

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIO DE POSGRADO

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA REPARACIÓN DE PAREDES DE MAMPOSTERÍA
CONFINADA REFORZADAS CON MALLA ELECTROSOLDADA DESPUÉS DE SER
SOMETIDAS A PRECARGA.

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de
Posgrado en Ingeniería Civil para optar al grado y título de Maestría Académica en
Ingeniería Civil.

MACIEL IRÍAS MURILLO

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2021

1 Dedicatoria

A las personas más importantes de mi vida, mi familia.

2 Agradecimientos

Primero quiero agradecer a Dios por permitirme alcanzar esta meta, por guiarme y protegerme durante todo el recorrido, porque con él, todo es siempre más fácil porque desde un inicio puse este proyecto de maestría en sus manos.

A mis papás, por ser un apoyo incondicional durante el transcurso de esta maestría y la vida en general, porque sin ellos no lo hubiera logrado.

A mi esposo, Armando Monge, por apoyarme y ayudarme durante todo este proceso, porque en los momentos difíciles supo cómo orientarme a buscar soluciones.

A mis compañeros del proyecto Luis Gerardo, Natalia y Andrés; gracias por todo el apoyo durante el desarrollo de esta investigación.

A mi director, Don Alejandro Navas, gracias por estar siempre disponible a contestar mis dudas y por guiarme en los momentos complicados.

A mis asesores Diego Hidalgo y Guillermo González, gracias por ser parte de este proyecto.

Al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), por su ayuda tanto con equipos como con el financiamiento de algunos de los materiales, gracias.

Al CONICIT por suministrar los fondos que hicieron posible el desarrollo de este proyecto, así también como Pedregal e Intaco.

A Francisco Villalobos y a los técnicos del LanammeUCR, a Avisaí, Diego, gracias por toda la ayuda que me brindaron durante el montaje y falla de los muros.

A Ernesto por ser el encargado de construir los muros de esta investigación.

Y en general, a todas las personas que de una u otra manera hicieron posible este documento.

Gracias.

Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Ingeniería Civil.

Ph.D. Sergio Lobo Aguilar
**Representante del Decano
Sistema de Estudios de Posgrado**

M.Sc. Alejandro Navas Carro
Director de Tesis

Ph.D. Guillermo González Beltrán
Asesor

Ph.D. Diego A. Hidalgo Leiva
Asesor

M.Sc. Danilo Hernández Guerrero
Representante del Director del Programa de Posgrado en Ingeniería Civil

Maciel Irías Murillo
Candidato

Tabla de contenido

1	Dedicatoria	ii
2	Agradecimientos	iii
3	Hoja de aprobación	iv
4	Resumen	viii
5	Abstract	x
6	Lista de cuadros	xi
7	Lista de figuras	xiii
8	Lista de abreviaturas	xviii
9	Derechos de propiedad intelectual	xxii
10	Introducción	1
10.1	Justificación	1
10.2	Problema e importancia	1
10.3	Técnicas de reparación en paredes de mampostería	2
10.3.1	Relleno de grietas principales mediante la inyección de resinas o morteros epóxicos.	4
10.3.2	Empleo de refuerzo (grapas) horizontal o diagonal a través del agrietamiento principal del muro.	5
10.3.3	Inserción y anclaje de refuerzo en perforaciones hechas a lo largo de las juntas horizontales.	6
10.3.4	Empleo de mallas de plástico o acero en las superficies de los muros.	6
10.3.5	Uso de bandas fabricadas con láminas de fibra de carbón en las superficies de los muros.	7
10.3.6	Malla electrosoldada en las superficies de los muros recubierta con mortero.	8
10.4	Justificación de escogencia del sistema de reparación.	9
11	Antecedentes teóricos y prácticos	10
11.1	“Determinación de la resistencia al cortante en paredes de mampostería”, Silvia Gamboa Herrera (1997).	10

11.2	“Determinación de la resistencia al cortante en paredes de mampostería de bloques de concreto, reforzado con malla electrosoldada”, Julio César Solano Barquero (2009). -----	11
11.3	“Rehabilitación con malla y mortero de muros de mampostería con aberturas”, Leonardo E. Flores, Moisés Ríos y Carlos Reyes Salinas (2004) (México). -----	13
11.4	“Rehabilitación sísmica de edificaciones de mampostería para vivienda”, Jorge Ruiz García (2007) (México). -----	13
11.5	“Reforzamiento estructural de muros de ladrillo pandereta con mallas para tarrajeo y electrosoldada”, F. Daniel Quiun, Joel Díaz y Óscar Cevallos (2015) (México). 14	
11.6	“Diseño de mallas electrosoldadas para el reforzamiento sísmico de viviendas de adobe típicas del Perú”, Ángel San Bartolomé y Daniel Quiun (2015) (Perú).-----	15
12	Objetivos-----	17
12.1	Objetivo general-----	17
12.2	Objetivos específicos -----	17
12.3	Alcance del proyecto -----	18
13	Marco teórico del análisis -----	20
13.1	Recomendaciones del procedimiento constructivo para el reforzamiento de paredes de mampostería confinada con malla electrosoldada. -----	20
13.2	Materiales de mampostería de concreto -----	21
13.3	Paredes de mampostería en Costa Rica-----	23
13.3.1	Refuerzo de muros-----	24
13.3.2	Determinación de la resistencia a la compresión de la mampostería-----	24
13.3.3	Requisitos para el refuerzo de la mampostería -----	25
13.3.4	Paredes con cargas paralelas al plano según el CSCR 2010-14 -----	25
13.4	Aporte de capacidad de la malla electrosoldada y mortero-----	28

13.4.1	Teoría de requisitos de capacidad en cortante para muros estructurales (8.7.2 CSCR 2010-14)	28
13.4.2	Aporte de capacidad de malla electrosoldada y mortero de acuerdo a la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural	29
13.5	Cálculo de resistencia de los muros	31
13.5.1	Paredes de mampostería confinada $h/l = 1$	31
13.5.2	Paredes de mampostería confinada $h/l = 0.5$	32
14	Esquema experimental	35
14.1	Instrumentación	35
14.2	Montaje en el piso fuerte y procedimiento de carga	38
15	Descripción de los muros	44
15.1	Muro $h/l = 0.5$	44
15.2	Muro $h/l = 1$	47
16	Caracterización de materiales	52
16.1	Cemento	52
16.2	Agregados	52
16.2.1	Agregado fino	52
16.2.2	Agregado grueso	54
16.3	Concreto	57
16.4	Acero de refuerzo	58
16.5	Bloques de mampostería	59
16.6	Concreto de relleno	61
16.7	Mortero de pega	62
16.8	Resistencia de la Mampostería	62
16.9	Mortero lanzado de reparación	63
17	Procedimientos constructivos	64
17.1	Procedimiento constructivo de las paredes	64

17.2	Procedimiento constructivo del sistema de reparación-----	70
18	Resultados-----	76
18.1	Primer grupo, paredes patrón-----	76
18.1.1	Muro $h/l = 0.5$ -----	76
18.1.2	Muro $h/l = 1$ -----	81
18.2	Segundo grupo, paredes precargadas 1-----	85
18.2.1	Muro $h/l = 0.5$ -----	85
18.2.2	Muro $h/l = 1$ -----	87
18.3	Segundo grupo, paredes reparadas 1-----	90
18.3.1	Muro $h/l = 0.5$ -----	90
18.3.2	Muro $h/l = 1$ -----	94
18.4	Tercer grupo, paredes precargadas 2-----	98
18.4.1	Muro $h/l = 0.5$ -----	98
18.4.2	Muro $h/l = 1$ -----	101
18.5	Tercer grupo, paredes reparadas 2-----	103
18.5.1	Muro $h/l = 0.5$ -----	103
18.5.2	Muro $h/l = 1$ -----	108
19	Análisis de resultados-----	114
20	Conclusiones-----	128
21	Recomendaciones-----	131
22	Referencias-----	132
23	Anexos-----	136
23.1	Anexo A-----	136
23.2	Anexo B-----	140
23.3	Anexo C-----	149

4 Resumen

El presente trabajo estudia el aporte de capacidad en cortante del sistema de reforzamiento de malla electrosoldada con mortero lanzado en muros de mampostería confinada una vez que han sido precargados ante cargas cíclicas en dos tipos relaciones de aspecto ($h/l = 0.5$ y $h/l = 1$). La importancia de dicha investigación radica a que este tipo de reforzamiento es actualmente muy utilizado en Costa Rica, pues se considera económico y fácil de trabajar, sin embargo, no existe teoría que respalde la utilización de dicho reforzamiento.

La obtención de los resultados se dio a partir de la construcción de seis muros a escala natural, tres con una relación de aspecto $h/l = 0.5$ (uno patrón y dos que fueron precargados y reparados) y tres con una relación de aspecto $h/l = 1$ (uno patrón y dos que fueron precargados y reparados).

Los resultados mostraron que una vez que los muros han sido precargados en un 94% de su capacidad máxima (paredes patrón), después de ser reparados con malla electrosoldada y mortero lanzado estos pueden volver a obtener su capacidad de carga original y sobrepasarla en 36% en el caso de los muros $h/l = 0.5$ y en 22% en el caso de los muros $h/l = 1$.

Además, se pudo observar que al duplicar el valor de la relación de aspecto (de $h/l = 0.5$ a $h/l = 1$), la capacidad del aporte del reforzamiento se reduce casi a la mitad.

5 Abstract

The present work studies the contribution of shear capacity of the electrowelded mesh reinforcement system with mortar thrown in confined masonry walls once they have been preloaded to cyclical loads in two types of aspect ratios ($h/l = 0.5$ and $h/l = 1$). The importance of this research lies in the fact that this type of reinforcement is currently widely used in Costa Rica, since it is considered cheap and easy to work, however, there is no theory that supports the use of said reinforcement.

The results were obtained from the construction of six full-scale walls, three with an aspect ratio $h/l = 0.5$ (one standard and two that were preloaded and repaired) and three with an aspect ratio $h/l = 1$ (one standard and two that were preloaded and repaired).

The results showed that once the walls have been preloaded by 94% of their maximum capacity (standard walls), after being repaired with electrowelded mesh and sprayed mortar, they can regain their original load capacity and exceed it by 36% in the case of walls $h/l = 0.5$ and in 22% in the case of walls $h/l = 1$.

In addition, it was observed that by doubling the value of the aspect ratio (from $h/l = 0.5$ to $h/l = 1$), the capacity of the reinforcement contribution is reduced almost by half.

6 Lista de cuadros

Cuadro 1 . Factores de reducción CSCR 2010-14.-----	25
Cuadro 2. Coeficientes de ecuación 12 que dependen de la razón h/l del muro a diseñar (CSCR 2010-14). -----	28
Cuadro 3. Aporte de malla electrosoldada. -----	31
Cuadro 4. Resumen de la resistencia nominal en cortante de cada muro de acuerdo a CSCR 2010-14 (ref). -----	34
Cuadro 5. Granulometría agregado fino. -----	53
Cuadro 6. Peso unitario, agregado fino. -----	54
Cuadro 7. Gravedad específica, agregado fino. -----	54
Cuadro 8. Granulometría agregado grueso. -----	55
Cuadro 9. Peso unitario, agregado grueso. -----	56
Cuadro 10. Gravedad específica, agregado grueso. -----	56
Cuadro 11. Resistencia a la compresión de cilindros de vigas y columnas a los 28 días, paredes patrón.-----	57
Cuadro 12. Resistencia a la compresión de cilindros de vigas y columnas a los 28 días, paredes precargadas y reparadas 1. -----	57
Cuadro 13. Resistencia a la compresión de cilindros de vigas y columnas a los 28 días, paredes precargadas y reparadas 2. -----	57
Cuadro 14. Resistencia a la compresión de cilindros de fundaciones a los 28 días, paredes patrón.-----	58
Cuadro 15. Resistencia a la compresión de cilindros de fundaciones a los 28 días, paredes precargadas y reparadas 1. -----	58
Cuadro 16. Resistencia a la compresión de cilindros de fundaciones a los 28 días, paredes precargadas y reparadas 2. -----	58
Cuadro 17. Propiedades mecánicas del acero empleado en la construcción de los muros. -----	59
Cuadro 18. Propiedades geométricas de los bloques de mampostería.-----	60
Cuadro 19. Resistencia de los bloques de mampostería. -----	60

Cuadro 20. Resistencia de prismas de concreto de relleno.-----	62
Cuadro 21. Resistencia de los prismas de mampostería medidos a los 28 días.-----	62
Cuadro 22. Resistencia de cubos de mortero.-----	63
Cuadro 23.Resultados generales del muro $h/l = 0.5$, pared patrón.-----	77
Cuadro 24. Resultados de galgas extensométricas, pared patrón $h/l = 0.5$ -----	80
Cuadro 25.Resultados generales del muro $h/l = 1$, pared patrón. -----	82
Cuadro 26. Resultados de galgas extensométricas, pared patrón $h/l = 1$. -----	84
Cuadro 27.Resultados generales del muro $h/l = 0.5$, pared precargada 1. -----	86
Cuadro 28. Resultados de galgas extensométricas, pared precargada 1 $h/l = 0.5$. -----	86
Cuadro 29.Resultados generales del muro $h/l = 1$, pared precargada 1.-----	88
Cuadro 30. Resultados de galgas extensométricas, pared precargada 1 $h/l = 1$.-----	88
Cuadro 31. Resultados generales del muro $h/l = 0.5$, pared reparada 1. -----	90
Cuadro 32. Resultados de galgas extensométricas, pared reparada 1 $h/l = 0.5$. -----	93
Cuadro 33. Resultados generales del muro $h/l = 1$, pared reparada 1. -----	95
Cuadro 34. Resultados de galgas extensométricas, pared reparada 1 $h/l = 1$.-----	97
Cuadro 35. Resultados generales del muro $h/l = 0.5$, pared precargada 2.-----	99
Cuadro 36. Resultados de galgas extensométricas, pared precargada 2 $h/l = 0.5$.-----	99
Cuadro 37. Resultados generales del muro $h/l = 1$, pared precargada 2. -----	101
Cuadro 38. Resultados de galgas extensométricas, pared precargada 2 $h/l = 1$. -----	102
Cuadro 39.Resultados generales del muro $h/l = 0.5$, pared reparada 2. -----	104
Cuadro 40.Resultados de galgas extensométricas, pared reparada 2 $h/l = 0.5$.-----	106
Cuadro 41. Resultados generales del muro $h/l = 1$, pared reparada 2. -----	108
Cuadro 42. Resultados de galgas extensométricas, pared reparada 2 $h/l = 0.5$. -----	110
Cuadro 43. Resumen de resultados. -----	112
Cuadro 44. Valores de carga nominal y experimentales. -----	114
Cuadro 45. Capacidad máxima obtenida en paredes patrón con respecto a la carga de diseño.-----	118
Cuadro 46. Cargas de precarga de los muros. -----	118
Cuadro 47. Cargas en paredes reparadas respecto a las paredes patrón. -----	118

Cuadro 48. Cargas obtenidas en paredes reparadas. -----	119
Cuadro 49. Valores de resistencia nominal y experimentales en ton/m. -----	119
Cuadro 50. Contribución del reforzamiento según norma mexicana, CSCR 2010-14 y de acuerdo a las pruebas. -----	120
Cuadro 51. Comparación de contribuciones de reforzamiento en pruebas con la teoría. -----	121
Cuadro 53. Cuadro comparativo de capacidades teóricas sin reforzamiento, con reforzamiento (De acuerdo a norma mexicana y CSCR 2010-14) y capacidades experimentales. -----	122
Cuadro 54. Diferencia entre la capacidad teórica de paredes reforzadas y la capacidad experimental de los muros reparados con el reforzamiento.-----	123
Cuadro 55. Aplicación de ecuación en distintos valores de h/l. -----	124
Cuadro 56. Comparación de rigidez en muros fallados.-----	126
Cuadro 57. Comparación de ductilidad en muros fallados. -----	127
Cuadro 58. Protocolo de carga, pared patrón 1, h/l = 0.5 -----	149
Cuadro 59. Protocolo de carga, pared patrón 1, h/l = 1-----	149
Cuadro 60. Protocolo de carga, pared precargada 1, h/l =0.5 -----	150
Cuadro 61. Protocolo de carga, pared precargada 1, h/l =1-----	150
Cuadro 62. Protocolo de carga, pared reparada 1, h/l =0.5 -----	151
Cuadro 63. Protocolo de carga, pared reparada 1, h/l =1 -----	151
Cuadro 64. Protocolo de carga, pared precargada 2, h/l =0.5 -----	152
Cuadro 65. Protocolo de carga, pared precargada 2, h/l =1-----	152
Cuadro 66. Protocolo de carga, pared reparada 2, h/l =0.5 -----	153
Cuadro 67. Protocolo de carga, pared reparada 2, h/l =1 -----	153

7 Lista de figuras

Figura 1 .Técnicas de rehabilitación en paredes de mampostería (Tomada de Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, “Rehabilitación sísmica de edificaciones de mampostería para vivienda”, Jorge Ruiz García, Queretaro 2007). -----	4
Figura 2. Relleno de grietas en paredes de mampostería (Tomada de Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, “Rehabilitación sísmica de edificaciones de mampostería para vivienda”, Jorge Ruiz García, Queretaro 2007). -----	5
Figura 3. Utilización de grapas en paredes de mampostería (Tomada de Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, “Rehabilitación sísmica de edificaciones de mampostería para vivienda”, Jorge Ruiz García, Queretaro 2007). -----	5
Figura 4. Inserción de barras de refuerzo en las juntas de mortero (Tomada de Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, “Rehabilitación sísmica de edificaciones de mampostería para vivienda”, Jorge Ruiz García, Queretaro 2007). -----	6
Figura 5. Uso de bandas de acero o plástico en paredes de mampostería (Tomada de Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, “Rehabilitación sísmica de edificaciones de mampostería para vivienda”, Jorge Ruiz García, Queretaro 2007). -----	7
Figura 6. Fibras de carbón en paredes de mampostería confinada. (Tomada de Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, “Rehabilitación sísmica de edificaciones de mampostería para vivienda”, Jorge Ruiz García, Queretaro 2007). -----	8
Figura 7. Reforzamiento con malla electrosoldada (Tomada de Capítulo V (T-ESPE-025410-5), “Técnicas de reforzamiento de mampostería”, A. San Batolomé y A. Castro). -----	8
Figura 8. Pared $h/l = 0.5$ (cotas en cm). -----	32
Figura 9. Pared $h/l = 0.5$ (cotas en cm). -----	33
Figura 10. Galga extensométrica y LVDT, tomado de Laboratorio de Estructural del LanammeUCR. -----	35
Figura 11. Ubicación esquemática de galgas extensométricas. -----	36
Figura 12. Ubicación esquemática de LVDT. -----	37
Figura 13. Colocación de galgas extensométricas. -----	38
Figura 14. Esquema del montaje en el LanammeUCR. -----	38

Figura 15. Montaje de pared $h/l = 1$ (cotas en cm).-----	39
Figura 16. Montaje de pared $h/l = 1$. -----	39
Figura 17. Montaje de pared $h/l = 0.5$ (cotas en cm). -----	40
Figura 18. Montaje de pared $h/l = 0.5$.-----	40
Figura 19. Efecto Bauschinger (Tomada de Propuesta del proyecto de graduación, <i>“Análisis de la eficiencia de los empalmes de barras horizontales en paredes de mampostería, en el sistema convencional y viga bloque, con empalmes por traslapo y con ganchos en barras verticales”</i> , Daniel Acuña García, Universidad de Costa Rica 2012). -----	42
Figura 20. Vista lateral de muro $h/l = 0.5$ con fundación tipo 1 (cotas en cm).-----	44
Figura 21. Vista lateral de muro $h/l = 0.5$ con fundación tipo 2 (cotas en cm).-----	44
Figura 22. Diseño de fundación tipo 1 muro $h/l = 0.5$ (cotas en cm)-----	45
Figura 23. Diseño de fundación tipo 2 muro $h/l = 0.5$ (cotas en cm)-----	46
Figura 24. Diseño de viga corona tipo 1 muro $h/l = 0.5$ (cotas en cm)-----	46
Figura 25. Diseño de viga corona tipo 2 para el muro con $h/l = 0.5$ (cotas en cm) -----	47
Figura 26. Diseño de columna para el muro con $h/l = 0.5$ (cotas en cm)-----	47
Figura 27. Vista lateral del muro con $h/l = 1$ y fundación tipo 1 (cotas en cm).-----	48
Figura 28. Vista lateral del muro con $h/l = 1$ y fundación tipo 2 (cotas en cm).-----	48
Figura 29. Detalle de sección transversal de la cimentación tipo 1.-----	49
Figura 30. Detalle de sección transversal de cimentación tipo 2.-----	50
Figura 31. Diseño de viga corona tipo 1 muro $h/l = 1$ (cotas en cm)-----	50
Figura 32. Diseño de viga corona tipo 2 muro $h/l = 1$ (cotas en cm)-----	51
Figura 33. Arena utilizada en el proyecto.-----	52
Figura 34. Curva granulométrica del agregado fino. -----	53
Figura 35. Agregado grueso.-----	55
Figura 36. Curva granulométrica agregado grueso. -----	56
Figura 37. Curva esfuerzo deformación de una varilla No 4. -----	59
Figura 38. Esquema general de la geometría de los bloques -----	60
Figura 39. Posición de bloques de mampostería para pruebas de concreto de relleno. --	61
Figura 40. Confección de armadura de fundación en patio del piso fuerte.-----	64

Figura 41. Colocación de ductos en fundaciones. -----	65
Figura 42. Encofrado y colocación de varillas verticales de paño de mampostería y columnas. -----	65
Figura 43. Colocación de galgas extensométricas en varillas. -----	66
Figura 44. Colado de fundaciones. -----	66
Figura 45. Levantamiento de paño de mampostería. -----	67
Figura 46. Colado de celdas de relleno. -----	67
Figura 47. Construcción de columnas y viga corona. -----	68
Figura 48. Encofrado de columnas y viga corona. -----	69
Figura 49. Colado de columnas y viga corona. -----	69
Figura 50. Colocación de malla electrosoldada en la pared. -----	70
Figura 51. Perforación de agujeros. -----	71
Figura 52. Inyección de gel epóxico. -----	71
Figura 53. Colocación de pines de varilla No 3. -----	72
Figura 54. Doblado de pines de varilla No 3. -----	72
Figura 55. Espesor del recubrimiento con mortero. -----	73
Figura 56. Lanzado de primera capa de mortero (25 mm). -----	74
Figura 57. Lanzado de segunda capa de mortero (25 mm). -----	74
Figura 58. Detalle de la reparación de las paredes de mampostería. -----	75
Figura 59. Curva histéresis del muro $h/l = 0.5$, pared patrón. -----	76
Figura 60. Curva envolvente y EEEP positiva del muro $h/l = 0.5$, pared patrón. -----	78
Figura 61. Curva envolvente y EEEP negativa del muro $h/l = 0.5$, pared patrón. -----	78
Figura 62. Muro fallado $h/l = 0.5$, pared patrón. -----	80
Figura 63. Curva histéresis del muro $h/l = 1$, pared patrón. -----	81
Figura 64. Curva envolvente y EEEP positiva del muro $h/l = 1$, pared patrón. -----	82
Figura 65. Curva envolvente y EEEP negativa del muro $h/l = 1$, pared patrón. -----	83
Figura 66. Muro fallado $h/l = 1$, pared patrón. -----	84
Figura 67. Curva histórica del muro $h/l = 0.5$, pared precargada 1. -----	85
Figura 68. Agrietamiento, pared precargada 1 $h/l = 0.5$. -----	86

Figura 69. Abertura de grietas en mm, pared precargada 1 $h/l = 0.5$.-----	87
Figura 70. Curva histórica del muro $h/l = 1$, pared precargada 1.-----	88
Figura 71. Agrietamiento, pared precargada 1 $h/l = 1$ -----	89
Figura 72. Abertura de grietas en mm, pared precargada 1 $h/l = 1$.-----	89
Figura 73. Curva histórica del muro $h/l = 0.5$, pared reparada 1. -----	90
Figura 74. Curva envolvente y EEEP positiva del muro $h/l = 0.5$, pared reparada 1. -----	91
Figura 75. Curva envolvente y EEEP negativa del muro $h/l = 0.5$, pared reparada 1. -----	91
Figura 76. Agrietamiento del muro $h/l = 0.5$, pared reparada 1.-----	93
Figura 77. Muro fallado $h/l = 0.5$, pared reparada 1.-----	94
Figura 78. Curva histórica del muro $h/l = 1$, pared reparada 1.-----	94
Figura 79. Curva envolvente y EEEP positiva del muro $h/l = 1$, pared reparada 1.-----	95
Figura 80. Curva envolvente y EEEP negativa del muro $h/l = 1$, pared reparada 1.-----	96
Figura 81. Agrietamiento del muro $h/l = 1$, pared reparada 1. -----	97
Figura 82. Muro fallado $h/l = 1$, pared reparada 1.-----	98
Figura 83. Curva histórica del muro $h/l = 0.5$, pared precargada 2. -----	99
Figura 84. Precarga del muro $h/l = 0.5$, pared precargada 2. -----	100
Figura 85. Agrietamiento del muro $h/l = 0.5$, pared precargada 2. -----	100
Figura 86. Curva histórica del muro $h/l = 1$, pared precargada 2.-----	101
Figura 87. Agrietamiento del muro $h/l = 1$, pared precargada 2. -----	102
Figura 88. Agrietamiento del muro $h/l = 1$, pared precargada 2. -----	103
Figura 89. Curva histórica del muro $h/l = 0.5$, pared reparada 2. -----	104
Figura 90. Curva envolvente y EEEP positiva del muro $h/l = 0.5$, pared reparada 2. -----	105
Figura 91. Curva envolvente y EEEP negativa del muro $h/l = 0.5$, pared reparada 2. -----	105
Figura 92. Agrietamiento del muro $h/l = 0.5$, pared reparada 2.-----	107
Figura 93. Agrietamiento del muro $h/l = 0.5$, pared reparada 2.-----	107
Figura 94. Curva histórica del muro $h/l = 1$, pared reparada 2.-----	108
Figura 95. Curva envolvente y EEEP positiva del muro $h/l = 1$, pared reparada 2.-----	109
Figura 96. Curva envolvente y EEEP negativa del muro $h/l = 1$, pared reparada 2. -----	109
Figura 97. Agrietamiento del muro $h/l = 1$, pared reparada 2. -----	111

Figura 98 Agrietamiento del muro $h/l = 0.5$, pared reparada 2.	111
Figura 99. Resumen de envolventes positivas.	113
Figura 100. Resumen de envolventes negativas.	113
Figura 101. Valores de resistencia nominal y experimental de los muros con $h/l = 0.5$.	115
Figura 102. Valores de resistencia nominal y experimentales con $h/l = 1$.	116
Figura 103. Valores de resistencia nominal y experimentales de los muros con $h/l = 0.5$ y $h/l = 1$.	117
Figura 104. Valores de resistencia nominal y experimentales de los muros $h/l = 0.5$ y $h/l = 1$.	117
Figura 105. Aporte del reforzamiento según norma mexicana, CSCR 2010-14 y de acuerdo a las pruebas.	120
Figura 106. Contribución del reforzamiento según norma mexicana, CSCR 2010-14 y de acuerdo a las pruebas.	121
Figura 107. Comparación de capacidades teóricas y experimentales con y sin reforzamiento.	122
Figura 108. Comparación de aportes de capacidad de acuerdo a la relación de aspecto.	125
Figura 109. Comparación de aportes de capacidad de acuerdo a la relación de aspecto.	125
Figura 110. Valores de rigidez obtenidos en pruebas realizadas.	126
Figura 111. Valores de ductilidad obtenidos en pruebas realizadas.	127
Figura 112. Diagrama de interacción para $h/l = 0.5$.	144
Figura 113. Diagrama de interacción para $h/l = 1$.	148

8 Lista de abreviaturas

α = Profundidad del bloque equivalente de esfuerzos de compresión, cm.

$A_{\text{compresión}}$ = Área del acero longitudinal en compresión, cm^2 .

A_{cv} = Área neta de la sección de concreto que resiste cortante, cm^2 .

A_g = Área bruta del muro, cm^2 .

A_{gc} = Área gruesa de la columna, cm^2 .

A_{gm} = Área gruesa de la mampostería, cm^2 .

A_s = Área del acero longitudinal en elementos sometidos a flexión, cm^2 .

$A_{\text{s columnas}}$ = Área del acero longitudinal en las columnas, cm^2 .

A_{sh} = Área del acero horizontal del paño, cm^2 .

a_{sh} = Área de las varillas de la malla electrosoldada, cm^2 .

A_T = Área bruta de la sección transversal del muro de mampostería, cm^2 .

b = Ancho del muro, cm.

b_w = Ancho efectivo de un elemento, cm.

b_{wc} = Ancho efectivo de la columna, cm.

b_{wm} = Ancho efectivo de la mampostería, cm.

c = Profundidad del eje neutro medida desde la fibra extrema en compresión, cm.

d = Distancia de la fibra extrema en compresión a una capa de acero, cm.

d_{rec} = Longitud del recubrimiento, cm.

E = Módulo de elasticidad del material, kg/cm^2 .

E_c = Módulo de elasticidad del concreto, kg/cm^2 .

E_m = Módulo de elasticidad de la mampostería, kg/cm^2 .

F_c = Fuerza de compresión en el muro, kg.

f'_c = Resistencia a la compresión a los 28 días del concreto, kg/cm^2 .

f'_m = Resistencia a la compresión de la mampostería a los 28 días, kg/cm^2 .

F_R = Factor de reducción de resistencia que puede considerarse como 0.8 de acuerdo con Norma Mexicana.

f_y = Esfuerzo de fluencia del acero, kg/cm^2 .

h = Altura del paño y viga corona del muro, cm.

h_m = Altura del paño de mampostería, cm.

l = Largo del paño y las columnas, cm.

l_m = Largo del paño de mampostería, cm.

M_n = Capacidad nominal a flexión de la sección, $\text{kg} \cdot \text{cm}$.

M_u = Momento último en la sección, $\text{kg} \cdot \text{cm}$.

P_c = Fuerza de compresión pura en el muro, kg.

P_n = Capacidad nominal de fuerza axial de la sección, kg.

P_u = Carga axial factorizada, kg.

s = Espaciamiento entre los aros de la columna, cm.

S_h = Espaciamiento entre el acero horizontal de la mampostería, cm.

t = Espesor del muro de mampostería, cm.

$V_{flexion}$ = Fuerza cortante asociada a la capacidad en flexión, kg.

V_b = Fuerza cortante basal actuante, kg.

V_c = Capacidad de cortante del concreto, kg.

V_m = Capacidad en cortante de la mampostería, kg.

V_n = Capacidad nominal en cortante de la sección, kg.

V_R = Resistencia de cortante de mampostería calculada de acuerdo con Norma Mexicana incluida en las Normas para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, kg.

$V_{R,R}$ = Resistencia a fuerza cortante de una estructura rehabilitada con malla electrosoldada, kg.

V_{rm} = Resistencia remanente del muro de mampostería ante cargas laterales, kg.

V_s = Capacidad en cortante del acero de refuerzo, kg.

V_{sm} = Contribución de la malla electrosoldada a la resistencia ante cargas laterales, kg.

V_u = Cortante último en la sección, kg.

V_p/V_n = Carga de pared patrón respecto a la carga de diseño.

V_{p1}/V_p = Carga de pared precargada 1 respecto a la carga de pared patrón.

V_{p2}/V_p = Carga de pared precargada 2 respecto a la carga de pared patrón.

V_{promp}/V_p = Carga promedio de precarga respecto a la carga de pared patrón.

V_{r1}/V_p = Carga de pared reparada 1 respecto a la carga de pared patrón.

V_{p2}/V_p = Carga de pared reparada 2 respecto a la carga de pared patrón.

V_{promr}/V_p = Carga promedio de pared reparada respecto a la carga de pared patrón.

Δ_{ced} = deformación de cedencia, mm.

Δ_{max} = deformación durante la carga máxima, mm.

Δ_u = deformación durante la carga última, mm.

δ = deformación del elemento, mm.

ϵ = deformación unitaria de la sección, mm/mm.

ϵ_c = deformación unitaria última del concreto, mm/mm.

ϵ_y = deformación unitaria de cedencia del acero de refuerzo, mm/mm.

μ = ductilidad.

ϕ = Factor de reducción.

α_c = Coeficiente que define la contribución relativa del concreto a la resistencia del muro.

ρ_n = Razón del área de refuerzo distribuido paralelo al plano de A_{cv} respecto al área de bruta de concreto perpendicular a dicho refuerzo.

ρ_h = Cuantía de refuerzo horizontal, proporcionada por malla electrosoldada.

η = Factor de eficiencia del refuerzo horizontal.

α = Coeficiente de flexocompresión.

β = Coeficiente de flexocompresión.

9 Derechos de propiedad intelectual

Fecha: julio 2021

Quien suscribe, Maciel Irías Murillo, cédula 1-1380-0505, estudiante de la Maestría Académica en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **A73303** manifiesto que es autora de Proyecto Final de Graduación **Estudio experimental de la reparación de paredes de mampostería confinada reforzadas con malla electrosoldada después de ser sometidas a precarga**, bajo la dirección del **Ing. Alejandro Navas Carro, M.Sc.**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); “no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni haber en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”. Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

SEP Sistema de
Estudios de Posgrado

Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Maciel Irías Murillo, con cédula de identidad 1-1380-0505, en mi condición de autor del TFG titulado Estudio experimental de la reparación de paredes de mampostería confinada reforzadas con malla electrosoldada después de ser sometidas a precarga.

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI NO *

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

10 Introducción

10.1 Justificación

Costa Rica es un país con una actividad sísmica importante y dentro de los sistemas constructivos más utilizados se encuentra la mampostería, pues es uno de los más comunes para la confección de obras de pequeña a mediana altura, ya que se considera fácil de construir y económico, tal como lo menciona Poveda, A en sus notas del curso de diseño de Estructuras de Mampostería, Universidad de Costa Rica (ref).

Sin embargo, a pesar de su frecuente utilización, las propiedades mecánicas de la mampostería todavía no han sido bien establecidas. El hecho de ser un sistema compuesto de diversos materiales y con distintas propiedades cada uno, hace que su comportamiento sea de difícil predicción.

Por otro lado, la reparación de estructuras dañadas o el reforzamiento, si se determina que son vulnerables, es uno de los campos de más impacto social en la ingeniería estructural, en especial cuando existen daños causados por desastres en el más importante patrimonio que tiene una familia, como lo es su propia vivienda, que en nuestro país generalmente está construido con mampostería.

10.2 Problema e importancia

De acuerdo al artículo “Rehabilitación con malla y mortero de muros de mampostería con aberturas” de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural (ref), el tipo de fenómeno que más afectan a estas estructuras es la acción sísmica, en especial cuando la configuración de la estructura carece de suficiente cantidad de elementos resistentes (muros de carga).

La acción de los asentamientos diferenciales es otro fenómeno que causa daño a las estructuras de mampostería, agrietando los muros y causando que pierdan su capacidad ante otros efectos como futuros sismos.

Si bien es posible reconstruir parcialmente un inmueble o cambiar el sistema resistente con la adición de nuevos elementos estructurales, es necesario tomar conciencia que la gran mayoría de la población no cuenta con recursos para afrontar reparaciones costosas, más aún en momentos inesperados de crisis tras la ocurrencia de un desastre. Por ello es necesario contar con técnicas de refuerzo eficientes, que requieran el mínimo costo y capacitación técnica para aplicarlas y que de manera adicional proporcionen no sólo la restitución de la capacidad original de la estructura, sino que de preferencia la superen aportando un mayor nivel de seguridad. Es por ello que las mejoras en el conocimiento de las paredes de mampostería confinada (mampostería integral con bordes de concreto, la cual es la técnica de construcción más utilizada en Costa Rica para la construcción de viviendas) permiten tomar medidas de mitigación de la vulnerabilidad sísmica, así como proponer métodos de reparación ante eventuales daños producto de un sismo.

10.3 Técnicas de reparación en paredes de mampostería

De acuerdo a lo indicado en el artículo “Rehabilitación sísmica de edificaciones de mampostería para vivienda” de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural (ref) desde hace algunos años se han realizado en varios países diferentes estudios y ensayos de laboratorio a escala que han permitido obtener varias técnicas de reforzamiento que permiten recuperar y mejorar las características estructurales de edificaciones dañadas; esto requiere de una inspección visual acompañada de un levantamiento de los daños, clasificarlos y evaluarlos con la intención de definir si la estructura se debe demoler o se puede rehabilitar, y por último, en caso de ser factible la rehabilitación desde un punto de vista socio económico, elegir la técnica de reparación que permita una rehabilitación adecuada.

Estas técnicas aportan mayor capacidad de carga a la estructura y disminuyen su vulnerabilidad sísmica y se caracterizan por aportar ductilidad a la mampostería, mantener la resistencia de la unidad estructural y reducir casi por completo las fallas frágiles y explosivas que se presentan comúnmente en estos elementos durante un sismo. Las principales técnicas se mencionan a continuación:

- Relleno de las grietas principales mediante la inyección de resinas o morteros epóxicos.
- Empleo de refuerzo (grapaso) horizontal o diagonal a través del agrietamiento principal del muro.
- Inserción y anclaje de refuerzo en perforaciones hechas a lo largo de las juntas de las hiladas.
- Empleo de mallas de plástico o acero en las superficies de los muros.
- Uso de bandas fabricadas con láminas de fibra de carbón en las superficies de los muros.
- Colocar malla electrosoldada en las superficies de los muros recubriéndola con mortero.

En la siguiente figura se muestra la curva de carga lateral – deformación lateral observada en muros de mampostería, así como la relación entre la anchura de las grietas y las técnicas de rehabilitación que pueden ser empleadas.

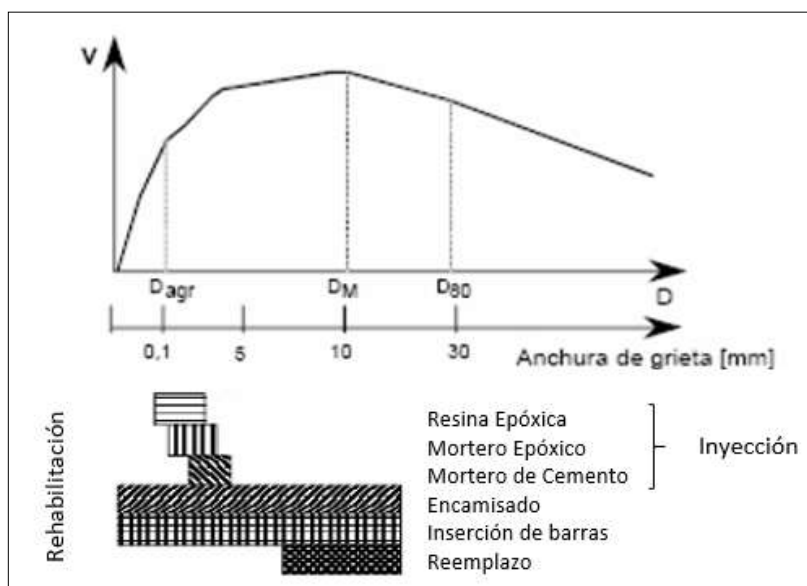


Figura 1 .Técnicas de rehabilitación en paredes de mampostería (Tomada de Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, “Rehabilitación sísmica de edificaciones de mampostería para vivienda”, Jorge Ruiz García, Queretaro 2007).

10.3.1 Relleno de grietas principales mediante la inyección de resinas o morteros epóxicos.

Es una de las más difundidas y conocidas, consiste en rellenar las grietas de los muros dañados con resina epóxica, mortero epóxico o con mortero de cemento (ver figura 2). Esta técnica tiene la ventaja de permitir la funcionalidad de la estructura durante su ejecución, así como mantener su apariencia estética. La elección del material de relleno depende del ancho de las grietas.

Resultados experimentales han evidenciado que si el relleno de grietas con mezclas epóxicas se realiza de manera correcta, se puede esperar incrementos en resistencia, rigidez y capacidad de deformación lateral del muro, del orden de 70% a 90%, 30% a 80% y del 75% al 90% respectivamente (Jorge Ruiz García, 2007).



Figura 2. Relleno de grietas en paredes de mampostería (Tomada de Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, “Rehabilitación sísmica de edificaciones de mampostería para vivienda”, Jorge Ruiz García, Queretaro 2007).

10.3.2 Empleo de refuerzo (grapas) horizontal o diagonal a través del agrietamiento principal del muro.

Cuando el daño se concentra en grietas inclinadas, bien definidas y el número de estas es reducido, en los muros de mampostería se reparan y refuerzan con barras de acero en forma de grapas (barras con ganchos a 90 ° en los extremos) (ver figura 3). Las grapas se colocan a lo largo de la grieta, formando una “costura” en la superficie del muro.

Los resultados obtenidos al utilizar esta técnica mostraron que la rigidez lateral inicial del muro reparado fue 60% de la rigidez inicial, mientras que la resistencia al primer agrietamiento en los muros reparados fue igual que 50% de la original (Jorge Ruiz García, 2007). Sin embargo, una vez presentado el primer agrietamiento diagonal, la contribución del refuerzo externo permitió incrementar la capacidad máxima ante cargas laterales en más de 20% con respecto a la observada en los muros originales.

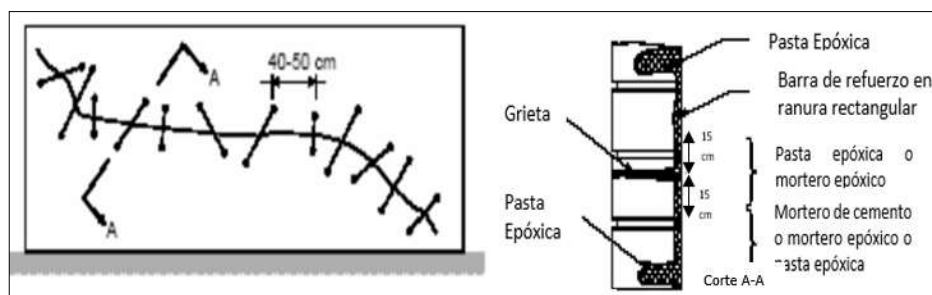


Figura 3. Utilización de grapas en paredes de mampostería (Tomada de Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, “Rehabilitación sísmica de edificaciones de mampostería para vivienda”, Jorge Ruiz García, Queretaro 2007).

10.3.3 Inserción y anclaje de refuerzo en perforaciones hechas a lo largo de las juntas horizontales.

El caso de la inserción de barras de refuerzo en las juntas de mortero es una técnica propuesta en Chile y consiste en colocar barras de acero en las juntas horizontales del mortero por ambas caras del muro, en el sentido longitudinal de los muros (ver figura 4). Posteriormente, las barras de acero se unen mediante alambres galvanizados colocados en perforaciones a cada 50 cm, aproximadamente. Finalmente, una vez colocadas las barras de acero se inyecta un material de relleno. Para fomentar un trabajo conjunto, las barras de acero deben estar ancladas a las columnas mediante ganchos de 90°.

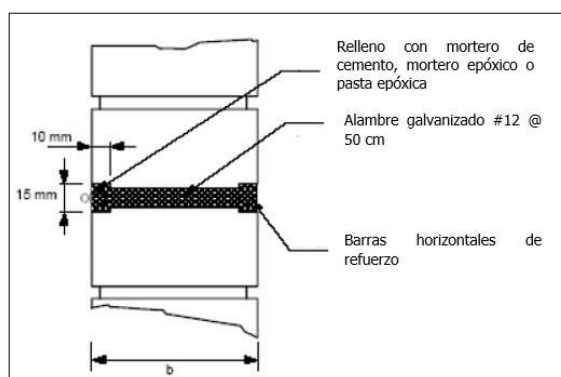


Figura 4. Inserción de barras de refuerzo en las juntas de mortero (Tomada de Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, “Rehabilitación sísmica de edificaciones de mampostería para vivienda”, Jorge Ruiz García, Queretaro 2007).

10.3.4 Empleo de mallas de plástico o acero en las superficies de los muros.

Las bandas de acero se colocan en la diagonal del muro por medio de angulares metálicos con eslabones como técnica de reparación para muros de mampostería confinada con un grado de daño considerado como grave, mientras que las bandas de plástico se colocan horizontalmente y se adhieren con resina epóxica y fibra de vidrio a la superficie del muro (ver figura 5), previo tensado de las bandas, como técnica de refuerzo en muros de mampostería sin daño previo.

Con base en los resultados experimentales obtenidos de dos muros de 2.60 m de largo por 2.30 m de altura con y sin confinamiento de vigas y columnas, (Jorge Ruiz García 2007)

indica que esta técnica permite la recuperación e incremento en la capacidad ante cargas laterales de muros de mampostería confinada con daño previo, del orden de 1.21 a 1.59 veces con respecto a los muros originales, así como un incremento en la capacidad de deformación lateral, del orden de 2.5 a 7.5 veces con respecto al muro original. Este comportamiento se atribuye al efecto de confinamiento que proporcionan las bandas metálicas ante cargas laterales alternadas.



Figura 5. Uso de bandas de acero o plástico en paredes de mampostería (Tomada de Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, *“Rehabilitación sísmica de edificaciones de mampostería para vivienda”*, Jorge Ruiz García, Queretaro 2007).

10.3.5 Uso de bandas fabricadas con láminas de fibra de carbón en las superficies de los muros.

Las bandas fabricadas con fibras de carbón, como técnica de rehabilitación estructural para muros de mampostería confinada, permiten un incremento en la capacidad ante cargas laterales, así como de deformación lateral, lo cual se atribuye a los esfuerzos de tensión que proporcionan las bandas cuando el muro es sometido ante cargas laterales alternadas en su plano. Por ello, se recomienda colocar bandas unidireccionales, con las fibras orientadas de modo que crucen perpendicularmente a las grietas inclinadas (ver figura 6).

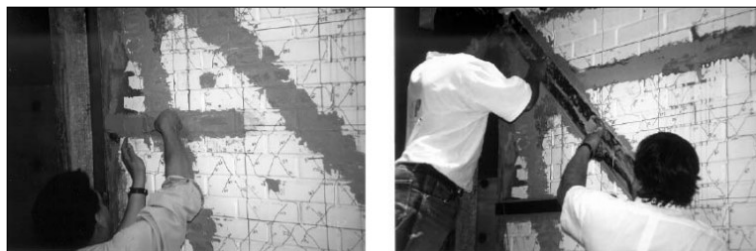


Figura 6. Fibras de carbón en paredes de mampostería confinada. (Tomada de Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, “Rehabilitación sísmica de edificaciones de mampostería para vivienda”, Jorge Ruiz García, Queretaro 2007).

10.3.6 Malla electrosoldada en las superficies de los muros recubierta con mortero.

Consiste en colocar malla electrosoldada en uno o ambos lados de la pared de mampostería para posteriormente ser recubierta con mortero (ver figura 7), lo cual permite obtener una mayor resistencia de los elementos y disminuir la falla frágil por cortante.

Investigaciones realizadas por Hernández (1981) concluyen que en promedio los muros reparados con esta técnica aumentan en un 64% su capacidad de deformación y que adicionalmente, muros construidos con tabique artesanal fueron reforzados con malla de alambre electrosoldada y ensayados ante cargas laterales cíclicas reversibles y en promedio, la resistencia de los muros reparados fue superior en 2.26 veces respecto a los muros originales.



Figura 7. Reforzamiento con malla electrosoldada (Tomada de Capítulo V (T-ESPE-025410-5), “Técnicas de reforzamiento de mampostería”, A. San Batolomé y A. Castro).

10.4 Justificación de escogencia del sistema de reparación.

Si bien existen varias técnicas de reparación de mampostería, como las mencionadas anteriormente, la técnica de rehabilitación con malla electrosoldada y mortero ha sido ampliamente usada en nuestro medio, en gran medida sin un sustento teórico- técnico y es por ello que la realización de este trabajo de graduación se torna importante. Esta metodología es relativamente fácil de aplicar, no requiere supervisión especializada, y es considerablemente económica, razones por las que se eligió esta técnica de reparación. Esta investigación demuestra la eficiencia de este sistema de reparación de estructuras de mampostería confinada para dos relaciones de aspecto; $h/l = 1$ y $h/l = 0.5$, donde h es la altura del muro y l su longitud.

Las paredes de mampostería sometidas a cargas en el plano están sujetas a dos modos de falla flexión o cortante. La falla por flexión tiene lugar, por lo general en las paredes de mampostería donde el factor h/l es relativamente alto ($h/l > 1$) y por otro lado, la falla por cortante ocurre en paredes donde la relación h/l es pequeña ($h/l \leq 1$).

Si bien existente estos dos modos de falla para paredes de mampostería, esta investigación se enfoca en la falla por cortante con relaciones de aspecto $h/l = 1$ (que se considera como el límite entre la falla por flexión y cortante) y $h/l = 0.5$, para así estudiar las variaciones de las propiedades dinámicas de las estructuras construidas con mampostería confinada al modificar la relación de aspecto y a su vez analizar la eficiencia de las reparaciones de paredes de mampostería confinada con malla electrosoldada y mortero al fallar por cortante.

11 Antecedentes teóricos y prácticos

El uso de la mampostería en países como Estados Unidos, Inglaterra, Nueva Zelandia y Latinoamérica ha originado un gran interés en su comportamiento ante todo tipo de carga. Investigadores de varias universidades como el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de México y la Universidad de California en Berkeley, se han dedicado a realizar pruebas bajo cargas dinámicas y estáticas a especímenes de mampostería tanto con modelos a escala reducida como modelos a escala natural (prototipos). Algunos proyectos referentes al tema de reforzamiento de estructuras con el sistema de malla electrosoldada y mortero, útiles para el desarrollo de este proyecto, se mencionan a continuación.

Investigaciones Nacionales:

11.1 “Determinación de la resistencia al cortante en paredes de mampostería”, Silvia Gamboa Herrera (1997).

Este trabajo estudio el comportamiento de paredes de mampostería sujetas a cargas en su propio plano, las cuales fueron construidas a escala natural de manera que sirvieran para evaluar la aplicabilidad de las fórmulas de resistencia al cortante establecidas en los diferentes códigos, especialmente en el Código Sísmico de Costa Rica de 1986.

Uno de los objetivos específicos de esta investigación fue determinar la efectividad de reparar con malla electrosoldada una pared previamente agrietada al llevarla a la falla.

Se realizaron pruebas a nueve paredes de 2.6 m de longitud y 2 m de altura compuesta por bloques de 12 x 20 x 40 cm y de las cuales dos de ellas fueron reparadas. Se les construyó una viga de concreto de 20 cm de altura sobre cada pared para que sirviera de anclaje del refuerzo vertical y se construyó una placa de concreto en la base. Por otro lado, no se construyeron columnas de concreto pues la investigación se limitaba a obtener la resistencia propia de la mampostería. Las paredes reparadas fueron la No 5 y la No 7, el sistema de reparación consistió en colocar malla electrosoldada en la pared y fijarla a esta mediante alambre o cabos de varilla #2, los cuales se anclaron al refuerzo vertical; luego se colocó un repello de 2.5 cm de espesor. En la pared No 5 se colocó la malla por ambos lados

de la pared, mientras que en la pared No 7 se colocó solamente de un lado para así determinar la diferencia en la respuesta. El esfuerzo de fluencia del acero de la malla electrosoldada era de $5,300 \text{ kg/cm}^2$ y el diámetro de la varilla era inferior al diámetro de la varilla #2.

En el caso de la pared No 5, ésta no sufrió agrietamiento durante todo el proceso de aplicación de la carga. Cuando alcanzó los 9000 kg de carga lateral, se presentó una grieta en la base del muro entre el bloque y la placa de cimentación. La pared se comportó como un bloque rígido durante todo el proceso, alcanzando una carga máxima de 23,000 kg y un desplazamiento lateral de 10.5 mm.

Por otro lado, en la pared No 7 se formaron grietas pequeñas de espesor, casi inapreciables, las cuales aparecieron en la pared después de los 7,000 kg de carga y las grietas que ya existían antes de reparar la pared se incrementaron en aproximadamente 2 mm. La carga máxima aplicada fue de 15,000 kg con un desplazamiento lateral de 14.8 mm. La prueba se detuvo al aparecer una grieta en la base de la pared.

En el caso de la pared No 5, el aumento fue tanto en la resistencia como en la rigidez, a tal punto que no se llegó a agrietar, si no que actuó como un bloque rígido, levantándose en la base a los 22,000 kg de carga, mientras que inicialmente había resistido una carga máxima de 10,000 kg con presencia de grietas importantes.

En el caso de la pared No 7, también existió un incremento en la resistencia al reparar la pared. Sin embargo, el aumento en la resistencia fue menor, ya que la malla fue colocada por un solo lado. La resistencia se incrementó en un promedio de 2,000 kg para deformaciones superiores a 4 mm. La carga máxima de la pared No 7 sin reparar fue de 13,000 kg y la carga máxima de la pared reparada fue de 15,000 kg.

11.2 “Determinación de la resistencia al cortante en paredes de mampostería de bloques de concreto, reforzado con malla electrosoldada”, Julio César Solano Barquero (2009).

Esta investigación se realizó debido a la necesidad de conocer el comportamiento de paredes de mampostería reforzadas externamente con malla electrosoldada. Se construyó un total de cuatro paredes de dos modelos diferentes. El modelo tipo 1 se reforzó con una barra #3 @ 80 cm en posición vertical y se usó una barra de 6.4 mm de diámetro lisa @ 40 cm como refuerzo horizontal. En el caso del modelo tipo 2, se reforzó con una barra #3 en ambas direcciones. Las paredes eran de 1.8 m de longitud por 1.8 m de altura compuestas por bloques de 12 x 20 x 40 cm.

Las celdas de los bloques se rellenaron únicamente donde se ubican las varillas verticales. Se construyó una viga corona de concreto sobre cada pared para anclar el refuerzo vertical y lograr la transmisión de la carga. Las paredes no presentaban elementos de confinamiento en los extremos.

En dos de las paredes, una modelo tipo 1 y una modelo tipo 2, se empleó un refuerzo externo con membrana de mortero y malla electrosoldada en una de sus caras y se les aplicó carga lateral.

Las otras dos paredes, una modelo tipo 1 y una modelo tipo 2, se ensayaron sin aplicarles refuerzo externo. Posterior al ensayo realizado en cada una de las paredes, se repararon mediante una membrana de malla electrosoldada y mortero. En la pared modelo tipo 1, se reparó únicamente una de sus caras, mientras que en la pared modelo tipo 2, se repararon ambas caras para evaluar el efecto del número de superficies reforzadas sobre la resistencia de las paredes.

Se aplicó carga lateral monotónica creciente a la pared tipo 1 reparada y cíclicas a las restantes paredes a nivel de la viga corona, mediante un pistón hidráulico, aplicada en ciclos previamente programados, de acuerdo con la deformación última que se deseaba obtener.

La resistencia obtenida en las paredes reforzadas con malla electrosoldada se comparó con los valores de resistencia al cortante obtenidos en las paredes ensayadas sin refuerzo externo. También se comparó los valores de resistencia que se obtuvo para cada pared con

los valores teóricos obtenidos con los códigos y criterios de diseño, sin embargo, no se obtuvo los resultados esperados.

Investigaciones internacionales:

11.3 “Rehabilitación con malla y mortero de muros de mampostería con aberturas”, Leonardo E. Flores, Moisés Ríos y Carlos Reyes Salinas (2004) (México).

En el proyecto se presentan los resultados del ensayo ante fuerzas horizontales cíclicas, de dos muros de mampostería de piezas macizas de arcilla recocida y confinados en sus extremos por vigas y columnas de 3.15 m de longitud y 2.5 m de altura respectivamente con una abertura en el centro en forma de ventana. Los muros fueron rehabilitados con malla electrosoldada y recubrimiento de mortero. Los dos especímenes fueron previamente ensayados y llevados a un nivel de daño severo, con grietas de más de 10 mm. La técnica de rehabilitación incluyó la reparación de los extremos de las columnas, el relleno con mortero en grietas de más de 3 mm y la colocación de la malla, rodeando los bordes del muro en los extremos y en la abertura. La malla usada fue de 6×6-10/10 (alambres de calibre 10, es decir 3.43 mm de diámetro y separados a cada 15 cm). Esta se conectó con clavos de 50 mm a cada 450 mm y se cubrió con mortero de 25 mm de espesor. Este refuerzo se colocó en ambas caras del muro. Como resultado, los muros rehabilitados superaron ampliamente la respuesta de los especímenes originales, tanto en rigidez inicial, carga de agrietamiento, cortante máximo y capacidad de deformación. La falla ocurrió al fracturarse los alambres de la malla. La resistencia de los modelos reparados fue de tres veces la de los especímenes originales.

11.4 “Rehabilitación sísmica de edificaciones de mampostería para vivienda”, Jorge Ruiz García (2007) (México).

El objetivo general de este trabajo consistió en presentar una revisión de las técnicas de rehabilitación aplicables a edificaciones de mampostería para vivienda que han sufrido daño estructural, principalmente cuando han sido sometidas a la acción sísmica. En particular, se describen los criterios de diseño y construcción cuando se decide emplear

malla electrosoldada como esquema de rehabilitación sísmica para muros de mampostería, o bien, para edificaciones de mampostería que requieran incrementar su capacidad ante cargas laterales debido a requisitos normativos más severos.

Se concluyó que el uso de la malla electrosoldada como técnica de rehabilitación estructural para estructuras de mampostería resulta una opción muy atractiva. La malla electrosoldada recubierta con mortero es relativamente fácil de aplicar, no requiere supervisión especializada y se considera económica con respecto a otras técnicas.

Además, se indica que el uso de la malla electrosoldada adosada a la superficie de los muros de mampostería que han sufrido daño, contribuye a un aumento en la resistencia ante cargas laterales y en la capacidad de deformación lateral si se compara con el comportamiento de muros sin daño previo. Dicha contribución depende de la cuantía del refuerzo horizontal, así como del tipo y densidad de anclaje. Esta técnica de rehabilitación favorece a que la distribución del agrietamiento sea más uniforme.

11.5 “Reforzamiento estructural de muros de ladrillo pandereta con mallas para tarrajeo y electrosoldada”, F. Daniel Quiun, Joel Díaz y Óscar Cevallos (2015) (México).

Para este proyecto, se construyó nueve muretes a escala con “ladrillos pandereta” (ladrillos fabricados de arcilla moldeada, extruida y quemada o cocida en un horno tipo túnel de proceso continuo), tres del tipo tradicional (tipo 1), otros tres reforzados con mallas para “tarrajeo” (malla metálica de una sola pieza sin costuras ni soldaduras que presentan una serie de aberturas de tamaño uniforme en forma de rombos) (tipo 2) y los últimos tres muretes reforzados con mallas electrosoldadas (tipo 3). Los muretes fueron sometidos a ensayos de compresión diagonal para hallar la resistencia al corte y comparar su comportamiento y costos.

Se constató que los muretes tipo 1 sin refuerzo tuvieron una falla frágil (abrupta), asimismo, se verificó que el refuerzo con malla para “tarrajeo” no aumentó significativamente la resistencia con respecto a los muretes sin refuerzo, pero mejoró el comportamiento del muro, ya que, al producirse la falla, permaneció confinado por la malla

para “tarrajeo”. La malla falló en la dirección perpendicular a la diagonal cargada. También se concluyó que con el refuerzo empleado de mallas electrosoldadas (tipo 3) se obtiene una resistencia 16% mayor que los muretes sin refuerzo. Por último, se comprobó que las fisuras diagonales que se formaron en los muretes reforzados fueron controladas por las mallas de refuerzo, evitándose así la falla en la unión mortero-ladrillo.

Para los muros de albañilería construidos con ladrillo pandereta y reforzados con mallas electrosoldadas, el costo se incrementó en 14% respecto a un muro sin reforzamiento. Sin embargo, los beneficios estructurales son mayores, y se evidencia una mejora en la resistencia y en la ductilidad.

11.6 “Diseño de mallas electrosoldadas para el reforzamiento sísmico de viviendas de adobe típicas del Perú”, Ángel San Bartolomé y Daniel Quiun (2015) (Perú).

Este trabajo muestra que las fuerzas sísmicas paralelas al plano de los muros, se pueden resistir con las mallas dispuestas en las esquinas y las mallas longitudinales. Se verificó el cálculo manual de las fuerzas con un modelo computacional de elementos finitos, logrando coincidencias cercanas. Se trata de plantear una teoría simple que permita el diseño estructural del refuerzo sísmico de viviendas de adobe típicas del Perú y los países andinos. El refuerzo consiste en adicionar mallas de alambre electrosoldadas sobre los muros de adobe de las viviendas, de modo que simulen vigas y columnas de confinamiento. El proyecto de investigación se desarrolló entre 1994 y 1999 en el marco del Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales de las Naciones Unidas del Perú. Su objetivo fue buscar mecanismos para mejorar el comportamiento sísmico de viviendas de adobe existentes en los países andinos. Se optó por aplicar como refuerzo sísmico, franjas de mallas de alambre electrosoldado simulando confinamientos sobre una serie de viviendas existentes de adobe en proyectos pilotos en Perú y otros países andinos, para su acabado y protección del medio ambiente, se recubren con mortero de cemento. Se obtuvo además un procedimiento de cálculo sencillo de las fuerzas que llegan a las mallas para así lograr su diseño y se logró demostrar que los resultados de la técnica de elementos finitos

coincidieron con la técnica manual de cálculo en la tracción entre muros perpendiculares y en el momento flector superior central. En el terremoto de 2001 del sur de Perú (M 8.4), seis viviendas reforzadas soportaron el sismo sin daños, y en el terremoto de 2007 en la costa central de Perú (M 8.0), otras cinco viviendas reforzadas también soportaron el sismo.

12 Objetivos

12.1 Objetivo general

Verificar experimentalmente la eficiencia del refuerzo con malla electrosoldada como técnica de reparación en paredes de mampostería confinada para relaciones de aspecto de altura entre longitud (h/l) de 1 y 0.5.

12.2 Objetivos específicos

1. Diseñar y construir tres paredes de mampostería confinada con relación de aspecto $h/l = 1$, una patrón para ensayar hasta la falla y dos para reparar con malla electrosoldada, todas con un mismo tipo de reforzamiento (# 3 @ 60 vertical y # 3 @ 60 horizontal).
2. Diseñar y construir tres paredes de mampostería confinada con relación de aspecto $h/l = 0.5$, una patrón para ensayar hasta la falla y dos para reparar con malla electrosoldada, todas con un mismo tipo de reforzamiento (# 3 @ 60 vertical y # 3 @ 60 horizontal).
3. Someter a un proceso de falla a la pared de mampostería confinada patrón de cada tipo de relación de aspecto ($h/l = 1$ y $h/l = 0.5$).
4. Determinar las curvas carga-desplazamiento para cada una de las paredes de mampostería confinada patrón de cada tipo de relación de aspecto ($h/l = 1$ y $h/l = 0.5$) cuando las paredes son sometidas a cargas cíclicas en su plano hasta la falla.
5. Someter a un proceso de precarga a las paredes de mampostería confinada por reparar de cada tipo de relación de aspecto ($h/l = 1$ y $h/l = 0.5$).
6. Determinar las curvas carga-desplazamiento para las paredes por reparar de cada tipo de relación de aspecto ($h/l = 1$ y $h/l = 0.5$) cuando las paredes son sometidas a cargas cíclicas en su plano hasta un cierto nivel de daño inicial.

7. Reparar las dos paredes de mampostería confinada de cada tipo de relación de aspecto ($h/l = 1$ y $h/l = 0.5$) con la técnica de refuerzo de malla electrosoldada y recubrimiento con mortero.
8. Ensayar las paredes de mampostería confinada reparadas hasta la falla.
9. Determinar las curvas carga-desplazamiento para las dos paredes reparadas de cada tipo de relación de aspecto ($h/l = 1$ y $h/l = 0.5$) cuando son sometidas a cargas cíclicas en su plano hasta la falla.
10. Realizar un análisis comparativo de la rigidez, y resistencia de las paredes y de las curvas esfuerzo-deformación de las barras de refuerzo medidas.
11. Determinar la capacidad de la malla electrosoldada y el mortero de funcionar adecuadamente como un sistema de reparación en paredes de mampostería confinada.

12.3 Alcance del proyecto

El alcance del proyecto consiste en la realización de pruebas de carga lateral en paredes de mampostería confinada con dos tipos de relaciones de aspecto distintas ($h/l = 1$ y $h/l = 0.5$). Para esto, se diseñan y construyen seis paredes de mampostería confinada sin aberturas. La diferencia es en el tipo de relación de aspecto, como se indica a continuación:

Tres paredes de mampostería confinada con relación de aspecto $h/l = 1$, de las cuales:

- La primera se construye con #3 @ 60 vertical y #3 @ 60 horizontal y se ensaya hasta la falla (pared patrón 1).
- La segunda y la tercera se construyen con #3 @ 60 vertical y #3 @ 60 horizontal y se ensayan hasta cierto nivel de daño, para posteriormente ser reparadas y ensayadas hasta la falla (paredes precargadas 1 y 2 y paredes reparadas 1 y 2).

Tres paredes de mampostería confinada con relación de aspecto $h/l = 0.5$, de las cuales:

- La primera se construye con #3 @ 60 vertical y #3 @ 60 horizontal y se ensaya hasta la falla (pared patrón 2).
- La segunda y la tercera se construyen con #3 @ 60 vertical y #3 @ 60 horizontal y se ensayan hasta cierto nivel de daño para posteriormente ser reparadas y ensayadas hasta la falla (paredes precargadas 3 y 4 y paredes reparadas 3 y 4).

Las paredes fueron construidas a escala natural, utilizando bloques de concreto de 15 cm de espesor, con dimensiones aproximadas de 280 cm de largo por 280 cm de altura para la relación de aspecto $h/l = 1$, y 560 cm de largo por 280 cm de altura para la relación de aspecto $h/l = 0.5$.

Dichas paredes fueron construidas con el siguiente detallado para evitar modos de falla no deseados.

- Las barras horizontales incluyen un gancho vertical de 90° embebido en la columna en los extremos de las paredes.
- Para la fundación de cada pared se consideró la configuración de los pernos de anclaje del piso fuerte donde fueron instaladas las paredes para los ensayos.
- El ensayo de los muros se realizó mediante la aplicación de un proceso cíclico de carga y descarga controlada por desplazamientos hasta alcanzar su falla y ciertos niveles de daño según ASTM 2126 (ref).

13 Marco teórico del análisis

13.1 Recomendaciones del procedimiento constructivo para el reforzamiento de paredes de mampostería confinada con malla electrosoldada.

De acuerdo con lo investigado a fin de lograr un comportamiento adecuado de esta técnica de rehabilitación, es necesario realizar algunas preparaciones en la superficie de los muros dañados antes de la colocación de la malla y su recubrimiento de mortero. En principio, se sugiere retirar los fragmentos y piezas sueltas de las grietas, principalmente en las zonas más dañadas, así como remover el polvo y las partículas en el interior de las grietas mediante chorro de agua. Para fomentar la adherencia entre la mampostería y el recubrimiento de mortero, la superficie de los muros debe estar libre de cualquier acabado. Asimismo, la superficie de la mampostería debe estar limpia y con rugosidades del orden de 0.5 mm de profundidad. Se recomienda rellenar las grietas inclinadas en la superficie de la mampostería con mortero de cemento y en zonas muy dañadas, es recomendable sustituir las piezas agrietadas por piezas nuevas. Cuando la anchura de las grietas es inferior a 0.5 mm, es conveniente utilizar una lechada de cemento (mezcla fluida de cemento y agua) y no se considera necesario el uso de resinas para el relleno de las grietas. En caso de daños en las columnas, se recomienda reparar localmente la zona afectada mediante la sustitución del concreto fracturado con concreto nuevo y enderezar las varillas.

Con la intención de distribuir el agrietamiento en forma uniforme y obtener un comportamiento estable y con amplia disipación de energía, se sugiere utilizar una densidad mínima de 9 anclajes/m². Adicionalmente al número de anclajes en la superficie de los muros, se sugiere que los bordes de las mallas electrosoldadas se sujeten a las columnas y a las vigas mediante anclajes adicionales. Asimismo, se debe buscar que la malla rodee las columnas, así como los bordes en puertas y ventanas. En ocasiones, cuando se coloque la malla electrosoldada por ambas caras, es necesaria la colocación de anclajes adicionales, esto puede ocurrir en la intersección de muros ortogonales. Finalmente, la

colocación del mortero de recubrimiento puede ser en forma manual, o bien con dispositivos neumáticos (lanzado).

En el caso de esta investigación, los daños ocasionados a los muros fueron controlados a partir de las fallas realizadas a las paredes patrón de cada una de las relaciones de aspecto, de manera que no se ocasionaron desprendimientos importantes en las paredes y así poder reparar los muros con malla electrosoldada en una de sus caras. Estos muros no tenían ningún tipo de acabado que se debía retirar.

13.2 Materiales de mampostería de concreto

A continuación, se presentan los materiales presentes en la mampostería de concreto, basados en el mercado costarricense y tomando en cuenta las normativas nacionales. Los materiales utilizados en el proyecto son ampliamente disponibles en nuestro medio, de manera que se representa de manera fehaciente las condiciones de la mampostería en Costa Rica.

El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de Cemento Portland y agua, une a los agregados (arena y grava o piedra triturada), para formar una masa semejante a una roca, pues la pasta endurece debido a la reacción química entre el cemento y el agua.

a) Cemento

El cemento se obtiene de la molienda de clínker tipo Portland y minerales naturales como caliza y puzolanas.

b) Bloques de concreto

De acuerdo al CSCR 2010-14 (ref) los bloques para mampostería se clasifican en tres tipos de acuerdo con la resistencia nominal especificada. De esta forma, las unidades se agrupan como clase A, B y C. La primera división tiene requisitos más severos que las otras y la clase C es la de menor resistencia.

Los bloques que se utilizaron en este proyecto son clase A, los cuales consisten en bloques de concreto con resistencia promedio a la compresión, medida sobre el área neta a los 28 días de edad, no menor de 133 kg/cm^2 y con un mínimo para cada muestra individual de 120 kg/cm^2 .

Esta es obligatoria para todas las construcciones mayores de 1000 m^2 y de 3 pisos de altura. Las pruebas de compresión de los bloques deben realizarse según ASTM C 140 (ref).

En nuestro país, los bloques para paredes de mampostería más utilizados existen en tres dimensiones. La variación es únicamente en el ancho del bloque, de 12, 15 y 20 cm, mientras que su altura y largo se mantienen en 19 y 39 cm respectivamente en todos los casos. Adicionalmente, existe una gran gama de bloques en sistemas modulares con medidas variables. En este proyecto se utilizan bloques de 15 cm de espesor porque se considera que son los que más se utilizan actualmente en las construcciones de Costa Rica.

c) Mortero de pega

De acuerdo con el CSCR 2010-14 (ref), el mortero es en una mezcla de cemento y cal o cemento de mampostería, agregados y agua. Se requiere que la arena cumpla con la normas ASTM C144 y C33 (ref). En el caso de estructuras a base de mampostería clase A, el mortero debe ser de tipo A y en el caso de mampostería clase B y C también se puede utilizar este tipo de mortero.

El mortero que se utilizó en este proyecto fue preempacado, que según el CSCR 2010-14 (ref) clasifica como mortero clase C siendo el mortero de pega que más se adecua a la actual práctica costarricense. Su composición es a base de arena con una granulometría adecuada, cemento de máxima calidad y aditivos como retenedores de humedad y promotores de adherencia.

d) Concreto de relleno

El concreto de relleno es una mezcla de cemento, agregados y agua. De acuerdo con el CSCR 2010-14 (ref), el tamaño máximo de agregado a utilizar es de 1.2 cm. Los materiales,

tales como arena y piedra, deben cumplir con las normas ASTM C 33 (ref) y C 476 (ref). Al igual que con el mortero, el concreto de relleno clase A debe utilizarse en mampostería clase A y puede utilizarse en las clases B y C. Debe ser una mezcla fluida de modo que el revenimiento especificado se encuentre entre 20 y 25 centímetros. La resistencia mínima es de 175 kg/cm².

En esta investigación se utilizó el concreto de relleno de celdas de bloques autocompactable, con el fin de facilitar la construcción de las paredes en el laboratorio.

13.3 Paredes de mampostería en Costa Rica

Debido a que la mampostería es el sistema más utilizado en nuestro país, en vivienda y edificios de diversas alturas (Cordero, 2012) (ref), tiene una importancia considerable y por esa razón el CSCR 2010-14 (ref) expone en su capítulo 9 y anexo A, las directrices para el diseño de paredes de mampostería integral, confinada y muros. Este sistema consiste en paños de bloques de concreto unidos con mortero, los cuales están reforzados con acero en la mampostería integral, o confinados por elementos de concreto reforzado en la mampostería confinada.

El refuerzo de la mampostería consiste en barras de acero colocadas vertical y horizontalmente, y según el CSCR 2010-14 (ref), las barras deben ser corrugadas. Estas deben ser colocadas en celdas rellenas de concreto en el caso vertical y sobre las hiladas de los bloques o en vigas-block para el acero horizontal. Estas barras deben cumplir los requisitos de longitud de desarrollo para garantizar la adherencia al concreto y así desarrollar su capacidad en tracción.

La técnica de reforzamiento de paredes de mampostería confinada con malla electrosoldada y mortero es comúnmente utilizada en nuestro país, sin embargo, no existe una sección en el CSCR 2010-14 (ref), que mencione como diseñarla y por eso la importancia de los resultados de esta investigación.

Para el diseño de las paredes de mampostería, el CSCR 2010-14 (ref) especifica en el Capítulo 9, Sección 9.7.5, que la fuerza de cortante nominal (V_n) debe ser calculada según la ecuación 9-22:

$$V_n = V_m + V_s \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

V_m = resistencia nominal en cortante de la mampostería.

V_s = resistencia nominal del refuerzo para cortante.

Las recomendaciones generales del CSCR 2010-14 para paredes de mampostería que deben seguirse en la realización del proyecto tales como acero mínimo, resistencia a la compresión, propiedades de los materiales y demás, se comentan a continuación.

13.3.1 Refuerzo de muros

En la sección 9.3.3.c. del CSCR 2010-14 (ref), se establece que la suma de las áreas del refuerzo vertical y horizontal no debe ser menor que 0.002 veces el área bruta del muro y la cantidad mínima de refuerzo en cualquiera de las dos direcciones debe ser 0.0007 veces el área bruta del muro.

El refuerzo vertical y horizontal debe ser al menos de varilla #3, con la excepción de que se utilicen escalerillas en las sisas, que deben tener un área equivalente a la mencionada.

13.3.2 Determinación de la resistencia a la compresión de la mampostería

La sección A.2 del CSCR 2010-14 (ref) menciona que la resistencia en compresión se debe basar en ensayos de prismas construidos con los mismos materiales y mano de obra que se utilizan en la construcción de la obra, ensayados según la norma ASTM C1314 (ref) (Métodos de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de prismas de mampostería).

El valor de f'_m para la mampostería clase A es de 100 kg/cm^2 , el cual fue el valor utilizado en esta investigación y comprobado a través del ensayo mencionado (ver en cuadro 21).

13.3.3 Requisitos para el refuerzo de la mampostería

En el inciso a) de la sección 9.3.5 del CSCR 2010-14 (ref) se menciona las propiedades del acero de refuerzo, el cual debe cumplir con la norma ASTM A706 grado 60 (ref) y además se permite utilizar acero que cumpla la norma ASTM A615 (ref), grado 40 y grado 60, si el esfuerzo real de cedencia no sobrepasa el esfuerzo especificado en más de 1250 kg/cm^2 y la relación de la resistencia última a la tracción y el esfuerzo de cedencia real no es inferior a 1.25.

13.3.4 Paredes con cargas paralelas al plano según el CSCR 2010-14

Las recomendaciones aplicables al proyecto, para paredes de mampostería con cargas paralelas a su plano y su metodología de análisis según el CSCR 2010-14 (ref) se cita a continuación, y posteriormente se realiza el diseño de las paredes (Anexo A), con el que se obtiene la resistencia teórica de la pared.

13.3.4.1 Resistencia de diseño

La sección 9.7.3 del CSCR 2010-14 (ref) establece que la capacidad suministrada por la sección transversal del muro de corte en términos de carga axial, cortante y momento debe calcularse como la resistencia nominal multiplicada por el respectivo factor de reducción, especificado en el siguiente cuadro (9.1 en el texto del CSCR 2010-14).

Cuadro 1 . Factores de reducción CSCR 2010-14.

Elemento mecánico	Mampostería clase A	Mampostería clase B
Flexión y carga axial	$\phi = 0.80 - \frac{1.5 P_u}{A_e f'_m}$ $0.60 \leq \phi \leq 0.80$	$\phi = 0.75 - \frac{1.5 P_u}{A_e f'_m}$ $0.55 \leq \phi \leq 0.75$
Cortante y torsión	$\phi = 0.60$	$\phi = 0.55$
Longitudinal de desarrollo y traslapes	$\phi = 0.80$	$\phi = 0.75$
Aplastamiento	$\phi = 0.60$	$\phi = 0.50$

13.3.4.2 Resistencia de cortante

La sección 9.7.5 del CSCR 2010-14 (ref) establece que para estructuras con ductilidad global mayor que 1, la fuerza de cortante de diseño debe ser el valor que da el análisis multiplicado por la razón entre el FED (Factor espectral dinámico) correspondiente a la ductilidad global de 1 y el FED correspondiente a la ductilidad global utilizada en el análisis. A continuación, se muestran las ecuaciones 9-21, 9-22 y 9-23 del CSCR 2010-14 (ref) empleadas para determinar la capacidad, respectivamente:

$$V_u \leq \phi V_n \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$V_n = V_m + V_s \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$V_s = \frac{0.5 A_{sh} f_y d}{S_h} \quad (\text{Ecuación 3})$$

La ecuación 4 (9-23 del CSCR 2010-14) es válida cuando el refuerzo horizontal está embebido en concreto en toda su longitud. En caso contrario, como el empleado en esta investigación, se debe utilizar la mitad del valor obtenido con la ecuación.

$$V_m = \left\{ \left[1 - 0.44 \left(\frac{M_u}{V_u d} \right) \right] \sqrt{f'_m} + 0.25 \left(\frac{P_u}{A_g} \right) \right\} db_w \quad (\text{Ecuación 4})$$

En la ecuación 4, 9-24 del CSCR 2010-14 (ref), el valor $\frac{M_u}{V_u d}$ es 1.0 como máximo y debe considerarse como un número positivo y adimensional y el valor de V_n calculado con las ecuaciones anteriores no debe exceder los siguientes valores:

Cuando el valor $\frac{M_u}{V_u d} \leq 0.25$ se utiliza la ecuación 9-25 del CSCR 2010-14:

$$V_n \leq (1.6 \sqrt{f'_m}) db_w \quad (\text{Ecuación 5})$$

Cuando el valor $\frac{M_u}{V_u d} \geq 1.00$ se utiliza la ecuación 9-26 del CSCR 2010-14:

$$V_n \leq (1.06\sqrt{f'_m})db_w \quad (\text{Ecuación 6})$$

Para valores de $\frac{M_u}{V_u d}$ entre 0.25 y 1.0 se debe interpolar linealmente.

Para el caso de paredes completamente rellenas, el brazo de palanca (d) es la distancia desde la fibra extrema en tensión y $b_w = t$, que es el espesor de la pared. Para paredes parcialmente rellenas, $b_w = t_{bi}$, donde t_{bi} es el ancho máximo del hueco interno del bloque en la dirección perpendicular a la fuerza cortante.

13.3.4.3 Flexocompresión

La sección 9.7.6 del CSCR 2010-14 (ref) establece que los muros rectangulares se pueden diseñar utilizando las siguientes ecuaciones, que corresponden a las ecuaciones 9-34 a 9-37 del CSCR 2010-14 (ref):

$$M_n = \frac{A_s f_y l_w}{2} \left(1 + \frac{P_n}{A_s f_y} \right) \left(1 - \frac{c}{l_w} \right) \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$\frac{c}{l_w} = \frac{\alpha + \beta}{2\alpha + 0.72} \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$\beta = \frac{P_n}{t l_w f'_m} \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$\alpha = \frac{A_s f_y}{t l_w f'_m} \quad (\text{Ecuación 10})$$

En el caso de esta investigación si existe carga axial, pero se desprecia por ser un valor muy pequeño y con el fin de ser conservadores.

13.4 Aporte de capacidad de la malla electrosoldada y mortero

Una vez elegido el sistema de reparación de malla electrosoldada y mortero como sistema de rehabilitación de muros de mampostería confinada, se debe de proceder a su diseño, es decir, determinar el tipo y la cantidad de malla a emplear para resistir las cargas actuantes y su colocación (una o ambas caras del muro). En este caso se utiliza malla electrosoldada 6 x 6, calibre 8 (4.11 mm de diámetro, 0.13 cm² de área y 5000 kg/cm² el esfuerzo de fluencia). Por otro lado, se debe definir el espesor y el tipo de mortero a colocar sobre la malla electrosoldada (5 cm y Repemax proyectable polímero 210 en esta investigación). Ambos productos se consideran de uso común en Costa Rica.

13.4.1 Teoría de requisitos de capacidad en cortante para muros estructurales (8.7.2 CSCR 2010-14)

Para el cálculo de la capacidad a cortante aportada por el sistema de reparación de malla electrosoldada, se ha utilizado la teoría correspondiente a los requisitos de capacidad en cortante para muros estructurales, contenidos en la sección 8.7.2 del CSCR 2010-14 (ref), partiendo del supuesto de que el sistema se comporta como un muro estructural de 5 cm de espesor.

$$V_n = A_{cv}(\alpha_c \sqrt{f'_c} + \rho_n f_y) \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde los valores de α_c , se obtienen del siguiente cuadro:

Cuadro 2. Coeficientes de ecuación 12 que dependen de la razón h/l del muro a diseñar (CSCR 2010-14).

Valores de coeficiente α_c	
h/l	α_c
≤ 1.5	0.8
≥ 2	0.53

Además el valor de $V_n < 2.5 \cdot A_{cv} \cdot \sqrt{f'_c}$ (Ecuación 12)

El valor de la resistencia a la compresión mínimo para mortero hecho en obra se debe asumir como mínimo de 100 kg/cm^2 , sin embargo, esto depende del tipo de mortero empleado de acuerdo a las necesidades de cada proyecto (cálculos mostrados en el anexo B).

13.4.2 Aporte de capacidad de malla electrosoldada y mortero de acuerdo a la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural

Este criterio establece:

$$V_{R,R} \geq V_b \text{ (Ecuación 13)}$$

Donde $V_{R,R}$ es la resistencia a fuerza cortante de la estructura rehabilitada con malla electrosoldada y V_b es la fuerza cortante basal actuante.

Una aproximación de la resistencia ante cargas laterales de una estructura rehabilitada con malla electrosoldada y recubierta con mortero, se define con la siguiente expresión.

$$V_{R,R} = V_{sm} + V_{rm} \text{ (Ecuación 14)}$$

Donde V_{rm} es la resistencia remanente del muro de mampostería ante cargas laterales y V_{sm} es la contribución de la malla electrosoldada a la resistencia ante cargas laterales.

La resistencia de cortante remanente de los muros que han sufrido daño incluye la contribución de la mampostería, así como de los elementos confinantes.

$$V_{rm} = F_R \cdot V_R \text{ (Ecuación 15)}$$

Donde V_R es la resistencia en cortante de la mampostería (Ecuación 17 de este documento) y F_R es un factor de reducción de resistencia que puede considerarse como 0.8.

$$V_R = (0.5 \cdot V_m \cdot A_T + 0.3P) \leq 1.5 \cdot F_R \cdot V_m \cdot A_T \quad (\text{Ecuación 16})$$

P se debe tomar positiva en compresión. En el área A_T , se debe incluir a las columnas, pero sin transformar el área transversal.

La resistencia en compresión diagonal de la mampostería para diseño V_m no deberá exceder 6 kg/cm^2 .

Por otro lado, la aproximación utilizada para la resistencia de cortante que proporciona la malla electrosoldada está dada por la siguiente expresión:

$$V_{sm} = \rho_h \cdot f_y \cdot A_T \cdot \eta \quad (\text{Ecuación 17})$$

Donde ρ_h es la cuantía de refuerzo horizontal, proporcionada por malla electrosoldada y f_y es el esfuerzo nominal de fluencia de la malla electrosoldada, A_T es el área bruta de la sección transversal del muro de mampostería y η es un factor de eficiencia del refuerzo horizontal. Para el cálculo de la cuantía se utiliza la siguiente expresión:

$$\rho_h = \frac{a_{sh}}{t \cdot s_h} \quad (\text{Ecuación 18})$$

Donde t es el espesor del muro de mampostería, a_{sh} es el área de las varillas de la malla electrosoldada en una separación s_h y s_h es la separación horizontal de las varillas de la malla electrosoldada.

Por otro lado, η es un factor de eficiencia que toma en cuenta que las varillas de la malla exhiben una distribución de deformaciones uniforme a la altura del muro y en consecuencia no alcanzan su esfuerzo de fluencia simultáneamente.

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

Para valores de $\rho_h f_{yh}$ entre 6 y 9 kg/cm^2 se interpola linealmente.

En el cuadro 3 se muestra un cuadro resumen de los cálculos, de acuerdo con la teoría del CSCR 2010-14 (ref) y la norma mexicana mencionados anteriormente. La memoria de cálculo detallada se muestra en el Anexo A.

Es importante resaltar que la ecuación de la norma Mexicana no considera el aporte del mortero.

Cuadro 3. Aporte de malla electrosoldada.

Aporte de la malla electrosoldada y mortero lanzado (ton)			
CSCR 2010 (7 días)		CSCR 2010 (28 días)	
h/l = 1	h/l = 0.5	h/l = 1	h/l = 0.5
26.94	42.63	28.15	45.04
Aporte de la malla electrosoldada (ton)			
Norma Mexicana (no considera aporte del mortero en su ecuación)			
h/l = 1		h/l = 0.5	
14.86		29.72	

13.5 Cálculo de resistencia de los muros

13.5.1 Paredes de mampostería confinada h/l = 1

Las dimensiones de los muros son 269.5 cm de altura y 280 cm de longitud (las medidas incluyen la viga corona y las columnas), con un espesor de 15 cm. Con una viga corona de 29.5 cm de peralte y dos columnas de 30 cm de ancho que confinan el muro de mampostería.

Se calculó la resistencia teórica en cortante considerando varillas #3 a cada 60 cm longitudinales, y luego se escogió el acero vertical colocando #3 a cada 60 cm como refuerzo vertical.

En el anexo B se detalla el ejemplo de cálculo de la resistencia teórica del muro calculada según el CSCR 2010-14 en su sección 9.7, sobre muros con cargas paralelas a su plano. Se desarrolla el cálculo con el acero horizontal en las sisas. Las propiedades de los materiales supuestas en este ejemplo de cálculo corresponden a las nominales, y podrían variar a las obtenidas mediante pruebas.

Las columnas fueron construidas de 30 cm x 15 cm con 8#4 y aros #3 @20 cm de manera que el acero vertical está concentrado en los elementos de borde, para así evitar el efecto dovela en los muros de mampostería y asegurar que la falla sea por cortante. En la figura 8 se puede observar el detalle.

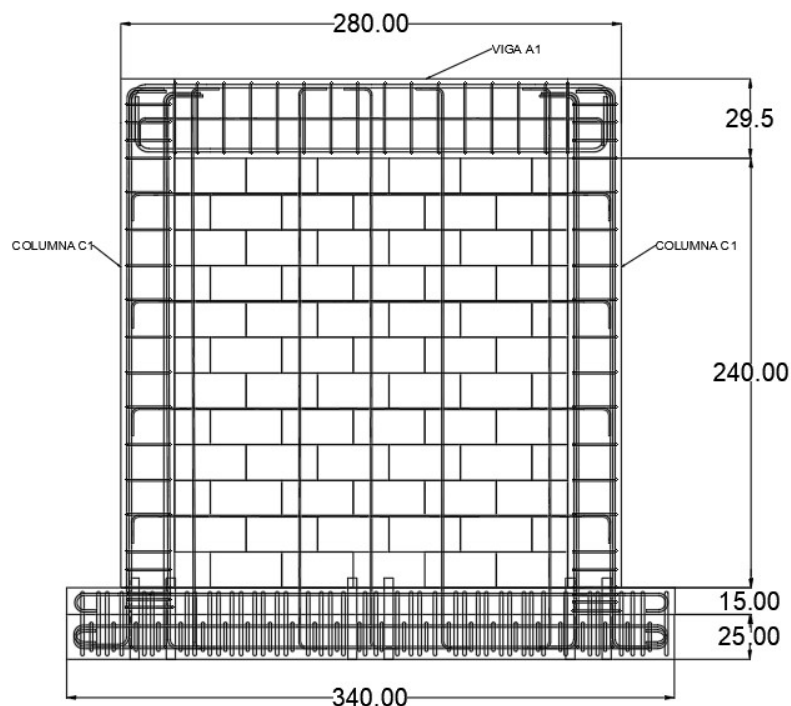


Figura 8. Pared $h/l = 0.5$ (cotas en cm).

13.5.2 Paredes de mampostería confinada $h/l = 0.5$

Las dimensiones de los muros son de 284.5 cm de altura y 560 cm de longitud (las medidas incluyen la viga corona y las columnas), con un espesor de 15 cm. La viga corona es de 44.5 cm de peralte y las dos columnas de 30 cm de ancho que confinan el muro de mampostería.

Se calcula la resistencia teórica en cortante considerando varillas #3 a cada 60 cm a lo largo de la altura, y luego se escogió el acero vertical colocando #3 a cada 60 cm como refuerzo vertical.

En el anexo B se muestra el ejemplo de cálculo de la resistencia teórica del muro calculada según el CSCR 2010-14 en su sección 9.7, sobre muros con cargas paralelas a su plano. Se desarrolla el cálculo con el acero horizontal en las sisas.

Las propiedades de los materiales supuestas en estos ejemplos de cálculo corresponden a las nominales, y podrían variar a las obtenidas mediante pruebas.

Las columnas fueron construidas de 30 cm x 15 cm con 8#4 y aros #3 @20 cm de manera que el acero vertical está concentrado en los elementos de borde, para así evitar el efecto dovela en los muros de mampostería y asegurar que la falla sea por cortante al igual que en el caso anterior. En la figura 9 se puede observar el detalle.

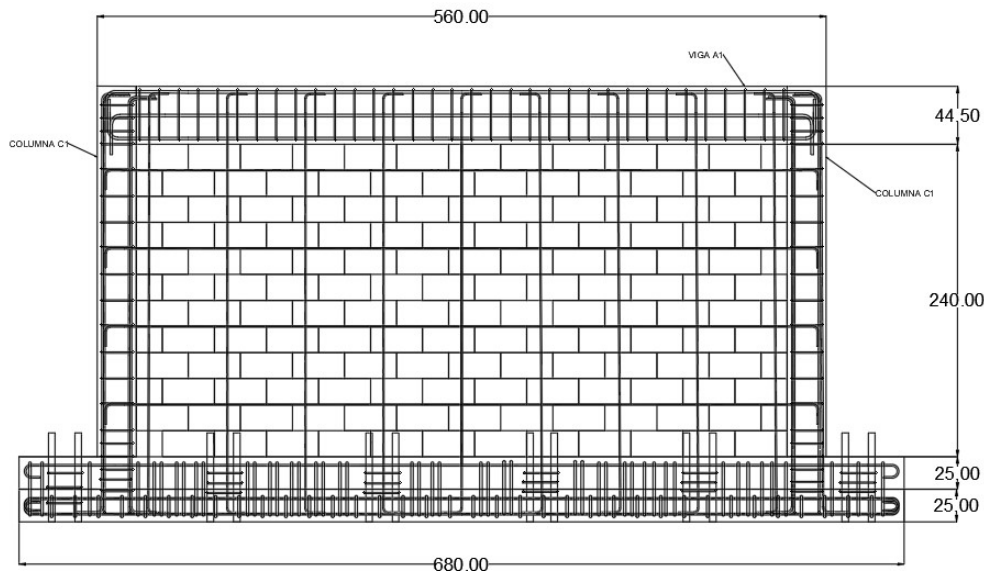


Figura 9. Pared $h/l = 0.5$ (cotas en cm).

En el cuadro 4 se muestra un cuadro resumen de las capacidades de los muros:

Cuadro 4. Resumen de la resistencia nominal en cortante de cada muro de acuerdo a CSCR 2010-14 (ref).

ITEM	Detalle	Detalle
h / L =	0.50	1.00
Refuerzo =	#3 @ 60 cm vertical #3 @ 60 cm horizontal, con elementos de borde con 8#4 y aros #3@20cm	#3 @ 60 cm vertical #3 @ 60 cm horizontal, con elementos de borde con 8#4 y aros #3@20 cm
Vn total del muro (Ton) =	47.85	24.67

14 Esquema experimental

14.1 Instrumentación

Los ensayos de las paredes tienen como objetivo la obtención de datos de su comportamiento y respuesta ante las cargas cíclicas que aplica el pistón.

La instrumentación de los muros se lleva a cabo con galgas extensométricas y dispositivos LVDT (transformador diferencial variable lineal).



Figura 10. Galga extensométrica y LVDT, tomado de Laboratorio de Estructural del LanammeUCR.

Las galgas de 1 o 2 pulgadas de largo, se adhieren al elemento mediante un pegamento especial y funcionan por cambios geométricos en su forma original, a partir de una propiedad física llamada resistencia eléctrica. De esta manera, cuando un conductor eléctrico es deformado dentro de su límite de elasticidad, éste se volverá más estrecho y alargado, incrementando su resistencia eléctrica. Por el contrario, cuando el conductor es comprimido, se acorta y ensancha, reduciendo así su resistencia al paso de corriente eléctrica. De tal manera, midiendo la resistencia eléctrica de la galga, puede deducirse la magnitud de la deformación del objeto entre dos puntos.

Los transformadores lineales LVDT, mediante cambios de voltaje en su composición interior, son capaces de representar los desplazamientos en los puntos de medición. Además, pueden transmitir información mediante canales, de manera que conectados a

un computador, pueden dar una gran cantidad de datos de las deformaciones o desplazamientos internos de los elementos.

Las galgas extensométricas se ubicaron como se muestra en la figura 11.

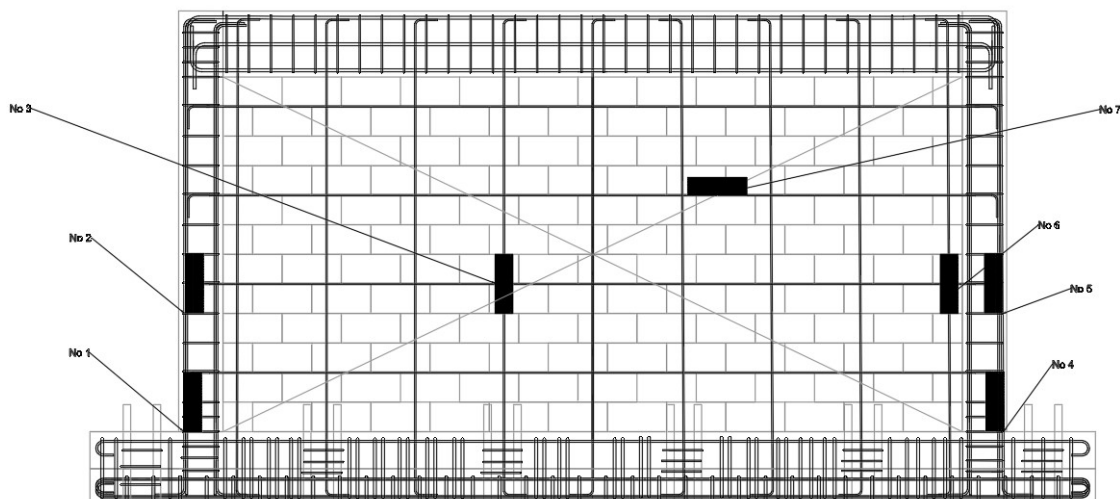


Figura 11. Ubicación esquemática de galgas extensométricas.

Las galgas No 1 y No 4 se colocaron en las columnas, justo donde termina la cimentación, con el fin de obtener la deformación del acero en la base, es decir, en la sección de momento máximo. De igual manera se colocaron las galgas No 2 y No 5 en las columnas en la cuarta hilada con el fin de determinar si el acero fluye un poco más arriba. Las galgas No 3 y No 6 se colocaron en el acero longitudinal de la mampostería, con el fin de comparar su deformación con la del acero longitudinal de las columnas. La galga No 7 se colocó en el acero horizontal a una distancia para lo cual se estimó que cruzaría la grieta diagonal de cortante.

Deben tenerse extensos cuidados debido a que una mala manipulación de las galgas puede afectar su adherencia. Adicionalmente, las galgas deben protegerse del concreto mediante parafina (ver figura 12) para asegurar su durabilidad, pues cuando la pared esté lista para ser fallada, solamente dos cables saldrán de la pared, y serán estos los que transmitirán las señales al equipo indicador de deformaciones. Cualquier error en la instrumentación de las galgas es irreparable una vez que la pared esté construida.

Por otro lado, las paredes se instrumentaron con LVDTs ubicados en cinco puntos, El No 1 y No 5 fueron colocados en la cimentación y en la base del muro para poder medir cualquier desplazamiento inferior y poder determinar deformaciones reales sin efecto del deslizamiento del muro. Por otro lado, los LVDT No 2 y No 4 se ubicaron de manera vertical de cada lado del muro con el fin de poder medir la rotación del muro ligada a la deformación por flexión. Por último, el LVDT No 3 fue localizado en el borde superior derecho del muro con el fin de obtener el desplazamiento horizontal en la parte superior del muro. Para lograr dichas mediciones es necesario proveer al espécimen con soportes fijados a las paredes mediante tornillos de contacto, sobre los cuales se colocan los LVDT, de manera que puedan tener una distancia fija de referencia.

En la figura 12 se muestra el esquema de la ubicación de los LVDT en las paredes de acuerdo a lo descrito anteriormente:

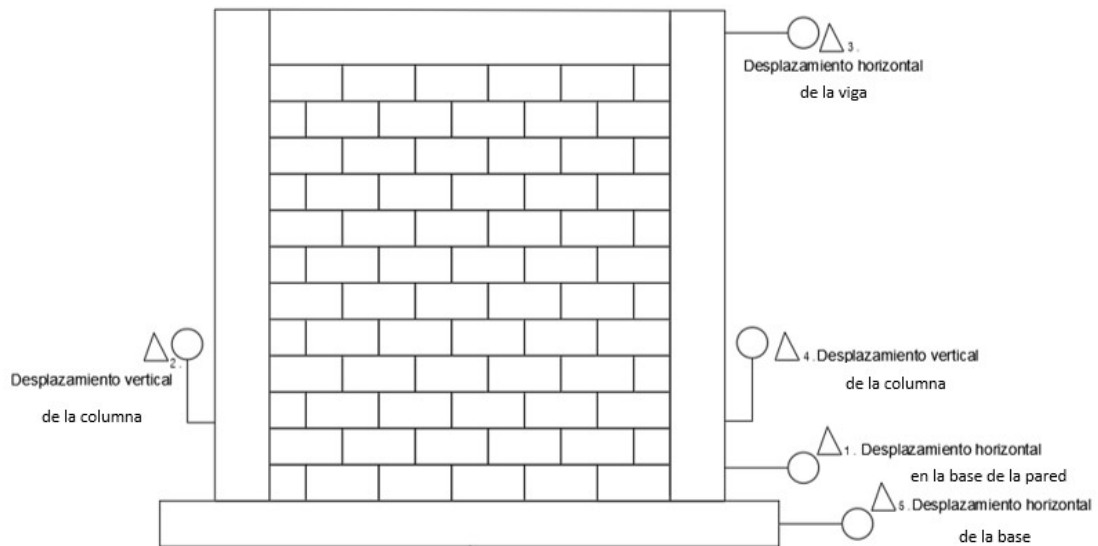


Figura 12. Ubicación esquemática de LVDT.



Figura 13. Colocación de galgas extensométricas.

14.2 Montaje en el piso fuerte y procedimiento de carga

El procedimiento de carga para la falla de las paredes se rige por la norma ASTM 2126 (ref). Este método de ensayo tiene como objetivo medir el desempeño de los muros sometidos a cargas horizontales, y dado que estas cargas son cíclicas, el proceso de carga simula las acciones de un sismo y sus efectos sobre las paredes.

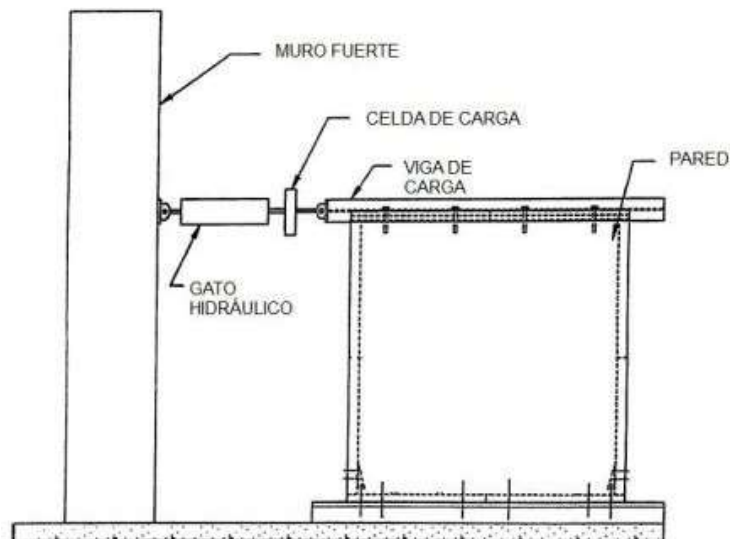


Figura 14. Esquema del montaje en el LanammeUCR.

La resistencia de cortante se determina sometiendo a un espécimen de mampostería a cargas cíclicas acumuladas como cargas de corte, siempre regresando al punto de inicio. Esto se logra anclando el borde inferior del conjunto de la pared a una base rígida (piso fuerte) y aplicando una fuerza paralela a la parte superior de la pared. Al ensamblaje se le permite desplazarse en su propio plano, y se debe fijar a la base mediante pernos anclados en su cimentación.

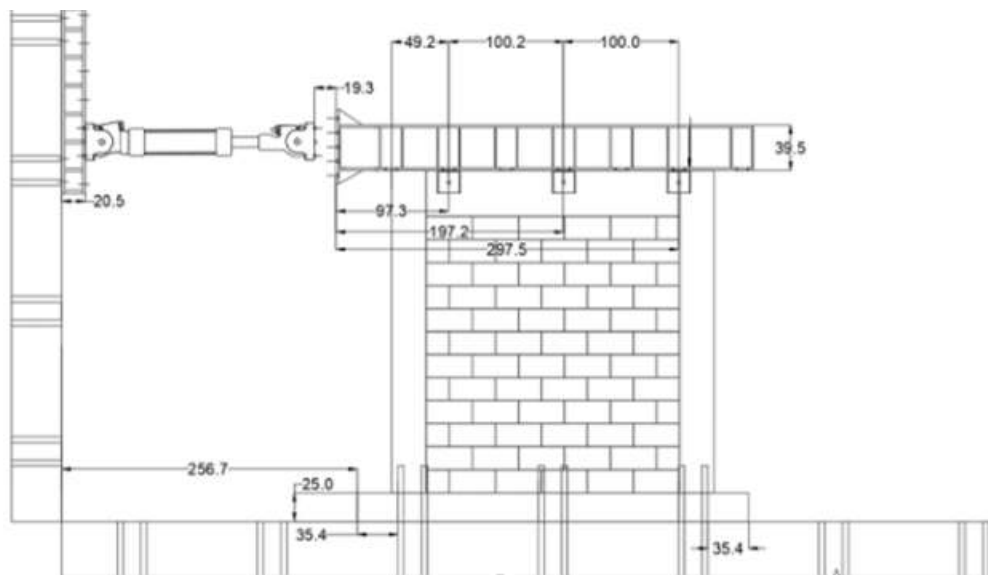


Figura 15. Montaje de pared $h/l = 1$ (cotas en cm).



Figura 16. Montaje de pared $h/l = 1$.

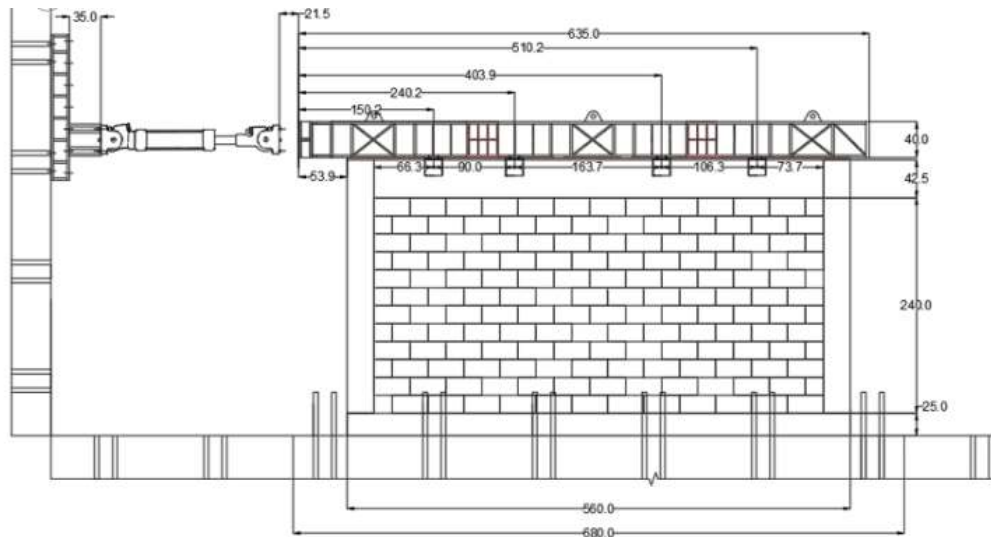


Figura 17. Montaje de pared $h/l = 0.5$ (cotas en cm).



Figura 18. Montaje de pared $h/l = 0.5$.

De las tres variaciones que la norma presenta, se utilizó el método B para la falla de las paredes, el cual es un procedimiento de carga basado en desplazamientos, el cual incluye ciclos de desplazamientos agrupados en fases, incrementando gradualmente los niveles de desplazamiento (Los protocolos de carga de esta investigación se muestran en el anexo c).

Se indica que debe presentarse un único patrón de desplazamiento cíclico o carga cíclica, y este debe escogerse de manera conservadora. El Método B está pensado para producir los datos que proporcionen la información suficiente para describir las propiedades cíclicas elástica e inelástica, y el modo de falla esperado bajo carga sísmica.

Un mínimo de dos pruebas por cada tipo de construcción es lo que recomienda la norma, lo cual se cumple en todos los casos donde se ensaya 3 modelos para cada relación de aspecto (1 pared patrón y dos paredes reparadas para cada h/l).

Las paredes de mampostería se cargaron lateralmente mediante un actuador hidráulico, que aplica carga en un sentido y luego descarga. Como se espera una falla a cortante, las grietas atravesaron las paredes en ángulos cercanos a los 45 grados, y una vez que falló el elemento (La carga que se obtiene es del 80% de la carga máxima alcanzada), su rigidez empezó a disminuir y los desplazamientos aumentaron. Esta carga lateral forma un puntal de compresión que atraviesa la pared y genera esfuerzos altos en los bloques inferiores, que pueden llegar a fallar por este motivo.

Después de que el acero se ha llevado más allá de su límite elástico y una vez en el rango plástico, una serie de fenómenos pueden ser observados durante los ciclos de descarga, recarga, y la reversión del esfuerzo. En primer lugar, la descarga al punto de desplazamiento nulo y la posterior carga al nivel máximo de esfuerzo previamente alcanzado será elástica con una rigidez igual que la rigidez inicial (k).

Entonces, como se muestra en la siguiente figura, en la reversión de esfuerzos, no se encuentra una esquina en la curva tensión-deformación en el inicio de la cedencia pues en su lugar se produce gradualmente un ablandamiento de la rigidez y esta cedencia se presenta antes de lo previsto. Este comportamiento, conocido como el efecto Bauschinger, es una característica natural del acero. Si la reversión de esfuerzo se inicia antes de obtener el endurecimiento por deformación cuando el acero se carga en una dirección, un “plateau” de cedencia eventualmente se encuentra en la dirección de carga invertida, Sin embargo, una vez que el rango de endurecimiento por deformación se ha introducido en la dirección de carga, el “plateau” de cedencia desaparece en los dos sentidos de carga (b).

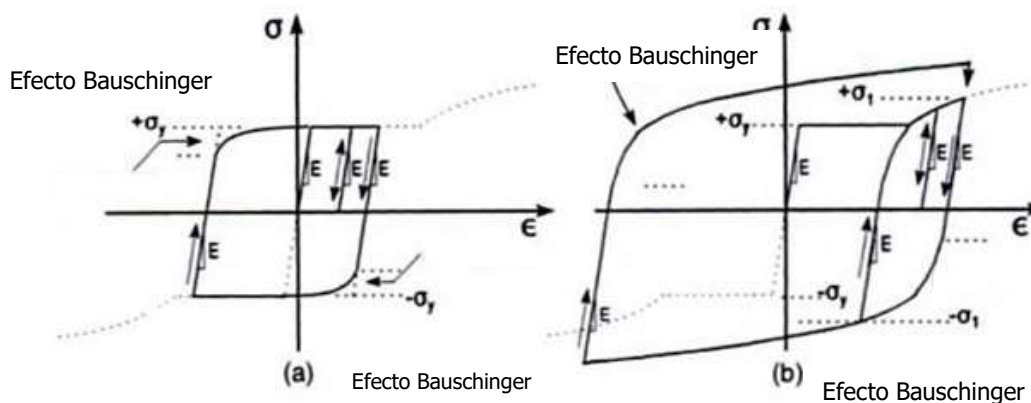


Figura 19. Efecto Bauschinger (Tomada de Propuesta del proyecto de graduación, “Análisis de la eficiencia de los empalmes de barras horizontales en paredes de mampostería, en el sistema convencional y viga bloque, con empalmes por traslapo y con ganchos en barras verticales”, Daniel Acuña García, Universidad de Costa Rica 2012).

Una característica importante del acero al ser sometido a una gran carga cíclica inelástica es su capacidad para disipar la energía de histéresis. La energía necesaria para alargar o acortar plásticamente un espécimen de acero puede ser calculado como el producto de la fuerza inelástica multiplicada por el desplazamiento inelástico (es decir, el trabajo realizado en el rango plástico) y se le llama energía de histéresis. A diferencia de la energía cinética y de deformación, la energía de histéresis no es recuperable pues se disipa.

Un cálculo más preciso de la energía de histéresis en este caso sería reconocer la pequeña pérdida de energía de histéresis en las esquinas redondeadas de la curva de fuerza-desplazamiento debido al efecto Bauschinger. En virtud de los repetidos ciclos de carga, la energía disipada en cada ciclo simplemente se suma para calcular la energía total disipada. Esta capacidad de disipación de energía acumulada es una propiedad que hace posible la supervivencia de las estructuras para las condiciones de carga inusuales pero severas, como la carga explosiva o cargas sísmicas.

Por otro lado, es importante conocer el comportamiento de los lazos histéricos; estos al inicio tienden a ser delgados y tienden a pasar por el origen del sistema de referencia

(propio de sistemas que disipan poca energía y degradan rigidez). Sin embargo, en las siguientes fases de carga, los lazos histéreticos varían progresivamente de tamaño conforme aumentan los desplazamientos laterales (muestran una tendencia a acostarse y alejarse rápidamente del origen del sistema de referencia), con lo que se aprecian degradaciones de la rigidez por el incremento de las deformaciones laterales.

15 Descripción de los muros

15.1 Muro $h/l = 0.5$

El muro con relación de aspecto aproximado $h/l = 0.5$ tiene medidas de 560 cm de longitud y una altura de 284.5 cm. Este muro fue construido a tesón y sogá con un reforzamiento vertical y horizontal de varillas #3 grado 40 @ 60 cm, en el caso del refuerzo horizontal fue colocado en la sisa y las únicas celdas rellenas fueron donde se colocaba la varilla vertical. El detalle se muestra en la figura 20 y figura 21.

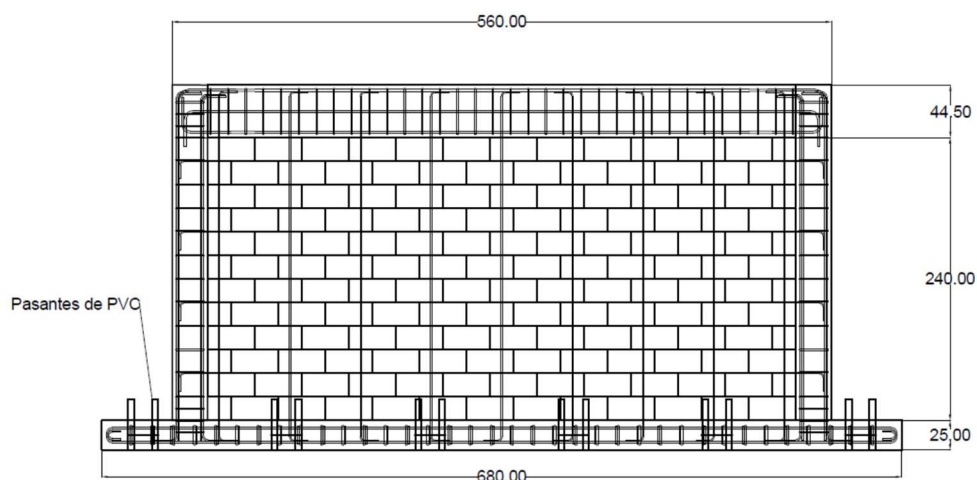


Figura 20. Vista lateral de muro $h/l = 0.5$ con fundación tipo 1 (cotas en cm).

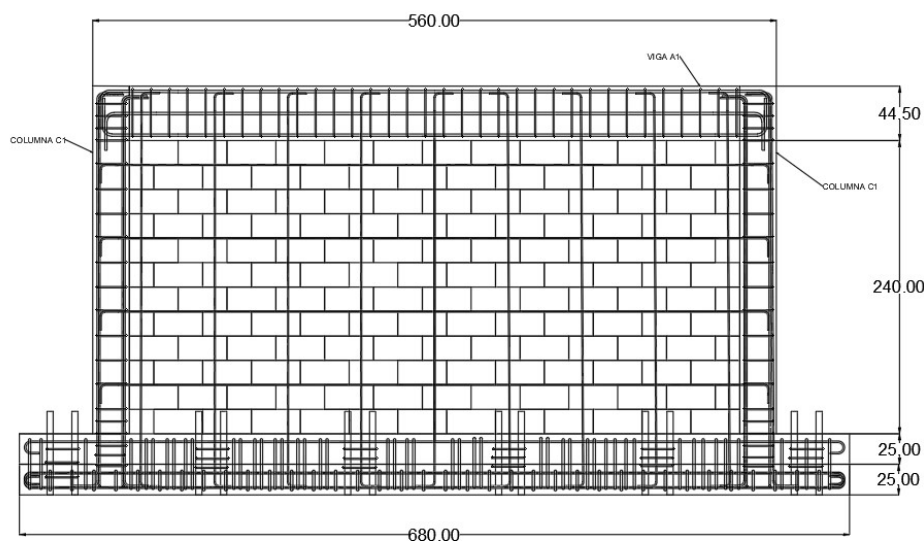


Figura 21. Vista lateral de muro $h/l = 0.5$ con fundación tipo 2 (cotas en cm).

En el caso de la cimentación de este muro, se realizó dos diseños, el primero fue usado para el primer grupo (paredes patrón) y el segundo diseño para los otros dos grupos (pared reparada 1 y pared reparada 2). El primer diseño consiste en un espesor de 25 cm, una longitud de 680 cm y un ancho de 175 cm; longitudinalmente posee 20 varillas No 4, aros externos No 6 @ 18 cm y aros internos No 4 @ 18 cm, todo grado 60. Se colocaron 48 ductos de PVC de 3.8 cm de diámetro confinados por 2 aros de varilla No 3, a través de los cuales se introdujeron los pernos de anclaje al piso fuerte, cuyo diámetro es de 3.4 cm y son de acero grado 60. El elemento fue diseñado con una resistencia a la compresión a los 28 días de 280 kg/cm^2 . El detalle en la figura 22.

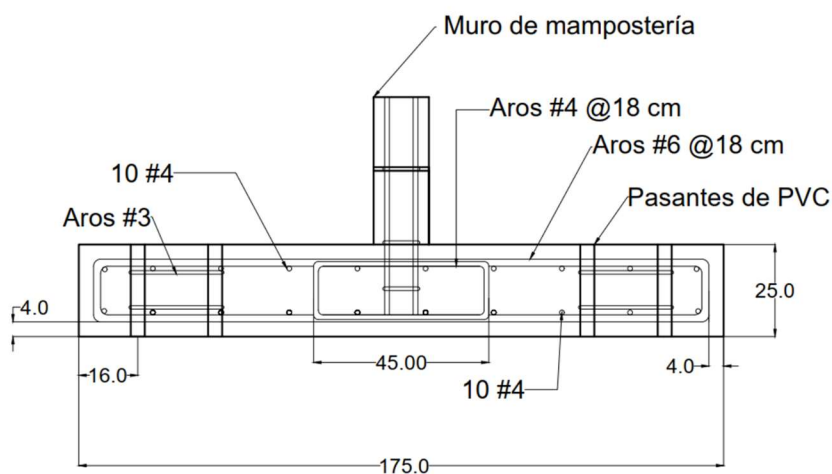


Figura 22. Diseño de fundación tipo 1 muro $h/l = 0.5$ (cotas en cm)

El segundo diseño fue de igual manera de 680 cm de longitud y 175 cm de ancho, en este caso el espesor es de 50 cm, pues se le aumentó una viga de otros 25 cm. El acero longitudinal fue de 16 # 4 Grado 60 con aros #4 @ 18 cm en cada extremo y @ 25 cm en el centro, en el caso de la viga superior de la fundación contenía 8 # 4 Grado 60 longitudinales y aros #4 @ 20 cm y de igual manera 48 ductos de PVC para la posterior introducción de los pernos de anclaje al piso fuerte. El detalle en la figura 23.

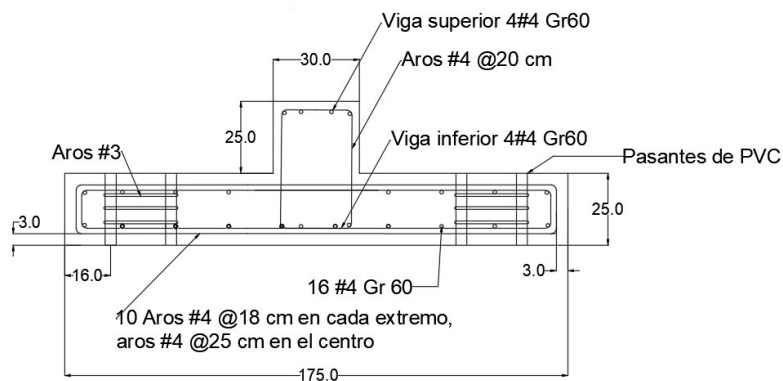


Figura 23. Diseño de fundación tipo 2 muro $h/l = 0.5$ (cotas en cm)

En el caso de la viga corona, de igual manera que con las fundaciones, se realizaron dos diseños, uno para el primer grupo de paredes (pared patrón 1) y otro para los dos grupos restantes. En el caso del diseño 1 se utilizó una viga de 15 cm x 44.5 cm con 6 # 6 grado 60 y aros #3 grado 40 @ 15 cm. El detalle en la figura 24.

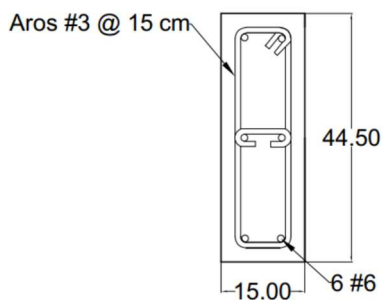


Figura 24. Diseño de viga corona tipo 1 muro $h/l = 0.5$ (cotas en cm)

Por otro lado, el segundo diseño de viga corona mantuvo las mismas medidas de 15 cm x 44.5 cm, pero el acero longitudinal es de 4 #4 grado 40 y aros y gancho #3 grado 40 @ 20 cm, tal como se muestra en la figura 25.

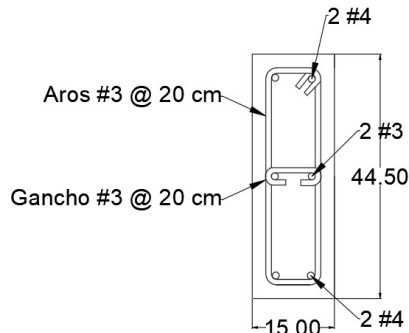


Figura 25. Diseño de viga corona tipo 2 para el muro con $h/l = 0.5$ (cotas en cm)

Finalmente, las columnas de confinamiento del paño de mampostería son de de 15 cm x 30 cm con una resistencia del concreto de diseño de 210 kg/cm^2 a los 28 días y acero longitudinal de 8 # 4 grado 40 y aros #3 @ 20 cm, como se muestra en la figura 26.

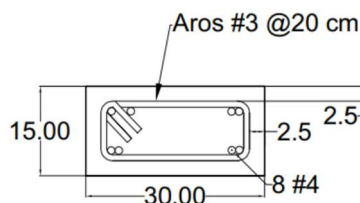


Figura 26. Diseño de columna para el muro con $h/l = 0.5$ (cotas en cm)

15.2 Muro $h/l = 1$

El muro con relación de aspecto aproximado $h/l = 1$ tuvo dos dimensiones; para el primer grupo fue de 280 cm de longitud y 284.4 cm de altura (pared patrón) y en el caso de los dos grupos restantes (paredes reparadas 1 y 2), al haber un cambio de diseño en la fundación (aumento de 15 cm de peralte), la altura se tuvo que modificar para lograr modular con el muro de reacción del laboratorio, a 280 cm de longitud y 269.5 cm de altura. Estos muros fueron construidos a tesón y soga con un reforzamiento vertical y horizontal de varillas #3 grado 40 @ 60 cm. En el caso del refuerzo horizontal, fue colocado en la sisa y las únicas celdas rellenas fueron donde se colocaba la varilla vertical.

Los detalles se observan en las figuras 27 y 28.

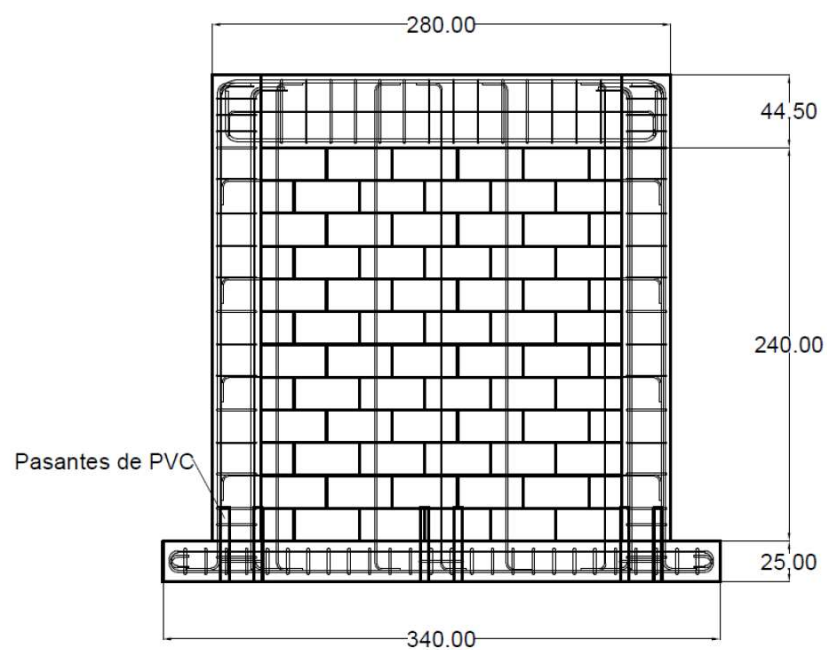


Figura 27. Vista lateral del muro con $h/l = 1$ y fundación tipo 1 (cotas en cm).

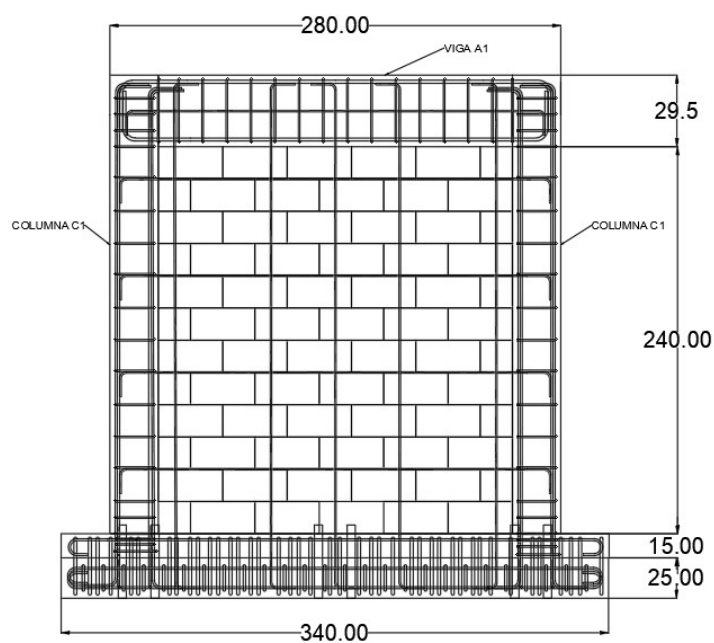


Figura 28. Vista lateral del muro con $h/l = 1$ y fundación tipo 2 (cotas en cm).

En el caso de la cimentación de este muro se utilizó dos diseños; el primero fue usado para el primer grupo (pared patrón) y el segundo para los otros dos grupos (pared reparada 1 y pared reparada 2). El primer diseño tiene un espesor de 25 cm, una longitud de 340 cm y un ancho de 70 cm; con 20 varillas No 4 longitudinales y aros externos No 5 @ 12.5 cm, ambas grado 60. Se colocaron 12 ductos de PVC de 3.8 cm de diámetro confinados por 2 aros de varilla No 3. A través de estos ductos, se introdujeron los pernos de anclaje al piso fuerte cuyo diámetro es de 3.4 cm y son de acero grado 60. El elemento fue diseñado con una resistencia a la compresión a los 28 días de 280 kg/cm^2 . Ver detalle en figura 29.

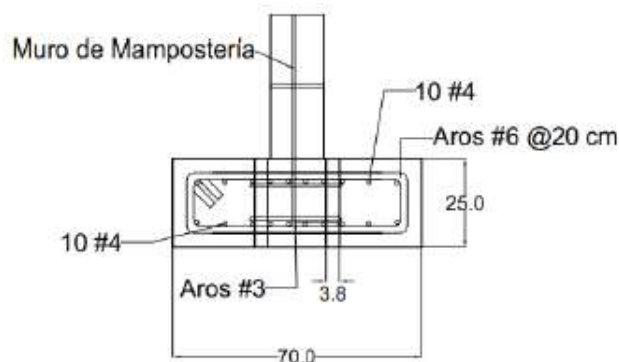


Figura 29. Detalle de sección transversal de la cimentación tipo 1.

El segundo diseño es de 340 cm de longitud, pero el ancho aumentó de 70 cm a 125 cm, el espesor es de 40 cm, pues se le agregó una sección de 15 cm. El acero longitudinal consiste en 16 # 4 Grado 60 con aros #4 @ 18 cm Grado 60. En el caso de la sección superior de la fundación, el refuerzo es de 6 # 4 Grado 60 longitudinales y aros #4 @ 36 cm y de igual manera 12 ductos de PVC para la posterior introducción de los pernos de anclaje al piso fuerte.

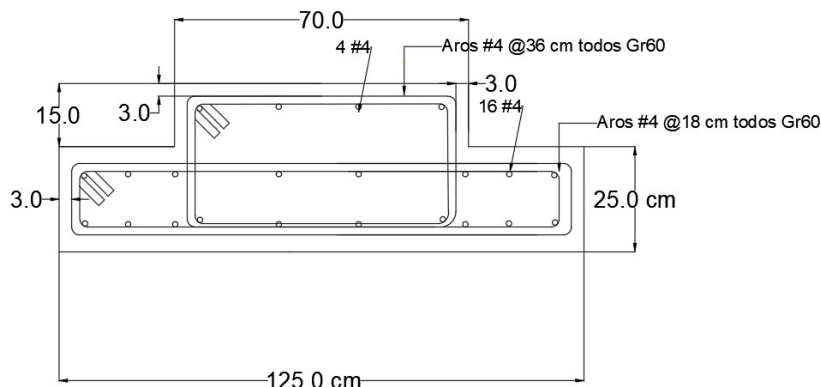


Figura 30. Detalle de sección transversal de cimentación tipo 2.

En el caso de la viga corona se utilizó dos diseños; uno para el primer grupo de las paredes (pared patrón) y otro para los dos grupos restantes. El diseño 1 es de 15 cm x 44.5 cm con 6 # 6 grado 60 y aros #3 grado 40 @ 15 cm (igual que viga corona 1 de pared $h/l = 0.5$). Ver figura 31.

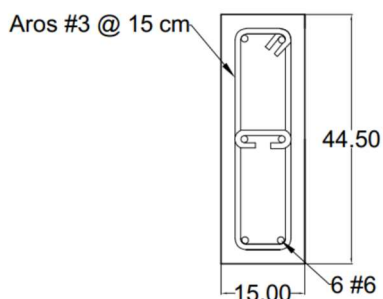


Figura 31. Diseño de viga corona tipo 1 muro $h/l = 1$ (cotas en cm)

Por otro lado, el segundo diseño de viga corona mantuvo la misma medida de ancho, pero disminuyó 15 cm de altura (los 15 cm que aumentó la fundación, disminuyeron en la viga por temas de modulación del muro en el que se ancla el gato hidráulico). Esta nueva viga fue de 15 cm x 29.5 cm y su acero longitudinal fue de 4 #4 grado 40 y aros y gancho #3 grado 40 @ 20 cm, tal como se muestra en la siguiente figura. Observar figura 32.

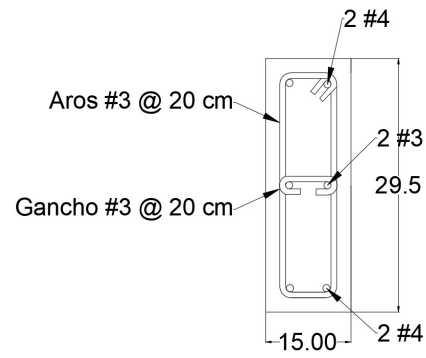


Figura 32. Diseño de viga corona tipo 2 muro $h/l = 1$ (cotas en cm)

Por último, en el caso de las columnas del marco de confinamiento estas se mantuvieron iguales a las del muro de $h/l = 0.5$.

16 Caracterización de materiales

16.1 Cemento

El cemento utilizado en el concreto de las columnas y de la viga corona fue cemento hidráulico de uso general, tipo RTCR 479:2015 MM/B (P-C)-28 fabricado en las plantas de Abangares y Guatuso de Patarrá.

16.2 Agregados

Los agregados para el concreto de las columnas y de la viga corona de los muros fueron proporcionados por el LanammeUCR, los cuales provienen de Guápiles. A continuación, se muestra su caracterización.

16.2.1 Agregado fino

Consiste en arena industrial, la cual consiste en polvo de piedra y partículas gruesas de piedra triturada de un tono grisáceo, tal cual se puede observar en la figura 33.



Figura 33. Arena utilizada en el proyecto.

En el cuadro 5 y figura 34 se detalla la granulometría del agregado fino.

Cuadro 5. Granulometría agregado fino.

MASA INICIAL:		1942.8 g		MASA FINAL:		1877.5 g	
MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RET. (g)	RETENIDO (%)	RET. ACUM. (%)	PASANDO (%)		
1/2"	12.5	0	0	0	100		
3/8"	9.5	0	0	0	100		
Nº 4	4.75	26.7	1	1	99		
Nº 8	2.36	297.6	15	17	83		
Nº 16	1.18	383.7	20	36	64		
Nº 30	0.6	466.5	24	60	40		
Nº 50	0.3	381.2	20	80	20		
Nº100	0.15	217.7	11	91	9		
Nº200	0.075	89.9	5	96	4		
ASTM C-33			PERDIDA POR LAVADO (%)		4.1		
			MODULO DE FINURA		2.86		
MALLA	LI	LS	Cumplimiento				
1/2"		100	CUMPLE				
3/8"	100	100	CUMPLE				
Nº 4	95	100	CUMPLE				
Nº 8	80	100	CUMPLE				
Nº 16	50	85	CUMPLE				
Nº 30	25	60	CUMPLE				
Nº 50	5	30	CUMPLE				
Nº 100	0	10	CUMPLE				
Nº 200	0	5	CUMPLE				

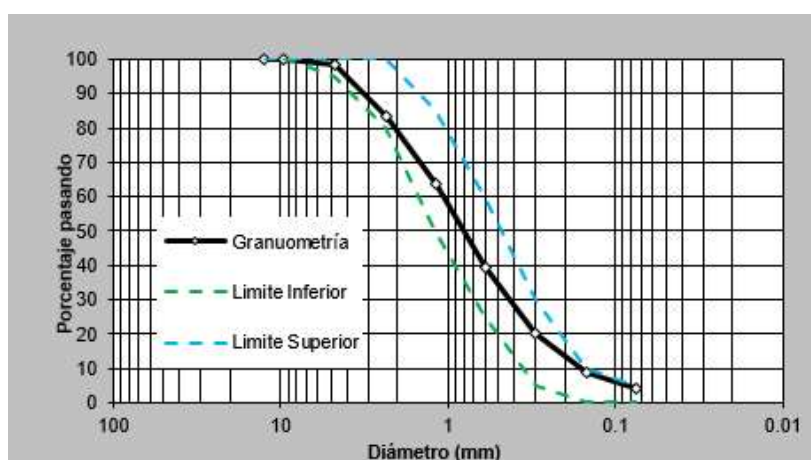


Figura 34. Curva granulométrica del agregado fino.

En el cuadro 6 se muestra la densidad masiva del agregado fino.

Cuadro 6. Peso unitario, agregado fino.

Recipiente	PU-007	W _{rec.} (g)	1730.2	V _{rec.} (l)	2.8355
N	Pesos		Densidades		
	Suelto	Envarillado	Suelto	Envarillado	
1	6116.3	6414.8	1547	1652	
2	6133	6441.53	1553	1662	
3	6146	6477.6	1557	1674	
		Promedio	1552	1663	

En el cuadro 7 se detalla la gravedad específica del agregado fino.

Cuadro 7. Gravedad específica, agregado fino.

Picnometro	54		Resultados	
Masa del Picnometro	150.3	g	Gb _s	2.52
Masa de la Muestra	500.1	g	Gb _{sss}	2.60
Temperatura	23	°C	Gb _{aparente}	2.75
Capsula	Gb-1		Absorción (%)	3.41
Peso Capsula	67.1	g		
Peso Cap + M. Seca	550.7	g		
Masa Pic+ M + Agua	956.7	g		
Masa Pic + Agua	648.7	g		
A	483.6	g		
B	648.7	g		
C	956.7	g		
S	500.1	g		

16.2.2 Agregado grueso

A continuación, podemos observar el agregado grueso que se utilizó para el concreto de vigas coronas y columnas de los muros de ambas relaciones de aspecto (ver figura 35).

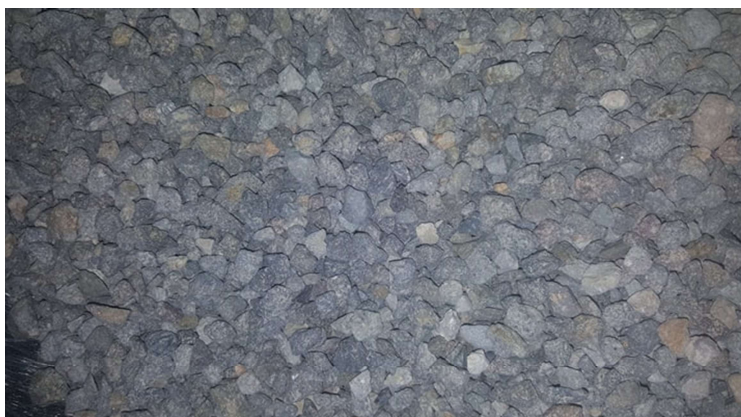


Figura 35. Agregado grueso.

En el cuadro 8 y figura 36 se detalla la granulometría del agregado grueso.

Cuadro 8. Granulometría agregado grueso.

MASA INICIAL:	3602.3	g	MASA FINAL:	3561.7	g
MALLA	ABERTURA	MASA RET.	RETENIDO	RET. ACUM.	PASANDO
No.	(mm)	(g)	(%)	(%)	(%)
1/2"	12.5	0	0	0	100
3/8"	9.5	542.8	15	15	85
Nº 4	4.75	2691.9	75	90	10
Nº 8	2.36	276.1	8	97	3
Nº 16	1.18	21.7	1	98	2
Nº 30	0.6	6	0	98	2
Nº 50	0.3	4.5	0	98	2
Nº100	0.15	7.4	0	99	1
Nº200	0.075	8.4	0	99	1
ASTM C-33			PERDIDA POR LAVADO (%)		1.2
			MODULO DE FINURA		5.96
MALLA	LI	LS	Cumplimiento		
1/2"		100	CUMPLE		
3/8"	85	100	NO CUMPLE		
Nº 4	10	30	CUMPLE		
Nº 8	0	10	CUMPLE		
Nº 16	0	5	CUMPLE		

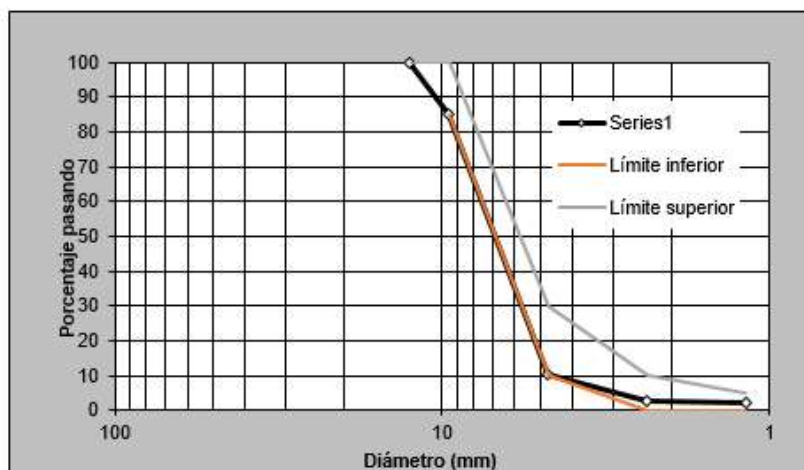


Figura 36. Curva granulométrica agregado grueso.

En el cuadro 9 se muestra la densidad masiva del agregado grueso.

Cuadro 9. Peso unitario, agregado grueso.

Recipiente	PU-007	$W_{rec.} (g)$	1730.2	$V_{rec.} (l)$	2.8355
N	Pesos		Densidades		
	Suelto	Envarillado	Suelto	Envarillado	
1	5712.4	6134.5	1404	1553	
2	5729.9	6098.1	1411	1540	
3	5728.5	6110.0	1410	1545	
		Promedio	1408	1546	

En el cuadro 10 se detalla la gravedad específica del agregado grueso.

Cuadro 10. Gravedad específica, agregado grueso.

Peso seco	3772.3	g
Peso SSS	3843.3	g
Peso sumergido	2408.4	g
Densidad relativa (s) G_b_s	2.63	
Densidad relativa (sss) G_b_{SSS}	2.68	
Densidad relativa aparente	2.77	
Absorción	1.88	%

16.3 Concreto

El concreto utilizado en las columnas y vigas coronas de los muros fue realizado en sitio con una resistencia teórica a los 28 días de 210 kg/cm^2 . Se realizaron pruebas a cilindros del material de acuerdo con la norma ASTM C39 (ref). En los cuadros 11, 12 y 13 se muestran los resultados obtenidos.

Cuadro 11. Resistencia a la compresión de cilindros de vigas y columnas a los 28 días, paredes patrón.

Cilindro	Resistencia (kg/cm^2)
1	292
2	285
3	249
Promedio	275

Cuadro 12. Resistencia a la compresión de cilindros de vigas y columnas a los 28 días, paredes precargadas y reparadas 1.

Cilindro	Resistencia (kg/cm^2)
1	224
2	226
Promedio	225

Cuadro 13. Resistencia a la compresión de cilindros de vigas y columnas a los 28 días, paredes precargadas y reparadas 2.

Cilindro	Resistencia (kg/cm^2)
1	220
2	223
3	226
Promedio	223

En el caso de las fundaciones de las paredes patrón se utilizó concreto premezclado con una resistencia esperada a la compresión a los 28 días de 350 kg/cm^2 , a pesar de que el diseño era en base a 280 kg/cm^2 , esto por cuestiones de coordinación con el proveedor del concreto.

Para las paredes precargadas y reparadas 1 y 2 se utilizó concreto con resistencia esperada a los 28 días de 280 kg/cm^2 . A continuación, se muestran los resultados de los cilindros de concreto en los cuadros 14, 15 y 16.

Cuadro 14. Resistencia a la compresión de cilindros de fundaciones a los 28 días, paredes patrón.

Cilindro	Resistencia (kg/cm^2)
1	461
2	426
3	469
Promedio	452

Cuadro 15. Resistencia a la compresión de cilindros de fundaciones a los 28 días, paredes precargadas y reparadas 1.

Cilindro	Resistencia (kg/cm^2)
1	315
2	298
3	293
4	287
Promedio	298

Cuadro 16. Resistencia a la compresión de cilindros de fundaciones a los 28 días, paredes precargadas y reparadas 2.

Cilindro	Resistencia (kg/cm^2)
1	343
2	293
3	319
4	351
Promedio	327

16.4 Acero de refuerzo

Se realizaron pruebas a las varillas de cada grado para conocer su esfuerzo de fluencia, esfuerzo último, deformación unitaria de fluencia y última y módulo de elasticidad. En el cuadro 17 se muestra un cuadro con los resultados obtenidos de las varillas.

Cuadro 17. Propiedades mecánicas del acero empleado en la construcción de los muros.

Propiedad	No 3 (Grado 40)	No 4 (Grado 60)	No 5 (Grado 60)	No 6 (Grado 60)
Esfuerzo de fluencia (kg/cm ²)	3412	4585	4529	4901
Esfuerzo último (kg/cm ²)	5289	6272	6246	7749
Deformación de fluencia (mm / mm)	0.002	0.003	0.003	0.003
Deformación última (mm / mm)	0.186	0.143	0.121	0.175
Módulo de Elasticidad (kg/cm ²)	1.65 x 10 ⁶	1.69 x 10 ⁶	1.68 x 10 ⁶	1.47 x 10 ⁶

En la figura 37 se detalla un gráfico tomado de manera aleatoria a manera de ejemplo de una de las varillas falladas, en este caso una varilla #4.

**Figura 37. Curva esfuerzo deformación de una varilla No 4.**

16.5 Bloques de mampostería

Los bloques utilizados para la construcción de los muros fueron los bloques estándar N-15. En la figura 38 se muestra un esquema general de las dimensiones de los bloques para

luego observar en el cuadro 18 el resumen de las medidas tomadas en bloques seleccionados al azar.

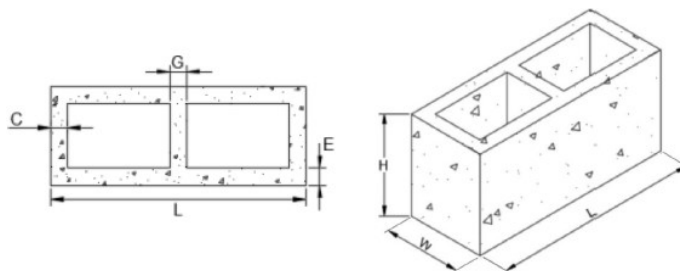


Figura 38. Esquema general de la geometría de los bloques

Cuadro 18. Propiedades geométricas de los bloques de mampostería.

Dimensión	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Bloque 4	Promedio
L (mm)	390	390	390	389	390
W (mm)	151	151	150	150	151
H (mm)	187	188	188	190	188
C (mm)	28	27	26	27	27
G (mm)	33	34	32	34	33
E (mm)	29	29	29	28	29
Área Neta (cm ²)	310	306	304	303	306

Por otro lado, de acuerdo con el CSCR 2010-14 (ref), los bloques clase A deben tener al menos una resistencia de 133 kg/cm², por lo cual se realizaron ensayos y se obtuvieron los siguientes resultados:

Cuadro 19. Resistencia de los bloques de mampostería.

Bloque	Carga (KN)	Resistencia kg/cm ²
1	881	294
2	915	305
3	883	295
Promedio	893	298

16.6 Concreto de relleno

El concreto de relleno utilizado para la construcción de los muros fue preempacado, especialmente utilizado para los colados en altura. De acuerdo con el CSCR 2010-14 (ref) la resistencia del concreto de relleno clase A debe ser al menos de 175 kg/cm^2 . En el cuadro 20 se muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con la norma ASTM C1019 (ref), la cual indica que se debe seleccionar un lugar donde los prismas no vayan a ser movidos durante 48 horas posteriores al colado (un lugar que no se vea sometido a vibración), además se deben colocar los bloques según se muestra en la siguiente figura 39.



Figura 39. Posición de bloques de mampostería para pruebas de concreto de relleno.

Además los prismas a fabricar deben tener una sección lo más cuadrada posible, un ancho que debe estar entre 3 " y 3.75" (76 mm a 95 mm) y la altura debe ser al menos el doble del ancho, colocar papel periódico en las superficies de los bloques que van a estar en contacto con el concreto, se recomienda hacer "cajas" de papel periódico con las medidas correspondientes, asegurarse que los bloques no se desplacen entre sí al momento de colar y posteriormente colocar un plástico sobre los prismas para evitar pérdida de humedad, desmoldar los prismas entre 24 y 48 horas después de moldear, colocar los especímenes en la cámara húmeda no más de 30 minutos después de haber desmoldado y por último mantener húmedo el espécimen hasta la fecha de falla.

Cuadro 20. Resistencia de prismas de concreto de relleno.

Bloque	Carga (KN)	Resistencia kg/cm^2
1	196	202
2	215	207
3	196	175
4	208	203
Promedio	204	197

16.7 Mortero de pega

El mortero utilizado para la construcción de los muros de esta investigación fue preempacado, especial para la pega de bloques de compresión moderada, de acuerdo con el CSCR 2010-14 (ref) el mortero clase C debe poseer una resistencia a la compresión de 53 kg/cm^2 , realizando pruebas a 6 cubos se obtuvo una resistencia promedio a la compresión de 61 kg/cm^2 .

16.8 Resistencia de la Mampostería

Para obtener los resultados de resistencia de los prismas de mampostería se construyeron 6 primas con altura de 2 bloques, de los cuales 3 eran vacíos y 3 rellenos. De acuerdo con el CSCR 2010-14 (ref) la mampostería clase A debe tener una resistencia mínima a la compresión de 100 kg/cm^2 . En el cuadro 21 se muestran los resultados obtenidos.

Cuadro 21. Resistencia de los prismas de mampostería medidos a los 28 días.

Prisma	Carga (KN)	Área	Resistencia (kg/cm^2)
Rellenos			
1	751	588	138
2	845	587	155
3	679	587	124
Vacíos			
4	714	306	252
5	598	303	212
6	850	303	302
Promedio	740	446	197

16.9 Mortero lanzado de reparación

Para la reparación de las paredes se utilizó mortero proyectable con una resistencia a la compresión a los 28 días de 210 kg/cm².

Cuadro 22. Resistencia de cubos de mortero.

No de Cubo	Resistencia a los 7 días	
	Pared h/l = 1	Pared h/l = 0.5
	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)
1	237	143
2	179	171
3	232	245
Promedio	216	186

17 Procedimientos constructivos

17.1 Procedimiento constructivo de las paredes

El proceso constructivo de los muros se llevó a cabo en las instalaciones del LanammeUCR y fueron construidos en 3 etapas: Primero las paredes patrón de ambas relaciones de aspecto ($h/l = 0.5$ y $h/l = 1$), segundo las paredes precargadas 1, que posteriormente fueron reparadas y falladas y por último las paredes precargadas 2 las cuales posteriormente serían reparadas y cargadas de nuevo hasta la falla, en estos dos últimos casos también para $h/l = 0.5$ y $h/l = 1$.

La mano de obra fue contratada a un operario y un ayudante que trabajan en construcción de mampostería.

El proceso constructivo consistió en las siguientes actividades:

1. Cimentaciones.

Se confeccionaron los aros de cada una de las fundaciones y sus respectivas varillas longitudinales para luego ser armadas en la zona correspondiente del laboratorio. En la figura 40 se observa el armado de las fundaciones.



Figura 40. Confección de armadura de fundación en patio del piso fuerte.

Para lograr anclar la fundación al piso fuerte, fue necesario la colocación de ductos que permitan introducir los pernos posteriormente a través de la cimentación; para esto se debe transportar la armadura al piso fuerte y colocar los ductos de acuerdo con la modulación del piso fuerte. La figura 41 muestra el detalle de la colocación de los ductos.



Figura 41. Colocación de ductos en fundaciones.

Posteriormente, se coloca la formaleta y las varillas verticales en el muro de mampostería y las columnas.

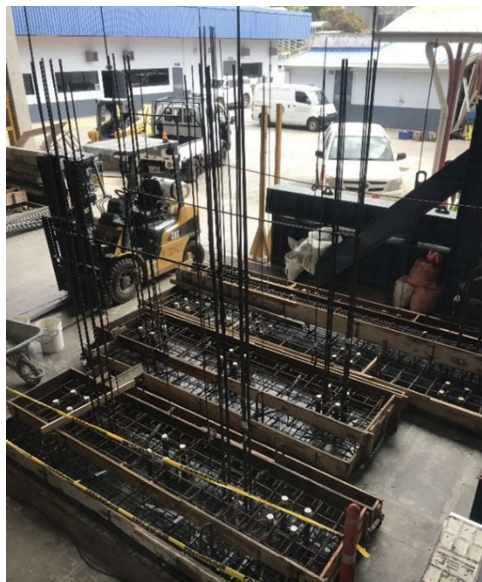


Figura 42. Encofrado y colocación de varillas verticales de paño de mampostería y columnas.

A continuación, se colocan las galgas extensométricas en las varillas de acuerdo con el plano de instrumentación y luego se procede con el colado de las fundaciones. La figura 43 muestra la colocación de las galgas extensométricas.



Figura 43. Colocación de galgas extensométricas en varillas.

Finalmente se realiza el colado de las cimentaciones, el cual se realiza con concreto premezclado. La figura 44 muestra el colado de las fundaciones.



Figura 44. Colado de fundaciones.

2. Levantamiento de los muros de mampostería.

Se utilizó la técnica de ir levantando los muros en etapas de filas (de cuatro en cuatro) para evitar la desnivelación del muro. Además, durante este

proceso se iba colocando el acero horizontal de los muros de acuerdo con los planos. En la figura 45 se observa el inicio y el final del levantamiento del paño de mampostería.

Levantamiento de pared de mampostería.



Figura 45. Levantamiento de paño de mampostería.

3. Relleno de celdas con concreto autocompactable.

Se colocó con una bomba. Para este método se realizó un colado de altura tal y como se muestra en la figura 46.



Figura 46. Colado de celdas de relleno.

4. Armado de las columnas y la viga corona.

Se realiza la colocación de los aros en las columnas, varillas longitudinales en la viga corona y sus respectivos aros de acuerdo a las indicaciones de los planos.



Figura 47. Construcción de columnas y viga corona.

5. Colocación de formaleta en columnas y viga corona.

Se colocan las tablas de formaleta y alfajillas de manera que se respeten las dimensiones de los elementos de acuerdo con lo indicado a planos y asegurándose que cuando se realice el colado del concreto se mantenga dentro. Ver figura 48.



Figura 48. Encofrado de columnas y viga corona.

6. Colado de columnas y viga corona.

Se realiza con concreto hecho en sitio de acuerdo con el diseño de mezcla realizado para una resistencia a la compresión del concreto de 210 kg/cm^2 a los 28 días. En la figura 49 se observa el concreto fresco y el concreto endurecido.



Figura 49. Colado de columnas y viga corona.

17.2 Procedimiento constructivo del sistema de reparación

Para la reparación de las paredes de mampostería que fueron sometidas a precarga se realizaron los siguientes pasos constructivos:

1. Colocación de la malla electrosoldada calibre 4.11 mm @15 cm en toda el área de la pared, incluyendo columnas y viga corona. Ver figura 50.

Malla electrosoldada colocada en pared de mampostería.



Figura 50. Colocación de malla electrosoldada en la pared.

2. Perforación de agujeros. Se tuvo que realizar con una broca de $\frac{1}{2}$ " , pues el orificio donde se coloca el anclaje debe tener un diámetro 6 mm ($\frac{1}{4}$ ") mayor que el diámetro del perno o varilla que se anclará. En este caso pines de varilla #3; los cuales fueron colocados a cada 60 cm horizontalmente (celdas rellenas de concreto de relleno) y a cada 40 cm verticalmente. La profundidad de la perforación es de 12 cm para alcanzar la pared interior de los bloques de concreto (15 x 20 x 40 cm). Ver figura 51.



Figura 51. Perforación de agujeros.

3. Inyección de gel epóxico para anclajes y fijaciones en concreto y mampostería. Se debe haber soplado el agujero y posteriormente colocar la punta de la boquilla de la unidad del cartucho en el fondo de la perforación y dispensar el epóxico de adentro hacia fuera, en cantidad suficiente observando que salga del orificio el producto. Se debe verificar constantemente que la mezcla que está saliendo de la boquilla sea homogénea (sin vetas) y que mantenga el mismo tono de gris. Ver figura 52.

Inyección de gel epóxico en los agujeros.



Figura 52. Inyección de gel epóxico.

4. Introducción de pines de varilla No 3. Se introduce con un movimiento giratorio hasta ubicarlo en su posición dentro de las perforaciones que contienen el gel epóxico. Ver figura 53.

Pines de varilla #3 ubicados en perforaciones con gel epóxico.

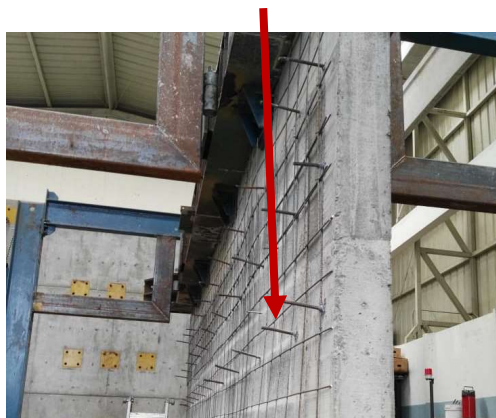


Figura 53. Colocación de pines de varilla No 3.

5. Se debe esperar 24 horas para el doblado de los pines de varilla No 3 de tal manera que la extensión del pin sea de 6.5 cm como mínimo, o bien, introducir el pin doblado dentro de la perforación. En el caso de esta investigación, solo en la primera pared reparada de $h/l = 0.5$ se doblaron después de su colocación, en la segunda pared y en adelante se introdujeron doblados. Ver figura 54.

Malla electrosoldada separada a 2.5 cm de la pared de mampostería.

Extensión de 6.5 cm de pines de varilla #3.

Pines de varilla #3 doblados.



Figura 54. Doblado de pines de varilla No 3.

El pin se dobla de manera que el recubrimiento interno entre la cara del bloque y la cara interna del gancho del pin sea de 2.5 cm. Por otro lado, el recubrimiento de la cara externa del gancho del pin a la capa final del mortero es de 1.5 cm, para un total de 5 cm de mortero. Ver figura 55.

Separación de 2.5 cm para
colocación de mortero.



Figura 55. Espesor del recubrimiento con mortero.

6. Colocación del mortero lanzado. Para esto se debe instalar las guías o maestras previamente, se coloca la boquilla lanzadora de mortero perpendicularmente a la superficie a repellar, a una distancia de 10 cm a 15 cm. Se proyecta entre las maestras con un movimiento horizontal en forma ascendente hasta lograr un espesor de 25 mm. Como la instalación lleva malla electrosoldada, se cubre primero con mortero el espacio entre la superficie y la malla y se debe esperar 24 horas a que obtenga suficiente dureza antes de colocar la siguiente capa. Ver figura 56.

Lanzado de la primera capa de mortero (2.5 cm), entre la pared de mampostería y la malla electrosoldada.

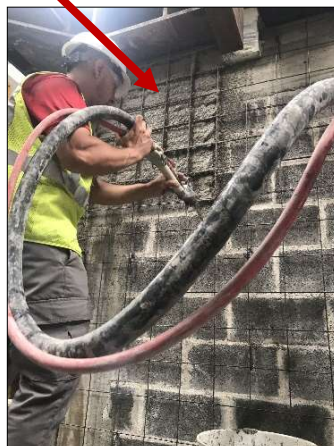


Figura 56. Lanzado de primera capa de mortero (25 mm).

7. Por último, 24 horas después se lanza la segunda capa de mortero de 25 mm y se nivela con un codal mientras el mortero esté trabajable. Una vez que esté ligeramente seco al tacto, se realiza el acabado final. Ver figura 57.

Primera capa de mortero colocada (25 mm de espesor) entre la pared de mampostería y la malla

Segunda capa de mortero colocada (25 mm de espesor).

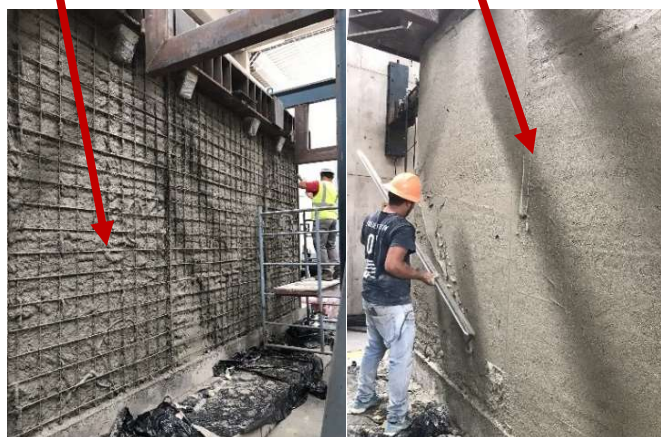


Figura 57. Lanzado de segunda capa de mortero (25 mm).

8. Se debe empezar el curado con agua a partir del día siguiente después de la colocación y extenderlo por 72 horas.

En la figura 58 se muestra el detalle del espécimen reparado.

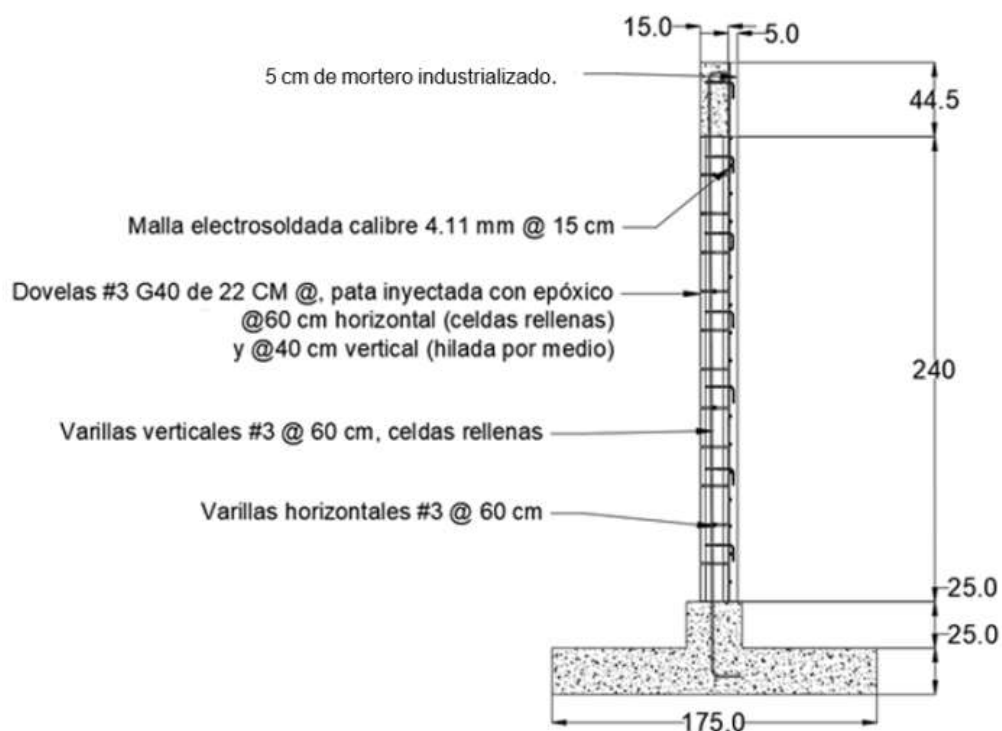


Figura 58. Detalle de la reparación de las paredes de mampostería.

El costo por m^2 de reparación con este sistema es de \$34,530.

18 Resultados

18.1 Primer grupo, paredes patrón

Este primer grupo de paredes patrón se refiere a los muros que fueron cargados y fallados hasta su colapso, con el fin de obtener un parámetro de la carga que son capaces de resistir.

18.1.1 Muro $h/l = 0.5$

A continuación, se presentan los lazos histeréticos, resumen de resultados de cargas y desplazamientos asociados, curvas de energía elastoplásticas equivalentes y fotografías de las fallas.

Durante el proceso de carga de este muro, no fue necesario detenerse para ajustar pernos de amarre al piso fuerte, por lo que fue ininterrumpido. Por otro lado, se percibió que los pistones hidráulicos poseían un ángulo muy pequeño con la horizontal, sin embargo, se realizó el cálculo para realizar la corrección obteniéndose como resultado 0.997 por lo cual se considera despreciable.

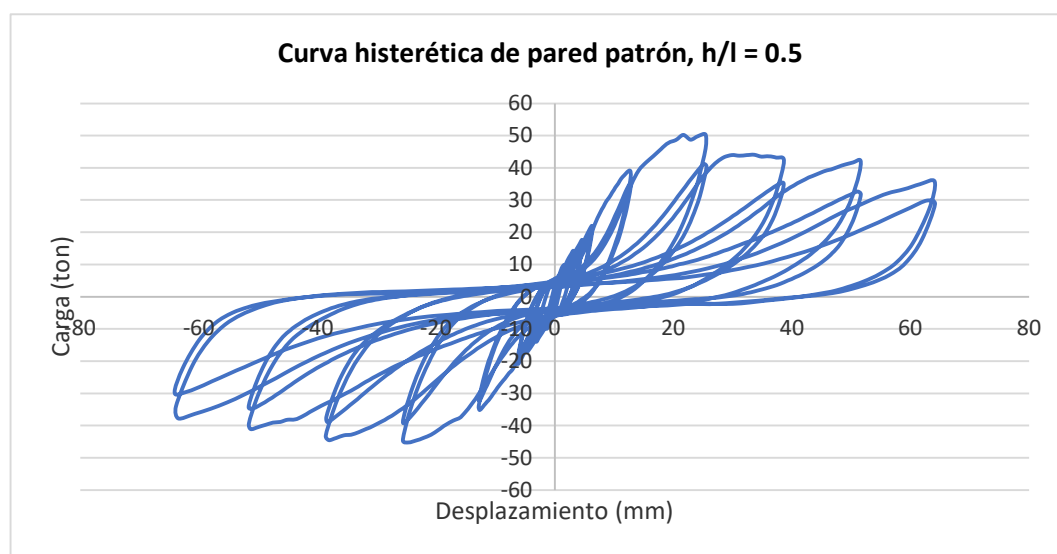


Figura 59. Curva histéresis del muro $h/l = 0.5$, pared patrón.

Como se puede observar, la pendiente de los lazos decrece conforme se incrementa el valor de la deformación, lo cual es parte de la degradación de la rigidez del muro. Es importante

resaltar que la reversión de la carga produce la apertura de grietas en la zona del elemento en tracción antes de que las grietas producidas en la fase de carga anterior se cierren, sin embargo, las grietas durante la recarga en la zona de compresión se cierran gradualmente produciendo una reactivación en la resistencia del concreto (endurecimiento de la curva). Por último, la curva de recarga comienza a suavizarse de nuevo debido a la cedencia del acero.

En las figuras 60 y 61 se muestran las envolventes positiva y negativa junto con la curva de energía elasto-plástica equivalente (EEEEP) y en el cuadro 23 el resumen de los valores obtenidos de carga, desplazamiento, rigidez elástica y ductilidad calculados a partir de las curvas generadas para ambas direcciones de desplazamiento. Se aclara que en este y todos los casos el desplazamiento máximo está asociado con la fuerza máxima alcanzada por el muro y el desplazamiento último es aquel que está vinculado con la fuerza última (80 % de la fuerza máxima).

Cuadro 23. Resultados generales del muro $h/l = 0.5$, pared patrón.

Característica	Sentido positivo	Sentido negativo
Fuerza fluencia (ton)	44.88	41.14
Desplazamiento fluencia (mm)	12.27	11.39
Fuerza máxima (ton)	50.28	45.13
Desplazamiento máximo (mm)	25.41	24.65
Fuerza última (ton)	40.22	36.10
Desplazamiento último (mm)	57.00	64.50
Ductilidad	4.64	5.66
Rigidez (ton/mm)	3.66	3.61

El punto máximo de la curva EEEP, corresponde al valor de la carga que provoca la cedencia. Para el movimiento del gato en sentido positivo fue de 44.88 toneladas, con un desplazamiento asociado de 12.27 mm aproximadamente, por otro lado la pendiente de la curva EEEP es la pendiente calculada con base en el origen y en el punto que corresponde al 40% de la carga máxima del muro que corresponde a la rigidez elástica de cortante que

fue de 3.66 ton/mm, por su parte, la porción negativa obtuvo una carga de cedencia de 41.14 toneladas a un desplazamiento de 11.39 mm y un valor de rigidez de 3.61 ton/mm.

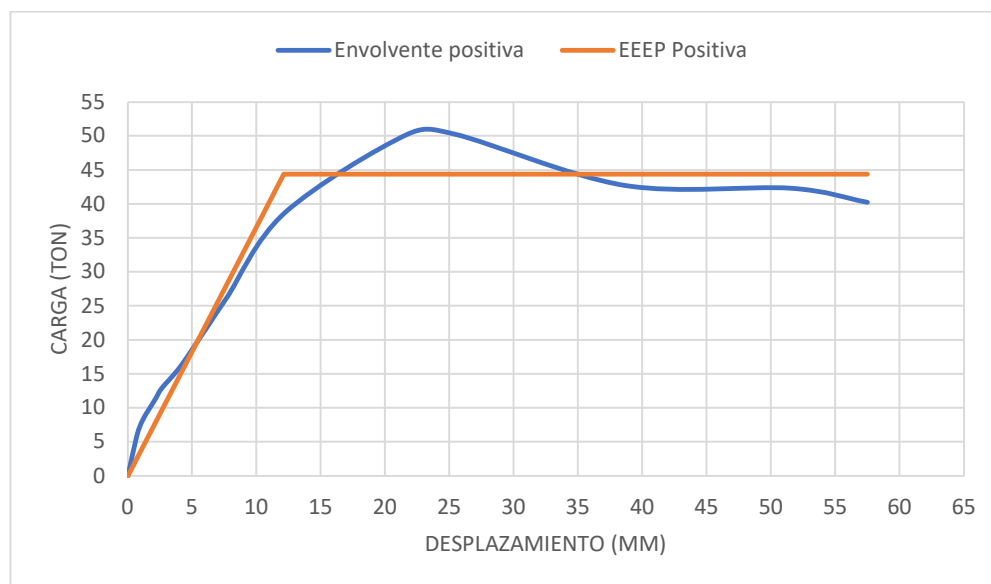


Figura 60. Curva envolvente y EEEP positiva del muro $h/l = 0.5$, pared patrón.

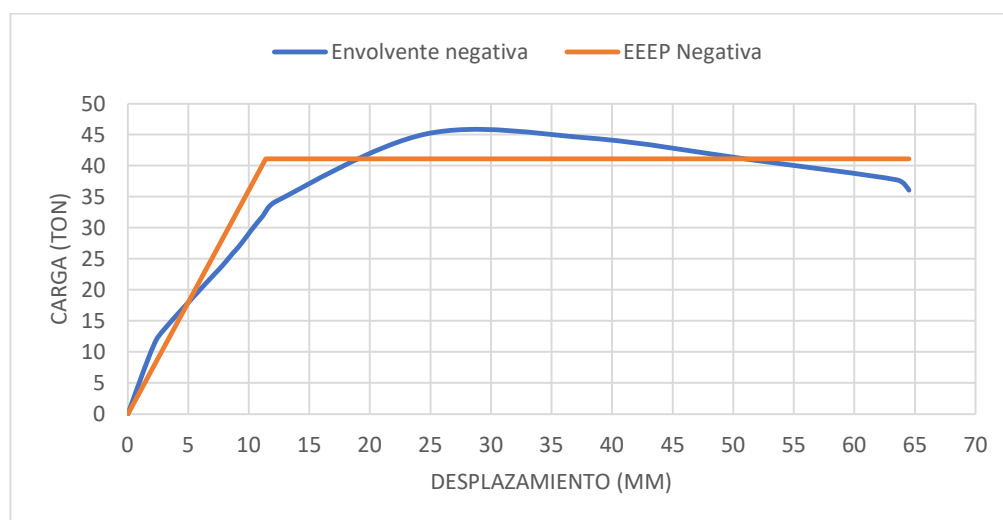


Figura 61. Curva envolvente y EEEP negativa del muro $h/l = 0.5$, pared patrón.

En la porción positiva de la curva histerética, el valor de carga máximo fue de 58.28 toneladas con un desplazamiento asociado de 25.41 mm, posteriormente el muro perdió resistencia hasta alcanzar el esfuerzo último, el cual de acuerdo a la norma utilizada corresponde al 80% de la carga máxima. Este valor fue de 40.22 toneladas asociado a un desplazamiento último de 57 mm. La ductilidad alcanzada en el caso positivo fue de 4.64, que corresponde a la razón entre el desplazamiento último y el de cedencia.

En el caso de la porción negativa de la curva histerética, el valor de carga máximo fue de 41.14 toneladas con un desplazamiento asociado de 24.65 mm, posteriormente el muro perdió resistencia hasta alcanzar el esfuerzo último, el cual de acuerdo a la norma utilizada corresponde al 80% de la carga máxima. Este valor fue de 36.10 toneladas asociado a un desplazamiento último de 64.5 mm. La ductilidad alcanzada en el caso negativo fue de 5.66, que como ya se mencionó corresponde a la razón entre el desplazamiento último y el de cedencia.

Las primeras grietas del muro se presentaron en la esquina superior, cerca del punto de aplicación de la carga. Estas se dieron en el paño de mampostería y en la viga corona, con orientación inclinada. Se observaron grietas en varias partes del paño de mampostería y deslizamiento horizontal en las hiladas No 11 y 12.

Además, se presentaron grietas en los bloques de mampostería y desprendimientos de concreto en los nudos viga-columna. Ver figura 62.



Figura 62. Muro fallado $h/l = 0.5$, pared patrón.

Por último, se pudo observar que, de las barras verticales instrumentadas en las columnas, 4 llegaron al esfuerzo de cedencia. Cabe destacar que hubo galgas con datos fuera de rango, las cuales registraron datos desde el inicio de la prueba, sin embargo, estas carecían de sentido ya que eran registros con valores en órdenes de magnitud superiores.

Cuadro 24. Resultados de galgas extensométricas, pared patrón $h/l = 0.5$

No de Galga	Detalle	Estado
Galga 1	Varilla vertical en columna 1, sitio inferior	Presentó fluencia
Galga 2	Varilla vertical en columna 1, a nivel de cuarta hilada	No fluyó
Galga 3	Varilla vertical en columna 2, a nivel de cuarta hilada	Presentó fluencia
Galga 4	Varilla vertical en columna 2, sitio 2	Presentó fluencia
Galga 5	Varilla vertical en paño de mampostería en primer celda	Presentó fluencia
Galga 6	Varilla vertical en paño de mampostería en tercer celda	Fuera de rango
Galga 7	Varilla horizontal en hilada 8	Fuera de rango

18.1.2 Muro $h/l = 1$

El muro patrón con relación de aspecto $h/l = 1$, presentó su primera grieta en el paño de mampostería y en el nudo viga-columna con forma de escalerilla a lo largo de la diagonal, iniciando cerca del sitio de carga y finalizando en la base. Durante todo el proceso de carga se presentaron grietas diagonales en el paño, escalerillas a lo largo del paño y grietas en la base de las columnas. Además, se presentó un deslizamiento horizontal entre la hilera No 11 y 12 provocando también desmoronamiento de los bloques de la última fila.

En la figura 63 se muestra la curva histórica del muro patrón $h/l = 1$.

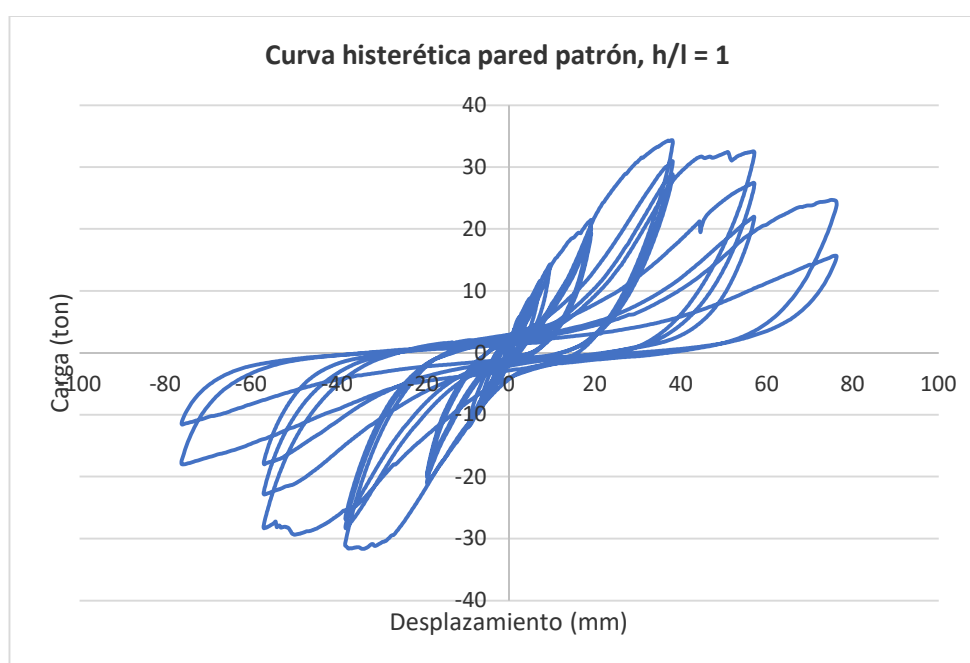


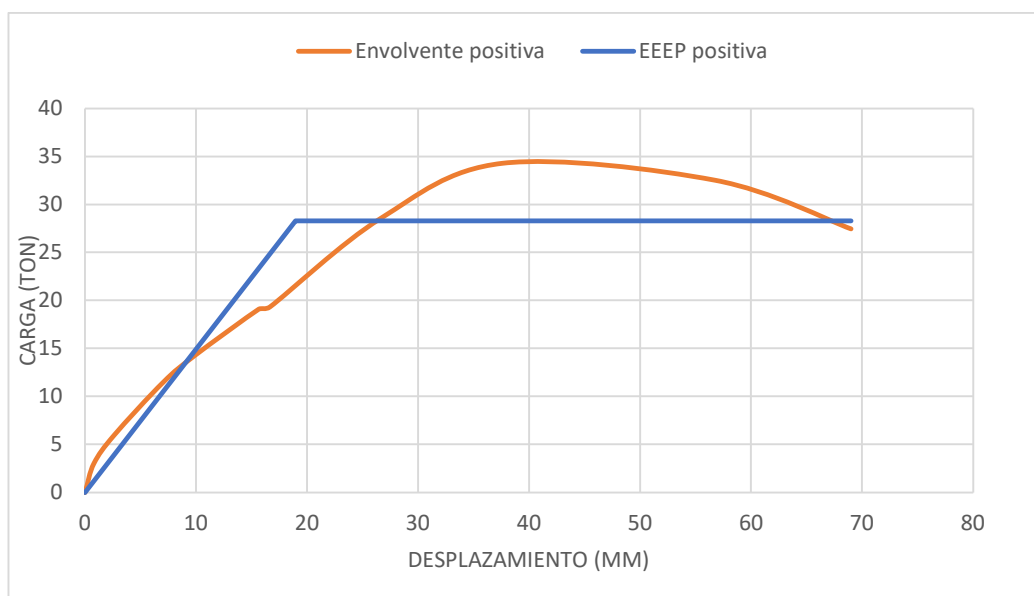
Figura 63. Curva histéresis del muro $h/l = 1$, pared patrón.

Además, en las figuras 64 y 65 se muestran las envolventes positivas y negativas junto con la curva de energía elastoplástica equivalente (EEEP) y en el cuadro 25 el resumen de los valores obtenidos de carga, desplazamiento, rigidez elástica y ductilidad calculados a partir de las curvas generadas para ambas direcciones de desplazamiento.

Cuadro 25. Resultados generales del muro $h/l = 1$, pared patrón.

Característica	Sentido positivo	Sentido negativo
Fuerza fluencia (ton)	28.30	29.04
Desplazamiento fluencia (mm)	18.97	24.12
Fuerza máxima (ton)	34.32	31.61
Desplazamiento máximo (mm)	37.61	33.65
Fuerza última (ton)	27.45	25.29
Desplazamiento último (mm)	69.00	64.00
Ductilidad	3.64	2.65
Rigidez (ton/mm)	1.49	1.20

En este caso, el valor de la cedencia para el movimiento del gato en sentido positivo fue de 28.30 toneladas, con un desplazamiento asociado de 18.97 mm aproximadamente, por otro lado, la rigidez elástica de cortante fue de 1.49 ton/mm, por su parte, la porción negativa obtuvo una carga de cedencia de 29.04 toneladas a un desplazamiento de 24.12 mm y un valor de rigidez de 1.2 ton/mm.

Figura 64. Curva envolvente y EEEP positiva del muro $h/l = 1$, pared patrón.

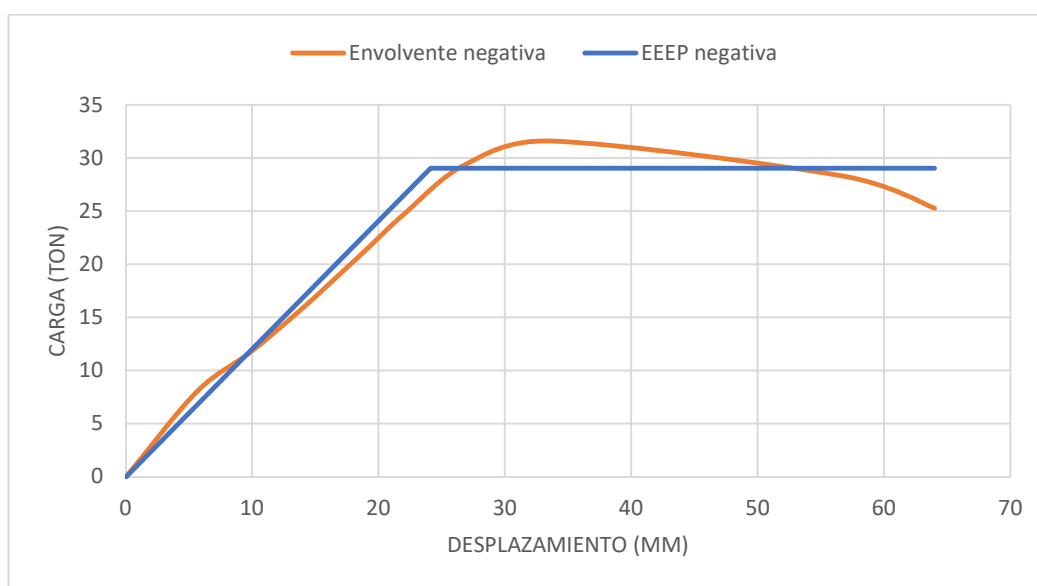


Figura 65. Curva envolvente y EEEP negativa del muro $h/l = 1$, pared patrón.

En la porción positiva de la curva histerética, el valor de carga máximo fue de 34.32 toneladas con un desplazamiento asociado de 37.61 mm, posteriormente el muro perdió resistencia hasta alcanzar el esfuerzo último de 27.45 toneladas asociado a un desplazamiento último de 69 mm. La ductilidad alcanzada en el caso positivo fue de 3.64, que corresponde a la razón entre el desplazamiento último y el de cedencia.

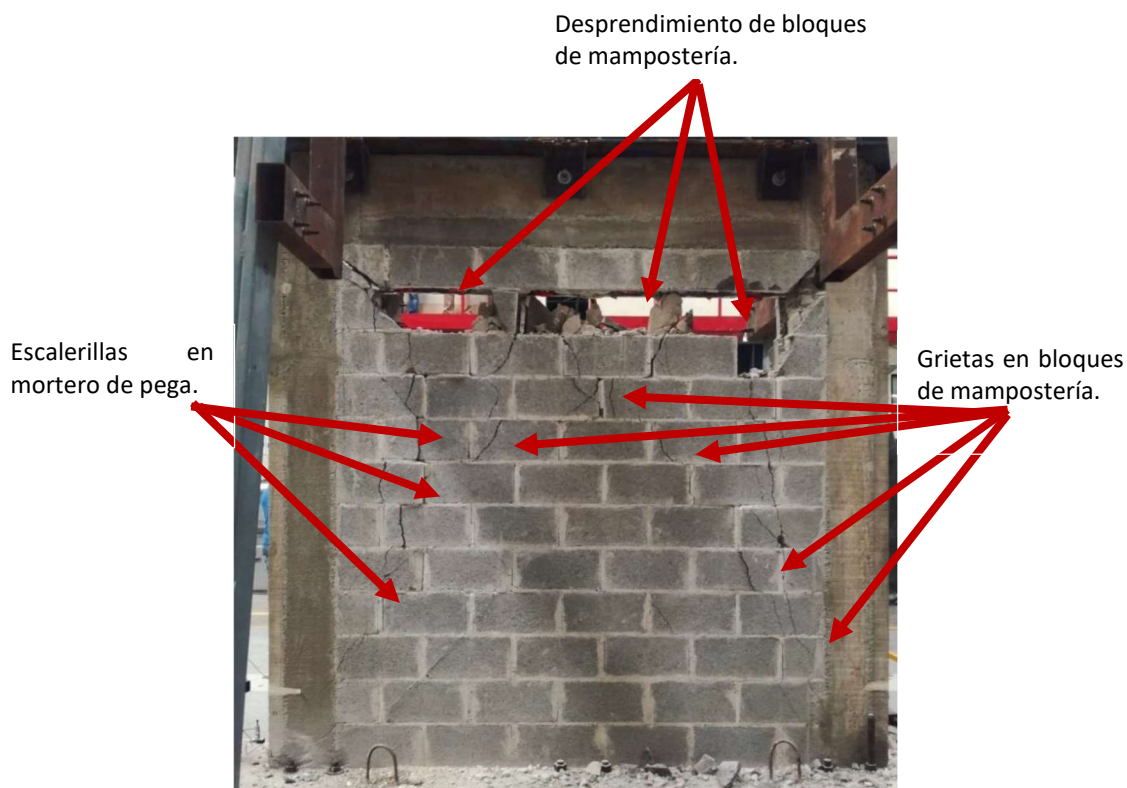
En el caso de la porción negativa de la curva histerética, el valor de carga máximo fue de 31.61 toneladas con un desplazamiento asociado de 33.65 mm, posteriormente el muro perdió resistencia hasta alcanzar el esfuerzo último de 25.29 toneladas asociado a un desplazamiento último de 64 mm. La ductilidad alcanzada en el caso negativo fue de 2.65, que como ya se mencionó corresponde a la razón entre el desplazamiento último y el de cedencia.

En el caso de las galgas se pudo observar que únicamente una galga no presentó fluencia, ver cuadro 26.

Cuadro 26. Resultados de galgas extensométricas, pared patrón h/l = 1.

No de Galga	Detalle	Estado
Galga 1	Varilla vertical en columna 2, sitio inferior	Presentó fluencia
Galga 2	Varilla vertical en columna 2, a nivel de cuarta hilada	Presentó fluencia
Galga 3	Varilla vertical en columna 1, a nivel de cuarta hilada	No presentó fluencia
Galga 4	Varilla vertical en paño de mampostería en primer celda (lado de columna 2)	Presentó fluencia
Galga 5	Varilla vertical en columna 1, sitio inferior	Presentó fluencia
Galga 6	Varilla vertical en paño de mampostería en primer celda que corta grieta diagonal (aprox segunda celda izquierda-derecha)	Presentó fluencia
Galga 7	Varilla horizontal en hilada 8	Presentó fluencia

Finalmente, en la figura 66 se detalla el estado final del muro, el cual como se mencionó anteriormente presentó grietas diagonales, escalerillas y desprendimientos de bloques principalmente en la penúltima hilada.

**Figura 66. Muro fallado h/l = 1, pared patrón.**

18.2 Segundo grupo, paredes precargadas 1

Se procedió a precargar el segundo grupo de muros con el fin de causarles cierto nivel de daño y proceder a repararlos con el sistema de reforzamiento de malla electrosoldada y mortero lanzado.

18.2.1 Muro $h/l = 0.5$

A continuación, se muestra la curva histerética del muro $h/l = 0.5$ precargado. La carga máxima aplicada en el sentido positivo fue de 49.48 toneladas asociado a un desplazamiento de 19.26 mm que corresponde a un 98.4% de la carga máxima de la pared patrón asociada.

Por otro lado, la carga máxima aplicada en el sentido negativo fue de 37.10 toneladas asociado a un desplazamiento de 28.93 mm que corresponde a un 82.2% de la carga máxima de la pared patrón asociada.

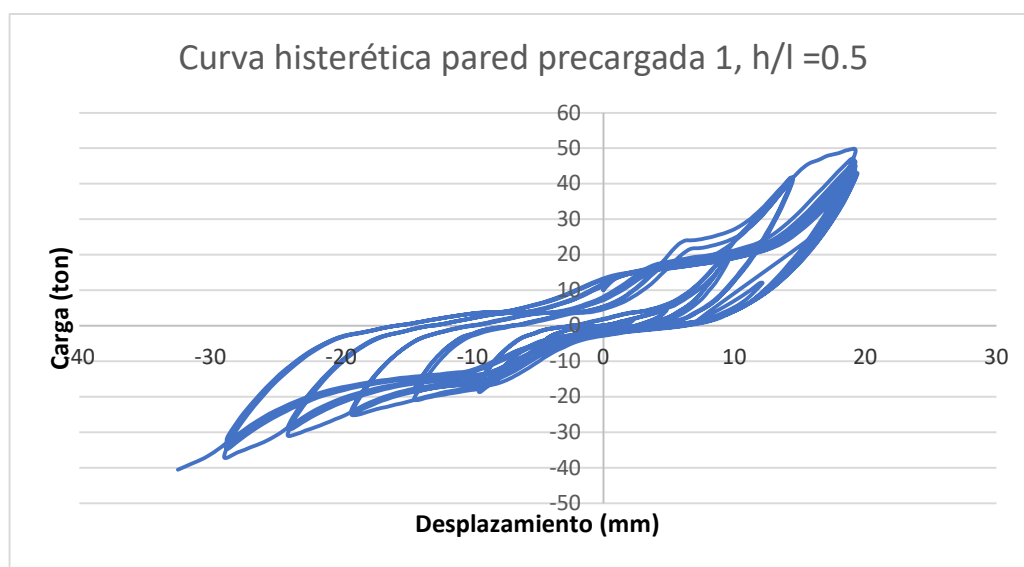


Figura 67. Curva histórica del muro $h/l = 0.5$, pared precargada 1.

En el cuadro 27 se muestran los valores de carga aplicados en ambos sentidos.

Cuadro 27. Resultados generales del muro $h/l = 0.5$, pared precargada 1.

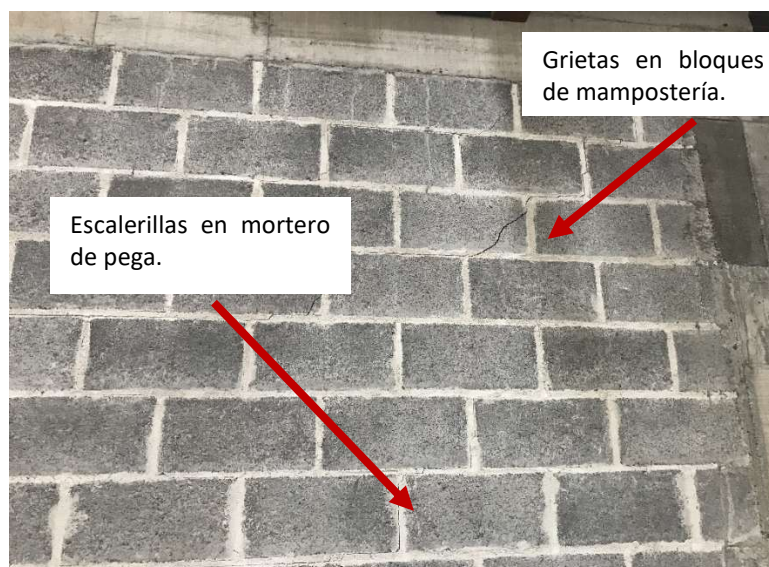
Característica	Sentido positivo	Sentido negativo
Fuerza máxima (ton)	49.48	37.10
Desplazamiento máximo (mm)	19.26	28.93

En el caso de las galgas, ninguna de ellas presentó fluencia durante la precarga.

Cuadro 28. Resultados de galgas extensométricas, pared precargada 1 $h/l = 0.5$.

No de Galga	Detalle	Estado
Galga 1	Varilla vertical en columna 2, sitio inferior	No presentó fluencia
Galga 2	Varilla vertical en paño de mampostería en primer celda (lado de columna 2)	No presentó fluencia
Galga 3	Varilla horizontal en hilada 8	No presentó fluencia
Galga 4	Varilla vertical en paño de mampostería en primer celda (lado de columna 1)	No presentó fluencia
Galga 5	Varilla vertical en columna 1, sitio inferior	No presentó fluencia

En la figura 68 y 69 se pueden observar los daños ocasionados en el paño de mampostería al precargar el muro; escalerillas en las sisas y grietas en diagonal a través de los bloques de mampostería con tamaños entre los 2 y 2.5 mm.

**Figura 68. Agrietamiento, pared precargada 1 $h/l = 0.5$.**

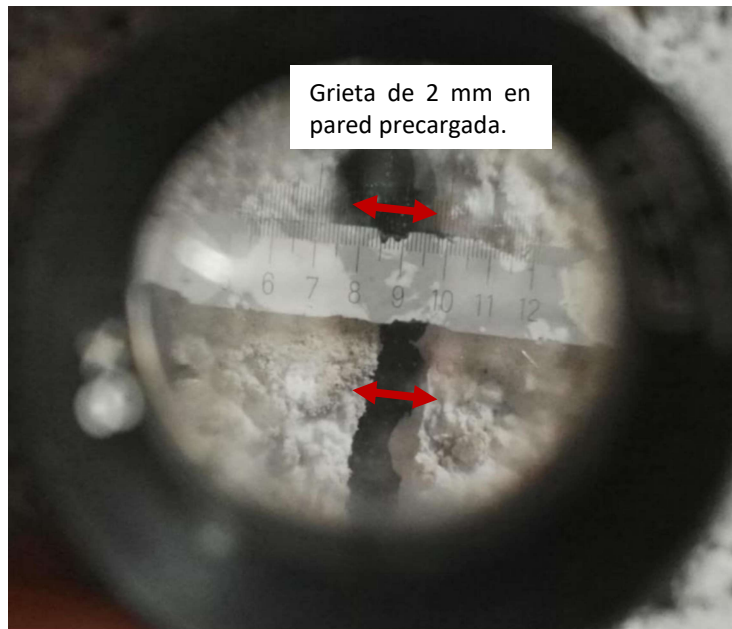


Figura 69. Abertura de grietas en mm, pared precargada 1 $h/l = 0.5$.

18.2.2 Muro $h/l = 1$

A continuación, se muestra la curva histerética del segundo grupo de paredes para $h/l = 1$, las cuales fueron precargadas para ser dañadas y posteriormente ser reforzadas y falladas.

La carga máxima aplicada en el sentido positivo fue de 33.72 toneladas asociada a un desplazamiento de 31.80 mm que corresponde a un 98.2% de la carga máxima de la pared patrón asociada.

Por otro lado, la carga máxima aplicada en el sentido negativo fue de 30.69 toneladas asociado a un desplazamiento de 31.78 mm que corresponde a un 97.08 % de la carga máxima de la pared patrón asociada.

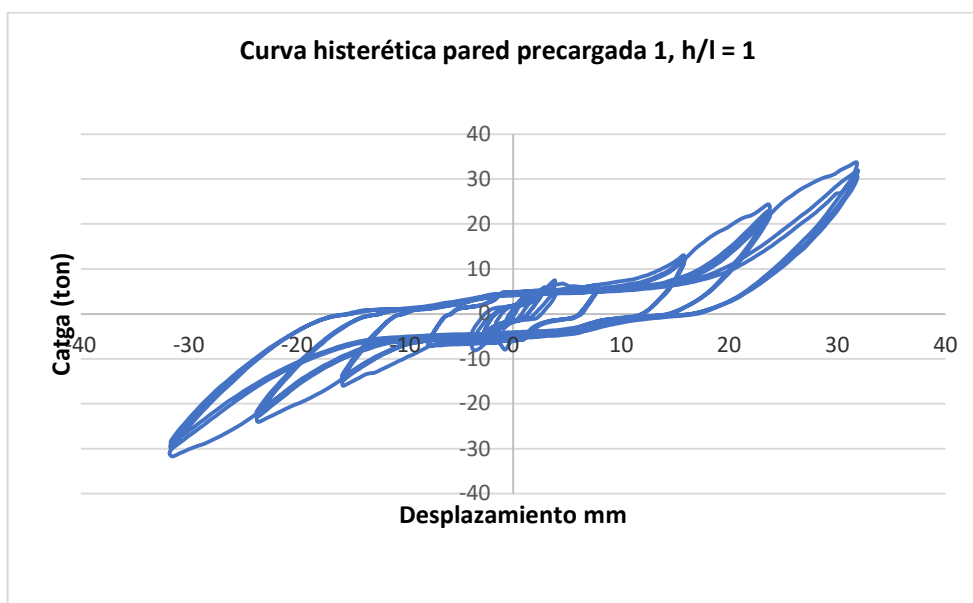


Figura 70. Curva histérica del muro $h/l = 1$, pared precargada 1.

En el cuadro 29 se muestran los valores de carga aplicados en ambos sentidos.

Cuadro 29. Resultados generales del muro $h/l = 1$, pared precargada 1.

Característica	Sentido positivo	Sentido negativo
Fuerza máxima (ton)	33.72	30.69
Desplazamiento máximo (mm)	31.80	31.78

En el caso de las galgas extensométricas, únicamente la galga ubicada en la barra horizontal presentó fluencia.

Cuadro 30. Resultados de galgas extensométricas, pared precargada 1 $h/l = 1$.

No de Galga	Detalle	Estado
Galga 1	Varilla vertical en columna 1, sitio inferior	No presentó fluencia
Galga 2	Varilla vertical en paño de mampostería en primer celda (lado de columna 1)	No presentó fluencia
Galga 3	Varilla horizontal en hilada 8	Presentó fluencia
Galga 4	Varilla vertical en paño de mampostería	No presentó fluencia
Galga 5	Varilla vertical en columna 1, sitio inferior	No presentó fluencia

En la figura 71 se muestra el nivel de daño que sufrió el muro al ser precargado, se pueden observar escalerillas en las sisas de los bloques y grietas entre los 2 y 2.5 mm de abertura en los mismos.

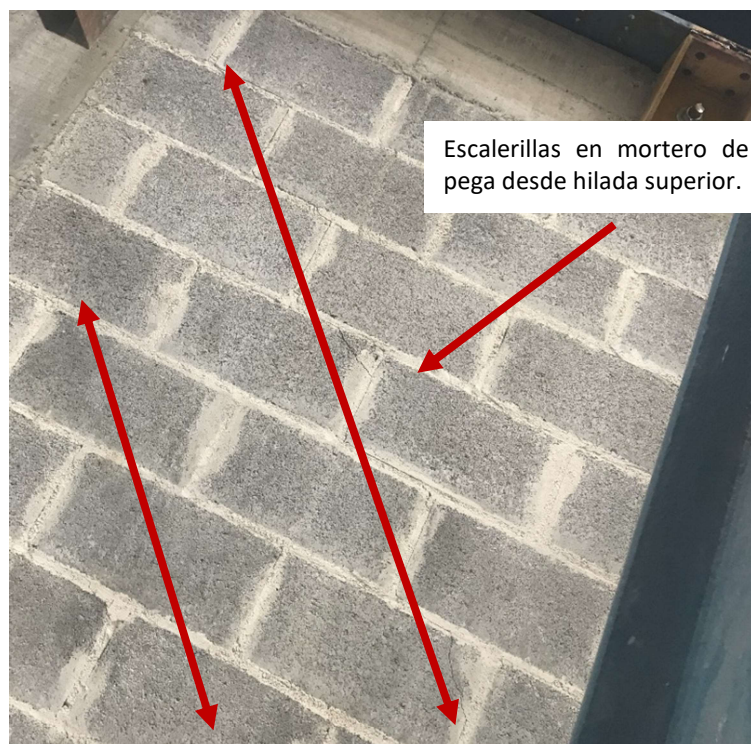


Figura 71. Agrietamiento, pared precargada 1 h/l = 1



Figura 72. Abertura de grietas en mm, pared precargada 1 h/l = 1.

18.3 Segundo grupo, paredes reparadas 1

A continuación, se presenta los resultados de las pruebas realizadas a los muros que fueron previamente precargados y reparados.

18.3.1 Muro h/l = 0.5

En el caso de este muro, los resultados obtenidos de su curva de histéresis lograron demostrar que la reparación realizada logró darle a la pared la capacidad de carga original y de superarla a pesar de haber sido dañada.

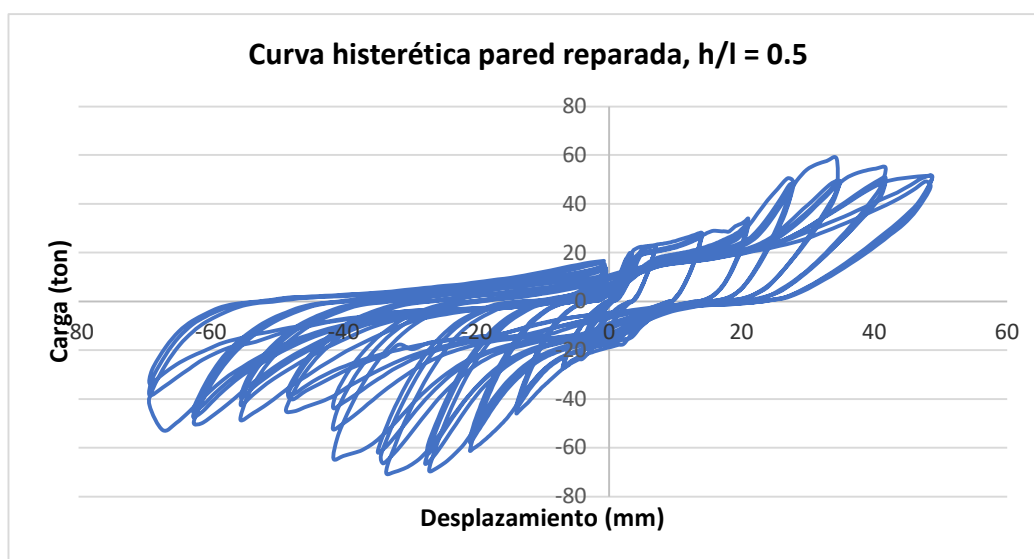


Figura 73. Curva histérica del muro h/l = 0.5, pared reparada 1.

El resumen de los resultados del muro reparado h/l = 0.5, se detallan en el cuadro 31.

Cuadro 31. Resultados generales del muro h/l = 0.5, pared reparada 1.

Característica	Sentido positivo	Sentido negativo
Fuerza fluencia (ton)	51.85	63.64
Desplazamiento fluencia (mm)	17.69	15.74
Fuerza máxima (ton)	58.61	70.73
Desplazamiento máximo (mm)	34.29	33.54
Fuerza última (ton)	46.89	56.59
Desplazamiento último (mm)	47.00	60.00
Ductilidad	2.66	3.81
Rigidez (ton/mm)	2.93	4.04

En este caso, el valor de la cedencia para el movimiento del gato en sentido positivo fue de 51.85 toneladas, con un desplazamiento asociado de 17.69 mm aproximadamente, por otro lado la rigidez elástica de cortante fue de 2.93 ton/mm, por su parte, la porción negativa obtuvo una carga de cedencia de 63.64 toneladas a un desplazamiento de 15.74 mm y un valor de rigidez de 4.04 ton/mm.

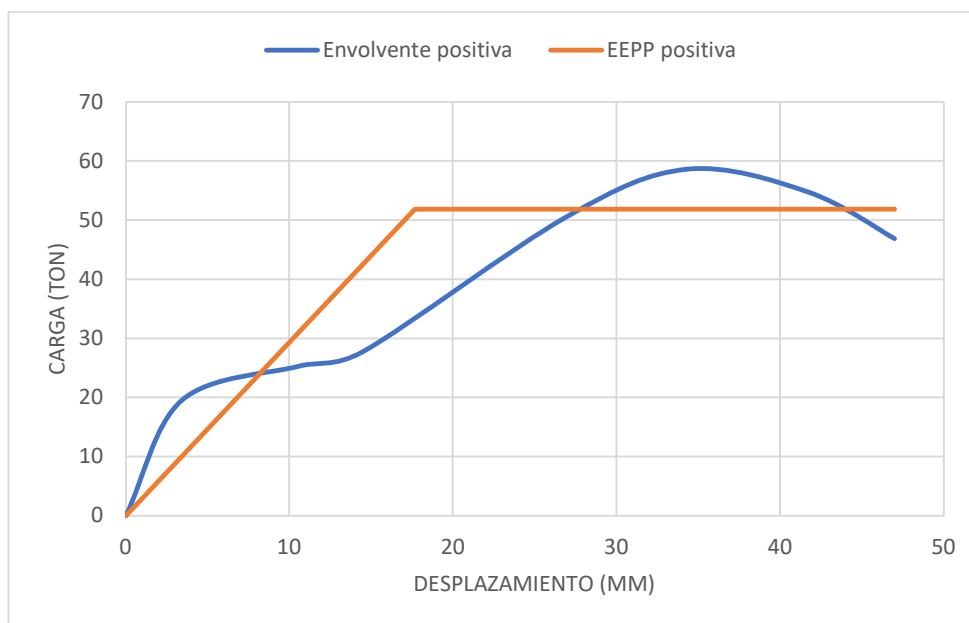


Figura 74. Curva envolvente y EEP positiva del muro $h/l = 0.5$, pared reparada 1.

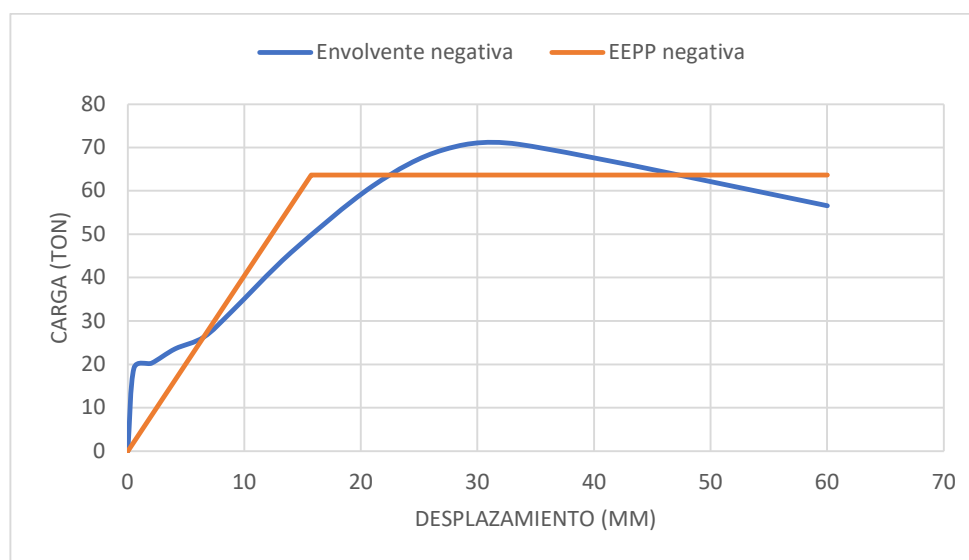


Figura 75. Curva envolvente y EEP negativa del muro $h/l = 0.5$, pared reparada 1.

En la porción positiva de la curva histerética, el valor de carga máximo fue de 58.61 toneladas con un desplazamiento asociado de 34.29 mm, lo cual correspondió a un 16.57% más con respecto al valor de la pared patrón asociada y a un 18.46% más respecto a su valor de precarga. Posteriormente el muro perdió resistencia hasta llegar al esfuerzo último de 46.89 toneladas asociado a un desplazamiento último de 47 mm. La ductilidad alcanzada en el caso positivo fue de 2.66, que corresponde a la razón entre el desplazamiento último y el de cedencia.

En el caso de la porción negativa de la curva histerética, el valor de carga máximo fue de 70.73 toneladas con un desplazamiento asociado de 33.54 mm, lo cual corresponde a un 56.73% más con respecto a su pared patrón asociada y a un 90.63% más respecto a su valor de precarga.

Posteriormente el muro perdió resistencia hasta llegar al esfuerzo último de 56.59 toneladas asociado a un desplazamiento último de 60 mm. La ductilidad alcanzada en el caso negativo fue de 3.81, que como ya se mencionó corresponde a la razón entre el desplazamiento último y el de cedencia.

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede apreciar que en este muro se tuvo que detener la carga positiva por problemas de torsión, por lo que se cargó más en el sentido negativo.

En el caso de las galgas se pudo observar que únicamente una galga presentó fluencia, ver cuadro 32.

Cuadro 32. Resultados de galgas extensométricas, pared reparada 1 $h/l = 0.5$.

No de Galga	Detalle	Estado
Galga 1	Varilla vertical en columna 1, sitio inferior	No presentó fluencia
Galga 2	Varilla vertical en paño de mampostería en primer celda (lado de columna 1)	Se encontraba dañada
Galga 3	Varilla horizontal en hilada 8	Presentó fluencia
Galga 4	Varilla vertical en paño de mampostería en primer celda (lado de columna 2)	No presentó fluencia
Galga 5	Varilla vertical en columna 2, sitio inferior	Se encontraba dañada

Se presentaron daños en las zonas de anclajes de la viga corona, agrietamientos diagonales en el mortero de pega en ambos lados de la pared tal cual se observa en las figuras 76 y 77.

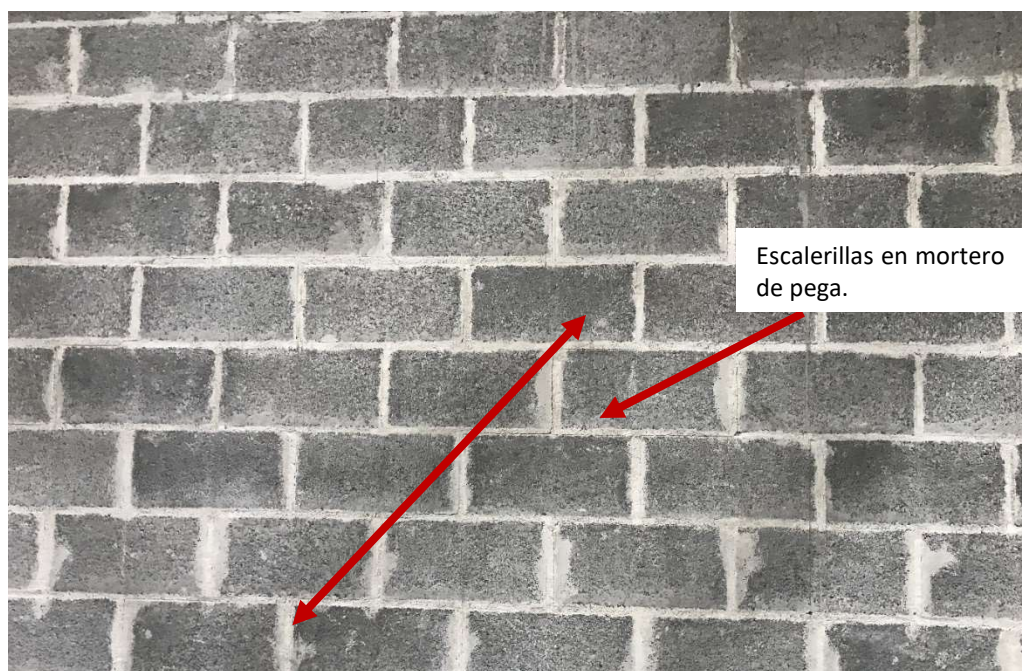
**Figura 76. Agrietamiento del muro $h/l = 0.5$, pared reparada 1.**



Figura 77. Muro fallado $h/l = 0.5$, pared reparada 1.

18.3.2 Muro $h/l = 1$

En el caso del primer muro reparado con $h/l = 1$, los lazos histéricos de ambos sentidos positivo y negativo presentaron una mayor similitud entre ellos. Ver figura 78.

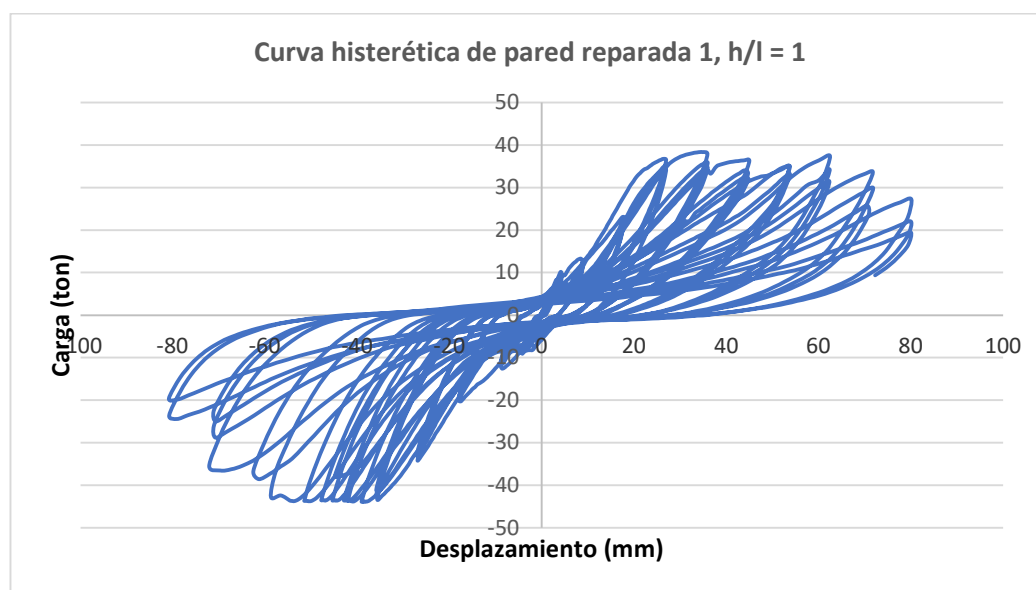


Figura 78. Curva histérica del muro $h/l = 1$, pared reparada 1.

El resumen de los resultados del muro reparado $h/l = 1$, se detallan en el cuadro 33.

Cuadro 33. Resultados generales del muro $h/l = 1$, pared reparada 1.

Característica	Sentido positivo	Sentido negativo
Fuerza fluencia (ton)	37.48	42.94
Desplazamiento fluencia (mm)	25.68	35.49
Fuerza máxima (ton)	38.32	43.86
Desplazamiento máximo (mm)	33.67	38.40
Fuerza última (ton)	30.65	35.08
Desplazamiento último (mm)	75.00	72.00
Ductilidad	2.92	2.03
Rigidez (ton/mm)	1.46	1.21

En este caso, el valor de la cedencia para el movimiento del gato en sentido positivo fue de 37.48 toneladas, con un desplazamiento asociado de 25.68 mm aproximadamente, por otro lado la rigidez elástica de cortante fue de 1.46 ton/mm, por su parte, la porción negativa obtuvo una carga de cedencia de 42.94 toneladas a un desplazamiento de 35.49 mm y un valor de rigidez de 1.21 ton/mm.

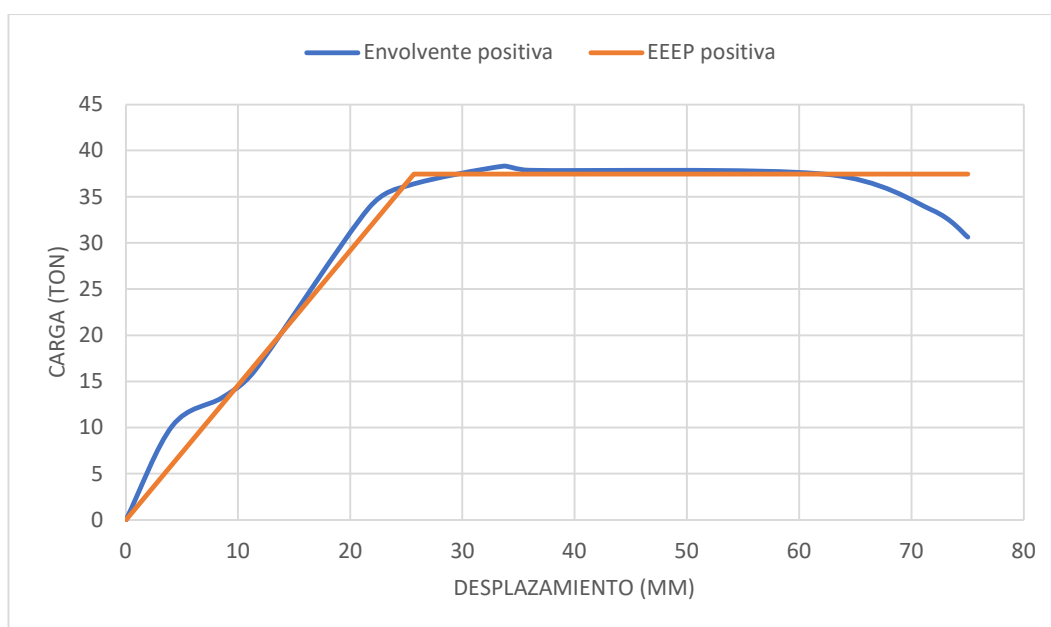


Figura 79. Curva envolvente y EEEP positiva del muro $h/l = 1$, pared reparada 1.

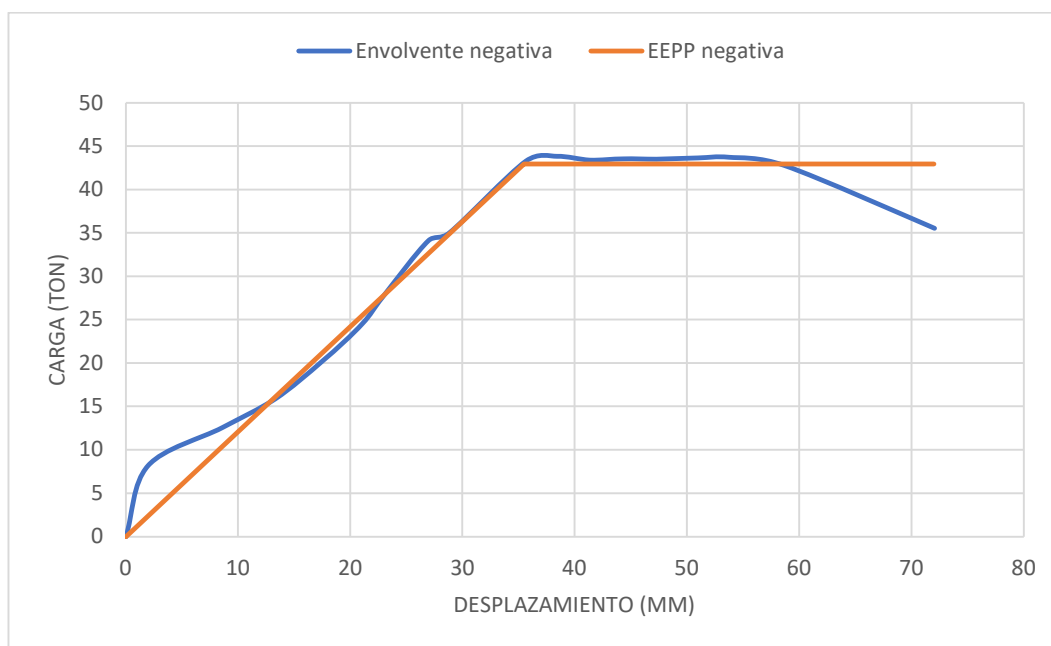


Figura 80. Curva envolvente y EEEP negativa del muro $h/l = 1$, pared reparada 1.

En la porción positiva de la curva histerética, el valor de carga máximo fue de 38.32 toneladas con un desplazamiento asociado de 33.67 mm, lo cual correspondió a un 11.64% más con respecto al valor de la pared patrón asociada y a un 13.63% más respecto a su valor de precarga.

Posteriormente el muro perdió resistencia hasta llegar al esfuerzo último de 30.65 toneladas asociado a un desplazamiento último de 75 mm. La ductilidad alcanzada en el caso positivo fue de 2.92, que corresponde a la razón entre el desplazamiento último y el de cedencia.

En el caso de la porción negativa de la curva histerética, el valor de carga máximo fue de 43.86 toneladas con un desplazamiento asociado de 38.40 mm, lo cual corresponde a un 38.73% más con respecto a su pared patrón asociada y a un 42.89% más respecto a su valor de precarga.

Posteriormente el muro perdió resistencia hasta llegar al esfuerzo último de 35.08 toneladas asociado a un desplazamiento último de 72 mm. La ductilidad alcanzada en el caso negativo fue de 2.03.

En el caso de las galgas se pudo observar que dos de las galgas presentaron fluencia. Ver cuadro 34.

Cuadro 34. Resultados de galgas extensométricas, pared reparada 1 h/l = 1.

No de Galga	Detalle	Estado
Galga 1	Varilla vertical en columna 2, sitio inferior	Presentó fluencia
Galga 2	Varilla vertical en paño de mampostería en primer celda (lado de columna 2)	No presentó fluencia
Galga 3	Varilla vertical en paño de mampostería en primer celda (lado de columna 1)	Presentó fluencia
Galga 4	Varilla vertical en paño de mampostería en primer celda (lado de columna 1)	No presentó fluencia
Galga 5	Varilla horizontal en hilada 8	Se encontraba dañada

En el caso de esta falla, se presentó agrietamiento en escalerillas bastante notables tanto en el lado reparado como en el lado sin reparar. Ver figura 81 y 82.

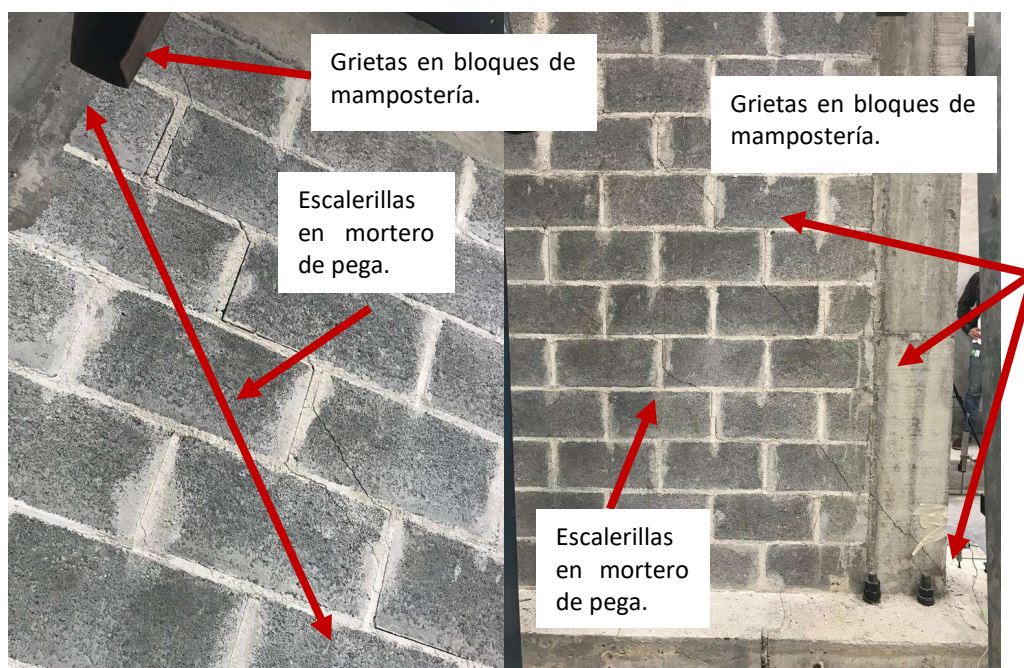


Figura 81. Agrietamiento del muro h/l = 1, pared reparada 1.



Figura 82. Muro fallado $h/l = 1$, pared reparada 1.

18.4 Tercer grupo, paredes precargadas 2

El tercer grupo de muros fallados consistió en repetir el proceso del segundo grupo, se precargaron los muros hasta llegar a un cierto nivel de daño para posteriormente ser reparados y fallados hasta el colapso, con el fin de obtener más muestras y comparar los resultados obtenidos.

18.4.1 Muro $h/l = 0.5$

La carga máxima aplicada en el sentido positivo fue de 50.75 toneladas asociado a un desplazamiento de 18.07 mm que corresponde a un 100.94% de la carga máxima de la pared patrón asociada y a un 102.57% con respecto a los valores de precarga 1.

Por otro lado, la carga máxima aplicada en el sentido negativo fue de 42.07 toneladas asociado a un desplazamiento de 18.43 mm que corresponde a un 93.22% de la carga máxima de la pared patrón asociada y a un 113.39% respecto a los valores de precarga 1.

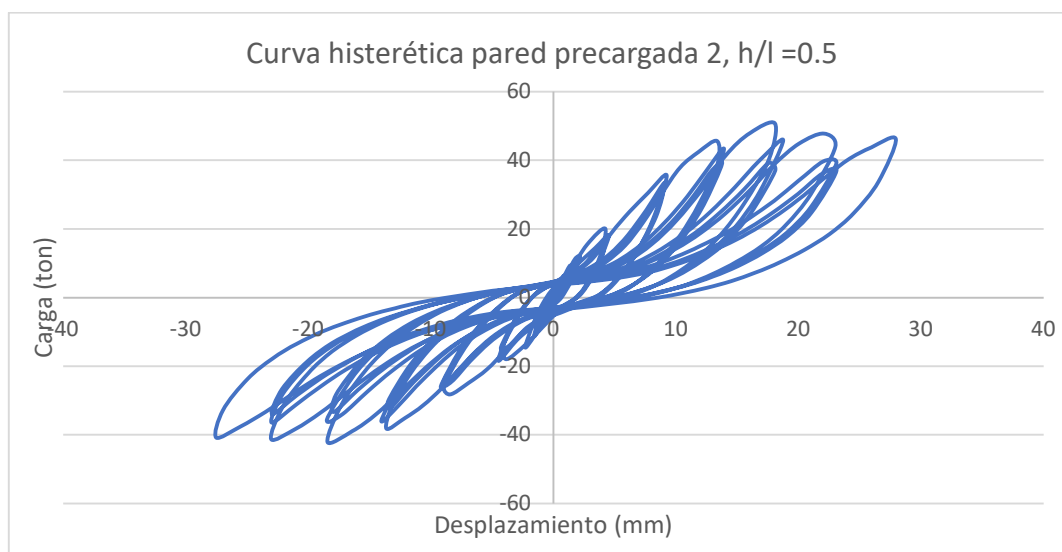


Figura 83. Curva histórica del muro $h/l = 0.5$, pared precargada 2.

En el cuadro 35 se detallan los valores de carga máximos aplicados al muro precargado.

Cuadro 35. Resultados generales del muro $h/l = 0.5$, pared precargada 2.

Característica	Sentido positivo	Sentido negativo
Fuerza máxima (ton)	50.75	42.07
Desplazamiento máximo (mm)	18.07	18.43

En esta precarga ninguna de las galgas presentó fluencia. Ver figura 36.

Cuadro 36. Resultados de galgas extensométricas, pared precargada 2 $h/l = 0.5$.

No de Galga	Detalle	Estado
Galga 1	Varilla vertical en columna 1, sitio inferior	No presentó fluencia
Galga 2	Varilla vertical en paño de mampostería en primer celda (lado de columna 1)	Se encontraba dañada
Galga 3	Varilla vertical en paño de mampostería en primer celda (lado de columna 2)	No presentó fluencia
Galga 4	Varilla horizontal en hilada 8	No presentó fluencia
Galga 5	Varilla vertical en columna 2, sitio inferior	No presentó fluencia

En la figura 84 y 85 se muestra el agrietamiento que se presentó en forma de escalerillas en diagonal.



Figura 84. Precarga del muro $h/l = 0.5$, pared precargada 2.

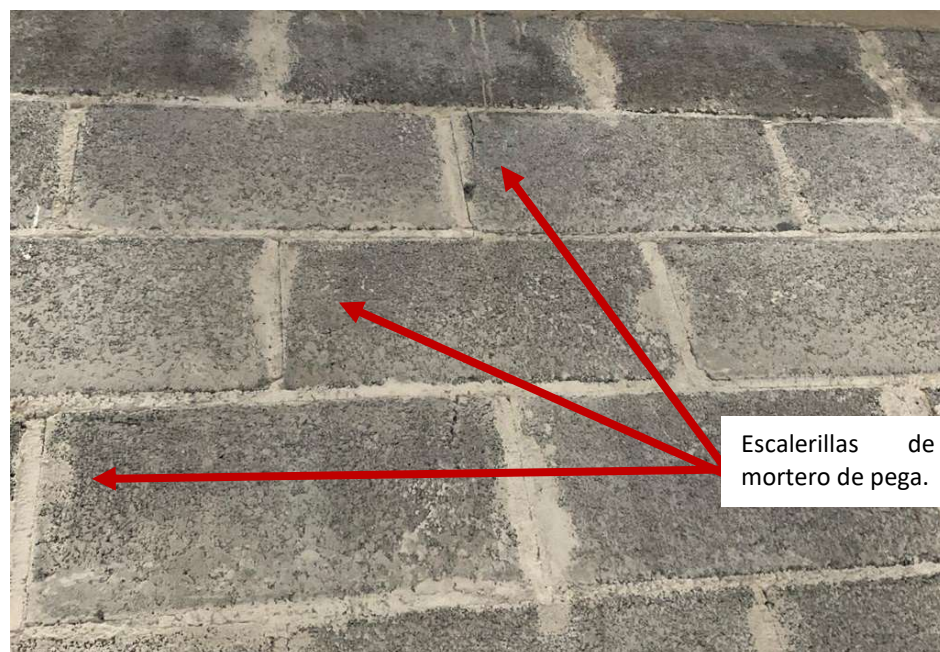


Figura 85. Agrietamiento del muro $h/l = 0.5$, pared precargada 2.

18.4.2 Muro $h/l = 1$

Los lazos histéricos de esta precarga presentaron gran similitud en ambos sentidos tanto del lado positivo como del negativo, los cuales se pueden observar en la figura 86.

La carga máxima aplicada en el sentido positivo fue de 28.31 toneladas asociado a un desplazamiento de 36.08 mm que corresponde a un 82.48% de la carga máxima de la pared patrón asociada y a un 83.95% con respecto a los valores de precarga 1.

Por otro lado, la carga máxima aplicada en el sentido negativo fue de 32.16 toneladas asociado a un desplazamiento de 36.06 mm que corresponde a un 101.73% de la carga máxima de la pared patrón asociada y a un 104.79% respecto a los valores de precarga 1.

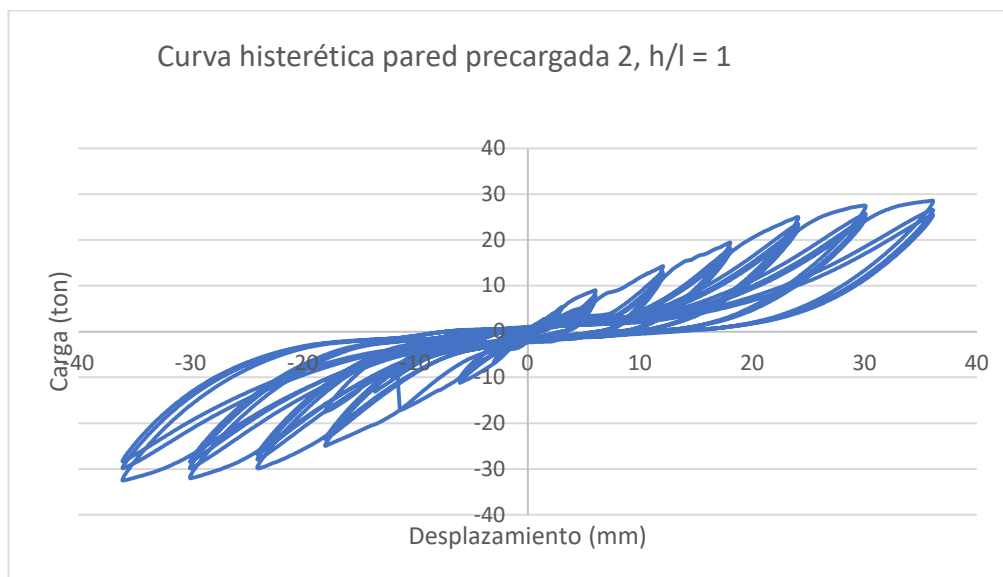


Figura 86. Curva histérica del muro $h/l = 1$, pared precargada 2.

En el cuadro 37 se detallan los valores de carga máximos aplicados al muro precargado.

Cuadro 37. Resultados generales del muro $h/l = 1$, pared precargada 2.

Característica	Sentido positivo	Sentido negativo
Fuerza máxima (ton)	28.31	32.16
Desplazamiento máximo (mm)	36.08	36.06

En esta precarga únicamente dos de las galgas extensométricas presentó fluencia, tal como se puede ver en el cuadro 38.

Cuadro 38. Resultados de galgas extensométricas, pared precargada 2 h/l = 1.

No de Galga	Detalle	Estado
Galga 1	Varilla vertical en columna 1, sitio inferior	No presentó fluencia
Galga 2	Varilla vertical en paño de mampostería en primer celda	No presentó fluencia
Galga 3	Varilla horizontal en hilada 8	Presentó fluencia
Galga 4	Varilla vertical en paño de mampostería en primer celda	No presentó fluencia
Galga 5	Varilla vertical en columna 2, sitio inferior	Presentó fluencia

Se presentó un agrietamiento (2 mm) importante en forma de escalerilla de manera diagonal. Ver las figuras 87 y 88.

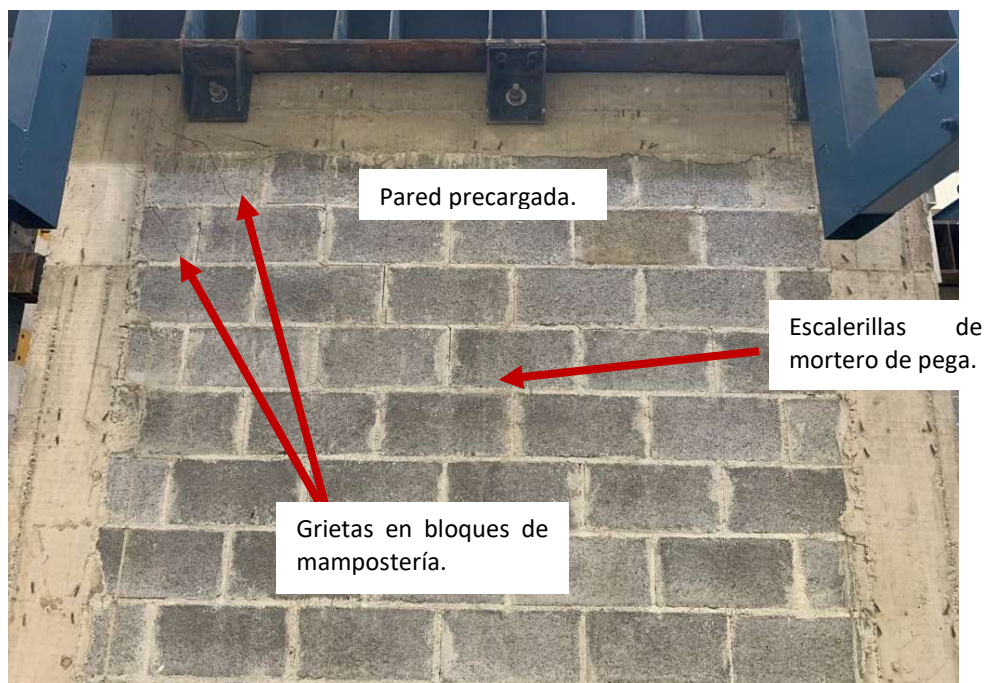


Figura 87. Agrietamiento del muro h/l = 1, pared precargada 2.

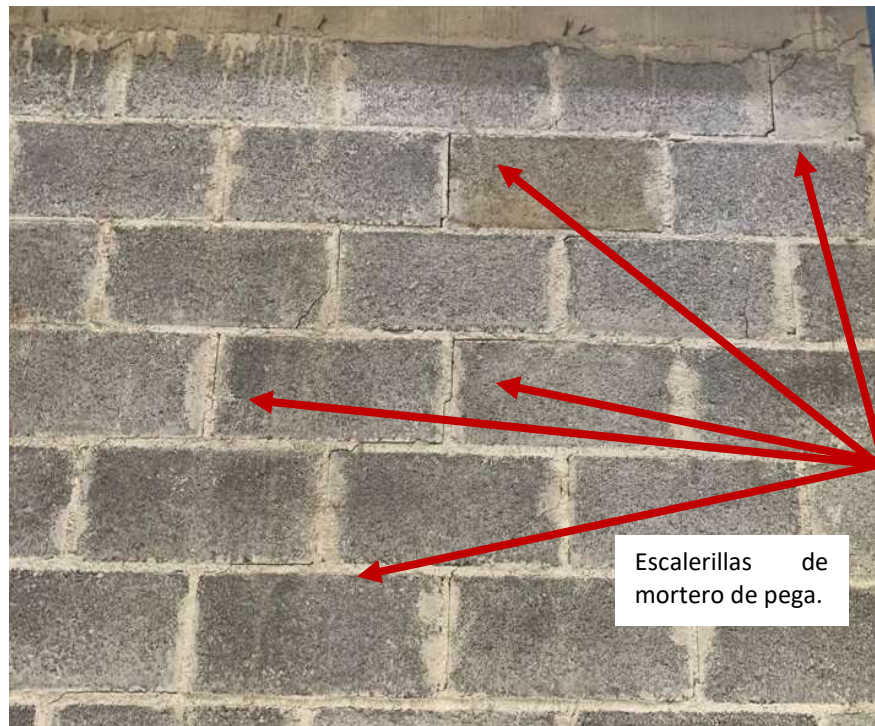


Figura 88. Agrietamiento del muro $h/l = 1$, pared precargada 2.

18.5 Tercer grupo, paredes reparadas 2

El tercer grupo de las paredes consistió en repetir el proceso del segundo grupo de paredes, una vez precargadas estas fueron reparadas y falladas nuevamente.

18.5.1 Muro $h/l = 0.5$

En este caso el muro de $h/l = 0.5$ presentó valores muy similares tanto el sentido positivo como en el negativo. Ver figura 89.



Figura 89. Curva histórica del muro $h/l = 0.5$, pared reparada 2.

En el cuadro 39 se muestra el resumen de los resultados del muro reparado $h/l = 0.5$.

Cuadro 39. Resultados generales del muro $h/l = 0.5$, pared reparada 2.

Característica	Sentido positivo	Sentido negativo
Fuerza fluencia (ton)	67.76	58.43
Desplazamiento fluencia (mm)	24.87	16.81
Fuerza máxima (ton)	68.46	60.83
Desplazamiento máximo (mm)	26.75	27.45
Fuerza última (ton)	54.77	48.66
Desplazamiento último (mm)	41.00	41.50
Ductilidad	1.65	2.47
Rigidez (ton/mm)	2.72	3.48

En este caso, el valor de la cedencia para el movimiento del gato en sentido positivo fue de 67.76 toneladas, con un desplazamiento asociado de 24.87 mm aproximadamente, por otro lado la rigidez elástica de cortante fue de 2.72 ton/mm, por su parte, la porción negativa obtuvo una carga de cedencia de 58.43 toneladas a un desplazamiento de 16.81 mm y un valor de rigidez de 3.48 ton/mm.

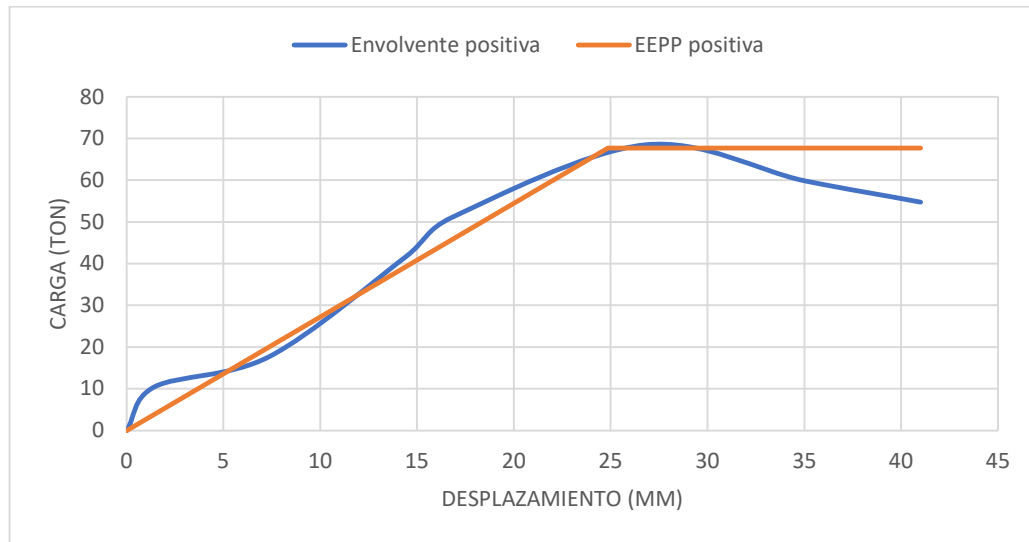


Figura 90. Curva envolvente y EEPP positiva del muro $h/l = 0.5$, pared reparada 2.

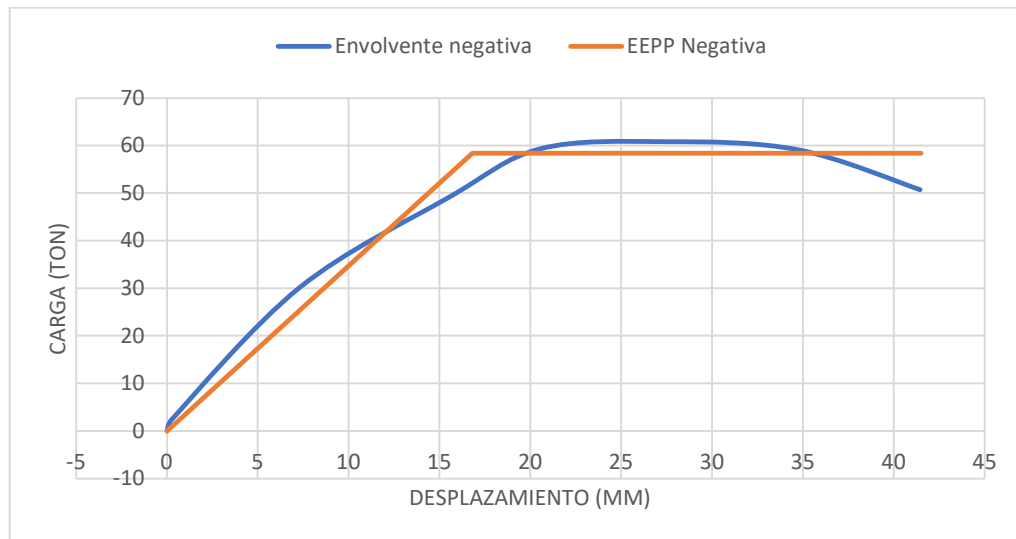


Figura 91. Curva envolvente y EEPP negativa del muro $h/l = 0.5$, pared reparada 2.

En la porción positiva de la curva histerética, el valor de carga máximo fue de 68.45 toneladas con un desplazamiento asociado de 26.75 mm, lo cual correspondió a un 36.15% más con respecto al valor de la pared patrón asociada y a un 34.87% más respecto a su valor de precarga.

Posteriormente el muro perdió resistencia hasta llegar al esfuerzo último 54.77 toneladas asociado a un desplazamiento último de 41 mm. La ductilidad alcanzada en el caso positivo fue de 2.72, que corresponde a la razón entre el desplazamiento último y el de cedencia.

En el caso de la porción negativa de la curva histerética, el valor de carga máximo fue de 60.82 toneladas con un desplazamiento asociado de 54.92 mm, lo cual corresponde a un 34.78% más con respecto a su pared patrón asociada y a un 44.5% más respecto a su valor de precarga.

Posteriormente el muro perdió resistencia hasta llegar al esfuerzo último de 48.66 toneladas asociado a un desplazamiento último de 41.5 mm. La ductilidad alcanzada en el caso negativo fue de 3.48.

En el caso de las galgas ninguna presentó fluencia, tal como se puede observar en el cuadro 40.

Cuadro 40. Resultados de galgas extensométricas, pared reparada 2 h/l = 0.5.

No de Galga	Detalle	Estado
Galga 1	Varilla vertical en columna 1, sitio inferior	No presentó fluencia
Galga 2	Varilla vertical en paño de mampostería en primer celda (lado de columna 1)	No presentó fluencia
Galga 3	Varilla horizontal en hilada 8	No presentó fluencia
Galga 4	Varilla vertical en paño de mampostería en primer celda (lado de columna 2)	No presentó fluencia
Galga 5	Varilla vertical en columna 2, sitio inferior	Se encontraba dañada

El agrietamiento de este muro fue mayor respecto a los demás muros, se presentó desprendimientos de bloques de lado no reparado y de mortero en lado reparado. Ver figuras 92 y 93.

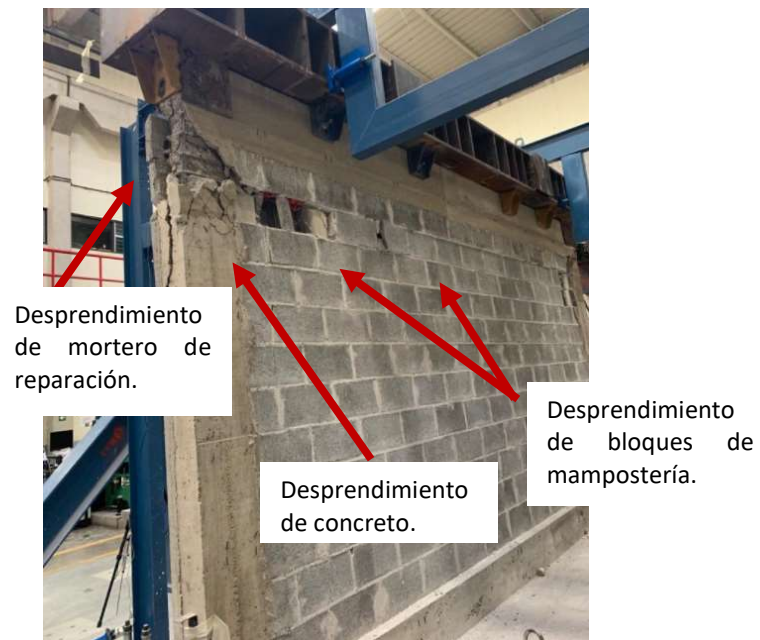


Figura 92. Agrietamiento del muro $h/l = 0.5$, pared reparada 2.



Figura 93 Agrietamiento del muro $h/l = 0.5$, pared reparada 2.

18.5.2 Muro $h/l = 1$

En el caso de este muro los lazos históricos del sentido positivo y negativo no tuvieron la misma similitud entre ellos debido a que en el sentido positivo se presentaron problemas de pandeo, estos se muestran en la figura 94.

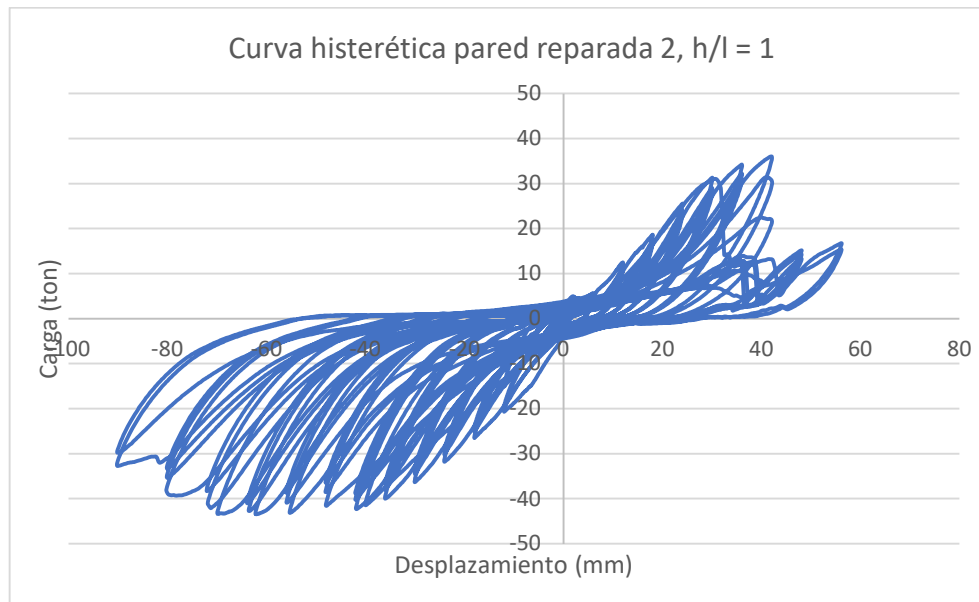


Figura 94. Curva histórica del muro $h/l = 1$, pared reparada 2.

El resumen de los resultados del muro reparado $h/l = 1$, se muestra en el cuadro 41.

Cuadro 41. Resultados generales del muro $h/l = 1$, pared reparada 2.

Característica	Sentido positivo	Sentido negativo
Fuerza fluencia (ton)	31.15	38.66
Desplazamiento fluencia (mm)	28.15	17.91
Fuerza máxima (ton)	35.97	43.18
Desplazamiento máximo (mm)	42.12	54.92
Fuerza última (ton)	28.78	34.54
Desplazamiento último (mm)	42.30	87.00
Ductilidad	1.50	4.86
Rigidez (ton/mm)	1.11	2.16

Las curvas envolventes y EEEP en sentido positivo y negativo se muestran en las figuras 95 y 96 y en este caso, el valor de la cedencia para el movimiento del gato en sentido positivo fue de 31.15 toneladas, con un desplazamiento asociado de 28.15 mm aproximadamente, por otro lado, la rigidez elástica de cortante fue de 1.11 ton/mm, por su parte, la porción negativa obtuvo una carga de cedencia de 38.66 toneladas a un desplazamiento de 17.91 mm y un valor de rigidez de 2.16 ton/mm.

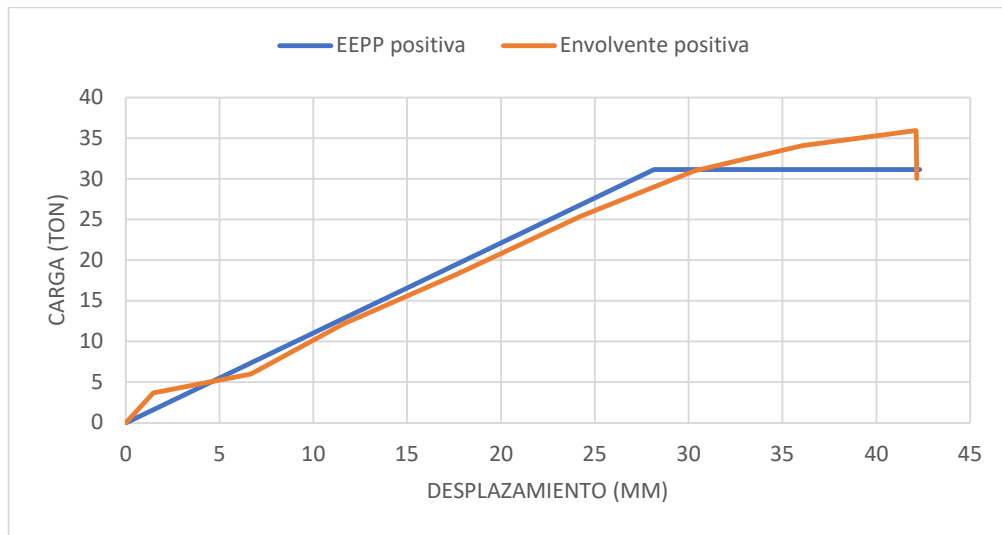


Figura 95. Curva envolvente y EEEP positiva del muro $h/l = 1$, pared reparada 2.

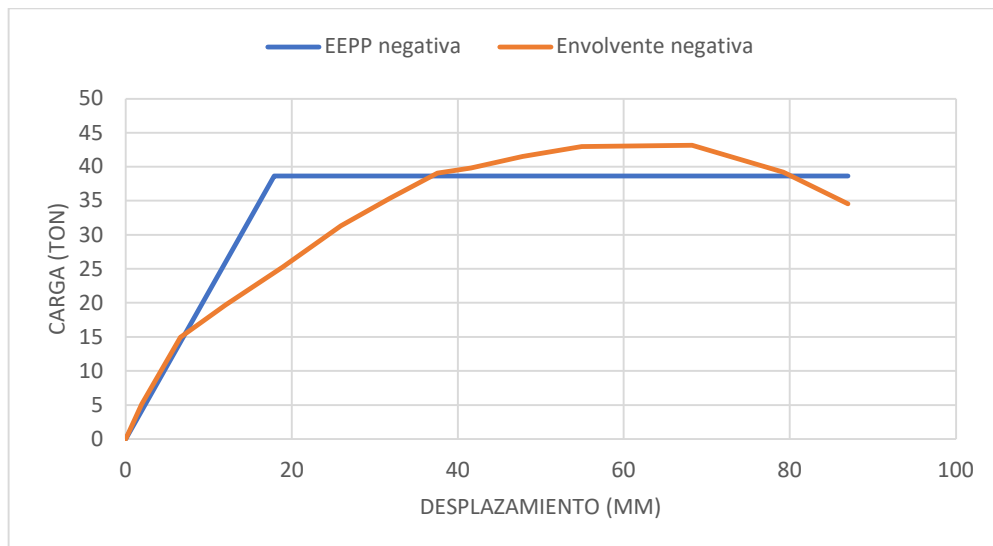


Figura 96. Curva envolvente y EEEP negativa del muro $h/l = 1$, pared reparada 2.

En la porción positiva de la curva histerética, el valor de carga máximo fue de 35.97 toneladas con un desplazamiento asociado de 42.12 mm, lo cual correspondió a un 4.8% más con respecto al valor de la pared patrón asociada y a un 27.06% más respecto a su valor de precarga.

Posteriormente el muro perdió resistencia hasta llegar al esfuerzo último de 28.78 toneladas asociado a un desplazamiento último de 42.3 mm. La ductilidad alcanzada en el caso positivo fue de 1.5, que corresponde a la razón entre el desplazamiento último y el de cedencia.

En el caso de la porción negativa de la curva histerética, el valor de carga máximo fue de 43.18 toneladas con un desplazamiento asociado de 54.92 mm, lo cual corresponde a un 36.95% más con respecto a su pared patrón asociada y a un 34.26% más respecto a su valor de precarga.

Posteriormente el muro perdió resistencia hasta llegar al esfuerzo último de 34.54 toneladas asociado a un desplazamiento último de 87 mm. La ductilidad alcanzada en el caso negativo fue de 2.16.

En el caso de las galgas extensométricas solo dos de ellas presentó fluencia. Ver cuadro 42.

Cuadro 42. Resultados de galgas extensométricas, pared reparada $2 h/l = 0.5$.

No de Galga	Detalle	Estado
Galga 1	Varilla vertical en columna 1, sitio inferior	No presentó fluencia
Galga 2	Varilla vertical en paño de mampostería en primer celda (lado de columna 1)	No presentó fluencia
Galga 3	Varilla horizontal en hilada 8	Presentó fluencia
Galga 4	Varilla vertical en paño de mampostería en primer celda (lado de columna 2)	No presentó fluencia
Galga 5	Varilla vertical en columna 2, sitio inferior	Presentó fluencia

En el caso de las fallas de estos muros presentaron un agrietamiento diagonal en ambos lados de los muros tanto el reparado como el no reparado, tal cual se observa en las figuras 97 y 98.



Figura 97. Agrietamiento del muro $h/l = 1$, pared reparada 2.



Figura 98 Agrietamiento del muro $h/l = 0.5$, pared reparada 2.

En el cuadro 43 y figuras 99 y 100 se muestra un resumen de los resultados obtenidos.

Cuadro 43. Resumen de resultados.

Tipo de relación de aspecto	Tipo de espécimen	Fuerza de fluencia (ton)	Desplazamiento de fluencia (mm)	Fuerza máxima (ton)	Desplazamiento máximo (mm)	Fuerza última (ton)	Desplazamiento último (mm)	Ductilidad	Rigidez (ton/m)
H/L = 0.5	Pared patrón	43.01	11.83	47.71	25.03	38.16	60.75	5.15	3.64
	Pared precargada 1	N/A	N/A	43.29	24.10	N/A	N/A	N/A	N/A
	Pared precargada 2	N/A	N/A	46.41	18.25	N/A	N/A	N/A	N/A
	Pared reparada 1	57.65	16.72	64.67	33.92	51.74	53.50	3.24	3.49
	Pared reparada 2	63.10	22.64	64.65	27.10	51.72	41.25	2.06	3.10
H/L = 1	Pared patrón	28.67	21.55	32.97	35.63	26.37	66.50	3.15	1.35
	Pared precargada 1	N/A	N/A	32.21	31.79	N/A	N/A	N/A	N/A
	Pared precargada 2	N/A	N/A	30.24	36.07	N/A	N/A	N/A	N/A
	Pared reparada 1	40.21	30.59	41.09	36.04	32.87	73.50	2.48	1.34
	Pared reparada 2	34.91	23.03	39.58	48.52	31.66	64.65	3.18	1.64

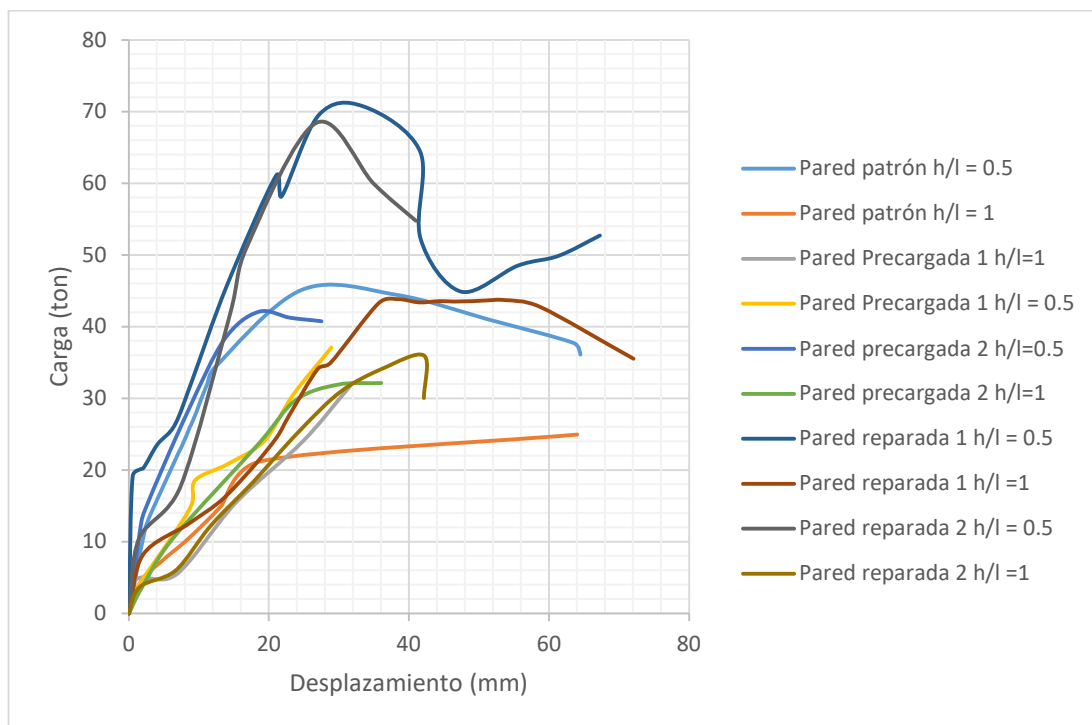


Figura 99. Resumen de envolventes positivas.

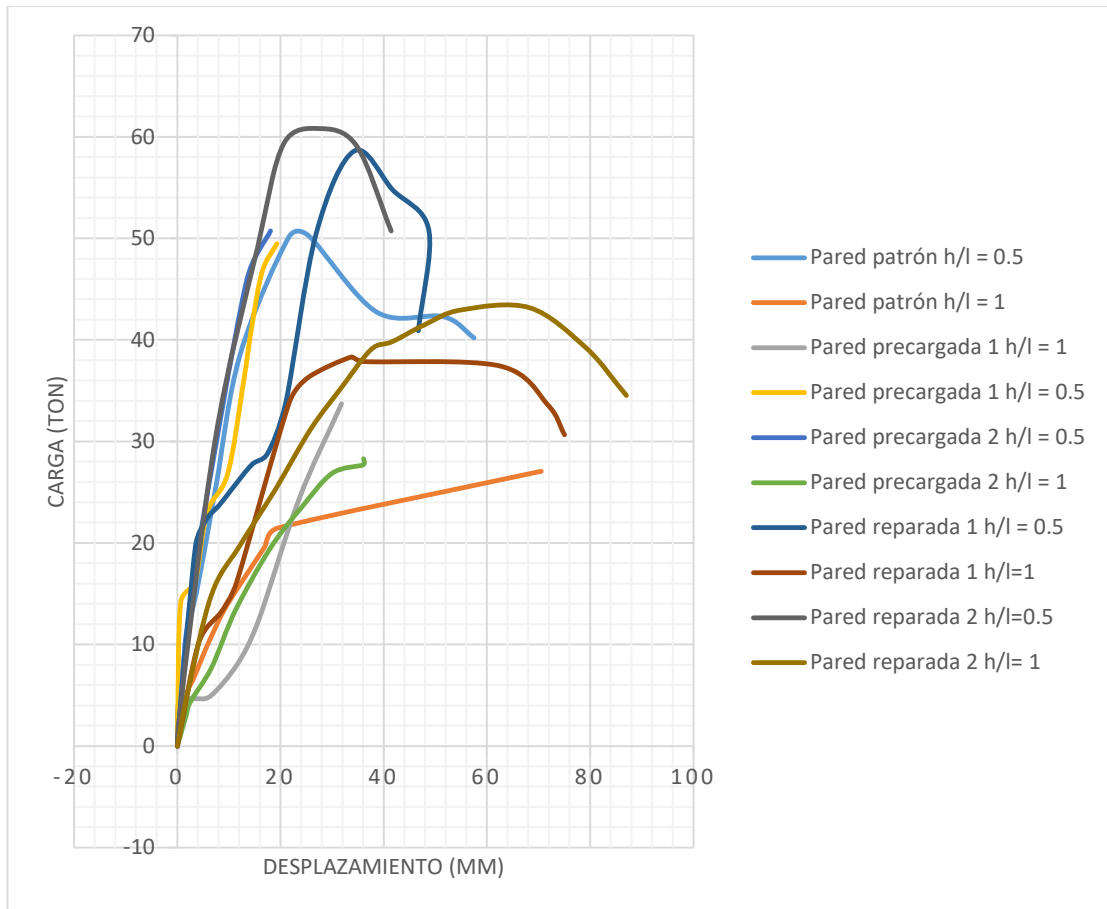


Figura 100. Resumen de envolventes negativas.

19 Análisis de resultados

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos realizados se procedió a analizarlos y compararlos con el fin de obtener las conclusiones y las recomendaciones de la investigación.

En el cuadro 44 se muestran los valores de carga nominal (V_n) de acuerdo con el diseño para cada una de las relaciones de aspecto en estudio y los valores de carga experimental (V_{exp}) máxima para cada una de las pruebas realizadas.

Cuadro 44. Valores de carga nominal y experimentales.

Tipo de relación de aspecto	V_n (ton)	V_{exp} paredes patrón (valores promedio (ton))	V_{exp} paredes precargadas 1 (valores promedio (ton))	V_{exp} paredes reparadas 1 (valores promedio (ton))	V_{exp} paredes precargadas 2 (valores promedio (ton))	V_{exp} paredes reparadas 2 (valores promedio (ton))
H/l = 0.5	47.85	47.71	43.29	64.67	46.41	64.64
H/l = 1	24.67	32.97	32.20	41.09	30.23	39.57

De acuerdo con el cuadro se puede observar que en el caso del muro $h/l = 0.5$, el valor de la capacidad nominal en relación con el valor obtenido en la prueba realizada a la pared patrón fue prácticamente el mismo, únicamente se presentó una diferencia de 0.15 ton por debajo del valor esperado, es decir un -0.3%.

Por otro lado, en el caso del muro con $h/l = 1$ la diferencia fue mayor, 8.3 ton pero en este caso mayor del valor esperado de diseño, es decir un 33.62%.

En el caso de los valores de precarga aplicados a las paredes, $h/l = 0.5$ estos fueron muy similares en ambos casos (43.29 ton para el muro 1 y 46.41 ton para el muro 2) para una

diferencia de 3.12 ton entre ellos, por lo cual se considera se obtendrán resultados similares en ambos casos.

De igual manera, en el caso de los muros con $h/l = 1$ los valores fueron semejantes entre ellos (32.2 ton para el muro 1 y 30.23 ton para el muro 2) lo que significa una diferencia de 1.97 ton entre ellas.

Por último, en este cuadro se aprecia que los valores de carga máxima obtenidos en los muros $h/l = 0.5$ una vez reparados también fueron similares entre ellos (64.67 ton para el muro 1 y 64.64 ton para el muro 2) para una diferencia de 0.03 ton.

En el caso de los muros con $h/l = 1$ los resultados también fueron muy semejantes (41.09 ton para el muro 1 y 39.57 ton para el muro 2) con una diferencia de 1.51 ton.

En la figura 98 se pueden observar los valores de carga máxima para cada uno de los muros con $h/l = 0.5$ ensayados para una mejor visualización.

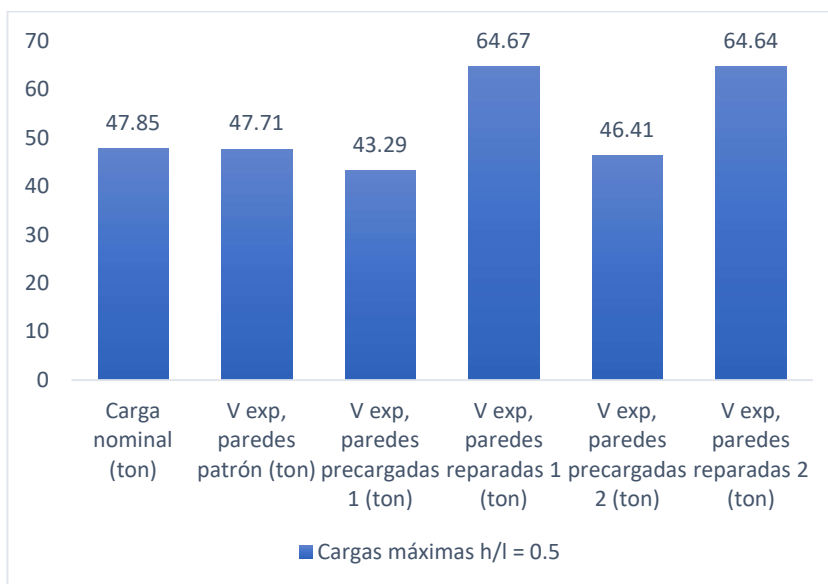


Figura 101. Valores de resistencia nominal y experimental de los muros con $h/l = 0.5$.

En la figura 99 se muestran los valores de carga máxima obtenidos en los muros con $h/l = 1$ ensayados durante la investigación.

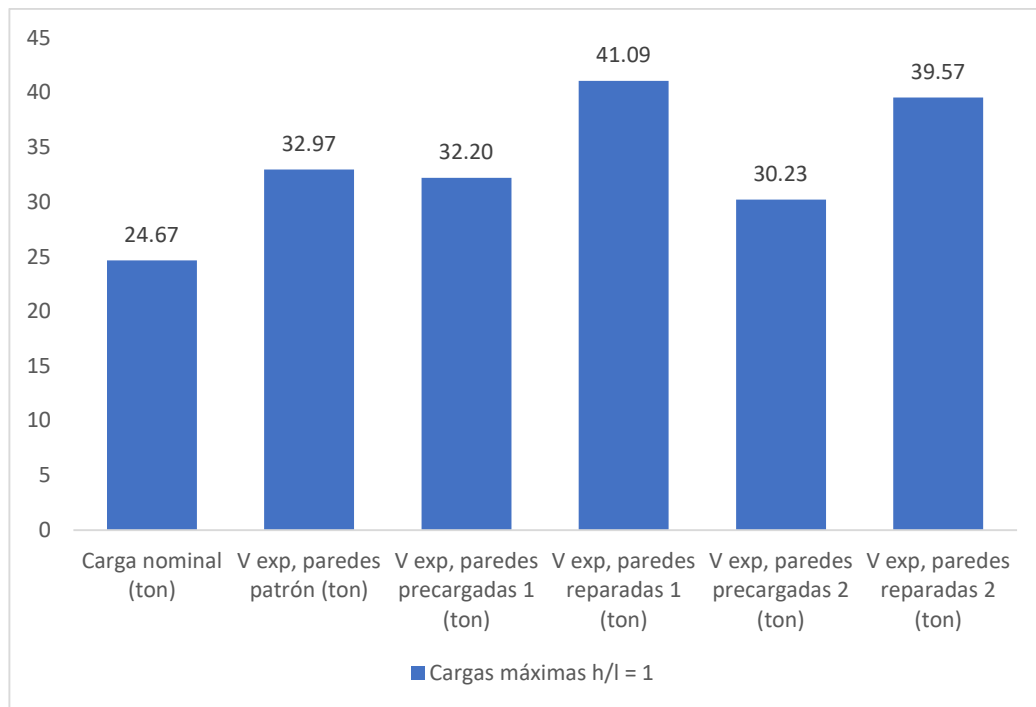


Figura 102. Valores de resistencia nominal y experimentales con $h/l = 1$.

En la figura 103 se muestran los resultados obtenidos en ambos tipos de muros para observar las diferencias de capacidades al variar las relaciones de aspecto de 0.5 a 1.

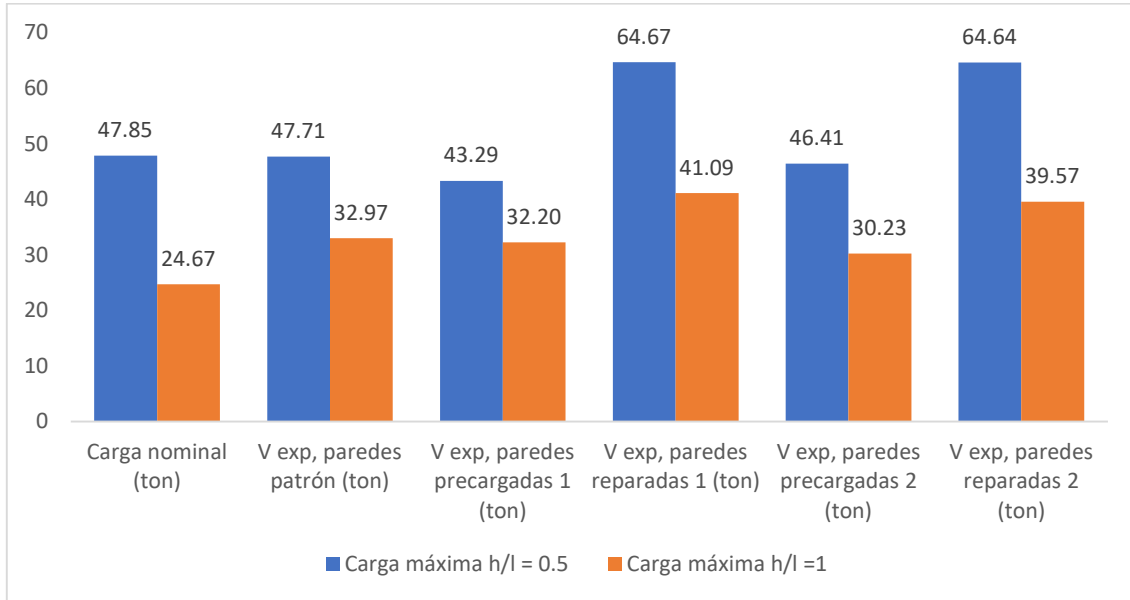


Figura 103. Valores de resistencia nominal y experimentales de los muros con $h/l = 0.5$ y $h/l = 1$.

En la figura 104 se muestran los valores obtenidos de carga máxima de los muros fallados.

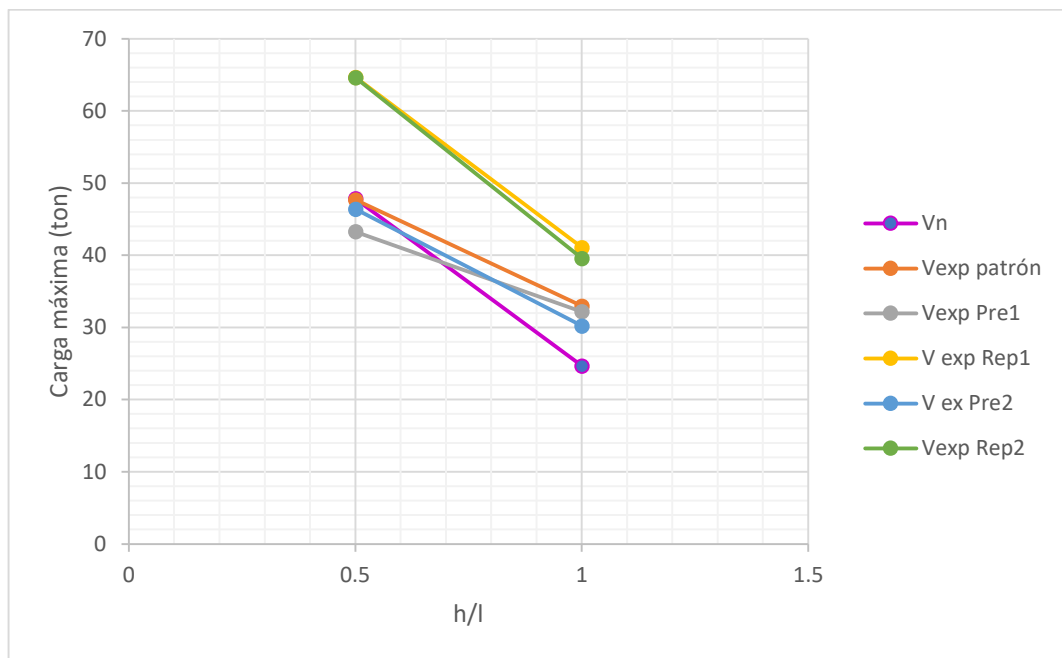


Figura 104. Valores de resistencia nominal y experimentales de los muros $h/l = 0.5$ y $h/l = 1$.

Como se mencionó anteriormente la carga máxima obtenida en la pared patrón con $h/l = 0.5$ fue similar con la carga nominal, pues se obtuvo un 99.7% de la carga esperada. En el

caso del muro con $h/l = 1$ se superó la carga nominal en un 33.62%, tal cual se puede observar en el cuadro 45.

Cuadro 45. Capacidad máxima obtenida en paredes patrón con respecto a la carga de diseño.

Tipo de relación de aspecto en estudio	Carga de pared patrón respecto a carga nominal $(V_p/V_n) \times 100$
H/l = 0.5	99.70%
H/l = 1	133.62%

En el cuadro 46 se aprecia que las cargas de precarga promedio aplicadas a los muros fueron un 94% de la carga obtenida en las paredes patrón de ambas relaciones de aspecto, logrando un nivel de daño apreciable a la vista humana, pero sin existir desprendimientos importantes de material.

Cuadro 46. Cargas de precarga de los muros.

Tipo de relación de aspecto en estudio	Carga de pared precargada 1 respecto a pared patrón $(V_{p1}/V_p) \times 100$	Carga de pared precargada 2 respecto a pared patrón $(V_{p2}/V_p) \times 100$	Carga promedio de precarga $(V_{promp}/V_p) \times 100$
H/l = 0.5	90.75%	97.29%	94.02%
H/l = 1	97.69%	91.72%	94.71%

En el caso de las paredes que fueron reparadas para ser falladas de nuevo, se obtuvo un incremento con respecto a la carga máxima alcanzada por las paredes patrón; en el caso del muro $h/l = 0.5$ de un 35.54 % y para $h/l = 1$ en un 22.34%, tal cual se observa en el cuadro 47.

Cuadro 47. Cargas en paredes reparadas respecto a las paredes patrón.

Tipo de relación de aspecto en estudio	Carga de pared reparada 1 respecto a pared patrón $(V_{r1}/V_p) \times 100$	Carga de pared reparada 2 respecto a pared patrón $(V_{r2}/V_p) \times 100$	Carga promedio en paredes reparadas $(V_{promr}/V_p) \times 100$	Aumento en la carga al ser reparadas (%)
H/l = 0.5	135.57%	135.50%	135.54%	35.54%
H/l = 1	124.63%	120.05%	122.34%	22.34%

En el cuadro 48 se observa que los valores obtenidos de carga máxima en las paredes reparadas de cada relación de aspecto fueron similares entre ellas, en el caso de $h/l = 0.5$, la diferencia entre la pared reparada 1 y la 2 fue únicamente de 0.03 ton, obteniéndose una carga promedio de 64.66 ton (16.95 ton más que la pared patrón asociada). Para $h/l = 1$ la diferencia entre el muro 1 reparado y el muro 2 reparado fue de 1.51 ton lo que significa una carga promedio de 40.33 ton (7.36 ton más que la patrón asociada).

Cuadro 48. Cargas obtenidas en paredes reparadas.

Tipo de relación de aspecto en estudio	V exp rep1 (ton)	V exp rep2 (ton)	V prom paredes reparadas (ton)	Aumento en la carga al ser reparadas con respecto a la pared patrón (ton)
H/l = 0.5	64.67	64.64	64.66	16.95
H/l = 1	41.09	39.57	40.33	7.36

Por otro lado, en el cuadro 49 se muestra un resumen de los valores de resistencia nominal y experimentales de las paredes patrón, precargadas y reparadas en ton/m, en donde se puede observar que en este caso los valores son mayores para la relación de aspecto $h/l = 1$.

Cuadro 49. Valores de resistencia nominal y experimentales en ton/m.

Tipo de relación de aspecto en estudio	Carga nominal (ton/m)	V exp patrón (ton/m)	V exp pr1 (ton/m)	V exp rep1 (ton/m)	V exp pr2 (ton/m)	V exp rep2 (ton/m)
H/l = 0.5	8.54	8.52	7.73	11.55	8.29	11.54
H/l = 1	8.81	11.77	11.50	14.67	10.80	14.13

En el cuadro 50 se resumen las contribuciones de capacidad de carga del reforzamiento de malla electrosoldada con mortero lanzado de acuerdo con la norma mexicana, teoría de muros de concreto del CSCR 2010-14 y los resultados de las pruebas realizadas a los muros.

Cuadro 50. Contribución del reforzamiento según norma mexicana, CSCR 2010-14 y de acuerdo a las pruebas.

Tipo de relación de aspecto en estudio	Contribución de la reparación según Norma Mexicana (ton)	Contribución de la reparación de acuerdo a teoría de muros de concreto del CSCR 2010-14 (ton)	Contribución de capacidad de acuerdo a pruebas de laboratorio (ton)
H/l = 0.5	29.72	43.84	16.95
H/l = 1	14.86	27.55	7.36

Como se puede observar, los valores calculados teóricamente son mayores a los valores obtenidos experimentalmente, por lo que resulta muy importante tomar en cuenta estos resultados, para ser más conservadores a la hora de calcular teóricamente las capacidades de carga adicional que aportará el sistema de reforzamiento.

En la figura 105 se puede observar las capacidades teóricas y experimentales del sistema de reforzamiento para cada una de las relaciones de aspecto en estudio.

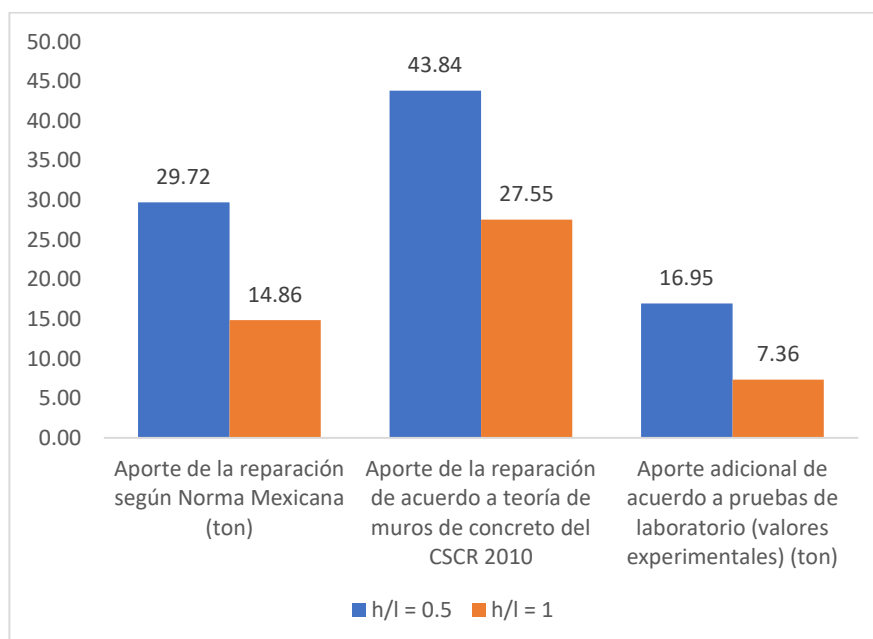


Figura 105. Aporte del reforzamiento según norma mexicana, CSCR 2010-14 y de acuerdo a las pruebas.

En la figura 106 se observa las contribuciones del reforzamiento para cada una de las relaciones de aspecto.

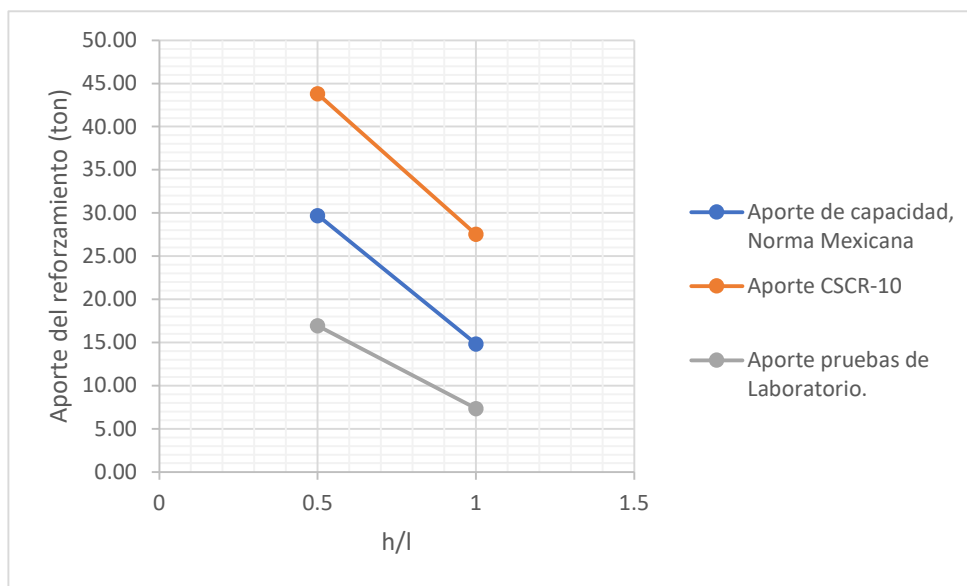


Figura 106. Contribución del reforzamiento según norma mexicana, CSCR 2010-14 y de acuerdo a las pruebas.

En el caso de la carga experimental de los muros con $h/l = 0.5$ con respecto a la norma mexicana se obtuvo un 57.04 % de la carga teórica y un 38.68% de la carga teórica del CSCR 2010-14 (Teoría de muros de concreto). Los muros $h/l = 1$ obtuvieron con respecto a la norma mexicana un 49.56 % de carga teórica y un 26.74% de la carga teórica del CSCR 2010-14.

Cuadro 51. Comparación de contribuciones de reforzamiento en pruebas con la teoría.

Tipo de relación de aspecto en estudio	Porcentaje de carga alcanzado de la reparación respecto a Norma Mexicana (%)	Porcentaje de carga de falla de la reparación con respecto con teoría de muros de concreto del CSCR 2010-14 (%)
H/l = 0.5	57.04%	38.68%
H/l = 1	49.56%	26.74%

Si bien los resultados obtenidos fueron más cercanos a la norma mexicana, esta norma no considera el aporte del mortero lanzado, por lo que se considera más correcto calcular el aporte del reforzamiento con la teoría de muros de concreto del CSCR 2010-14 (ref) y posteriormente aplicar la fórmula de corrección de acuerdo con los resultados obtenidos experimentalmente.

Cuadro 52. Cuadro comparativo de capacidades teóricas sin reforzamiento, con reforzamiento (De acuerdo a norma mexicana y CSCR 2010-14) y capacidades experimentales.

Tipo de relación de aspecto en estudio	Vn (ton) (sin malla electrosoldada y mortero)	Vn (ton) (con malla electrosoldada), de acuerdo a Norma Mexicana	Vn (ton) (con malla electrosoldada y mortero), de acuerdo a CSCR 2010-14.	V exp prom de paredes reparadas 1 y 2 con malla electrosoldada y mortero (ton).
H/l = 0.5	47.85	77.57	91.69	64.66
H/l = 1	24.67	39.53	52.22	40.33

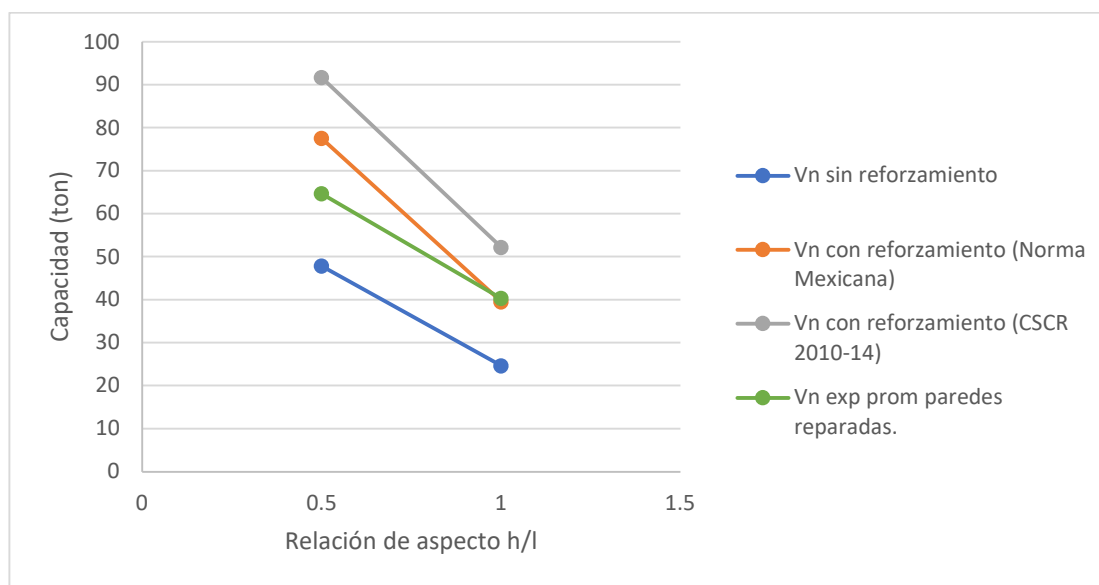


Figura 107. Comparación de capacidades teóricas y experimentales con y sin reforzamiento.

Cuadro 53. Diferencia entre la capacidad teórica de paredes reforzadas y la capacidad experimental de los muros reparados con el reforzamiento.

Tipo de relación de aspecto en estudio	Diferencia de capacidad teórica (norma mexicana) con capacidad experimental reforzados (ton).	Diferencia de capacidad teórica (CSCR 2010-14) con capacidad experimental reforzados (ton).
H/l = 0.5	-12.91	-27.03
H/l = 1	+0.80	-11.89

Se analizan los resultados obtenidos experimentalmente de los muros reparados con el sistema de malla electrosoldada y mortero (paredes reparadas), con los valores teóricos de diseño de muros reforzados con la norma mexicana y el CSCR 2010-14, se puede ver que en el caso de los muros con $h/l = 0.5$, la capacidad obtenida fue de 12.91 ton por debajo del valor teórico (norma mexicana) y de 27.03 ton por debajo del valor teórico en el caso de la teoría del CSCR 2010-14; por otro lado, los muros con relación de aspecto $h/l = 1$ superaron la capacidad teórica en 0.8 ton con la teoría de la norma mexicana pero con la teoría del CSCR 2010-14 el valor experimental fue de 11.89 ton inferior al valor teórico.

Con base en los resultados obtenidos se logró descifrar la siguiente fórmula que ayudaría a un posible diseñador a establecer un valor conservador de capacidad adicional a los muros después de haber sido dañados y reparados con malla electrosoldada y mortero lanzado. La ecuación establece un rango de aporte de capacidad dentro del cual se puede elegir un valor para el diseño.

$$\text{Aporte de reforzamiento real} = \frac{0.21 \times \text{AporteCSCR10 (ton)}}{h/l} \pm 1.6 \text{ (ton)} \quad (\text{Ecuación 20})$$

Se dedujo la ecuación de acuerdo con los valores que determinó la filosofía de muros de concreto del CSCR 2010-14 y los resultados obtenidos de carga en los muros dañados y reparados en estudio $h/l = 0.5$ y $h/l = 1$.

Para el muro $h/l = 0.5$ se obtiene un rango de carga de 16.81 ton a 20.01 ton adicional a la capacidad del muro patrón al aplicar la fórmula, siendo 16.95 ton el valor alcanzado experimentalmente.

En el caso del muro $h/l = 1$ se obtuvo un rango de carga de 4.18 ton a 7.38 ton adicional a la capacidad del muro patrón al aplicar la fórmula, siendo 7.36 ton el valor obtenido experimentalmente.

Por otro lado, se calcularon los valores de aporte de capacidad para otras relaciones de aspecto (0.75, 1.5 y 2) y al aplicar la ecuación se establecieron los rangos en los cuales se podría elegir la carga adicional que aporta el reforzamiento para posibles futuros diseños de reparaciones.

Cuadro 54. Aplicación de ecuación en distintos valores de h/l .

Datos de cálculo y experimentales			Aplicando fórmula (rango de aporte)	
Relación de aspecto (h/l)	Aumento de capacidad teórica del reforzamiento de acuerdo al CSCR 2010-14(Ton)	Aumento de capacidad de los muros reforzados de acuerdo a pruebas experimentales (ton)	+ 1.6 ton	- 1.6 ton
0.5	43.84	16.95	20.01	16.81
0.75	31.88	N/A	10.53	7.33
1	27.55	7.36	7.38	4.18
1.5	21.73	N/A	4.64	1.44
2	17.83	N/A	3.47	0.27

En la figura 106 se pueden observar los valores del cuadro anterior de una mejor manera visual, donde se detallan los valores de capacidad de acuerdo al CSCR 2010-14, los rangos obtenidos con la ecuación y por último las capacidades alcanzadas experimentalmente en las relaciones de aspecto h/l 0.5 y 1, en el caso de las relaciones de aspecto 0.75, 1.5 y 2 los valores se muestran en cero, pues no era parte del alcance de esta investigación, sin

embargo se calcularon los rangos con la ecuación para observar el comportamiento en distintas relaciones de aspecto.

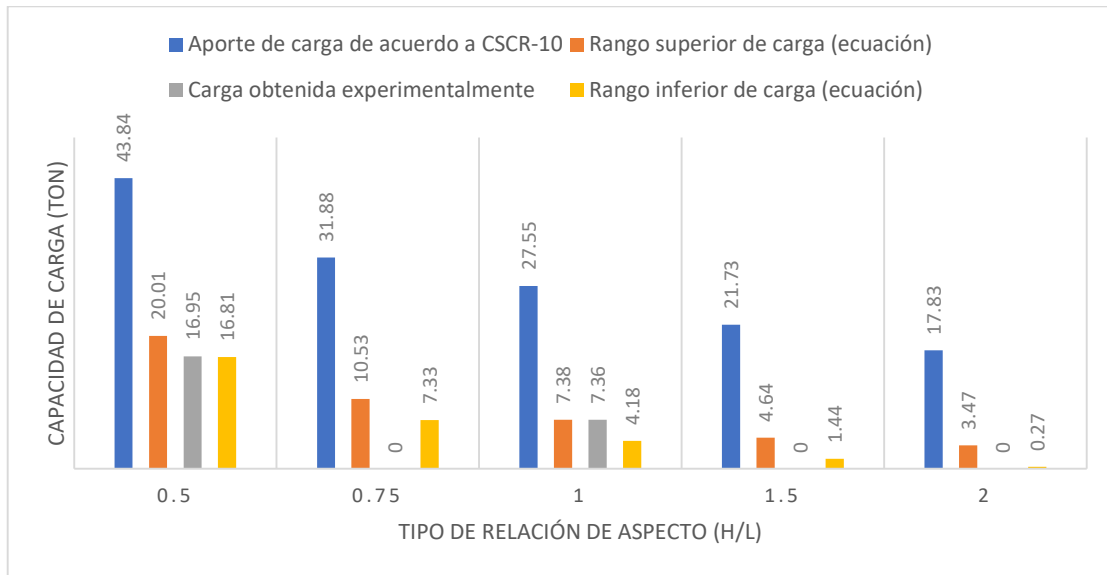


Figura 108. Comparación de aportes de capacidad de acuerdo a la relación de aspecto.

Otra forma de visualizar los datos mencionados se muestra en la figura 109, donde se puede observar como los valores teóricos en todas las relaciones de aspecto se encuentra por arriba de los valores obtenidos experimentalmente y además se detallan los rangos obtenidos con la ecuación.

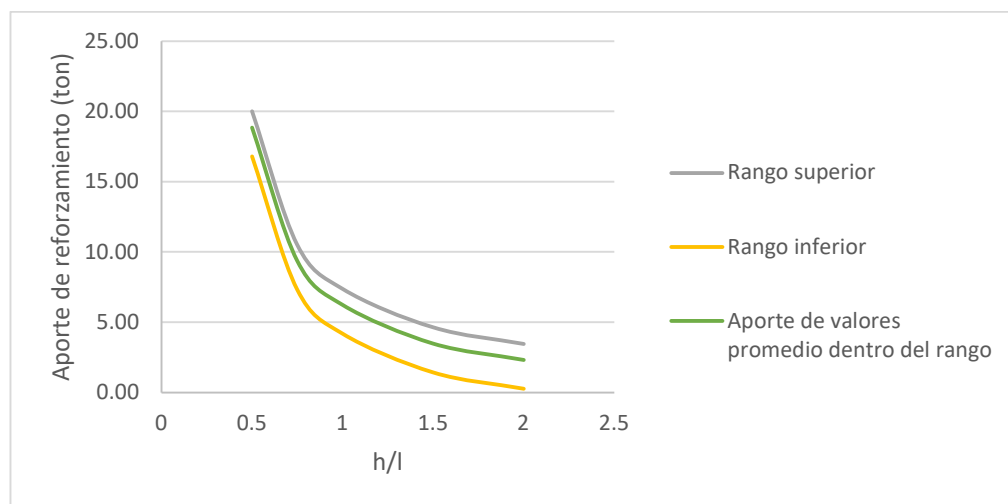


Figura 109. Comparación de aportes de capacidad de acuerdo a la relación de aspecto.

En el cuadro 56 se pueden observar los valores de rigidez obtenidos en las pruebas realizadas a los muros en los tres grupos (paredes patrón, reparadas 1 y reparadas 2) para ambos h/l .

Cuadro 55. Comparación de rigidez en muros fallados.

Rigidez (ton/mm)			
h/l	Pared patrón	Pared reparada 1	Pared Reparada 2
0.5	3.63	3.49	3.10
1	1.35	1.33	1.63

En el caso de los muros con $h/l = 0.5$, los tres tuvieron valores muy similares entre sí, con valores entre 3.10 y 3.63. Los muros con $h/l = 1$ también tuvieron valores muy similares entre ellos, con un rango entre 1.33 y 1.63.

Además, como era de esperarse, los valores de rigidez fueron mayores para los muros con h/l menor, es decir, los de 0.5 pues las áreas de inercia y de cortante son mayores con respecto a $h/l = 1$.

En la figura 107 se muestra los valores graficados para los tres grupos estudiados.

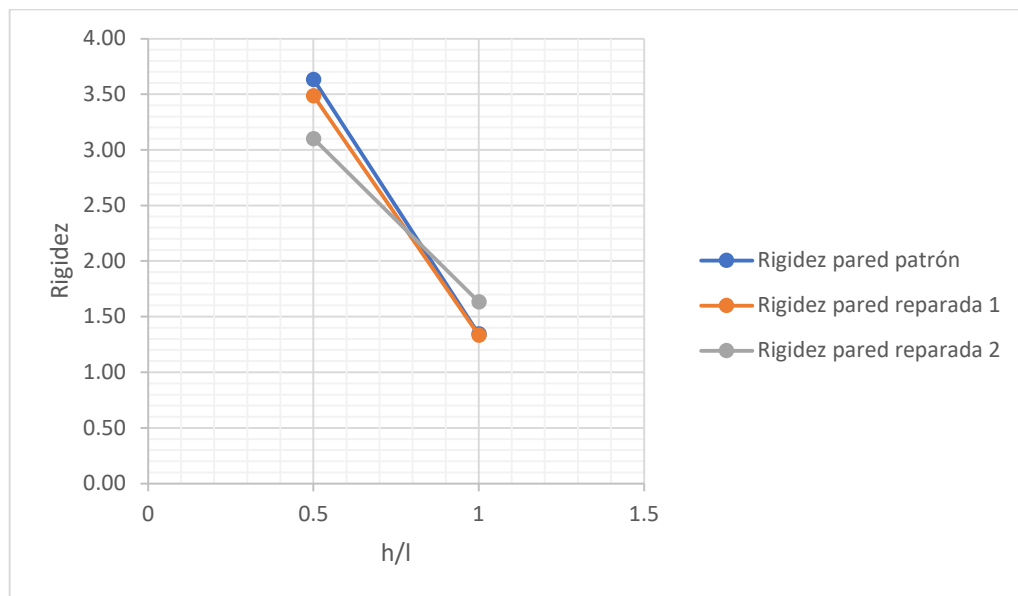


Figura 110. Valores de rigidez obtenidos en pruebas realizadas.

Los valores de ductilidad de los muros fallados, no fueron tan similares entre sí como en el caso de los valores de la rigidez. En el caso de los muros $h/l = 0.5$, los resultados variaron desde 2.06 hasta 5.15 y para $h/l = 1$ de 2.47 a 3.18.

Cuadro 56. Comparación de ductilidad en muros fallados.

Ductilidad (ton/mm)			
h/l	Pared patrón	Pared reparada 1	Pared Reparada 2
0.5	5.15	3.23	2.06
1	3.15	2.47	3.18

En el caso de los valores de ductilidad, el variar la relación de aspecto no provoca cambios importantes, no se muestra un patrón definido, lo cual puede deberse a que los valores obtenidos después de la capacidad máxima no son tan pronunciados.

En la figura 111 se muestran los valores obtenidos gráficamente para ambas relaciones de aspecto.

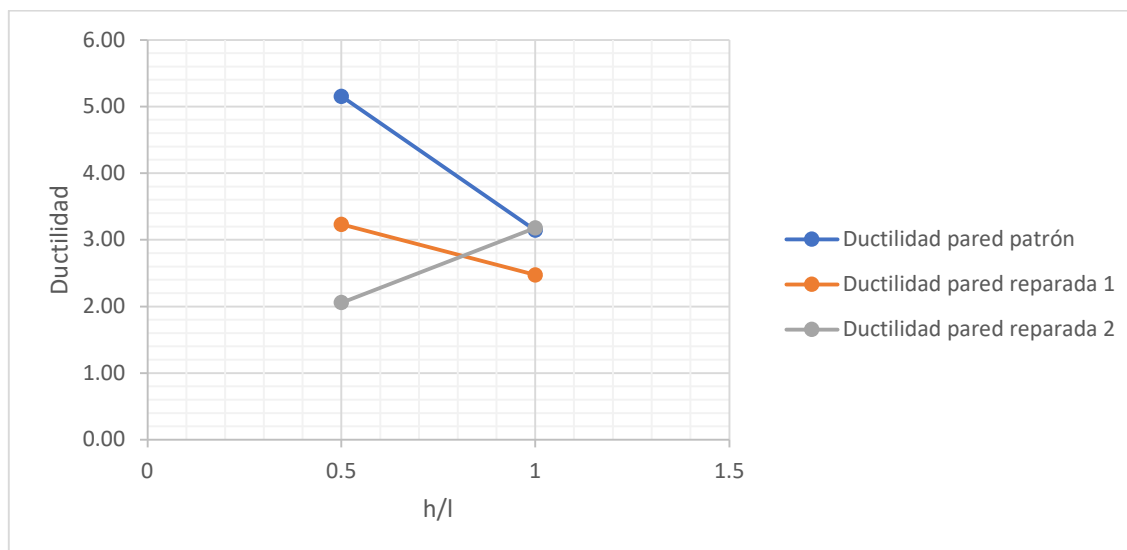


Figura 111. Valores de ductilidad obtenidos en pruebas realizadas.

20 Conclusiones

Con base en el análisis de resultados obtenido y a la investigación realizada, se concluye que:

- Los valores de carga teóricos nominales calculados de acuerdo con capítulo 9 de mampostería del CSCR 2010-14 (ref), de los muros sin el reforzamiento, se consideran conservadores de acuerdo con los resultados obtenidos experimentalmente en los muros patrón de ambas relaciones de aspecto.
- Al reparar paredes de mampostería confinada, una vez que han sido precargadas en un 94% de su capacidad (agrietamientos con rangos entre los 2 y 2.5 mm), con el sistema de reforzamiento de malla electrosoldada y mortero lanzado en uno de los lados del muro se obtuvo las resistencias iniciales de capacidad más un 36%, para aquellos muros con una relación de aspecto de $h/l = 0.5$.
- Al reparar paredes de mampostería confinada, una vez que han sido precargadas en un 94% de su capacidad (agrietamientos con rangos entre los 2 y 2.5 mm) con el sistema de reforzamiento de malla electrosoldada y mortero lanzado en uno de los lados del muro se obtuvo las resistencias iniciales de capacidad más un 22%, para aquellos muros con una relación de aspecto de $h/l = 1$.
- Los resultados de capacidad obtenidos entre las muestras, es decir entre el segundo y tercer grupo de los muros de mampostería confinada de cada uno de los tipos de relación de aspecto ($h/l = 0.5$ y $h/l = 1$) al ser reparados con el sistema de malla electrosoldada y mortero lanzado fueron prácticamente iguales al ser fallados en ambos casos, es decir los resultados fueron consistentes.

- La capacidad teórica del reforzamiento con el sistema de malla electrosoldada y mortero lanzado de acuerdo a la normativa del diseño de muros de concreto del apartado 8.7.2 del CSCR 2010-14 no se considera conservador pues experimentalmente solo se obtuvo un 39% del valor teórico en los muros con $h/l = 0.5$ y un 27 % del valor teórico en los muros con $h/l = 1$.
- La capacidad teórica del reforzamiento con el sistema de malla electrosoldada y mortero lanzado de acuerdo a la norma mexicana no se considera conservador pues experimentalmente solo se obtuvo un 57% del valor teórico en los muros con $h/l = 0.5$ y un 50 % del valor teórico en los muros con $h/l = 1$.
- De acuerdo con los resultados obtenidos, se podría considerar que la norma mexicana se adapta un poco mejor a los resultados obtenidos experimentalmente, sin embargo, es importante resaltar que la ecuación propuesta no considera el aporte del mortero lanzado, por lo que teóricamente sus valores deberían ser mayores.
- De acuerdo con los resultados obtenidos se logró obtener una ecuación que establece un rango de valores conservadores a ser considerados por un diseñador al reparar muros de mampostería confinada con malla electrosoldada y mortero lanzado de acuerdo a su relación de aspecto.
- Los valores de carga por metro lineal (ton/m) son mayores para la relación de aspecto $h/l = 1$, sin embargo, el aumento de carga por metro lineal de las paredes reparadas con respecto a la pared patrón que le corresponde es mayor para la relación de aspecto $h/l = 0.5$.
- Los valores obtenidos de rigidez de los muros fueron mayores en el caso de $h/l = 0.5$ en relación a los muros de $h/l = 1$.

- Los valores obtenidos de ductilidad de los muros no presentaron un patrón definido en concordancia a la relación de aspecto h/l .
- Con respecto al acero horizontal de los muros con $h/l = 0.5$, solo en una de las paredes reparadas presentó fluencia, lo cual se puede atribuir a la gran rigidez que presentan los muros de este tipo de relación de aspecto.
- Por otro lado, el acero horizontal de los muros con $h/l = 1$ presentaron fluencia en todos los casos a excepción de una que se encontraba dañada, lo cual es de esperar pues este acero es colocado para resistir el cortante.
- En el caso del acero vertical ubicado en las columnas 1 y 2 de los muros con $h/l = 0.5$, solo en una de las paredes se presentó la fluencia en dichas varillas, de igual forma la gran rigidez que presentan estos muros pudo provocar tal efecto.
- En el caso del acero vertical ubicado en las columnas 1 y 2 de los muros con $h/l = 1$, el comportamiento fue muy variado entre los muros por lo cual no se puede obtener una conclusión concreta.
- La malla electrosoldada no se ancló al cimiento pues constructivamente se considera más invasivo, sin embargo, en caso de realizarse podrían obtenerse mejores resultados de capacidad pues se logra un comportamiento más monolítico y aumentos de capacidad a flexión de los muros.
- Al aumentar la relación de aspecto, disminuye la capacidad de carga tanto de las paredes sin reforzar como de las reforzadas, pero aumenta el desplazamiento.

21 Recomendaciones

A continuación, se presentan una serie de recomendaciones a tomar en cuenta para futuras investigaciones afines a este tema de estudio:

- En el caso de fallar muros con relaciones de aspecto $h/l = 0.5$ o menores, se debe considerar realizar un montaje en el piso fuerte con tres pistones en lugar de dos, pues los muros actualmente fallados no se lograron degradar visualmente lo suficiente (a nivel de resistencia).
- Tener en cuenta en los montajes de próximas investigaciones la colocación de las camisas de acero que envuelven a los muros en la zona superior y que son soldadas a la viga de carga de acero, pues en el desarrollo de esta investigación se lograron obtener mejores resultados de las fallas, pues se lograba controlar el pandeo o desviación de los muros en el momento de ser cargados.
- Continuar realizando investigaciones de este tipo con un mayor alcance en las relaciones de aspecto y en la cantidad de las muestras, pues esto permitiría continuar ajustando la ecuación y permitir no sólo obtener rangos aceptables del aporte del reforzamiento de malla electrosoldada y mortero lanzado en muros de mampostería si no conseguir un valor más acertado.

22 Referencias

1. ASTM C1019: *Standard test method for sampling and testing grout. Annual Book of Standards, Vol. 4.01* (2008 Edition). Philadelphia, PA.
2. ASTM C136 – 06: *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Annual Book of Standards, Vol. 4.01*, (2008 Edition). Philadelphia, PA.
3. ASTM C29 / C29M – 09: *Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate*
4. ASTM C90: *Standard Specification for Loadbearing Concrete Masonry Units*
5. ASTM C127 – 07: *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.*
6. ASTM C39: *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*
7. ASTM C187 – 10: *Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement*
8. ASTM C128: *Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate. Annual Book of Standards, Vol. 4.01* (2008 Edition). Philadelphia, PA
9. ASTM C1314: *Standard test method for compressive strength of masonry prisms. Annual Book of Standards, Vol. 4.01* (2008 Edition). Philadelphia, PA.
10. ASTM C140: *Standard test method for sampling and testing concrete masonry units and related units. Annual Book of Standards, Vol. 4.01*, (2008 Edition). Philadelphia, PA
11. ASTM C270: *Standard specification for mortar for unit masonry. Annual Book of Standards, Vol. 4.01*, (2008 Edition). Philadelphia, PA.
12. ASTM C33: *Standard specification for concrete aggregates. Annual Book of Standards, Vol. 4.01*, (2008 Edition). Philadelphia, PA.
13. ASTM C 109/C – 109M – 02: *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). Annual Book*

- of Standards, Vol. 4.01, (2008 Edition). Philadelphia, PA.*
14. ASTM C476 – 09: *Standard Specification for Grout for Masonry. Annual Book of Standards, Vol. 4.01, (2008 Edition). Philadelphia, PA.*
 15. ASTM C-1117: *Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing. Annual Book of Standards, Vol. 4.01, (2008 Edition). Philadelphia, PA.*
 16. ASTM A615: *Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement.*
 17. ASTM A706: *Standard Specification for Smooth and Corrugated Low Alloy Steel Bars for Reinforcement of Concrete.*
 18. ASTM E2126-10: *Standard Test Methods For Cyclic (Reversed) Load Test For Shear Resistance Of Vertical Elements Of The Lateral Force Resisting Systems For Buildings.*
 19. ASTM E-519: *Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages. Annual Book of Standards, Vol. 4.01, (2008 Edition). Philadelphia, PA.*
 20. ASTM C1019: *Standard Test Method for Sampling and Testing Grout for Masonry.*
 21. Bruneau, M., Uang, C. & Whittaker, A. (1998). *Ductile Design of Steel Structures*. New York: McGraw-Hill
 22. MEIC 6293, Norma Oficial para Elementos de Mampostería Hueca de Concreto (Bloques).
 23. Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico de Costa Rica (2010). Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica (CFIA), *Código Sísmico de Costa Rica 2010.-14* Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
 24. Catálogo de Mampostería, Productos de Concreto. 2010
 25. Codero, M. (2012) Comportamiento en cortante de muros de mampostería con el refuerzo horizontal embebido en concreto o colocado en las sisas de los bloques, Universidad de Costa Rica.
 26. INTE 06-02-18-07, Compresión de prismas de mampostería.

27. INTECO. Norma INTE 06-03-01-07 Elementos de mampostería hueca de concreto – bloques– para uso estructural – requisitos.
28. INTECO. Norma INTE 06-02-13-07 Muestreo y ensayo de unidades de mampostería de concreto (bloques de concreto).
29. INTECO. Norma INTE 06-02-18-07 Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de prismas de mampostería.
30. INTECO. Norma INTE 06-02-19-07 Método de ensayo para el muestreo y ensayos del concreto de relleno para mampostería hueca de concreto.
31. INTECO. Norma INTE 06-03-04-08 Concretos – Especificaciones del mortero para unidades de mampostería.
32. INTECO. Norma INTE 06-02-20-08 Método de ensayo para la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico – usando especímenes cúbicos de 50 mm.
33. Navas, A. (2010). Notas de Clase, Curso Materiales Estructurales, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
34. Poveda, A. (2010). Notas del Curso Diseño de Estructuras de Mampostería. Costa Rica, Universidad de Costa Rica
35. Solano Barquero, J.C. Determinación de la resistencia al cortante en paredes de mampostería de bloques de concreto, reforzy mortero de muros de mamposteradas con malla electrosoldada. Informe del proyecto final para graduación. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, 2009.
36. Cordero Mariela, Comportamiento en cortante de muros de mampostería con el refuerzo horizontal embebido en concreto o colocado en las sisas de los bloques. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, 2012.
37. Leornado E. Flores, Moisés Ríos y Carlos Reyes Salinas, Rehabilitación con malla y mortero de muros de mampostería con aberturas, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, 2004.
38. Jorge Ruíz García, Rehabilitación sísmica de edificaciones de mampostería para

vivienda, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, 2007.

23 Anexos

23.1 Anexo A

A continuación, se presenta el cálculo del aporte de la malla electrosoldada y mortero lanzado en la pared de relación de aspecto $h/l = 1$ y para una resistencia del mortero de 28 días de 210 kg/cm^2 de acuerdo a la teoría de muros del capítulo 8 del CSCR 2010-14.

Datos del muro		
Cantidad de malla electrosoldada	1	unid
Espesor del mortero	5	cm
h del muro de mampostería con viga	269.5	cm
Espesor total del mortero	5	cm
Long del muro de mampostería más columnas	280	cm

Fórmulas		
Acv	1400	cm ²
Para α_c	$\frac{h}{l}$	0.96
α_c	0.8	1.5
α_c	0.53	

Valores de coeficiente α_c	
h/l	α_c
≤ 1.5	0.8
≥ 2	0.53

$\alpha_c = 0.8$

Propiedades de los materiales		
Fc mortero	210	kg/cm ²
Fy malla	5000	kg/cm ²
Separación de la malla	15	cm
Cantidad de varillas horizontales en la altura del muro	18	unid
Diámetro de varilla	4.11	mm
Diámetro de varilla	0.41	cm
Área de varilla de la malla	0.13	cm ²
Cantidad de acero total	2.38	cm ²

$$A_s = \rho_n \cdot t \cdot l$$

$\rho_n = 0.001702601$

Entonces:

$$V_n = A_{cv} (\alpha_c \sqrt{f'_c} + \rho_n f_y)$$

Vn	28148.6	kg
Vn	28.15	ton

Revisión

Además:

$$V_n < 2.5 \cdot A_{cv} \cdot \sqrt{f'_c}$$

Vn menor a	50719.8	kg
Vn menor a	50.7	ton

ok

Para la pared con relación de aspecto $h/l = 0.5$, el cálculo del aporte de la malla electrosoldada y mortero lanzado con una resistencia a los 28 días de 210 kg/cm^2 es el siguiente:

Datos del muro		
Cantidad de malla electrosoldada	1	unid
Espesor del mortero	5	cm
h del muro de mampostería	284.5	cm
Espesor total del mortero	5	cm
Long del muro de mampostería	560	cm

Fórmulas

Acv	2800	cm ²
Para α_c	$\frac{h}{l}$	0.51
α_c	0.8	1.5
α_c	0.53	

$$\alpha_c = 0.8$$

Valores de coeficiente α_c	
h/l	α_c
≤ 1.5	0.8
≥ 2	0.53

Propiedades de los materiales

Fc mortero	210	kg/cm ²
Fy malla	5000	kg/cm ²
Separación de la malla	15	cm

Cantidad de varillas horizontales en la altura del muro	18.9667	unid
Diámetro de varilla	4.11	mm
Diámetro de varilla	0.41	cm
Área de varilla de la malla	0.13	cm ²
Cantidad de acero total	2.52	cm ²

$$A_s = \rho_n \cdot t \cdot l$$

$$\rho_n = 0.00089868$$

Entonces:

$$V_n = A_c (\alpha_c \sqrt{f'_c} + \rho_n f_y)$$

$$V_n = 45042.25 \text{ kg}$$

$$V_n = 45.04 \text{ ton}$$

Revisión

$$\text{Además: } V_n < 2.5 \cdot A_{cv} \cdot \sqrt{f'_c}$$

$$V_n \text{ menor a } 101440 \text{ kg}$$

$$V_n \text{ menor a } 101.44 \text{ ton} \quad \text{ok}$$

A continuación, se presenta el cálculo del aporte de la malla electrosoldada de acuerdo a la norma mexicana en la pared de relación de aspecto h/l= 1.

Resistencia de una estructura rehabilitada ante cargas laterales

$$V_{R.R} = V_{sm} + V_{rm}$$

Resistencia a fuerza cortante que proporciona la malla electrosoldada

$$V_{sm} = \rho_h \cdot f_y \cdot A_T \cdot \eta$$

Resistencia a cortante remanente de los muros que han sufrido daños

$$V_{rm} = F_R \cdot V_R$$

Aporte de la malla electrosoldada:

$$V_{sm} = \rho_h \cdot f_y \cdot A_T \cdot \eta$$

Fy	5000	kg/cm ²
Longitud del muro de mampostería	280	cm
Espesor del muro de mampostería	15	cm
At (área bruta de la sección transversal del muro)	4200	cm ²

$$\rho_h = \frac{a_{sh}}{t \cdot s_h}$$

t	15	cm
sh (separacion de la malla electrosoldada)	15	cm
Diámetro de varilla de la malla electrosoldada	4.11	mm
Diámetro de varilla de la malla electrosoldada	0.41	cm
Área de varilla de la malla electrosoldada	0.13	cm ²
Área de varillas de la malla en una separación Sh	0.27	cm ²
ρ_h	0.001179291	

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

para valores de $\rho_h f_{yh}$ entre 6 y 9 kg/cm² se variara linealmente.

$\rho_h f_{yh}$	5.90
η	0.6

Entonces:

$V_{sm} = \rho_h \cdot f_y \cdot A_T \cdot \eta$	14859.067	kg
$V_{sm} = \rho_h \cdot f_y \cdot A_T \cdot \eta$	14.86	ton

Para la pared con relación de aspecto $h/l = 0.5$, el cálculo del aporte de la malla electrosoldada de acuerdo a la norma mexicana es el siguiente:

Resistencia de una estructura rehabilitada ante cargas laterales

$$V_{R,R} = V_{sm} + V_{rm}$$

Resistencia a fuerza cortante que proporciona la malla electrosoldada

$$V_{sm} = \rho_h \cdot f_y \cdot A_T \cdot \eta$$

Resistencia a cortante remanente de los muros que han sufrido daños

$$V_{rm} = F_R \cdot V_R$$

Aporte de la malla electrosoldada:

$$V_{sm} = \rho_h \cdot f_y \cdot A_T \cdot \eta$$

F_y	5000	kg/cm ²
Longitud del muro de mampostería	560	cm
Espesor del muro de mampostería	15	cm
A_t	8400	cm ²

$$\rho_h = \frac{a_{sh}}{t + s_h}$$

t	15	cm
sh (separacion de la malla electrosoldada)	15	cm
Diámetro de varilla	4.11	mm
Diámetro de varilla	0.41	cm
Área de varilla de la malla electrosoldada	0.13	cm ²
Área de varillas de la malla en una separación Sh	0.27	cm ²
ρ_h	0.0011793	

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

para valores de $\rho_h f_{yh}$ entre 6 y 9 kg/cm² se variara linealmente.

$\rho_h f_{yh}$	5.90
η	0.6

Entonces:

$$V_{sm} = \rho_h \cdot f_y \cdot A_T \cdot \eta \quad 29718 \quad \text{kg}$$

$$V_{sm} = \rho_h \cdot f_y \cdot A_T \cdot \eta \quad 29.72 \quad \text{ton}$$

23.2 Anexo B

A continuación, se detalla cálculo de la resistencia del muro $h/l = 0.5$.

Datos de pared

Refuerzo	#3 @ 60 cm vertical #3 @ 60 cm horizontal, con elementos de borde con 8#4 y aros #3@20cm
----------	--

h/l	0.50
-------	------

Datos de muro de mampostería

Peso de la mampost	1850	kg/m ³
Espesor del bloque	0.15	m
Longitud	5	m
Altura	2.4	m

Peso de la mampostería

@	80	1650	kg/m ³
@	60	1850	kg/m ³
@	40	2050	kg/m ³
@	20	2250	kg/m ³

Datos de viga corona

Peso del concreto	2400	kg/m ³
Espesor	0.15	m
Longitud	5.6	m
Altura	0.445	m

Datos de columna

Peso del concreto	2400	kg/m ³
Espesor	0.15	m
Longitud	0.3	m
Altura	2.4	m

Como vimos anteriormente para el diseño en cortante:

$$V_s = \frac{0.5A_{sh}f_y d}{2s}$$

$$d = 0.8l_w$$

$$V_m = \left\{ \left[1 - 0.44 \left(\frac{M_u}{V_u d} \right) \right] \sqrt{f'_m} + 0.25 \left(\frac{P_u}{A_g} \right) \right\} db_w$$

Donde:

$$\left(\frac{M_u}{V_u d} \right) \leq 1.0$$

$$A_g = bl_w$$

$$V_n = V_s + V_m$$

Diseño a cortante

$$\frac{Mu}{Vu} = \frac{Vu h}{Vu} = h$$

h	240	cm
d	490	cm
fm	100	kg/cm ²
Pu	0	kg
Ag	7500	cm ²
bw	7.6	cm
(Mu/Vu.d) calculado	0.49	
(Mu/Vu.d) a usar	0.49	

Clase de mampostería	Fm kg/cm ²
A	100
B	70
C	60

Vm = 29,214 kg

Ash	0.71	cm ²
Fy	3500	kg/cm ²
d	490	cm
Sh	60	cm

No de varilla	Area	
#3	0.71	cm ²
#4	1.27	cm ²
#5	1.98	cm ²
#6	2.85	cm ²

Vs = 5073.54 kg

Vn = 34,287.94 kg

Vn = 34.29 ton

Elemento de borde en tensión

Cantidad de columna	1	unid
F'c	210	kg/cm ²
d col	30	cm
b col	15	cm

Vc = 3456.2 kg

As	0.71	cm ²
Fy	3500	kg/cm ²
d col	25.415	cm
s col	20	cm

Vs = 3157.81375 kg

Vn = 6614.0 kg

Vn = 6.61 ton

Elemento de borde en compresión

Cantidad de columna	1	unid
F'cc	252	kg/cm ²
d col	30	cm
b col	15	cm
Vc	3786.1	kg
As	0.71	cm ²
Fy	3500	kg/cm ²
d col	25.415	cm
s col	20	cm
Vs	3157.81375	kg
Vn	6943.9	kg
Vn	6.94	ton
Vn total	47.85	ton

CON ELEMENTOS DE BORDE Y EL REFUERZO CONCENTRADO EN LOS MISMOS

Mn = 190 Ton.m (ver diagrama de interacción)

Vn por flexión =	66.78	Ton
-------------------------	--------------	------------

Para el diseño por flexión:

$$M_n = \frac{A_s f_y l_w}{2} \left(1 + \frac{P_n}{A_s f_y} \right) \left(1 - \frac{c}{l_w} \right)$$

$$\frac{c}{l_w} = \frac{\alpha + \beta}{2\alpha + 0.72}$$

$$\beta = \frac{P_n}{t l_w f'_m}$$

$$\alpha = \frac{A_s f_y}{t l_w f'_m}$$

Diseño a flexión (Método simplificado para mampostería)

As	5.9	cm ²
fy	3500	kg/cm ²
lw	500	cm
Pn	0	kg
t	15	cm
fm	100	kg/cm ²

$$\alpha = 0.028$$

$$\beta = 0$$

$$c/l_w = 0.036$$

$$M_n = 4,992,691.01 \text{ kg cm}$$

$$M_n = 49.93 \text{ ton m}$$

$$V_n \text{ por flexión} = 20.80 \text{ ton}$$

Ahora se analiza en conjunto el acero de la mampostería y las columnas:

CON ELEMENTOS DE BORDE Y EL REFUERZO CONCENTRADO EN LOS MISMOS

$$M_n = 190 \text{ Ton.m (ver diagrama de interacción)}$$

Vn por flexión =	66.78	Ton
------------------	-------	-----

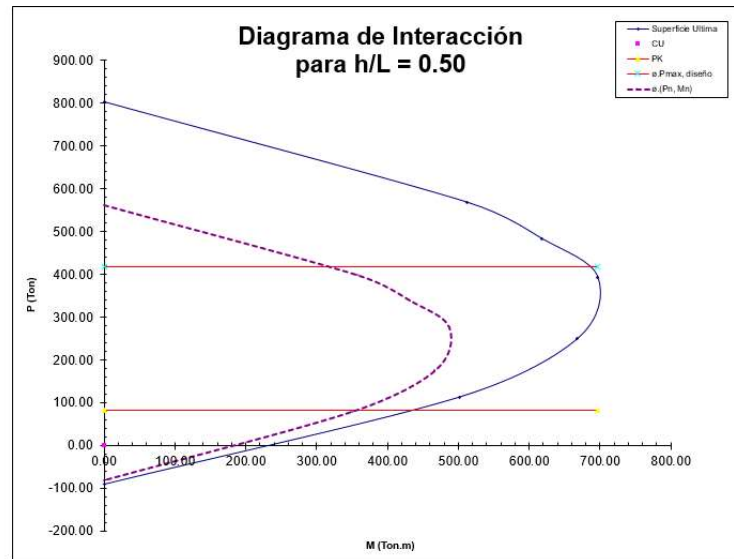


Figura 112. Diagrama de interacción para $h/l = 0.5$.

A continuación, se detalla cálculo de la resistencia del muro $h/l = 1$.

Datos de pared

Refuerzo	#3 @ 60 cm vertical #3 @ 60 cm horizontal, con elementos de borde con 8#4 y aros #3@20 cm
----------	---

h/l	1.00
-------	------

Datos de muro de mampostería

Peso de la mampostería	1850	kg/m^3
Espesor del bloque	0.15	m
Longitud	2.2	m
Altura	2.4	m

Peso de la mampostería

80	1650	kg/m^3
60	1850	kg/m^3
40	2050	kg/m^3
20	2250	kg/m^3

Datos de viga corona

Peso del concreto	2400	kg/m^3
Espesor	0.15	m
Longitud	2.8	m
Altura	0.295	m

Datos de columna

Peso del concreto	2400	kg/m^3
Espesor	0.15	m
Longitud	0.3	m
Altura	2.4	m

Como vimos anteriormente para el diseño en cortante:

$$V_s = \frac{0.5A_{sh}f_y d}{2s}$$

$$d = 0.8l_w$$

$$V_m = \left\{ \left[1 - 0.44 \left(\frac{M_u}{V_u d} \right) \right] \sqrt{f'_m} + 0.25 \left(\frac{P_u}{A_g} \right) \right\} db_w$$

Donde:

$$\left(\frac{M_u}{V_u d} \right) \leq 1.0$$

$$A_g = bl_w$$

$$V_n = V_s + V_m$$

Diseño a cortante

$\frac{M_u}{V_u}$	=	$\frac{V_u h}{V_u}$	=		
h	240	cm		Clase de mampostería	Fm kg/cm²
d	210	cm		A	100
f _m	100	kg/cm ²		B	70
P _u	0	kg		C	60
A _g	3300	cm ²			
b _w	7.6	cm			
(M _u /V _u .d) _{calculado}	1.14				
(M _u /V _u .d) _{a usar}	1				
V_m =	8,938	kg		No de varilla	Area
A _{sh}	0.71	cm ²		#3	0.71 cm ²
F _y	3500	kg/cm ²		#4	1.27 cm ²
d	210	cm		#5	1.98 cm ²
S _h	60	cm		#6	2.85 cm ²
V_s =	2174.375	kg			
V_n =	11,111.98	kg			
V_n =	11.11	ton			

Elemento de borde en tensión

Cantidad de columnas	1	unid
F'c	210	kg/cm ²
d col	30	cm
b col	15	cm
Vc	3456.2	kg
As	0.71	cm ²
Fy	3500	kg/cm ²
d col	25.415	cm
s col	20	cm
Vs	3157.81375	kg
Vn	6614.0	kg
Vn	6.61	ton

Elemento de borde en compresión

Cantidad de columnas	1	unid
F'cc	252	kg/cm ²
d col	30	cm
b col	15	cm
Vc	3786.1	kg
As	0.71	cm ²
Fy	3500	kg/cm ²
d col	25.415	cm
s col	20	cm
Vs	3157.81375	kg
Vn	6943.9	kg
Vn	6.94	ton

Vn total	24.67	ton
-----------------	--------------	------------

Para el diseño por flexión:

$$M_n = \frac{A_s f_y l_w}{2} \left(1 + \frac{P_n}{A_s f_y} \right) \left(1 - \frac{c}{l_w} \right)$$

$$\frac{c}{l_w} = \frac{\alpha + \beta}{2\alpha + 0,72}$$

$$\beta = \frac{P_n}{t l_w f'_m}$$

$$\alpha = \frac{A_s f_y}{t l_w f'_m}$$

Diseño a flexión (Método simplificado para mampostería)

As	2.6	cm ²
fy	3500	kg/cm ²
lw	220	cm
Pn	0	kg
t	15	cm
fm	100	kg/cm ²
$\alpha =$	0.028	
$\beta =$	0	
$c/l_w =$	0.036	
Mn =	966,584.98	kg cm
Mn =	9.67	ton m
Vn por flexión=	4.03	ton

Ahora se analiza en conjunto el acero de la mampostería y las columnas:

CON ELEMENTOS DE BORDE Y EL REFUERZO CONCENTRADO EN LOS MISMOS

Mn = 95 Ton.m (ver diagrama de interacción)

Vn por flexión = 35.25 Ton

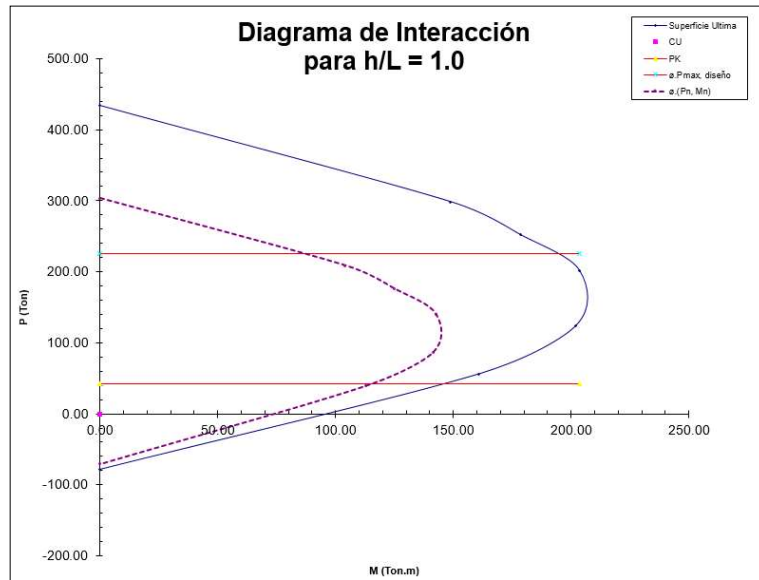


Figura 113. Diagrama de interacción para $h/l = 1$.

23.3 Anexo C

A continuación, se detallan los protocolos de carga de cada una de las paredes.

Pared patrón 1, $h/l = 0.5$

Cuadro 57. Protocolo de carga, pared patrón 1, $h/l = 0.5$

Etapa	Ciclo	Número de repeticiones	Amplitud (mm)	% de Delta m
1	1	1	0.81	1.25%
	2	1	1.63	2.50%
	3	1	3.25	5.00%
2	4	2	4.88	7.50%
	5	2	6.50	10.00%
	6	2	13.00	20.00%
	7	2	26.00	40.00%
	8	2	39.00	60.00%
	9	2	52.00	80.00%
	10	2	65.00	100.00%

Pared patrón 1, $h/l = 1$

Cuadro 58. Protocolo de carga, pared patrón 1, $h/l = 1$

Etapa	Ciclo	Número de repeticiones	Amplitud (mm)	% de Delta m
1	1	1	1.19	1.25%
	2	1	2.38	2.50%
	3	1	4.75	5.00%
	4	1	7.13	7.50%
	5	1	9.50	10.00%
2	6	3	19.00	20.00%
	7	3	38.00	40.00%
	8	3	57.00	60.00%
	9	3	76.00	80.00%
	10	3	95.00	100.00%
	11	3	114.00	120.00%
	12	3	133.00	140.00%

Pared precargada 1, $h/l = 0.5$

Cuadro 59. Protocolo de carga, pared precargada 1, $h/l = 0.5$

Etapa	Ciclo	Número de repeticiones	Amplitud (mm)	% de Delta m
1	1	1	0.38	1.25%
	2	1	0.76	2.50%
	3	1	1.52	5.00%
	4	1	2.29	7.50%
	5	1	3.05	10.00%
2	6	3	6.09	20.00%
	7	3	12.19	40.00%
	8	3	18.28	60.00%
	9	3	24.38	80.00%
	10	3	30.47	100.00%
	11	3	36.57	120.00%
	12	3	42.66	140.00%

Pared precargada 1, $h/l = 1$

Cuadro 60. Protocolo de carga, pared precargada 1, $h/l = 1$

Etapa	Ciclo	Número de repeticiones	Amplitud (mm)	% de Delta m
1	1	1	0.25	1.25%
	2	1	0.51	2.50%
	3	1	1.02	5.00%
	4	1	1.52	7.50%
	5	1	2.03	10.00%
2	6	3	4.07	20.00%
	7	3	8.13	40.00%
	8	3	12.20	60.00%
	9	3	16.26	80.00%
	10	3	20.33	100.00%
	11	3	24.39	120.00%
	12	3	28.46	140.00%

Pared reparada 1, $h/l = 0.5$

Cuadro 61. Protocolo de carga, pared reparada 1, $h/l = 0.5$

Etapa	Ciclo	Número de repeticiones	Amplitud (mm)	% de Delta m
1	1	1	0.44	1.25%
	2	1	0.88	2.50%
	3	1	1.75	5.00%
	4	1	2.63	7.50%
	5	1	3.50	10.00%
2	6	3	7.00	20.00%
	7	3	14.00	40.00%
	8	3	21.00	60.00%
	9	3	28.00	80.00%
	10	3	35.00	100.00%
	11	3	42.00	120.00%
	12	3	49.00	140.00%

Pared reparada 1, $h/l = 1$

Cuadro 62. Protocolo de carga, pared reparada 1, $h/l = 1$

Etapa	Ciclo	Número de repeticiones	Amplitud (mm)	% de Delta m
1	1	1	0.56	1.25%
	2	1	1.13	2.50%
	3	1	2.25	5.00%
	4	1	3.38	7.50%
	5	1	4.50	10.00%
2	6	3	9.00	20.00%
	7	3	18.00	40.00%
	8	3	27.00	60.00%
	9	3	36.00	80.00%
	10	3	45.00	100.00%
	11	3	54.00	120.00%
	12	3	63.00	140.00%

Pared precargada 2, $h/l = 0.5$

Cuadro 63. Protocolo de carga, pared precargada 2, $h/l = 0.5$

Etapa	Ciclo	Número de repeticiones	Amplitud (mm)	% de Delta m
1	1	1	0.31	1.25%
	2	1	0.63	2.50%
	3	1	1.25	5.00%
	4	1	1.88	7.50%
	5	1	2.50	10.00%
2	6	3	5.00	20.00%
	7	3	10.00	40.00%
	8	3	15.00	60.00%
	9	3	20.00	80.00%
	10	3	25.00	100.00%
	11	3	30.00	120.00%
	12	3	35.00	140.00%

Pared precargada 2, $h/l = 1$

Cuadro 64. Protocolo de carga, pared precargada 2, $h/l = 1$

Etapa	Ciclo	Número de repeticiones	Amplitud (mm)	% de Delta m
1	1	1	0.39	1.25%
	2	1	0.78	2.50%
	3	1	1.55	5.00%
	4	1	2.33	7.50%
	5	1	3.10	10.00%
2	6	3	6.20	20.00%
	7	3	12.40	40.00%
	8	3	18.60	60.00%
	9	3	24.80	80.00%
	10	3	31.00	100.00%
	11	3	37.20	120.00%
	12	3	43.40	140.00%

Pared reparada 2, $h/l = 0.5$ **Cuadro 65. Protocolo de carga, pared reparada 2, $h/l = 0.5$**

Etapa	Ciclo	Número de repeticiones	Amplitud (mm)	% de Delta m
1	1	1	0.44	1.25%
	2	1	0.88	2.50%
	3	1	1.75	5.00%
	4	1	2.63	7.50%
	5	1	3.50	10.00%
2	6	3	7.00	20.00%
	7	3	14.00	40.00%
	8	3	21.00	60.00%
	9	3	28.00	80.00%
	10	3	35.00	100.00%
	11	3	42.00	120.00%
	12	3	49.00	140.00%

Pared reparada 2, $h/l = 1$ **Cuadro 66. Protocolo de carga, pared reparada 2, $h/l = 1$**

Etapa	Ciclo	Número de repeticiones	Amplitud (mm)	% de Delta m
1	1	1	0.50	1.25%
	2	1	1.00	2.50%
	3	1	2.00	5.00%
	4	1	3.00	7.50%
	5	1	4.00	10.00%
2	6	3	8.00	20.00%
	7	3	16.00	40.00%
	8	3	24.00	60.00%
	9	3	32.00	80.00%
	10	3	40.00	100.00%
	11	3	48.00	120.00%
	12	3	56.00	140.00%