

**Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil**

**Análisis del comportamiento ante carga cíclica de muros de
mampostería confinada reforzada con diferentes relaciones de aspecto**

Trabajo Final de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Andrés David Picado Arguedas

Director del Proyecto de Graduación:

Dr.-Ing. Diego Hidalgo Leiva

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Director:

Dr.-Ing. Diego Hidalgo Leiva

Asesor:

Ing. Guillermo González Beltrán, Ph.D.

Asesor:

Ing. Alejandro Navas Carro, M.Sc

Estudiante:

Andrés David Picado Arguedas

Fecha: 2019, Octubre

El suscrito, Andrés David Picado Arguedas, cédula 4-0231-0973, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **B45295**, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación **Análisis del comportamiento ante carga cíclica de muros de mampostería confinada reforzada con diferentes relaciones de aspecto**, bajo la dirección del **Dr.-Ing Diego Hidalgo Leiva**, 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 hacer 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 la información contenida en esta obra.

Dedicatoria

A mis papás.

Agradecimientos

A mi mamá y mi papá por todo el apoyo, al comité asesor por la guía brindada y al Lanamme por la ayuda. Además, al CONICIT, por suministrar los fondos que hicieron posible el presente proyecto y a Pedregal, Intaco y AMCO por las donaciones de material.

Índice

1.	Introducción.....	1
1.1	Justificación.....	1
1.1.1	Problema específico.....	1
1.1.2	Importancia	1
1.2	Objetivos.....	2
1.2.1	Objetivo general.....	2
1.2.2	Objetivos específicos	2
1.3	Marco teórico	2
1.3.1	Sistema constructivo	2
1.3.2	Muros de corte.....	4
1.3.3	Relación de aspecto	5
1.3.4	Curvas de histéresis	10
1.3.5	Modo de falla	12
1.3.6	Hipótesis	17
1.4	Antecedentes experimentales	18
1.5	Alcances.....	24
1.6	Metodología.....	25
1.6.1	Recopilación de información.....	26
1.6.2	Desarrollo Experimental.....	26
1.6.3	Análisis de Información	28
2.	Caracterización de los especímenes estructurales	29
2.1	Materiales	29
2.1.1	Cemento.....	29
2.1.2	Agregados	29
2.1.3	Concreto.....	29
2.1.4	Acero de refuerzo.....	30

2.1.5	Bloques de mampostería	31
2.1.6	Concreto de relleno	32
2.1.7	Mortero	33
2.1.8	Resistencia de la mampostería	33
2.2	Descripción geométrica de los Muros.....	33
2.2.1	Muro A	33
2.2.2	Muro B	35
2.2.3	Muro C	37
2.2.4	Muro D.....	38
2.2.5	Muro E	40
2.3	Capacidad nominal de los muros.....	41
2.4	Proceso constructivo	41
2.4.1	Cimentación.....	41
2.4.2	Paño de mampostería.....	44
2.4.3	Elementos de confinamiento	48
2.5	Montaje experimental.....	51
2.5.1	Instrumentación.....	51
2.5.2	Montaje en el piso fuerte.....	52
3.	Presentación y Análisis de Resultados	55
3.1	Resultados del Muro A.....	55
3.1.1	Proceso de falla.....	55
3.1.2	Fluencia del acero	57
3.1.3	Curva histerética	57
3.2	Análisis del Muro A.....	58
3.3	Resultados del Muro B.....	61
3.3.1	Proceso de falla.....	61
3.3.2	Fluencia del acero	64
3.3.3	Curva histerética	64

3.4	Análisis del Muro B.....	65
3.5	Resultados del Muro C.....	68
3.5.1	Proceso de falla.....	68
3.5.2	Fluencia del acero	71
3.5.3	Curva histerética	71
3.6	Análisis del Muro C.....	72
3.7	Resultados del Muro D	75
3.7.1	Proceso de falla.....	75
3.7.2	Fluencia del acero	77
3.7.3	Curva histerética	77
3.8	Análisis del Muro D	78
3.9	Resultados del Muro E.....	80
3.9.1	Proceso de falla.....	80
3.9.2	Fluencia del acero	83
3.9.3	Curva histerética	83
3.10	Análisis del Muro E.....	84
3.11	Comparación entre muros	86
3.11.1	Curvas envolventes y EEEP	86
3.11.2	Ductilidad y Energía Disipada	88
3.11.3	Resistencias y desplazamientos	90
3.11.4	Rigideces elásticas	93
3.11.5	Galgas extensométricas	98
3.11.6	Modo de falla	98
4.	Conclusiones y Recomendaciones	100
4.1	Conclusiones	100
4.2	Recomendaciones	102
5.	Bibliografía.....	103
5.1	Fuentes de información	103

5.2	Normas consultadas	105
6.	Apéndice 1	108
6.1	Metodología de diseño de los muros	108
6.1.1	Diseño para resistir flexocompresión	108
6.1.2	Diseño para resistir fuerzas cortantes	111
7.	Apéndice 2	115
7.1	Instrumentación de los muros	115
8.	Apéndice 3	118
8.1	Protocolos de carga	118
8.1.1	Muro A	118
8.1.2	Muro B	118
8.1.3	Muro C	119
8.1.4	Muro D	119
8.1.5	Muro E	120
9.	Apéndice 4	121
9.1	Valores máximos de cada ciclo de histéresis	121
9.1.1	Muro A	121
9.1.2	Muro B	122
9.1.3	Muro C	123
9.1.4	Muro D	124
9.1.5	Muro E	125
10.	Apéndice 5	127
10.1	Degradación de la rigidez	127
10.1.1	Muro A	127
10.1.2	Muro B	127
10.1.3	Muro C	128
10.1.4	Muro D	128
10.1.5	Muro E	129

11.	Apéndice 6.....	130
11.1	Cálculos adicionales	130
11.1.1	Cortante por deslizamiento del Muro A	130
11.1.2	Cortante por deslizamiento del Muro B	130
11.1.3	Cortante por deslizamiento del Muro C	130

Índice de figuras

Figura 1.	Diagrama de carga lateral $F(x)$, fuerza cortante $V(x)$ y momento flector $M(x)$. ..	5
Figura 2.	Muros de mampostería con relaciones de aspecto de: a) 1,0 b) 2,0 c) 0,5.	6
Figura 3.	Razón de fuerzas cortantes al variar la relación de aspecto y carga axial, NIST (2014).	9
Figura 4.	Curva de histéresis, Carter (1988).	10
Figura 5.	Curva de energía elastoplástica equivalente y envolvente, Acuña (2014).	12
Figura 6.	Modelo puntal tensor en un muro, Viu (2009).	13
Figura 7.	Modo de falla por cortante deslizante, Paulay & Priestley (1992).	14
Figura 8.	Falla por tracción diagonal, Ingham & Voon (2006).	15
Figura 9.	Falla por aplastamiento en la base, Chenghao et al. (2008).	15
Figura 10.	Falla por inestabilidad, Chenghao et al. (2008).	16
Figura 11.	Muro de mampostería dúctil y su curva de histéresis, NIST (2014).	17
Figura 12.	Muro de mampostería frágil y su curva de histéresis, NIST (2014).	17
Figura 13.	Ductilidad y comportamiento al variar la relación de aspecto, a) Sandoval et al. (2018), b) Ramírez et al. (2016).	22
Figura 14.	Degradación de la rigidez al variar la deriva lateral, a) Sandoval et al. (2018), b) Ramírez et al (2016).	23
Figura 15.	Diagrama metodológico.	25
Figura 16.	Curva esfuerzo-deformación de una varilla No. 4.	31
Figura 17.	Esquema general de la geometría de bloques huecos de concreto, Zúñiga (2018).	31
Figura 18.	Vista lateral del Muro A, correspondiente a una relación de aspecto de 0,5 (cotas en cm).	34
Figura 19.	Detalle de la sección transversal de cimentación del Muro A (cotas en cm). ...	34
Figura 20.	Detalle de sección transversal de columnas y viga del Muro A (cotas en cm)..	35

Figura 21. Vista lateral del Muro B, correspondiente a una relación de aspecto de 0,75 (cotas en cm).	35
Figura 22. Detalle de la sección transversal de cimentación del Muro B (cotas en cm). ...	36
Figura 23. Detalle de sección transversal de columna y viga de los muros B y C (cotas en cm).	36
Figura 24. Vista lateral del Muro C, correspondiente a una relación de aspecto de 1,0 (cotas en cm).	37
Figura 25. Detalle de la sección transversal de cimentación del Muro C (cotas en cm). ...	37
Figura 26. Vista lateral del Muro D, correspondiente a una relación de aspecto de 1,5 (cotas en cm).	38
Figura 27. Detalle de la sección transversal de cimentación del Muro D (cotas en cm). ...	39
Figura 28. Detalle de sección transversal de columna y viga de los muros D y E (cotas en cm).	39
Figura 29. Vista lateral del Muro E, correspondiente a una relación de aspecto de 2,0 (cotas en cm).	40
Figura 30. Detalle de la sección transversal de cimentación del Muro E (cotas en cm). ...	40
Figura 31. Armadura de la cimentación para el Muro A.	42
Figura 32. Ductos de pernos y ajuste en el piso fuerte.....	42
Figura 33. Cimentación encofrada con acero vertical colocado.	43
Figura 34. Preparación de galga extensométrica en varilla vertical.....	43
Figura 35. Colado de las cimentaciones con concreto premezclado.	44
Figura 36. Construcción de las primeras 4 hiladas del Muro E.....	44
Figura 37. Paño terminado del Muro E.	45
Figura 38. Ventanas de inspección.	46
Figura 39. Prueba de fluidez del concreto de relleno.....	46
Figura 40. Equipo Monomix para mezcla y bombeo del concreto de relleno.....	47
Figura 41. Última celda de muro rellena con concreto.....	47
Figura 42. Muro envuelto con plástico para garantizar fraguado del concreto.....	48
Figura 43. Muros con elementos de borde verticales encofrados.	49
Figura 44. Encofrado de la viga corona.	49
Figura 45. Colado de la viga corona.....	50
Figura 46. Muros finalizados en proceso de curado.....	50
Figura 47. Instrumentación esquemática de los muros.	51
Figura 48. Ejemplo de preparación experimental del espécimen de muro de corte, ASTM E2126 (ref).	52

Figura 49. Montaje del muro en el laboratorio de fuerza.	53
Figura 50. Riostras laterales, pistón hidráulico y viga de carga sobre muro de mampostería.	53
Figura 51. Agrietamiento parcial del paño de mampostería del Muro A, para el 2° ciclo de la 9° serie (± 52 mm).	55
Figura 52. Condición final del nudo superior izquierdo del Muro A.	56
Figura 53. Condición final del Muro A.	56
Figura 54. Curva de histéresis del Muro A.	57
Figura 55. Curvas envolvente y EEEP del Muro A.	58
Figura 56. Agrietamiento parcial del Muro B para el 3° ciclo de la 8° serie (± 48 mm).	62
Figura 57. Agrietamiento final en la base del Muro B.	62
Figura 58. Condición final del nudo del Muro B.	63
Figura 59. Condición final del Muro B.	63
Figura 60. Curva de histéresis del Muro B.	64
Figura 61. Curvas envolvente y EEEP del Muro B.	65
Figura 62. Agrietamiento parcial en el Muro C para el 1° ciclo de la 8° serie (± 57 mm).	69
Figura 63. Condición final del nudo del Muro C.	69
Figura 64. Aplastamiento final en la base de la columna del Muro C.	70
Figura 65. Condición final del Muro C.	70
Figura 66. Curva de histéresis del Muro C.	71
Figura 67. Curvas envolvente y EEEP del Muro C.	72
Figura 68. Agrietamiento parcial del Muro D para el 1° ciclo de la 10° serie (± 85 mm).	75
Figura 69. Pandeo del acero en la base de la columna del Muro D.	76
Figura 70. Condición final del Muro D.	76
Figura 71. Curva de histéresis del Muro D.	77
Figura 72. Curvas envolvente y EEEP del Muro D.	78
Figura 73. Agrietamiento parcial en el Muro E para el 1° ciclo de la 10° serie (± 90 mm).	81
Figura 74. Aplastamiento del concreto y ruptura del acero de refuerzo de la columna del Muro E.	82
Figura 75. Condición final del Muro E.	82
Figura 76. Curva de histéresis del Muro E.	83
Figura 77. Curvas envolvente y EEEP del Muro E.	84
Figura 78. Curvas envolventes de los muros.	87
Figura 79. Curvas EEEP de los muros.	87

Figura 80. Ductilidad para las direcciones de carga positiva y negativa, así como el valor promedio para cada muro.....	88
Figura 81. Energía disipada en cada muro.	88
Figura 82. Porcentajes de energía elástica y plástica disipada en cada muro.	89
Figura 83. Resistencia máxima de los muros.	90
Figura 84. Fuerza de fluencia de los muros.	90
Figura 85. Fuerza por unidad de longitud.....	91
Figura 86. Desplazamiento máximo de los muros.	92
Figura 87. Desplazamiento de fluencia de los muros.....	92
Figura 88. Rigidez elástica experimental de los muros.	93
Figura 89. Rigidez elástica teórica de los muros.	94
Figura 90. Comparación entre rigideces.	95
Figura 91. Rigidez elástica de los muros con coeficientes de ajuste.	96
Figura 92. Degradación de la rigidez con respecto a la deformación lateral en los muros.	97
Figura 93. Diagrama de interacción típico.	108
Figura 94. Sección transformada.	110
Figura 95. Instrumentación del Muro A.	115
Figura 96. Instrumentación del Muro B.	115
Figura 97. Instrumentación del Muro C.	116
Figura 98. Instrumentación del Muro D.....	116
Figura 99. Instrumentación del Muro E.	117

Índice de cuadros

Cuadro 1. Requerimientos mecánicos de los componentes de la mampostería, de acuerdo con los lineamientos del CSCR-10/14 (2016).	3
Cuadro 2. Datos generales de los ensayos de Acuña (2014).....	20
Cuadro 3. Rigidez y ductilidad de paredes de mampostería integral de Cordero (2012)...	20
Cuadro 4. Carga, deformación y ductilidad de los muros de Salazar (2013).....	21
Cuadro 5. Normas utilizadas durante el proceso experimental.....	26
Cuadro 6. Resistencia del concreto de vigas y columnas medida a los 28 días.	29
Cuadro 7. Resistencia del concreto de la cimentación medido a los 28 días.....	30
Cuadro 8. Propiedades mecánicas del acero empleado en la construcción de los muros estudiados.	30

Cuadro 9. Propiedades geométricas de los bloques de mampostería medidas en laboratorio.	32
Cuadro 10. Resistencia de bloques de mampostería medida sobre el área neta de las unidades.....	32
Cuadro 11. Resistencia de prismas de concreto de relleno medida a los 28 días.	32
Cuadro 12. Resistencia de los prismas de mampostería medida a los 28 días.	33
Cuadro 13. Capacidades nominales teóricas de los especímenes.	41
Cuadro 14. Resumen de información de las galgas del Muro A.	57
Cuadro 15. Resultados generales del Muro A.	58
Cuadro 16. Resumen de información de las galgas del Muro B.	64
Cuadro 17. Resultados generales del Muro B.	65
Cuadro 18. Resumen de información de las galgas del Muro C.	71
Cuadro 19. Resultados generales del Muro C.	72
Cuadro 20. Resumen de información de las galgas del Muro D.....	77
Cuadro 21. Resultados generales del Muro D.	78
Cuadro 22. Resumen de información de las galgas del Muro E.	83
Cuadro 23. Resultados generales del Muro E.....	84
Cuadro 24. Comparación de la información de las galgas.....	98
Cuadro 25. Protocolo de carga del Muro A.	118
Cuadro 26. Protocolo de carga del Muro B.	118
Cuadro 27. Protocolo de carga del Muro C.	119
Cuadro 28. Protocolo de carga del Muro D.	119
Cuadro 29. Protocolo de carga del Muro E.	120
Cuadro 30. Valores extremos de cada ciclo de histéresis del Muro A.	121
Cuadro 31. Valores extremos de cada ciclo de histéresis del Muro B.	122
Cuadro 32. Valores extremos de cada ciclo de histéresis del Muro C.	123
Cuadro 33. Valores extremos de cada ciclo de histéresis del Muro D.....	124
Cuadro 34. Valores extremos de cada ciclo de histéresis del Muro E.	125
Cuadro 35. Degradación de rigidez para el Muro A.	127
Cuadro 36. Degradación de rigidez para el Muro B.	127
Cuadro 37. Degradación de rigidez para el Muro C.	128
Cuadro 38. Degradación de rigidez para el Muro D.....	128
Cuadro 39. Degradación de rigidez del Muro E.	129

Índice de abreviaturas

a = profundidad del bloque equivalente de esfuerzos de compresión, cm.

$A_{compresión}$ = área del acero longitudinal en compresión, 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 .

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

A_v = área de una pata del acero de los aros de las columnas, cm^2 .

A_{va} = área efectiva en cortante de la sección transversal, cm^2 .

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

b = ancho del muro, cm.

b_{col} = ancho de la columna con área transformada, 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 = longitud de la diagonal del modelo puntal-tensor, cm.

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

d_c = distancia de la fibra extrema en compresión de la columna a la capa de acero más alejada, cm.

d_m = distancia de la fibra extrema en compresión de la mampostería a la capa de acero más alejada, cm.

d_{rec} = longitud del recubrimiento, cm.

$d_{\#4}$ = diámetro de una varilla No. 4, cm.

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

E_c = módulo de elasticidad del concreto, kg/cm².

E_m = módulo de elasticidad de la mampostería, kg/cm².

F_c = fuerza de compresión en el muro, kg.

f'_c = resistencia a la compresión a los 28 días del concreto, kg/cm².

f'_m = resistencia a la compresión de la mampostería a los 28 días, kg/cm².

F_s = fuerza total en el acero de refuerzo vertical del muro, kg.

f_s = esfuerzo en el acero de refuerzo vertical del muro, kg/cm².

f_y = esfuerzo de fluencia del acero, kg/cm².

f_{yt} = esfuerzo de fluencia del acero ubicado en la fibra con máxima deformación en tracción, kg/cm².

G = módulo de cortante, kg/cm².

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

h_m = altura del paño de mampostería, cm.

I = inercia de la sección, cm⁴.

k_b = rigidez de flexión del elemento, T/mm.

k_s = rigidez secante del elemento, T/mm.

k_v = rigidez cortante del elemento, T/mm.

k_t = rigidez total del elemento, T/mm.

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, kg·m.

M_u = momento último en la sección, kg·m.

n = razón entre módulos de concreto y mampostería.

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

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

P_T = fuerza de tracción pura en el muro, kg.

P_u = fuerza axial última en la sección, kg.

R_s = fuerza en el puntal diagonal, kg.

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

S_n = espaciamiento entre el acero horizontal de la mampostería, cm.

$V_{flexión}$ = fuerza cortante asociada a la capacidad en flexión, 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_s = capacidad en cortante del acero de refuerzo, kg.

V_u = cortante último en la sección, kg.

x = distancia variable medida desde la base del muro hasta el tope, cm.

Δ_{ced} = deformación de cedencia, mm.

$\Delta_{máx}$ = 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.

θ = ángulo entre la horizontal y el puntal diagonal.

μ = ductilidad.

τ_0 = esfuerzo cortante en el plano de falla, kg/cm².

Picado Arguedas Andrés David

Análisis del comportamiento ante carga cíclica de muros de mampostería confinada reforzada con diferentes relaciones de aspecto

Proyecto de Graduación Ingeniería Civil –San José, C.R.:

A. D. Picado A., 2019

xix, 107, [23]h; ils. col. -63 refs.

Resumen

El presente trabajo estudia los cambios ante carga cíclica en la resistencia en cortante, el desplazamiento lateral, la rigidez elástica, la ductilidad, la energía disipada y el modo de falla de paredes de mampostería confinada reforzada con cinco diferentes relaciones de aspecto de: 0,5, 0,75, 1,0, 1,5 y 2,0. La importancia radica en el desconocimiento de la forma de variación de dichas propiedades en la mampostería confinada reforzada, que destaca por ser un sistema propio y de uso generalizado en Costa Rica.

La determinación de cambios en dichas propiedades se llevó a cabo por medio de la aplicación de carga cíclica en especímenes a escala natural, lo que permitió obtener las curvas de histéresis de las cinco paredes y observar el modo de falla.

Los resultados mostraron que, al aumentar la relación de aspecto se reduce la resistencia lateral, aumenta el desplazamiento lateral y disminuye la rigidez elástica lateral. Además, no se observó una influencia notable en los valores de ductilidad, mientras que los especímenes con la mayor y menor relación de aspecto disiparon la mayor cantidad de energía. Asimismo, el modo de falla por esfuerzos cortantes fue predominante en los muros más chatos, y fue cambiando gradualmente hacia un modo de falla dominado por flexión en los muros más esbeltos. A.P.A.

RELACIÓN DE ASPECTO; MURO DE MAMPOSTERÍA CONFINADA REFORZADA; ESCALA NATURAL; CURVAS DE HISTÉRESIS

Dr.-Ing. Diego Hidalgo Leiva

Escuela de Ingeniería Civil

1. Introducción

El presente proyecto estudia el comportamiento de muros de mampostería reforzados que son confinados mediante marcos de concreto reforzado, a los que se le llamarán muros de mampostería confinada reforzada, este sistema se encuentra descrito en el Código Sísmico de Costa Rica (2016) (CSCR-10/14) como mampostería integral con bordes de concreto. Dicho sistema estructural es ampliamente utilizado en Costa Rica, pero no así en otros países por lo que su comportamiento específico ante diferentes tipos de acciones es en parte desconocido.

1.1 Justificación

1.1.1 Problema específico

En gran parte de construcciones costarricenses, tanto de carácter residencial como comercial, se utiliza el sistema de muros de mampostería confinada reforzada (MCR), por lo que su estudio permitirá comprender de mejor forma el comportamiento de dichos elementos. Además, al ser inherentemente un sistema constructivo heterogéneo, se vuelve más laborioso su estudio, lo cual hace surgir la necesidad de realizar pruebas experimentales para poder describir de mejor manera sus propiedades mecánicas y modo de falla. Debido a que este es un sistema tan común, se pueden crear muchos elementos con diferentes formas y cualidades geométricas, sin embargo, la relación de aspecto (alto/longitud) será la variable de interés para este estudio.

Según NIST (National Institute of Standards and Technology) (2014) y de acuerdo con la TMS (The Masonry Society) 402/602 (2016), cuando la relación de aspecto de los muros es superior a 1 y se tiene una zona de rótula plástica bien diseñada, estos suelen estar dominados por esfuerzos de flexión, mientras que aquellos con relaciones menores presentan una tendencia a poseer un comportamiento predominado por cortante. Sin embargo, inmediatamente alrededor de este valor de relación de aspecto se da una transición en el comportamiento de las fuerzas internas, por lo que en este trabajo se busca conocer las variaciones en este intervalo y determinar el comportamiento predominante en cada relación analizada.

1.1.2 Importancia

La importancia del análisis radica en lo común que es el uso de muros de MCR con celdas parcialmente rellenas en las construcciones costarricenses, desde edificaciones de varios niveles, hasta viviendas unifamiliares de una sola planta, por lo que el estudio de su

comportamiento ante cargas similares a las de sismo o viento es necesario para realizar diseños más eficientes sin comprometer las vidas humanas.

Adicionalmente, el análisis del comportamiento de materiales usados en elementos estructurales tanto en el rango lineal como no lineal, permiten definir parámetros necesarios en el análisis, el diseño y evaluación de estructuras nuevas y existentes. Como parte del estudio, se determinó mediante pruebas de laboratorio la rigidez elástica de los muros de corte y su ductilidad ante cargas laterales, lo que permitirá en futuras investigaciones emplear los resultados obtenidos para perfeccionar o comprobar modelos estructurales con una tipología similar a la que se está estudiando.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Analizar el comportamiento de muros de mampostería confinada reforzada con diferentes relaciones de aspecto ante carga cíclica, mediante pruebas experimentales a escala natural.

1.2.2 Objetivos específicos

- Construir cinco paredes de mampostería confinada reforzada con relaciones de altura entre longitud de aproximadamente 0,5, 0,75, 1,0, 1,5 y 2,0.
- Obtener las curvas de carga-desplazamiento lateral de las paredes de mampostería confinada reforzada a partir de la aplicación de carga cíclica.
- Definir variaciones existentes en las fuerzas laterales, desplazamientos laterales, ductilidades, rigideces y energía disipada de muros de mampostería confinada reforzada ante carga cíclica con diferentes relaciones de aspecto.
- Determinar la semejanza del modo de falla en el muro de mampostería confinada reforzada con aquella de elementos dominados por flexión o cortante.

1.3 Marco teórico

1.3.1 Sistema constructivo

El sistema constructivo utilizado en los muros en estudio corresponde a mampostería confinada reforzada (MCR) de concreto. La mampostería es definida según Poveda (2018) como una construcción con elementos estructurales y no estructurales en los que se utilizan como componentes principales pequeñas unidades prefabricadas que comúnmente se denominan como bloques o ladrillos.

La estructura de un muro reforzado puede ser integral; donde todo el sistema es de mampostería; o confinada, en la que hay un perímetro con elementos capaces de tomar fuerzas de tracción y compresión y que por lo general son de concreto reforzado. Existe además un sistema mixto en el que se utiliza refuerzo en el paño de mampostería y elementos perimetrales de concreto reforzado, al que el presente trabajo se refiere como MCR.

Adicional a los elementos perimetrales, la mampostería se compone de bloques, mortero de pega y concreto de relleno para las celdas. Los bloques pueden ser de concreto o arcilla, así como ornamentales de vidrio. Además, estos pueden estar apilados o a tesón y sogá, es decir, traslapados. En el caso del mortero de pega, este puede ser elaborado en obra o también puede adquirirse de manera preempacada. Igualmente, el concreto de relleno puede ser preempacado o hecho en obra.

El panel interior del muro debe ser reforzado vertical y horizontalmente según los lineamientos del CSCR-10/14 (2016). Según Poveda (2018), el sistema más utilizado en Costa Rica es una mezcla de mampostería integral y confinada; es decir MCR, ya que los paneles se refuerzan integralmente, pero igual se encuentran confinados por elementos como vigas, columnas y cimentaciones de concreto reforzado.

El CSCR-10/14 (2016) establece 3 clases de mampostería, las cuales se denominan como A, B y C. Para pertenecer a cada una de estas categorías es necesario que todos los elementos componentes de la estructura de mampostería también pertenezcan a su respectiva clase o superiores. En el Cuadro 1 se presentan los requerimientos mecánicos de cada componente, así como su conjunto según el CSCR-10/14 (2016).

Cuadro 1. Requerimientos mecánicos de los componentes de la mampostería, de acuerdo con los lineamientos del CSCR-10/14 (2016).

Elemento	Resistencia a la compresión a los 28 días de edad (kg/cm ²)		
	Clase A	Clase B	Clase C
Bloque de concreto (f'_{cb})	133	90	70
Mortero de pega (f'_j)	175	126	53
Concreto de relleno (f'_g)	175	140	120
Mampostería (f'_m)	100	70	60

Los bloques de concreto pueden tener un espesor nominal de 12, 15 o 20 cm, mientras que el mortero para mampostería debe poseer, según la ASTM C270 (ref), una consistencia adecuada para su trabajabilidad. En el caso del concreto de relleno, este debe tener un asentamiento de entre 20 a 25 cm de acuerdo con el CSCR-10/14 (2016).

El acero de refuerzo a utilizar debe cumplir con la norma ASTM A706 (ref), la cual estandariza características como el diámetro, peso por unidad de longitud, área, así como la resistencia que deben presentar las barras de acero tanto de grado 60 como 80, es decir, 420 MPa y 550 MPa, mientras que para el acero de grado 40 (280 MPa) se debe cumplir con la norma ASTM A615 (ref).

La mampostería, como sistema constructivo en un país tan sísmico como Costa Rica, es altamente probable que sea utilizado en partes de la estructura que se desempeñarán como muros de corte.

1.3.2 Muros de corte

Los muros son componentes estructurales importantes en la planeación de los edificios, ya que como mencionan Park & Paulay (1988), son elementos que pueden ser muy eficientes a la hora de soportar cargas laterales producidas por viento o por sismo. Parte de su utilidad se encuentra en su capacidad de controlar deflexiones provocadas por la carga lateral, y además, cuando se encuentran bien diseñados proporcionan una buena seguridad estructural y no estructural, ya que dan protección contra daño no estructural durante eventos sísmicos de intensidad moderada al controlar las deformaciones laterales.

Los muros son de utilidad cuando un sismo afecta una estructura, ya que aquellos que están ubicados paralelamente a la dirección de la fuerza; o su componente vectorial, se encargarán de resistirla, lo cual produce esfuerzos de corte y de flexocompresión; estos últimos se generan debido al efecto de la carga axial que, usualmente, son fuerzas gravitacionales soportadas por la estructura. Sin embargo, los esfuerzos de cortante son los que tendrán predominancia, por esta razón se les suele llamar muros de corte.

En el caso de un muro confinado sin aberturas; aislado intencionalmente para su análisis estructural, empotrado en su base y libre en su parte superior, este se comporta como una viga de gran peralte en voladizo. En el caso de la aplicación de carga sísmica se podría presentar el esquema mostrado en la Figura 1; se toma una altura de 284,5 cm pues se utilizará dicha elevación en la etapa experimental.

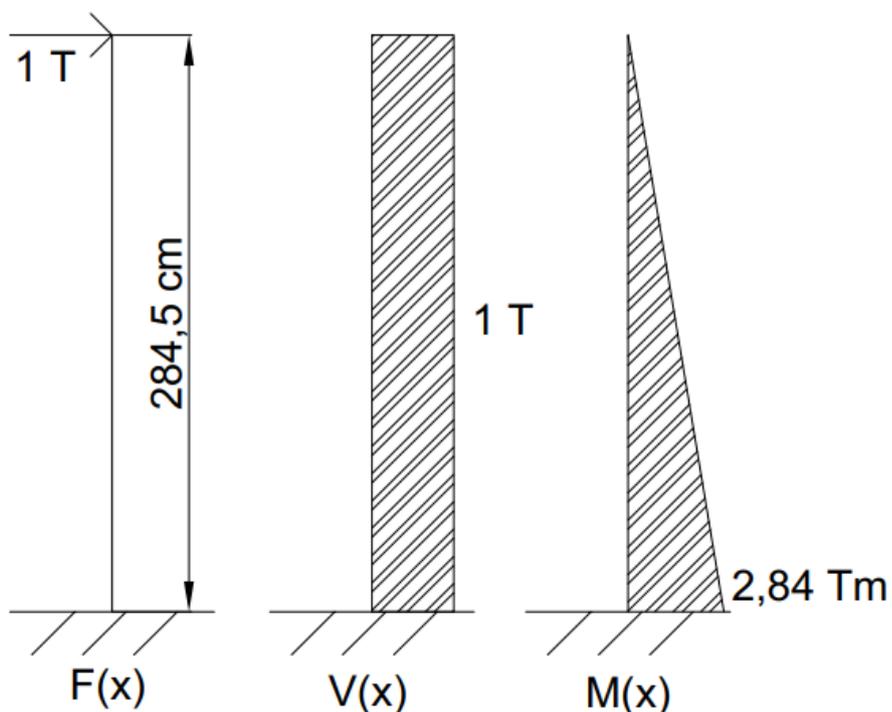


Figura 1. Diagrama de carga lateral $F(x)$, fuerza cortante $V(x)$ y momento flector $M(x)$.

Por lo tanto, conociendo los esfuerzos producidos en un muro durante un evento sísmico, se vuelve necesario diseñar sus componentes para ser capaces de ofrecer resistencia tanto en cortante como en flexión. La metodología utilizada corresponde al diseño LRFD (*Load and Resistance Factor Design*) y lineamientos provistos en el CSCR-14 (2016) en su sección 9.9.4 para el panel de mampostería, así como en el manual ACI-318S-14 (2014) para los elementos de borde. La metodología de diseño y sus respectivos resultados se muestran en el Apéndice 1.

1.3.3 Relación de aspecto

La relación de aspecto es una característica geométrica del espécimen que se obtiene al dividir la altura (h) entre el largo (l) del elemento, esto genera cambios en la distribución de esfuerzos y trayectoria de cargas. La Figura 2 muestra varios muros de mampostería con distintas relaciones de aspecto.

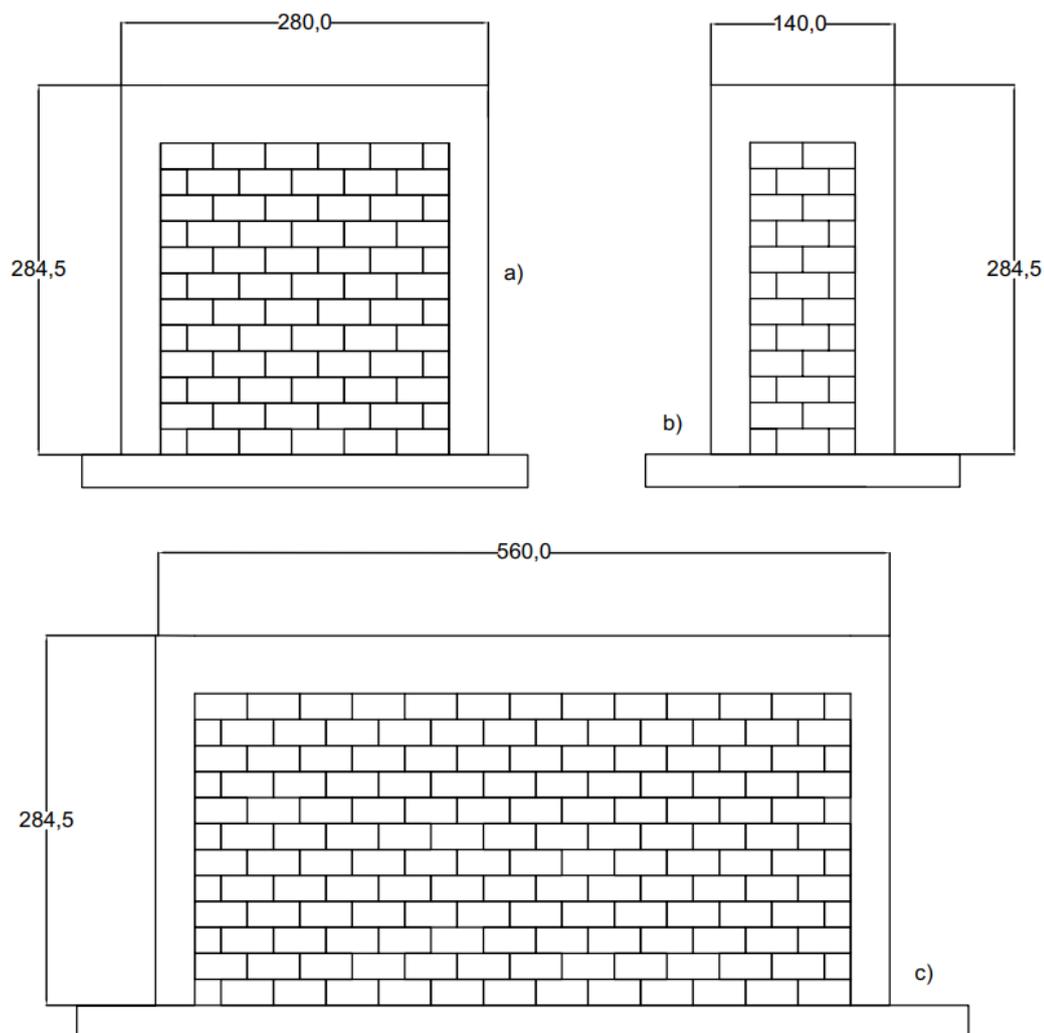


Figura 2. Muros de mampostería con relaciones de aspecto de: a) 1,0 b) 2,0 c) 0,5.

A partir de la figura anterior, se muestran tres muros de mampostería con formas distintas, el muro b) corresponde a una pared con una relación de aspecto alta, puesto que su altura es dominante y su largo es corto, por lo que califica como esbelto. Por otro lado, el muro c) posee una baja relación de aspecto, ya que es más largo en comparación con su altura, lo cual corresponde a un elemento chato. A su vez, el muro a) se encuentra en una zona transitoria, ya que su altura y su largo son de dimensiones similares.

A partir de la Figura 1 se observa que el momento flector en la base se puede descomponer como una fuerza de corte igual a la carga sísmica, en dirección opuesta y con la altura del muro como brazo de palanca. Adicionalmente, la diferencia entre la variable d_m y l_m suele ser muy poca, por lo que se puede hacer la simplificación mostrada en la Ecuación 1, la cual muestra que dependiendo de la forma del muro, el término $M_u/(V_u \cdot d_m)$ modifica las ecuaciones de diseño y su comportamiento ante la aplicación de carga lateral.

$$\frac{M_u}{V_u \cdot d_m} = \frac{V_u \cdot h_m}{V_u \cdot d_m} = \frac{h_m}{d_m} \approx \frac{h_m}{l_m}$$

Ecuación 1

Donde:

d_m = Distancia de la fibra extrema en compresión de la mampostería a la capa más alejada de acero.

M_u = Momento último en la sección transversal.

h_m = Altura del paño de mampostería.

V_u = Fuerza cortante última en la sección transversal.

l_m = Largo del paño de mampostería.

De acuerdo con la TMS 402/602 (2016), los muros de mampostería con una relación de aspecto inferior a 0,25 presentan una rigidez cortante predominante, mientras que aquellos con una relación de aspecto superior a 4,0 poseen una rigidez por flexión preponderante. Los muros ubicados entre ambos valores presentan un comportamiento intermedio en el que ambas rigideces son de importancia.

Las rigideces de un elemento dependen de aspectos geométricos, el tipo de conexión en sus extremos y del material del cual se compone, por lo que implícitamente la relación de aspecto influye en su cálculo. En el caso de un sistema en voladizo, se puede obtener por medio del método de trabajo virtual expuesto en Popov (2000), tanto la rigidez por flexión como la rigidez por cortante, las cuales se muestran en la Ecuación 2 y la Ecuación 3, respectivamente. Además, la rigidez total se presenta en la Ecuación 4.

$$k_b = \frac{E \cdot I}{4 \cdot h^3} = \frac{E \cdot b}{4 \cdot \left(\frac{h}{l}\right)^3}$$

Ecuación 2

$$k_v = \frac{G \cdot A_{va}}{h} = \frac{G \cdot b_w}{\left(\frac{h}{l}\right)}$$

Ecuación 3

$$k_T = \frac{1}{\frac{1}{k_b} + \frac{1}{k_v}}$$

Ecuación 4

Donde:

A_{va} = Área efectiva en cortante de la sección transversal.

b = Ancho de la sección transversal.

b_w = Ancho efectivo en cortante de la sección transversal.

E = Módulo de elasticidad.

G = Módulo de cortante.

h = Altura del muro.

I = Inercia de la sección transversal.

k_b = Rigidez flexionante.

k_v = Rigidez cortante.

k_t = Rigidez total.

l = Largo del muro.

De acuerdo con el CSCR-10/14 (2016), en elementos en flexión y para efectos del análisis estructural, se debe reducir a la mitad la inercia utilizada en las ecuaciones anteriores. A su vez, en la propuesta del nuevo código, se establece adicionalmente una reducción a la mitad del área efectiva de cortante. En ambos casos esto se realiza con el objetivo de representar el agrietamiento de la sección transversal

Dependiendo de la relación de aspecto y tomando los demás parámetros como constantes, las curvas de rigidez se intersectan en un punto a partir del cual una pasa a tener valores superiores a la otra; esto indica un intercambio en la rigidez dominante. En forma similar, si se varía la relación de aspecto, la razón entre la fuerza cortante por flexión ($V_{flexión}$) y la capacidad nominal en cortante (V_n) cambia, tal y como se muestra en la Figura 3. Dicha cortante por flexión es definida según el NIST (2014), como la demanda cortante asociada con la capacidad esperada en flexión; y se obtiene al dividir el momento nominal (M_n) entre la altura de la pared. En ocasiones se utiliza un 25% más del momento nominal para considerar la sobrerresistencia.

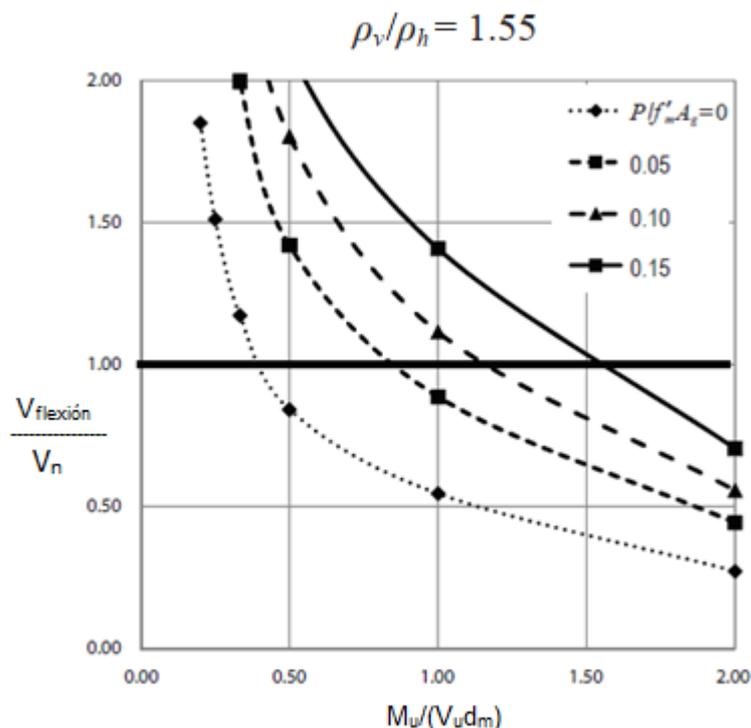


Figura 3. Razón de fuerzas cortantes al variar la relación de aspecto y carga axial, NIST (2014).

De la Figura 3, se desprende que el comportamiento del muro tiende a ser frágil si su razón de cortantes se encuentra por encima de la línea horizontal de 1,00, ya que corresponde a paredes típicamente dominadas por tracción diagonal (NIST, 2014). Esto ocurre cuando se disminuye la relación de aspecto, principalmente por el incremento en el cortante por flexión desarrollado por la enorme resistencia en flexión (M_n) de la sección transversal, en comparación con su capacidad en cortante (V_n). A su vez, si se incrementa la relación de aspecto, un comportamiento dúctil es más esperable. En lo que respecta a la carga axial, esta influye al fragilizar el elemento, ya que desplaza las curvas hacia la mitad superior del diagrama.

Por lo tanto, si las relaciones de aspecto se encuentran más allá de los topes mencionados en el TMS 402/602 (2016), es fácil describir el comportamiento y conocer si los esfuerzos de flexión o cortante predominarán el comportamiento de falla. Sin embargo, una relación de aspecto alrededor de 1,0 presenta un comportamiento con características de ambos extremos, ya que dependiendo de diversos factores puede mostrar más uno que otro. Cabe destacar que, una forma de estudiar el comportamiento experimental de falla es por medio de diagramas de fuerza contra deformación o curvas de histéresis si la carga es cíclica.

1.3.4 Curvas de histéresis

Las curvas de histéresis permiten evaluar diferentes características del material ante la aplicación de cargas cíclicas y son básicamente diagramas de fuerza contra deformación. Según Venegas (1997), estas poseen ciclos y series, los primeros corresponden a la secuencia de carga y descarga hasta un desplazamiento específico, por lo que se componen de una carga en el sentido positivo, una descarga que regresa al elemento a la posición original, una carga en el sentido negativo y una última descarga que regresa el elemento a la condición de cero desplazamiento. A su vez, las series son un grupo de ciclos que se dan a un determinado nivel de desplazamiento. Una curva de histéresis se muestra en la Figura 4.

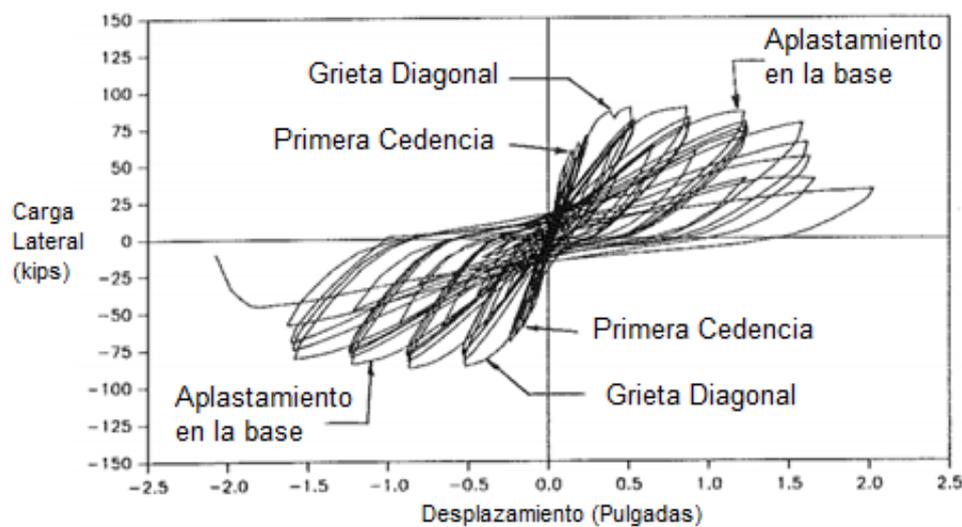


Figura 4. Curva de histéresis, Carter (1988).

En primera instancia, las curvas de histéresis permiten observar la degradación entre ciclos de igual amplitud; lo cual implica una disminución en la rigidez del material, así como la degradación de la resistencia ante aumentos de desplazamiento; que se debe a un ablandamiento del material. Además, se puede caracterizar la rigidez tangencial a diferentes niveles de deformación o de resistencia, lo cual permite definir la rigidez a emplear en los modelos de análisis elásticos.

Las curvas de histéresis de materiales frágiles o semi-dúctiles, presentan por lo general el estrangulamiento de los lazos entre cada fase de carga y descarga. Dicho efecto es común en elementos con falla por cortante. Acuña (2014), menciona que se debe específicamente a un proceso del material en el que antes de recobrar la rigidez se debe dar un desplazamiento reverso significativo, en el cual la ganancia de resistencia no posee la misma pendiente que la observada en la fase elástica.

Para obtener la rigidez conforme se incrementan los ciclos, se debe calcular la rigidez secante de cada lazo, tal como se muestra en la Ecuación 5.

$$k_{s,i} = \frac{V_{m\acute{a}x,i} - V_{m\acute{i}n,i}}{\delta_{m\acute{a}x,i} - \delta_{m\acute{i}n,i}}$$

Ecuación 5

Donde:

$K_{s,i}$ = Rigidez secante del lazo i. $V_{m\acute{i}n,i}$ = Fuerza cortante m\acute{i}nima del lazo i.

$V_{m\acute{a}x,i}$ = Fuerza cortante m\acute{a}xima del lazo $\delta_{m\acute{a}x,i}$ = Deformaci\acute{o}n m\acute{a}xima del lazo i.

i. $\delta_{m\acute{i}n,i}$ = Deformaci\acute{o}n m\acute{i}nima del lazo i.

Es posible, adem\acute{a}s, relacionar la energ\acute{a} disipada por el material con el \xe1rea dentro de los ciclos de hist\acute{e}resis. Dicha energ\acute{a} permite comparar materiales y su rendimiento a la hora de disipar energ\acute{a}. Si el \xe1rea bajo la curva de inter\acute{e}s se encuentra en la zona el\xe1stica, se conoce como resiliencia, mientras que cuando se encuentra en el rango pl\acute{a}stico se le llama tenacidad, donde ambas representan la energ\acute{a} disipada por el material durante el proceso de carga y descarga.

La energ\acute{a} tambi\acute{e}n permite obtener una curva sint\acute{e}tica simplificada a partir de la envolvente de la curva hister\acute{e}tica, esta se denomina como curva de energ\acute{a} elastopl\acute{a}stica equivalente (*EEEEP*). La *EEEEP* permite conocer valores aproximados de cedencia a partir del punto en el que la rigidez el\xe1stica de cortante del elemento disminuye un 5% o m\acute{a}s. Su confecci\acute{o}n se explica en el procedimiento ASTM E2126 (ref) y en la Figura 5 se muestra la relaci\acute{o}n entre la envolvente y la *EEEEP*.

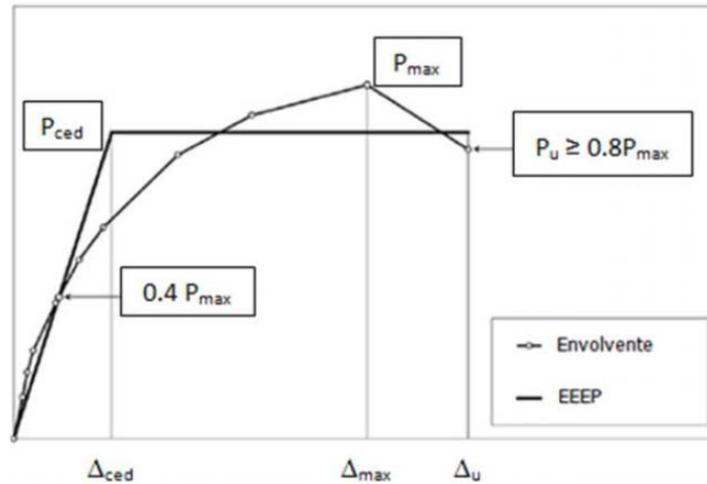


Figura 5. Curva de energía elastoplástica equivalente y envoltente, Acuña (2014).

La EEEP también facilita el cálculo de la ductilidad (μ), la cual según el NIST (2014) se define como la habilidad de un elemento para resistir repetidamente ciclos en ambas direcciones de deformación inelástica sin una importante degradación de la resistencia. Esta se puede calcular de acuerdo con la Ecuación 6.

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_{ced}}$$

Ecuación 6

Con base en la ductilidad y la curva de histéresis, se puede obtener información relativa al comportamiento de la estructura, no obstante, un análisis completo incluye el aspecto cualitativo, el cual abarca el comportamiento físico de las paredes durante el ensayo, el modo de falla y su condición final.

1.3.5 Modo de falla

El modo de falla o ruptura depende de la forma de aplicar la carga y de la forma del elemento ya que, según Popov (2000), ambas influyen en la forma en la que se distribuyen los esfuerzos internos. En el caso de muros de MCR, el efecto de ambos factores se puede comprender aproximadamente por medio del modelo puntal tensor.

Según Viu (2009), el modelo puntal tensor consiste en una representación de las principales acciones dentro de un elemento estructural como fuerzas uniaxiales de tracción y compresión, donde las primeras son representadas por el acero (tensores) y las segundas por el concreto (puntales). Es una herramienta que permite el seguimiento de los flujos de cargas en el interior del elemento estructural. En el caso de un muro confinado, el modelo se muestra en la Figura 6.

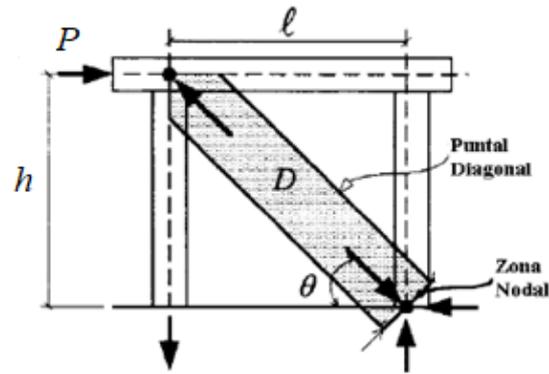


Figura 6. Modelo puntal tensor en un muro, Viu (2009).

En este caso, los elementos de confinamiento se analizan como un marco, con una columna en tracción y otra en compresión, mientras que el paño de mampostería es un puntal diagonal que rigidiza el conjunto. Conforme se incrementan los desplazamientos laterales, el comportamiento se vuelve más complejo y el paño intenta desligarse del marco confinante, por lo que según Paulay & Priestley (1992), el ancho del puntal es aproximada y conservadoramente una cuarta parte del valor de la diagonal.

Según Paulay & Priestley (1992) y Chenghao et al. (2008), existen varios tipos de falla para este tipo de estructuras, los cuales son:

1. Falla en tracción de una de las columnas debido a la aplicación de momentos flectores.
2. Falla por cortante deslizante en la mampostería a lo largo de las sisas ubicadas aproximadamente a media altura.
3. Falla por tracción diagonal del paño de mampostería, sin embargo no es un estado final, puesto que puede ser seguido por otros modos de falla.
4. Falla en compresión del puntal diagonal y aplastamiento en la base del elemento.
5. Falla en flexión o cortante de las columnas.
6. Falla por inestabilidad de la estructura.

Experimentalmente se ha observado que el orden más común de modos de falla es empezando en el punto 1 y terminando en el 5.

El modo de falla en tracción se da en paneles con una alta relación de aspecto, ya que el modo de falla crítico se debe a esfuerzos de flexión, lo cual implica la cedencia y posible ruptura del acero vertical de refuerzo en la columna, así como de algunas varillas dentro del paño. Este modo de falla va acompañado de un comportamiento razonablemente dúctil.

La falla por cortante deslizante se da cuando una grieta horizontal a lo largo de la sisa provoca la separación del paño de mampostería en dos secciones que se deslizan paralelamente. Es un modo de falla bastante común en muros con baja relación de aspecto y poca carga axial. Si este modo de falla rige, el modelo propuesto en la Figura 6 cambia por el mostrado en la Figura 7, el cual evidencia que el desplazamiento del paño puede provocar la formación de rótulas plásticas a media altura del muro o directamente la falla de cortante de la columna.

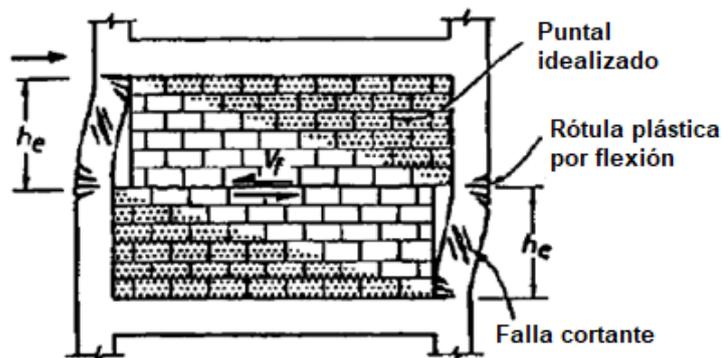


Figura 7. Modo de falla por cortante deslizante, Paulay & Priestley (1992).

La fuerza del puntal diagonal que puede dar inicio al deslizamiento por cortante depende del esfuerzo cortante (τ_0), la relación de aspecto (h/l), el largo de la diagonal del paño (D), y se obtiene de acuerdo con la Ecuación 7. Según Paulay & Priestley (1992), se recomiendan los valores de $\tau_0 = 0,03 \cdot f'_m$ y $\mu = 0,3$.

$$R_s = \frac{\tau_0}{1 - \mu \cdot \left(\frac{h}{l}\right)} \cdot D \cdot b$$

Ecuación 7

La falla por tracción diagonal, mostrada en la Figura 8, se da cuando una grieta diagonal, aproximadamente a 45° , se extiende a lo largo del paño de mampostería. Esta se debe a la deformación provocada por la compresión del puntal, lo cual provoca esfuerzos de tracción perpendiculares a este y por ende agrietamiento. Este modo de falla es común en muros con baja relación de aspecto y alta carga axial, además, exhibe baja ductilidad.

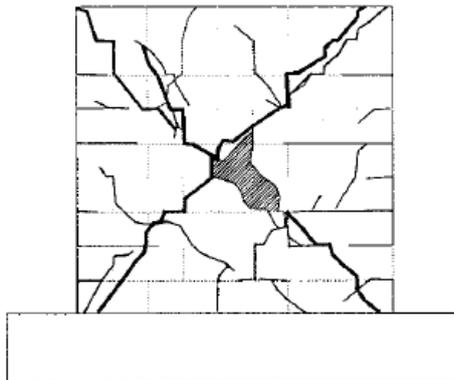


Figura 8. Falla por tracción diagonal, Ingham & Voon (2006).

La falla por compresión del puntal diagonal usualmente es precedida por agrietamiento por tracción diagonal, sin embargo, la resistencia final es regida por la capacidad en compresión del puntal.

El aplastamiento en la base del elemento, mostrado en la Figura 9, se da cuando el desplazamiento en el tope es considerablemente alto, esto provoca grandes esfuerzos de flexión en la sección transversal, especialmente en la base ya que ahí se ubica el momento máximo de un sistema en voladizo. Es opuesto a la falla en tracción, puesto que, en lugar de fallar el acero, falla el concreto. Es común en muros con alta relación de aspecto y alta carga axial.

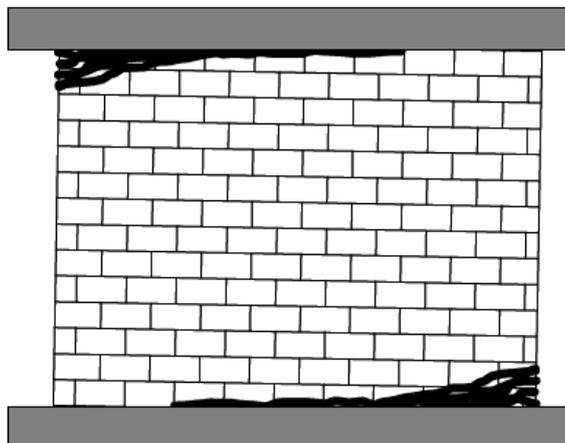


Figura 9. Falla por aplastamiento en la base, Chenghao et al. (2008).

La falla por flexión o cortante se puede dar en forma simultánea con agrietamiento severo en el paño de mampostería, incluso algunas grietas son continuas entre ambos elementos. Si el colapso es por cortante, este se caracteriza por grietas a 45° , mientras que si es por flexión, las grietas son horizontales y cerca de la base de la columna.

La falla por inestabilidad se da cuando no hay suficiente adherencia entre el paño y la base, es común en muros con alta relación de aspecto y bajo esfuerzo axial, factores que favorecen una baja estabilidad ante carga lateral. Este tipo de falla se muestra en la Figura 10.

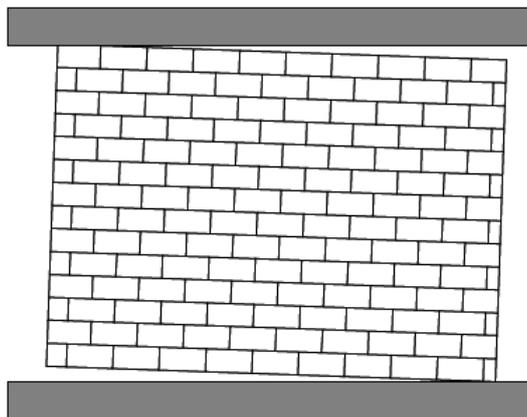


Figura 10. Falla por inestabilidad, Chenghao et al. (2008).

Dependiendo de varios factores, como el refuerzo vertical, la cantidad de refuerzo horizontal, o relación de aspecto, se puede incurrir más en un tipo de falla u otro. En el caso de que solo se esté considerando la relación de aspecto, la TMS 402/602 (2016) menciona que, dependiendo de dicha variable, el muro podrá ser dominado por flexión, cortante o ambos.

Según el NIST (2014), una pared dominada por flexión es aquella en la que la respuesta inelástica es dominada por deformaciones que resultan de la fluencia en tracción del refuerzo para flexión. La Figura 11 muestra un muro fallado por cargas laterales y con comportamiento dúctil, en la que se aprecian extensas fisuras a lo largo del elemento y rupturas en la base, que consiste en el punto de momento máximo. Además, se observa su curva de histéresis ampliamente extendida en sentido lateral, lo cual implica mayor ductilidad.

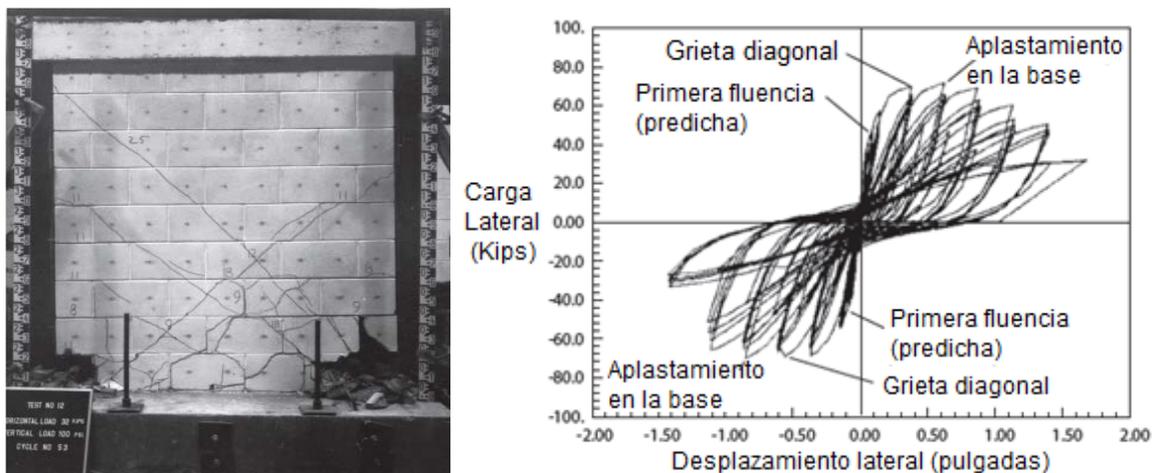


Figura 11. Muro de mampostería dúctil y su curva de histéresis, NIST (2014).

A su vez, el NIST (2014) también menciona que aquellos elementos dominados por cortante, presentan en la respuesta inelástica un comportamiento en el que predominan las grietas por tracción diagonal. La Figura 12 muestra un muro dominado por falla cortante, en el que se puede apreciar un comportamiento más frágil y abundancia de grietas diagonales, así como una mayor degradación por parte del elemento. Además, su curva de histéresis se muestra más angosta y con una pendiente más empinada, lo cual evidencia su menor ductilidad.

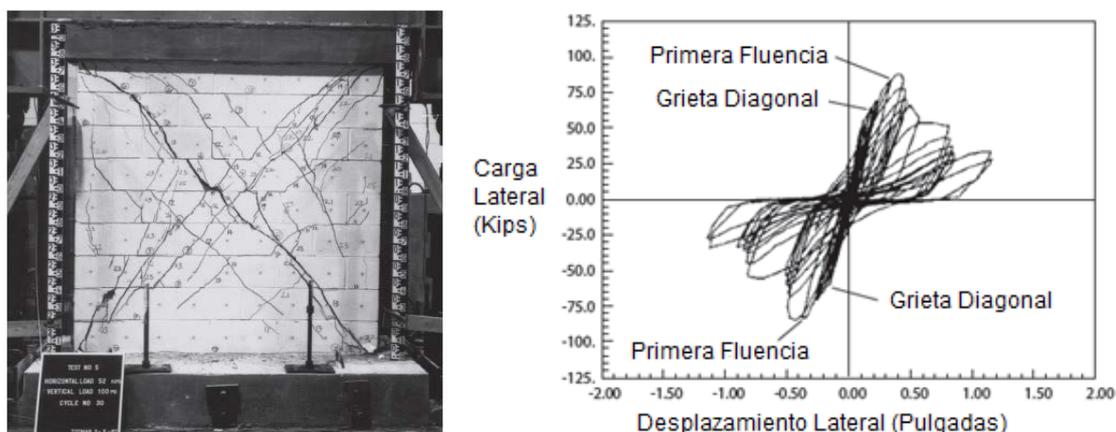


Figura 12. Muro de mampostería frágil y su curva de histéresis, NIST (2014).

1.3.6 Hipótesis

Se espera que conforme aumente la relación de aspecto del muro, su modo de falla se asemeje más al de una falla dominada por flexión y su comportamiento sea más dúctil, y viceversa. A su vez, también se espera que una relación de aspecto con valor de 1,0 presente un comportamiento de transición entre dúctil y frágil.

1.4 Antecedentes experimentales

En Costa Rica, se han realizado con anterioridad pruebas a muros de mampostería en escala natural, muchos de ellos correspondientes a Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería Civil o de la Maestría Académica en Ingeniería Civil. Estas permitirán comparar el comportamiento y valores de ductilidad y rigidez en paredes a escala natural.

En el caso de Venegas (1997), se realizaron pruebas en dos muros de MCR con relaciones de aspecto de aproximadamente 1,0. Estas fueron sometidas a un desplazamiento máximo de 30 mm. A partir de la curva histerética se observó que la pendiente de carga era distinta a la de descarga, además, los lazos se estrecharon y hubo una reducción de la resistencia conforme se aumentaban los ciclos de carga. Se encontró además un comportamiento asimétrico, ya que la pared resultó ser más rígida en la dirección de compresión.

El modo de falla desarrollado en la primera pared fue principalmente debido a tracción diagonal, pues se observó la formación de grietas a lo largo y alto de algunas unidades de mampostería, las cuales formaban un patrón escalonado. La mayoría de las grietas y escalerillas conservaron una orientación de 45°. En el caso de las columnas, estas presentaron grietas horizontales, en su mayoría alineadas con el mortero de pega de los bloques adyacentes, además, no se observaron grietas inclinadas de cortante en estos elementos. Cabe destacar que los tres modos de falla se presentaron simultáneamente.

El acero de refuerzo colocado en las columnas apenas logró alcanzar la fluencia durante los últimos ciclos de carga, mientras que, en la mampostería, tanto el refuerzo vertical como horizontal no alcanzaron el valor de fluencia, lo cual permitió concluir una baja influencia del refuerzo en el comportamiento histerético de la pared.

El Trabajo Final de Graduación de Hernández (1998), implicó la construcción y análisis de 3 paredes de mampostería con el valor de 1,0 de relación de aspecto, de las cuales 2 se sometieron a falla cíclica y la restante a carga estática monotónica. En el caso de las paredes sometidas a carga cíclica, la pendiente de las fases de carga y descarga resultó ser distinta, además, se presentó nuevamente una reducción en la resistencia al aumentar los ciclos de carga.

El modo de falla observado implicó la aparición de grietas horizontales en las columnas (efecto de la flexión) y posteriormente grietas diagonales en la mampostería cerca del plano de unión con la viga corona, así como una grieta horizontal en el plano de unión de las unidades de mampostería producto de cortante deslizante. Posteriormente, al incrementar la carga apareció una grieta con patrón de escalerilla perpendicular a la anterior, lo cual

generó dos planos de falla con forma de equis (X), lo cual se debió a tracción diagonal. Con el aumento del desplazamiento, se desarrollaron nuevas grietas diagonales a partir de la grieta horizontal. En el caso de la otra pared fallada cíclicamente, el comportamiento fue similar, excepto que las grietas diagonales llegaron hasta la base del muro y se generó una grieta horizontal a lo largo de la unión del paño con la viga corona. El acero de refuerzo de las columnas llegó a la fluencia, mientras que el acero horizontal no se vio altamente esforzado, pues llegó a alcanzar 1600 kg/cm^2 . Dentro de las conclusiones obtenidas, se encuentra que la relación de aspecto analizada presenta un comportamiento intermedio entre chata y esbelta. El modo principal de falla observado fue la tracción diagonal y el acero de las columnas fluyó después de la aparición de las grietas por esfuerzos de corte, los cuales gobernaron la falla.

El Proyecto de Graduación de Acón (1999) implicó la construcción de 4 paredes de mampostería confinada con una relación de aspecto de 1,13. Dos poseían un buque de puerta y las otras 2 no tenían aberturas, además, se construyó una viga medianera, lo que dividió el paño en dos secciones; a su vez, este no se encontraba reforzado. Durante la ejecución de la prueba, se observó una disminución en la resistencia al aumentar los ciclos, además de un comportamiento asimétrico. Se concluyó que las paredes de mampostería no se comportan como un cuerpo rígido, ya que sus componentes trabajan en formas distintas. El modo de falla fue tanto por flexión como por cortante, pues se presentó una grieta por tracción diagonal a lo largo del paño, así como grietas horizontales en las columnas. A su vez, también se observó deslizamiento por cortante en la última hilada superior del paño de mampostería. En la otra pared, se obtuvo el mismo resultado, a excepción de que las grietas de cortante fueron predominantes en el paño inferior de mampostería.

En el Trabajo de maestría de Acuña (2014), se construyeron 8 paredes de mampostería integral con una relación de aspecto de 0,87. Durante el proceso de falla del primer muro, se presentó agrietamiento diagonal, la falla fue por cortante y se dio aplastamiento en las esquinas inferiores. Los demás muros presentaron un comportamiento similar, con excepción del sexto y séptimo, que mostraron más daño en la zona inferior y una grieta horizontal cerca de la mitad de su altura. Cabe destacar que se presentaron recurrentemente fallas por adherencia entre el mortero de pega y las unidades de mampostería. En todos los muros se logró la fluencia del acero de refuerzo vertical. Las ductilidades y rigideces de los muros se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Datos generales de los ensayos de Acuña (2014).

Muro	Ductilidad		Rigidez (T/mm)	
	Positiva	Negativa	Positiva	Negativa
1	6,5	2,3	4,28	3,07
2	1,9	2,8	0,65	1,31
3	3,6	3,9	3,44	3,48
4	5,8	4,2	4,35	2,71
5	3,3	3,1	1,86	1,27
6	2,0	5,1	1,47	3,89
7	4,4	3,6	4,88	3,17
8	2,4	2,4	2,49	2,16

En el Trabajo Final de Graduación de Cordero (2012), se llevó a cabo la construcción de 4 paredes de mampostería integral con una relación de aspecto de 0,75. Durante la falla de la primera pared, se produjeron grietas inclinadas a aproximadamente 45° tanto a través de las juntas horizontales como de los bloques, además, se observó aplastamiento en los bloques inferiores en los extremos de la pared. En el caso de la segunda pared, luego de superar el desplazamiento de carga máxima (2,85 cm), se comenzó a formar una grieta horizontal debajo de la primera hilada de bloques bajo la viga corona, que posteriormente se incrementó y dio paso a una separación entre sus secciones superior e inferior, además, no se formó una grieta diagonal a lo largo del paño y se observó que la resistencia en el sentido positivo fue inferior al negativo. Para la falla de la tercera pared se presentaron grietas a 45°, en conjunto con grietas horizontales. Para la última pared, también se encontraron grietas a 45° que cruzaban completamente el paño. Las rigideces y ductilidades obtenidas se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Rigidez y ductilidad de paredes de mampostería integral de Cordero (2012).

Pared	Ductilidad Promedio	Rigidez Promedio (T/mm)
1	9	5,66
2	8	6,46
3	8	6,55
4	5	5,23

En el Trabajo de maestría de Salazar (2013), se construyeron 4 muros de mampostería con elementos de concreto reforzado como confinamiento en el borde, estos tenían una relación de aspecto de 0,92. Los primeros 2 muros se fallaron con carga estática monotónica, mientras que los 2 restantes se sometieron a carga cíclica. Durante la falla del primer muro

se presentaron fisuras horizontales en las columnas, así como falla en tracción de las varillas longitudinales de estas, además, se observaron grietas a 45° en el paño de mampostería; que incluso atravesaron la columna. Para el caso del segundo muro, el comportamiento fue similar, a excepción de que las varillas de la columna no fallaron. Los muros 3 y 4 se comportaron en forma parecida al primer muro, con la excepción de que ambas columnas presentaron las fisuras horizontales. La carga, deformación y ductilidad se muestra en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Carga, deformación y ductilidad de los muros de Salazar (2013).

Muro	Carga Máxima (T)		Deformación Máxima (cm)		Ductilidad	
1	22,6		1,4		36,01	
2	30,95		2,71		18,58	
3	+22,87	-21,18	+2,68	-2,34	14,29	24,79
4	+31,68	-27,67	+2,59	-2,74	13,23	16,65

A nivel internacional, se puede tomar como referencias los trabajos de investigación de Sandoval et al. (2018) y Ramírez et al. (2016). En el primero se construyeron 8 paredes de mampostería integral de arcilla, mientras que en el segundo se construyeron 10 paredes de mampostería integral de concreto. En ambos casos las paredes tenían diferentes variaciones entre sí, tal como la cantidad acero vertical, horizontal y fuerza axial. Asimismo, en los dos estudios se utilizaron tres relaciones de aspecto: 0,44, 0,97 y 1,95.

Entre los hallazgos observados por Sandoval et al. (2018), se encuentra que las paredes mostraron falla por cortante debido a la tracción diagonal en el paño en ambas direcciones. Para los muros más chatos, se produjo una ruptura en el refuerzo horizontal, mientras que en los muros más esbeltos se observó la caída de bloques ubicados a media altura. De igual forma, en muros con bloques de concreto; ensayados por Ramírez et al. (2016), se obtuvieron resultados similares; con el modo de falla regido por tracción diagonal.

En la Figura 13 se muestra el comportamiento de 3 de los muros de Sandoval et al. (2018) y 4 de las paredes de Ramírez et al. (2016), al variar la relación de aspecto y el efecto en sus respectivas ductilidades.

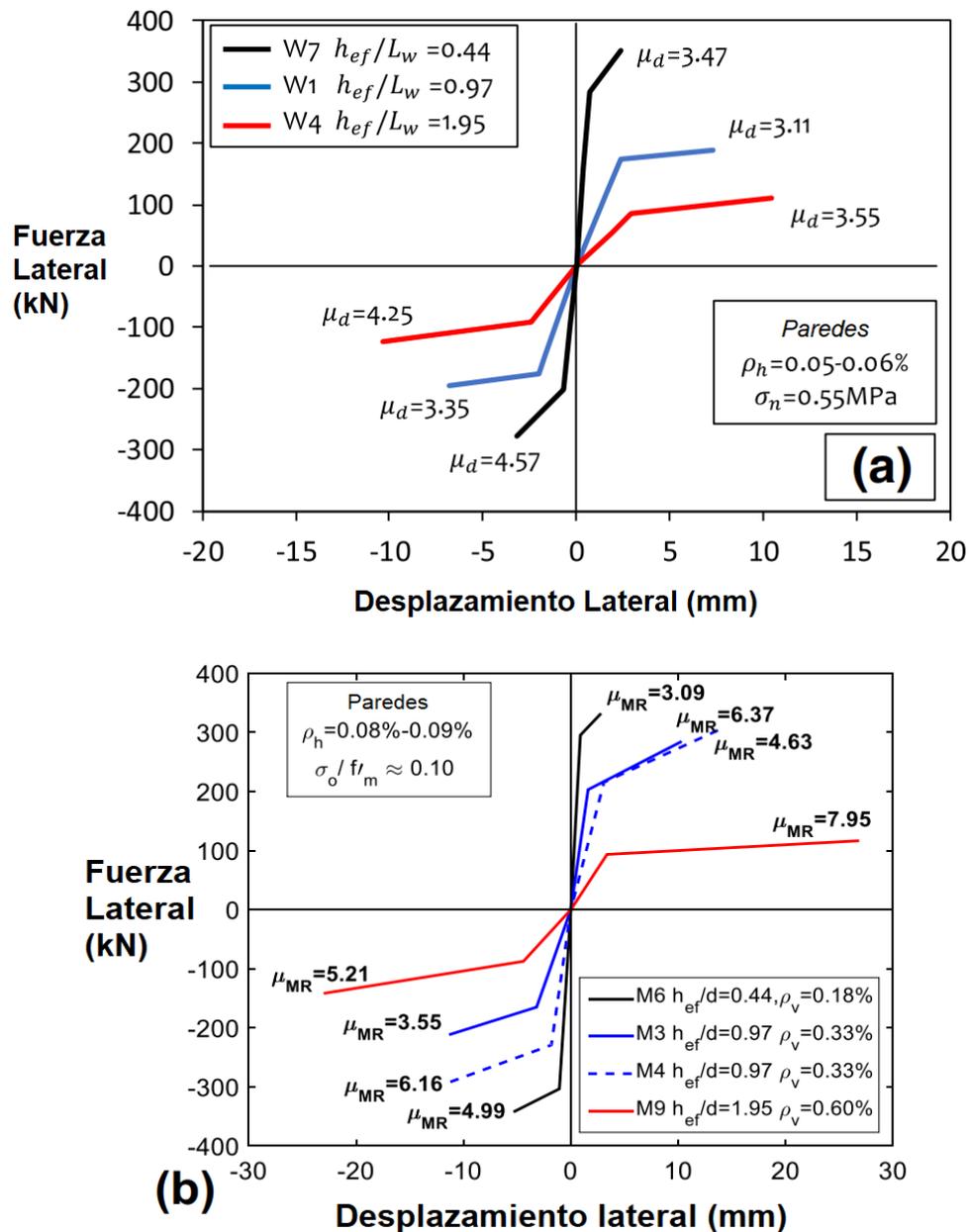


Figura 13. Ductilidad y comportamiento al variar la relación de aspecto, a) Sandoval et al. (2018), b) Ramírez et al. (2016).

Además, en ambos estudios se analizó la degradación de las rigideces secantes (K_s) con respecto a la rigidez elástica (K_0); es decir, la rigidez secante del primer ciclo. Para esto se comparó el cociente de la rigidez de cada lazo entre la rigidez inicial; contra la deriva lateral, lo que permite obtener el gráfico mostrado en la Figura 14, la cual muestra que la velocidad de degradación de la rigidez disminuye al incrementar la relación de aspecto.

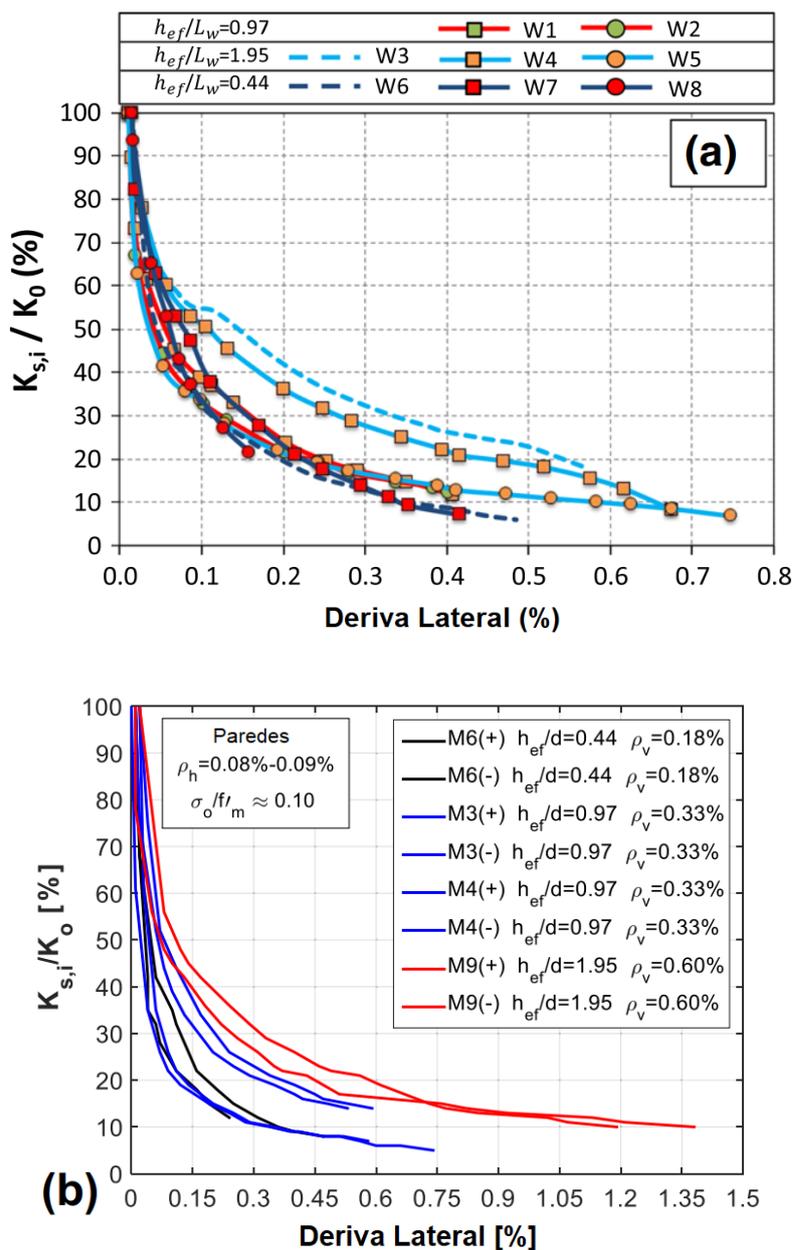


Figura 14. Degradación de la rigidez al variar la deriva lateral, a) Sandoval et al. (2018), b) Ramírez et al (2016).

A partir de los resultados obtenidos, se concluyó en ambos estudios que conforme la relación de aspecto se incrementa: disminuye la resistencia lateral, aumenta la deriva lateral, disminuye la velocidad con que se degrada la rigidez de las paredes y no se provoca un efecto importante en el valor de la ductilidad.

Finalmente, en el trabajo de investigación de Abdelkhalik et al. (2014), se construyeron 6 paredes de mampostería confinada, de las cuales 5 especímenes se fabricaron con bloques de arcilla y la restante con bloques de concreto. La relación de aspecto de los muros es de 0,88 y se ensayaron con una carga estática monótonica.

El comportamiento observado durante la falla fue de una grieta diagonal a lo largo del paño y las columnas, que empezó en el punto de aplicación de carga y finalizó en el extremo inferior opuesto. Se obtuvo una carga máxima de 28,5 T con un desplazamiento de 4,29 cm.

1.5 Alcances

El presente proyecto de investigación se enmarca dentro del proyecto de Investigación B8503 inscrito ante la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica, el cual posee financiamiento por parte del CONICIT-MICITT. Dicho proyecto posee una extensión y objetivos más amplios que el presente TFG, pero permite obtener los resultados experimentales necesarios para comprobar la hipótesis planteada.

El proyecto de graduación toma en cuenta paredes de MCR, parcialmente rellena y con cinco relaciones de aspecto específicas; de aproximadamente 0,5, 0,75, 1,0, 1,5 y 2,0, de las cuales 0,5 y 2,0 pertenecen a este proyecto de investigación y las paredes 0,75 y 1,5 pertenecen al Trabajo Final de Graduación de Sánchez (2019), mientras que la de 1,0 se realizó en forma conjunta.

El fin principal es analizar las variaciones en el comportamiento y características como la ductilidad, la energía disipada, la fuerza, los desplazamientos, la rigidez y los mecanismos de colapso de los muros ante carga cíclica, generada por el equipo hidráulico del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (Lanamme-UCR), a partir de las curvas de histéresis medidas durante el método estándar ASTM E2126 (ref). No se analizaron los valores de capacidad, debido a que dicho análisis se encuentra en el Trabajo Final de Graduación de Sánchez (2019).

Las paredes se construyeron con materiales disponibles en el mercado nacional, por un albañil que utiliza las técnicas y características comunes usadas en la mayoría de construcciones costarricenses, tal como la colocación de los bloques a tesón y sogá, el ancho de sisa del mortero, la forma de manejar el acero de refuerzo, entre otros. Esto aplica a la mampostería costarricense confinada reforzada construida con las técnicas conocidas y más usuales en el país en el momento de realización del presente trabajo.

Las pruebas tomaron en cuenta únicamente cambios en la relación de aspecto, por lo que se mantendrán constantes factores que modifican el comportamiento de los muros de mampostería, tal como: el ancho del bloque, la cantidad de acero horizontal y vertical, la aplicación de carga axial, las dimensiones de los elementos de borde, las condiciones de apoyo, la existencia de perforaciones, entre otros.

1.6 Metodología

La metodología seguida para la elaboración del proyecto se muestra en la Figura 15.

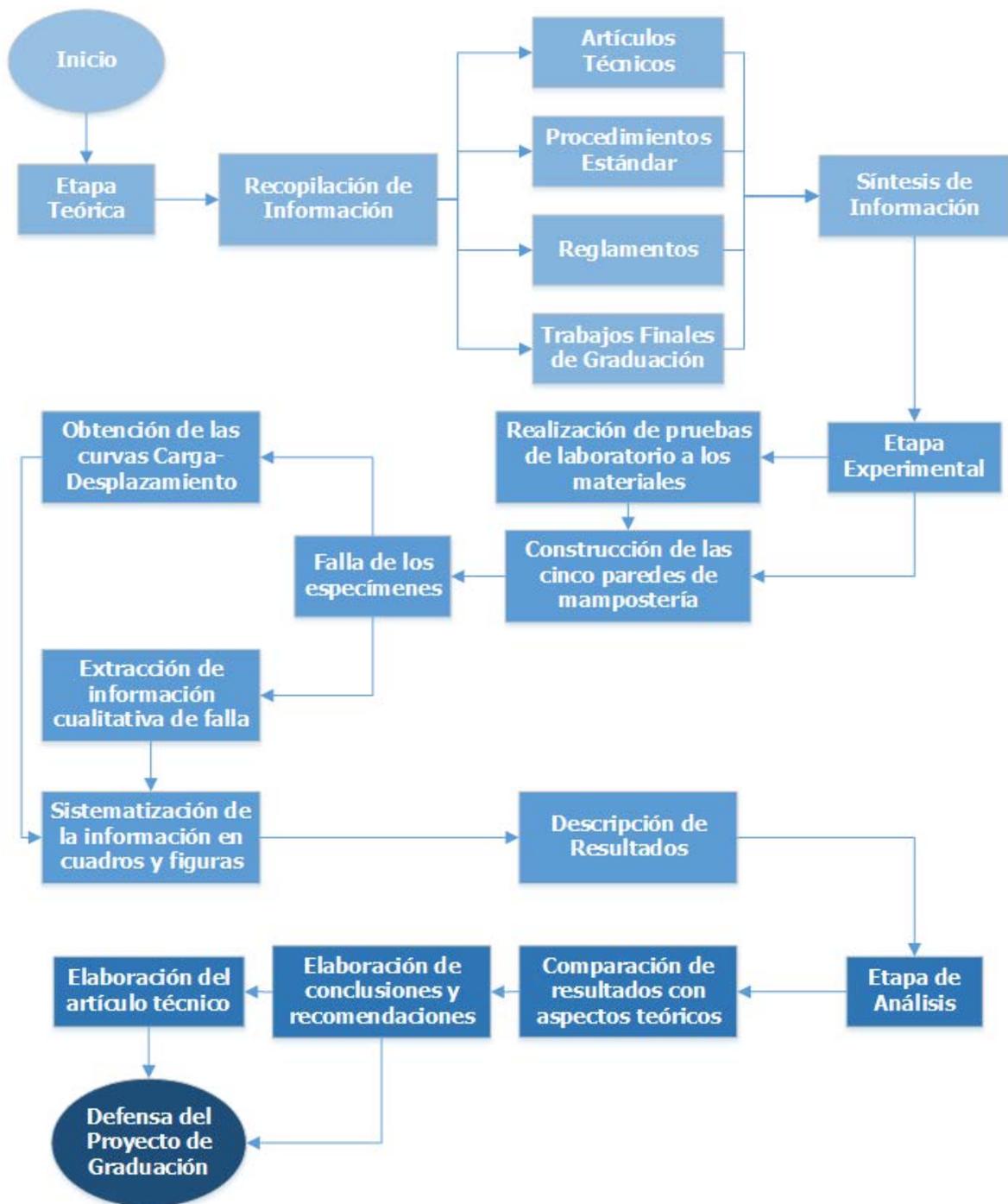


Figura 15. Diagrama metodológico.

Se dividió el proceso metodológico en 3 fases principales, mostradas a continuación:

1.6.1 Recopilación de información

La recopilación de información se llevó a cabo en estudios anteriores sobre muros de mampostería, tanto dentro de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, como de otras instituciones nacionales e internacionales.

El tipo de información recopilada abarca artículos científicos que exponen investigaciones en paredes de mampostería y su comportamiento ante cargas laterales, el procedimiento estándar; la ASTM E2126 (ref), que rige la forma en la que se deben llevar a cabo las mediciones y toma de información en los ensayos, los reglamentos de diseño; tal como el CSCR-10/14 (2016) y TMS 402/602-16 (2016), y trabajos finales de graduación hechos en el área de mampostería.

Se ensayó el acero utilizado para obtener la fuerza de cedencia y el módulo de elasticidad. En los agregados del concreto se realizaron ensayos de caracterización para obtener propiedades tales como; el análisis granulométrico, densidades, pesos específicos, porcentajes de absorción y humedad, mientras que en el cemento se realizó el ensayo de densidad. A su vez, en la mampostería se realizaron pruebas específicas de laboratorio para averiguar la resistencia en compresión de los bloques, del mortero, el concreto de relleno y el conjunto de mampostería.

Una vez recopilada toda la información necesaria y descartada aquella superflua, se procedió con su debida organización y se sintetizó por medio de cuadros y figuras. Esto permitió la creación de una base teórica contra la cual se comparó la información experimental.

1.6.2 Desarrollo Experimental

La etapa experimental consistió en todas aquellas actividades relacionadas con pruebas de laboratorio, los ensayos realizados a los materiales se presentan en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Normas utilizadas durante el proceso experimental

Norma ASTM	Norma INTE	Parámetro producto
ASTM A615	INTE C400:2019	Características del acero
ASTM A706	INTE C401:2017	
ASTM A370	INTE C403:2014	Resistencia a tracción del acero
ASTM C33	INTE C15:2018	Granulometría de agregados
ASTM C136	INTE C46:2016	

Norma ASTM	Norma INTE	Parámetro producto
ASTM C117	INTE C49:2018	Cantidad de material que pasa el tamiz 75 μm
ASTM C29	INTE C58:2013	Densidad bruta y porcentaje de vacíos en agregados
ASTM C127	INTE C68:2016	Densidad, gravedad específica y absorción de los agregados grueso y fino
ASTM C128	INTE C69:2016	
ASTM C188	INTE C141:2018	Gravedad específica del cemento hidráulico
ASTM C143	INTE C41:2017	Revenimiento del concreto hidráulico
ASTM C31	INTE C19:2019	Resistencia a compresión de cilindros de concreto
ASTM C39	INTE C39:2018	
ASTM C109	INTE C57:2018	Resistencia a compresión del mortero
ASTM C1019	INTE C56:2018	Resistencia a compresión del concreto de relleno
ASTM C140	INTE C50:2018	Resistencia a compresión de los bloques de concreto
ASTM C1314	INTE C55:2015	Resistencia de prismas de mampostería

A partir de los ensayos de laboratorio se obtuvieron las características de los materiales que se utilizaron en el concreto de los elementos de confinamiento, cuyo diseño de mezcla fue realizado con base en la norma ACI 211. A su vez, los muros y sus elementos de confinamiento se diseñaron con base en el CSCR-10/14 (2016) y la norma ACI 318S-14 (2014). El acero de refuerzo vertical se escogió en todos los casos para favorecer una falla dominada por cortante, por lo que se obtuvo una distribución poco convencional y concentrada en las columnas.

La construcción de los muros de mampostería la realizó un albañil que utilizó prácticas comúnmente usadas en el país, esto para garantizar que los especímenes fueran lo más representativos posibles de las condiciones de construcciones costarricenses. Además, los

especímenes se instrumentaron en varias secciones para obtener los parámetros de falla requeridos; en especial, la curva carga-desplazamiento. La falla de las paredes se dio por medio del equipo hidráulico ubicado en el laboratorio de fuerza del LanammeUCR.

Una vez terminada la falla, se procedió con la obtención de los datos de las curvas carga-desplazamiento y con la toma de fotografías del muro fallado, registro del patrón de grietas, entre otras características observables, tanto en los nudos viga-columna, el paño y las columnas. Toda esta información se organizó por medio de cuadros y figuras, las cuales permitieron describir los resultados obtenidos.

1.6.3 Análisis de Información

Durante la etapa de análisis se recopiló toda la información obtenida de las fuentes de consulta y se contrastó con los resultados obtenidos durante el desarrollo experimental. Esto con el fin de estudiar aquellas variaciones entre la teoría y la práctica, e incluso entre los mismos resultados experimentales, puesto que las diferentes relaciones de aspecto se compararon entre sí.

Se documentó los resultados obtenidos y se procedió con la redacción de conclusiones y recomendaciones del caso. Finalmente, se elaboró el presente documento final y se realizó la posterior defensa pública del trabajo final de graduación.

2. Caracterización de los especímenes estructurales

2.1 Materiales

2.1.1 Cemento

El cemento utilizado en el concreto de la viga corona y las columnas de los muros, es Cemento Hidráulico de Uso General de Cemex, tipo RTCR 479:2015 MM/B (P-C)-28, fabricado en las plantas de Colorado de Abangares y Guatuso de Patarrá.

2.1.2 Agregados

Los agregados utilizados para el concreto de la viga corona y las columnas de los muros son aquellos disponibles en el LanammeUCR. El agregado fino proviene de río y posee un módulo de finura de 2,72, mientras que el agregado grueso es piedra quintilla y posee un tamaño máximo de 19 mm; ambos provienen de Guápiles.

2.1.3 Concreto

El concreto utilizado en la viga corona y las columnas fue realizado en obra; con una resistencia teórica en compresión a los 28 días de 210 kg/cm², por lo que se realizaron pruebas a cilindros del material de acuerdo con la norma ASTM C39 (ref), las cuales dieron como resultado un revenimiento de 225 mm, y los datos de resistencia mostrados en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Resistencia del concreto de vigas y columnas medida a los 28 días.

Cilindro	Carga (kN)	(h/d)	Resistencia (kg/cm ²)
1	228,55	1,97	292
2	223,00	1,98	285
3	194,95	1,98	249
Promedio			275

En el caso de las cimentaciones, se utilizó concreto premezclado suministrado por la empresa AMCO, y de este se esperaba una resistencia en compresión a los 28 días de 350 kg/cm², por lo que también se realizaron pruebas a cilindros del material aplicando la misma norma. A partir de estas se obtuvo un asentamiento de 200 mm y los datos de resistencia mostrados en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Resistencia del concreto de la cimentación medido a los 28 días

Cilindro	Carga (kN)	(h/d)	Resistencia (kg/cm ²)
1	354,20	2,00	461
2	333,75	1,99	426
3	368,10	1,98	469
Promedio			452

2.1.4 Acero de refuerzo

El acero utilizado en los muros fue en forma de barras corrugadas No. 3 grado 40 para el acero horizontal y vertical del paño de mampostería, mientras que No. 4 grado 60 para las columnas, No. 5 grado 60 en la cimentación y No. 6 grado 60 en la cimentación y viga corona. El acero cumple con las normas ASTM A706 (ref) para el caso de las varillas grado 60 y ASTM A615 (ref) para el caso de las varillas grado 40.

Se realizaron pruebas a las varillas de cada grado para conocer su esfuerzo de fluencia, esfuerzo último, deformación unitaria de fluencia y última, así como el módulo de elasticidad. Los resultados se muestran en el Cuadro 8, mientras que una curva representativa de esfuerzo contra deformación se muestra en la Figura 16.

Cuadro 8. Propiedades mecánicas del acero empleado en la construcción de los muros estudiados.

Propiedad	No. 3 (Grado 40)	No. 4 (Grado 60)	No. 5 (Grado 60)	No. 6 (Grado 60)
Esfuerzo de fluencia (kg/cm ²)	3 412	4 585	4 529	4 901
Esfuerzo último (kg/cm ²)	5 289	6 272	6 246	7 749
Deformación de fluencia (mm/mm)	0,00206	0,00271	0,00270	0,00334
Deformación última (mm/mm)	0,186	0,143	0,121	0,175
Módulo de Elasticidad (kg/cm ²)	1,65 x10 ⁶	1,69 x10 ⁶	1,68 x10 ⁶	1,47 x10 ⁶

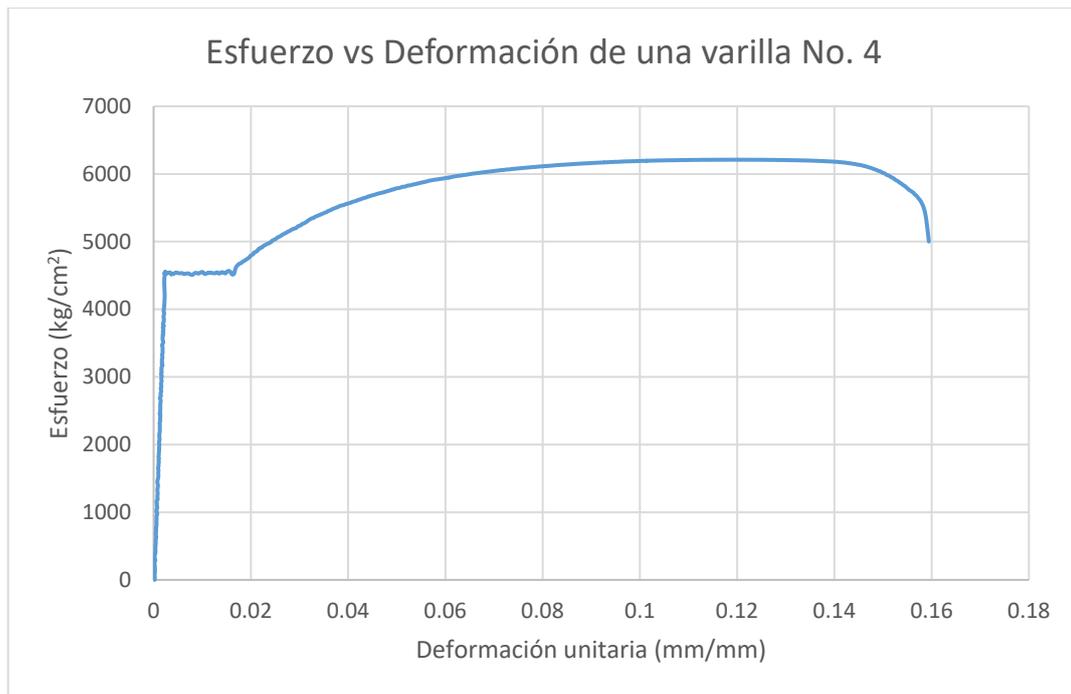


Figura 16. Curva esfuerzo-deformación de una varilla No. 4.

2.1.5 Bloques de mampostería

Los bloques utilizados para construir el paño de mampostería de los muros son bloques estándar N-15 de Pedregal. En la Figura 17 se muestra el esquema general de la geometría que poseen los bloques huecos de concreto y se señalan sus principales dimensiones.

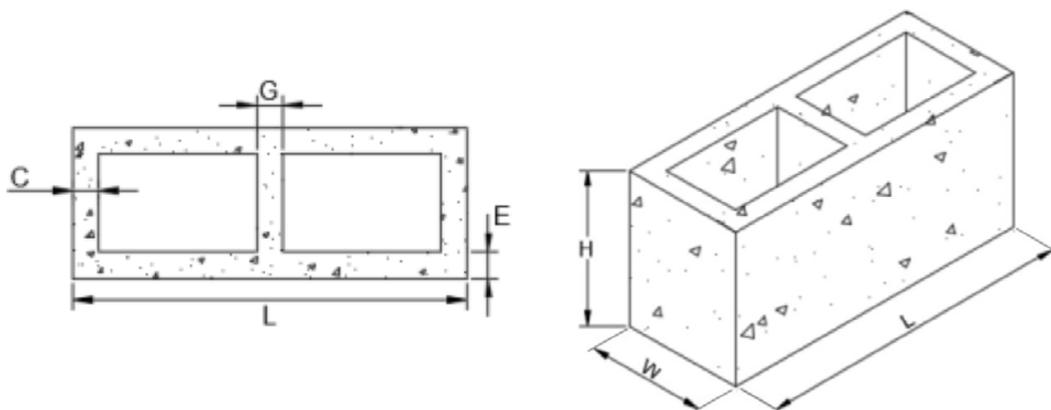


Figura 17. Esquema general de la geometría de bloques huecos de concreto, Zúñiga (2018).

En el Cuadro 9 se muestran los valores obtenidos al medir 4 especímenes en el laboratorio.

Cuadro 9. Propiedades geométricas de los bloques de mampostería medidas en laboratorio.

Dimensión	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Bloque 4	Promedio
L (mm)	390,45	389,75	390,03	389,19	389,86
W (mm)	150,76	150,58	150,24	150,20	150,44
H (mm)	186,55	188,43	188,13	189,87	188,24
C (mm)	28,36	27,41	26,33	27,19	27,32
G (mm)	32,89	33,60	31,87	33,60	32,99
E (mm)	28,99	28,61	28,92	28,37	28,72
Área Neta (cm ²)	309,53	305,56	303,72	303,02	305,46

De acuerdo con el CSCR-10/14 (2016), los bloques clase A deben tener al menos una resistencia de 133 kg/cm², por lo que se revisó la capacidad de 3 bloques utilizando el área neta promedio. A partir del Cuadro 10 se observa que la resistencia promedio es de 298 kg/cm².

Cuadro 10. Resistencia de bloques de mampostería medida sobre el área neta de las unidades.

Bloque	Carga (kN)	Resistencia (kg/cm ²)
1	881,25	294
2	915,40	305
3	882,55	295
Promedio		298

2.1.6 Concreto de relleno

El concreto de relleno utilizado es preempacado de Intaco, tipo CRC Autocompactable, especialmente útil para colado de altura. De acuerdo con el CSCR-10/14 (2016), el concreto de relleno clase A debe tener al menos una resistencia a los 28 días de 175 kg/cm², por lo que se hicieron pruebas a 4 prismas del material y se obtuvo una resistencia promedio de 197 kg/cm²; los resultados se muestran el Cuadro 11.

Cuadro 11. Resistencia de prismas de concreto de relleno medida a los 28 días.

Prisma	Carga (kN)	Resistencia (kg/cm ²)
1	196,30	202
2	214,80	207
3	195,65	175
4	207,90	203
Promedio		197

2.1.7 Mortero

El mortero utilizado es Pegablok Tipo N de Intaco y es especial para pegar bloques de compresión moderada. De acuerdo con el CSCR-10/14 (2016), el mortero clase C debe poseer como mínimo una resistencia de 53 kg/cm², por lo que se realizaron pruebas a 6 cubos del material y se obtuvo una resistencia de 61 kg/cm².

Se empleó Mortero Tipo N debido a que de acuerdo con los Trabajos Finales de Graduación de Barahona (2019) y García (2019), con este se logran módulos de ruptura y resistencias a la compresión de prismas de mampostería considerablemente similares a los alcanzados con otros tipos superiores de mortero.

2.1.8 Resistencia de la mampostería

La resistencia de la mampostería fue obtenida al ensayar a 28 días, 6 prismas de mampostería de 2 bloques de altura, de los cuales 3 se encontraban rellenos y 3 vacíos. De acuerdo con el CSCR-10/14 (2016), la mampostería clase A debe tener una resistencia mínima de 100 kg/cm², a su vez, la norma ASTM C1314 (ref) establece que para especímenes de esa altura se debe usar un factor de corrección de 1,04. Los resultados se muestran en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Resistencia de los prismas de mampostería medida a los 28 días.

Prisma	Carga (kN)	Área (cm ²)	Resistencia (kg/cm ²)
Rellenos			
1	751,08	588,30	138
2	845,24	587,37	155
3	678,82	586,84	124
Vacíos			
4	713,85	305,70	252
5	597,80	303,30	212
6	849,62	303,12	302
Promedio			197

2.2 Descripción geométrica de los Muros

2.2.1 Muro A

El Muro A se presenta en la Figura 18. Corresponde al muro con relación de aspecto de aproximadamente 0,5, con una altura total de 284,5 cm y una longitud de 560 cm.

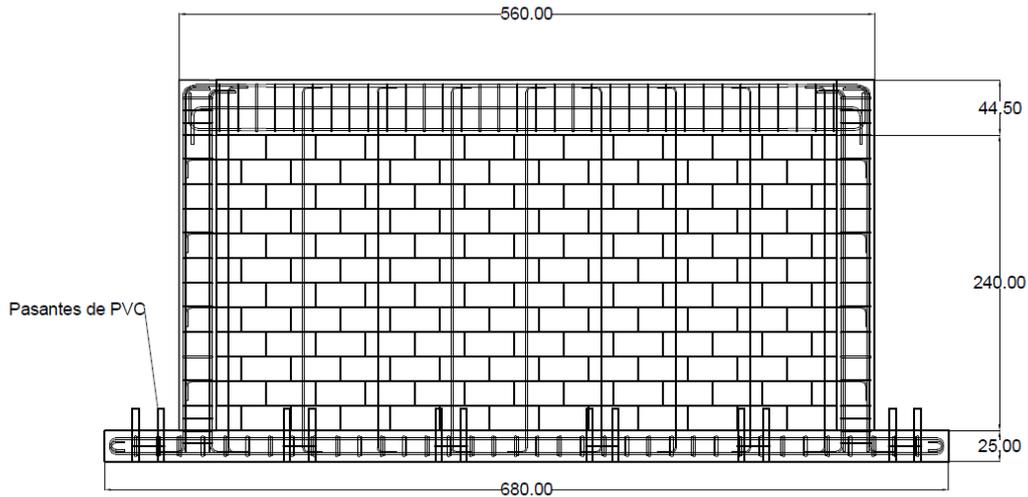


Figura 18. Vista lateral del Muro A, correspondiente a una relación de aspecto de 0,5 (cotas en cm).

El paño de mampostería se construyó a tesón y soga, posee refuerzo horizontal de varillas No. 3 grado 40 a cada 60 cm colocado en la sisa, y acero vertical de varillas No. 3 a cada 60 cm. Se rellenaron únicamente las celdas en las que se colocó acero vertical.

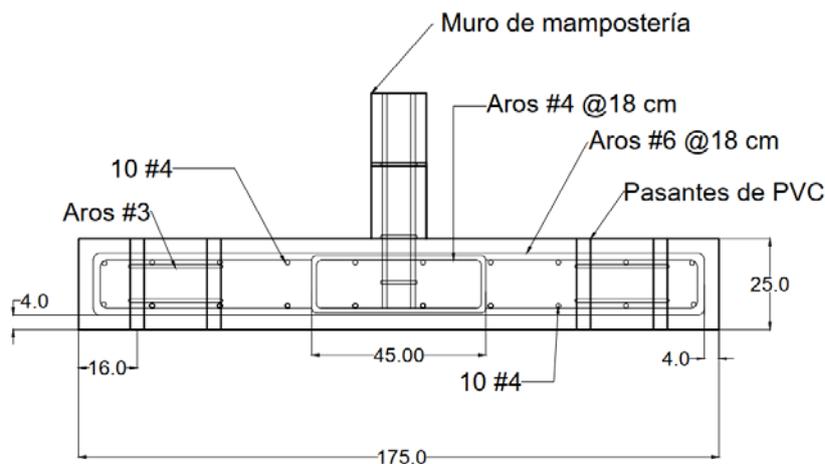


Figura 19. Detalle de la sección transversal de cimentación del Muro A (cotas en cm).

La cimentación del Muro A, mostrada en la Figura 19, tiene 25 cm de altura, 680 cm de largo y 175 cm de ancho. Longitudinalmente posee 20 varillas No. 4 y aros externos No. 6 a cada 18 cm e internos No. 4 a cada 18 cm; todas grado 60, además contiene 48 ductos de PVC de 3,8 cm de diámetro, confinados por 2 aros de varilla No. 3. A través de estos ductos se colocarán 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 un concreto cuya resistencia en compresión a los 28 días es de 350 kg/cm².

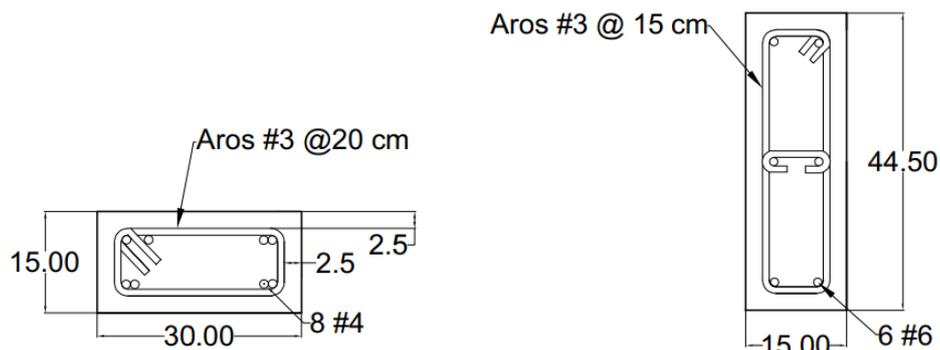


Figura 20. Detalle de sección transversal de columnas y viga del Muro A (cotas en cm).

Las columnas del marco de confinamiento, mostradas en la Figura 20, tienen una sección transversal de 30 cm x 15 cm, además, poseen longitudinalmente 8 varillas No. 4 grado 60 y aros de varilla No. 3 grado 40 a cada 20 cm. La viga corona posee una sección transversal de 44,5 cm x 15 cm y longitudinalmente lleva como refuerzo 6 varillas No. 6 grado 60, con aros de varilla No 3 grado 40 a cada 15 cm, además, tiene embebidos 4 pernos de 2,5 cm de diámetro y acero grado 80. Ambos elementos fueron diseñados con un concreto cuya resistencia en compresión a los 28 días es de 210 kg/cm².

2.2.2 Muro B

El Muro B se presenta en la Figura 21. Corresponde al muro con relación de aspecto de aproximadamente 0,75, con una altura total de 284,5 cm y una longitud de 380 cm.

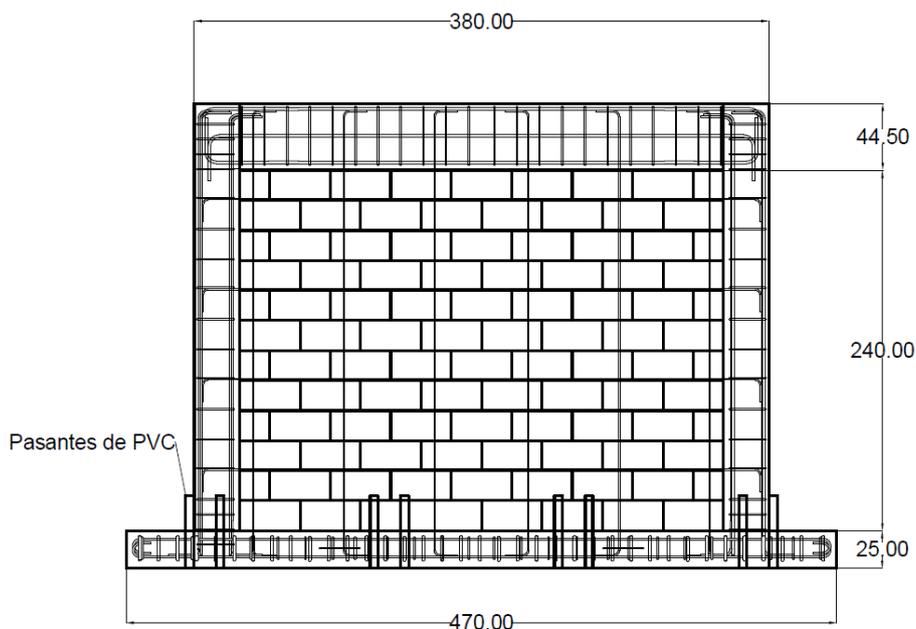


Figura 21. Vista lateral del Muro B, correspondiente a una relación de aspecto de 0,75 (cotas en cm).

El paño de mampostería se construyó a tesón y sogá, posee refuerzo horizontal de varillas No. 3 grado 40 a cada 60 cm colocado en la sisa, y acero vertical de varillas No. 3 a cada 60 cm. Se rellenaron únicamente las celdas en las que se colocó acero vertical.

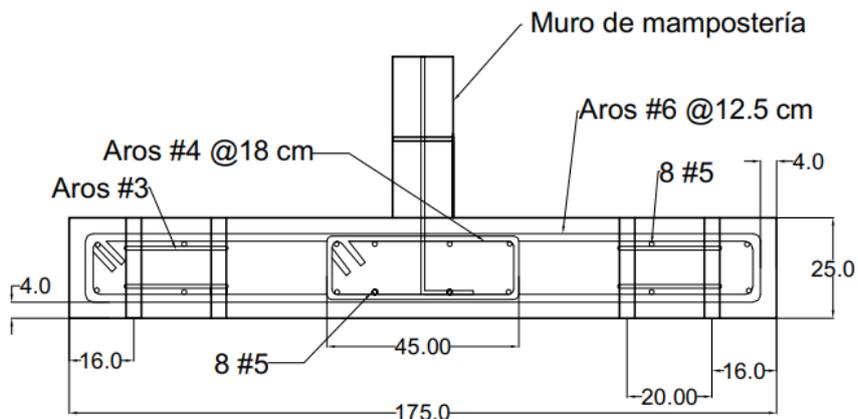


Figura 22. Detalle de la sección transversal de cimentación del Muro B (cotas en cm).

La cimentación del Muro B, mostrada en la Figura 22, tiene 25 cm de altura, 470 cm de largo y 175 cm de ancho. Longitudinalmente posee 16 varillas No. 5 y aros No. 6 a cada 12,5 cm; ambas grado 60, además contiene 32 ductos de PVC de 3,8 cm de diámetro, confinados por 2 aros de varilla No. 3. A través de estos ductos se colocarán los pernos de anclaje al piso fuerte, los cuales son idénticos a los del Muro A. El elemento fue diseñado con un concreto cuya resistencia en compresión a los 28 días es de 350 kg/cm².

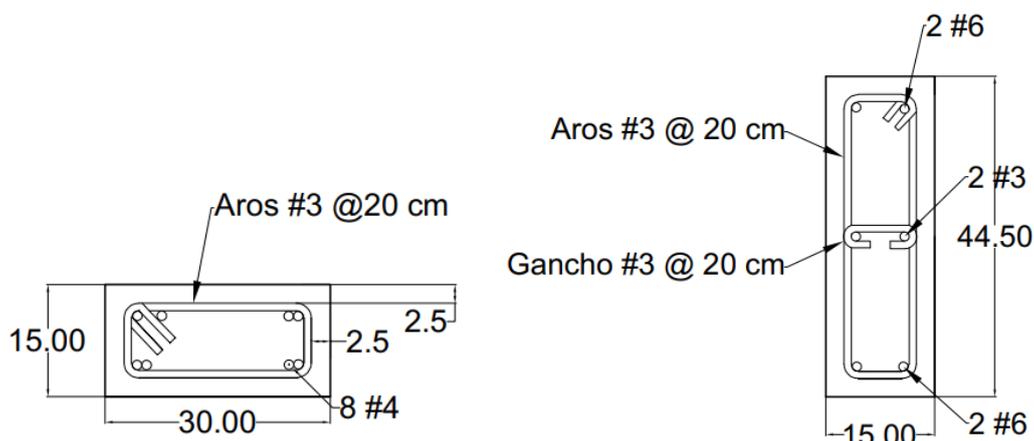


Figura 23. Detalle de sección transversal de columna y viga de los muros B y C (cotas en cm).

Las columnas del marco de confinamiento, mostradas en la Figura 23, tienen una sección transversal de 30 cm x 15 cm, además, poseen longitudinalmente 8 varillas No. 4 grado 60 y aros de varilla No. 3 grado 40 a cada 20 cm. La viga corona posee una sección transversal

de 44,5 cm x 15 cm y longitudinalmente lleva como refuerzo 4 varillas No. 6 grado 60 y 2 varillas No. 3 grado 40, con aros de varilla No. 3 grado 40 a cada 15 cm, además, tiene embebidos 3 pernos de acero idénticos a los de la viga del Muro A. Ambos elementos fueron diseñados con un concreto cuya resistencia en compresión a los 28 días es de 210 kg/cm².

2.2.3 Muro C

El Muro C se presenta en la Figura 24. Corresponde al muro con relación de aspecto de aproximadamente 1,0, con una altura total de 284,5 cm y una longitud de 280 cm.

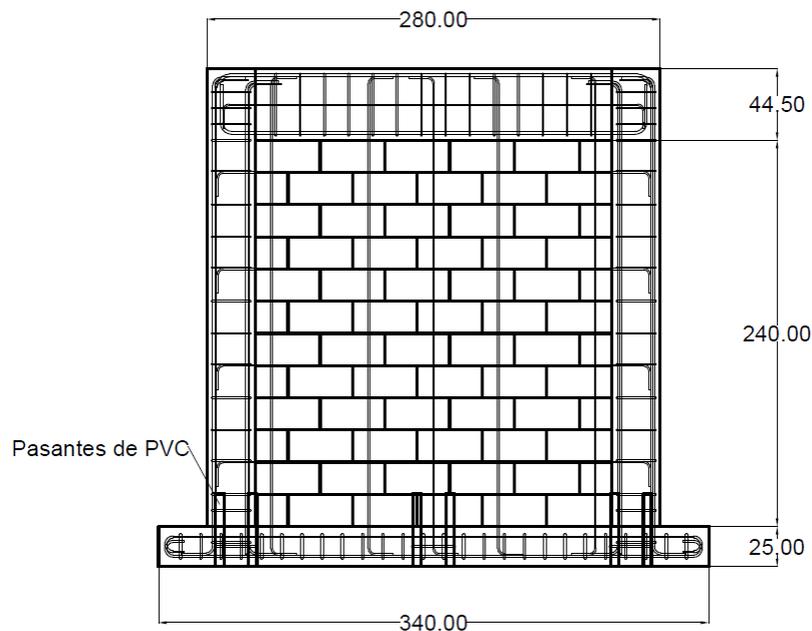


Figura 24. Vista lateral del Muro C, correspondiente a una relación de aspecto de 1,0 (cotas en cm).

El paño de mampostería se construyó a tesón y sogá, posee refuerzo horizontal de varillas No. 3 grado 40 a cada 60 cm colocado en la sisa, y acero vertical de varillas No. 3 a cada 60 cm. Se rellenaron únicamente las celdas en las que se colocó acero vertical.

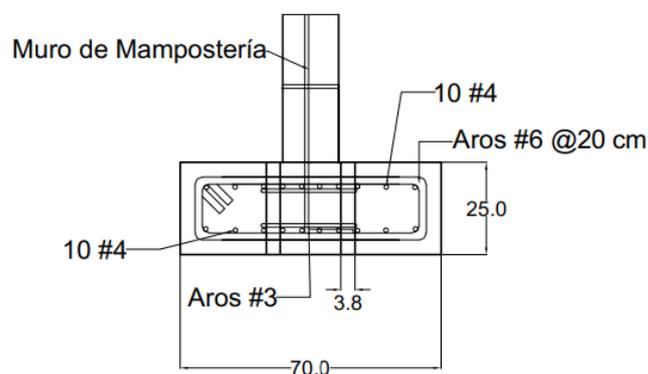


Figura 25. Detalle de la sección transversal de cimentación del Muro C (cotas en cm).

La cimentación del Muro C, mostrada en la Figura 25, tiene 25 cm de altura, 340 cm de largo y 70 cm de ancho. Longitudinalmente posee 20 varillas No. 4 y aros No. 5 a cada 12,5 cm; ambas grado 60, además contiene 12 ductos de PVC de 3,8 cm de diámetro, confinados por 2 aros de varilla No 3. A través de estos ductos se colocarán los pernos de anclaje al piso fuerte idénticos a los del Muro A. El elemento fue diseñado con un concreto cuya resistencia en compresión a los 28 días es de 350 kg/cm².

Las columnas del marco de confinamiento y la viga corona son idénticas a las del muro B y se muestran en la Figura 23. Ambos elementos fueron diseñados con un concreto cuya resistencia en compresión a los 28 días es de 210 kg/cm².

2.2.4 Muro D

El Muro D se presenta en la Figura 26. Corresponde al muro con relación de aspecto de aproximadamente 1,5, con una altura total de 284,5 cm y una longitud de 180 cm.

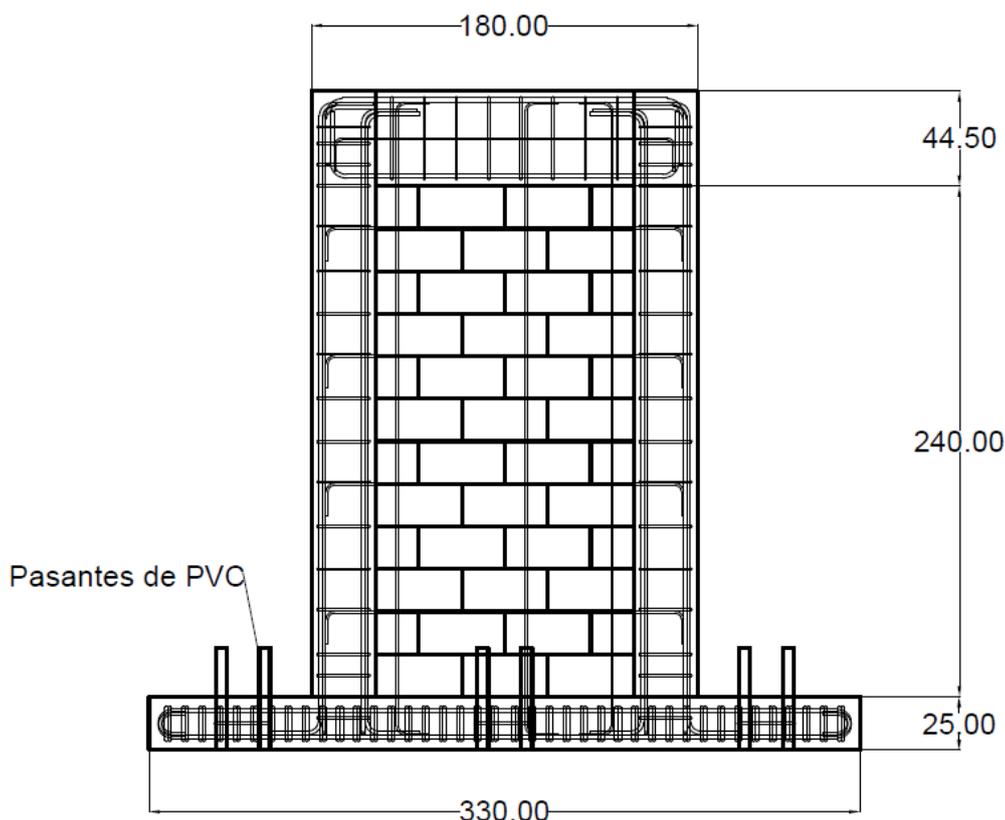


Figura 26. Vista lateral del Muro D, correspondiente a una relación de aspecto de 1,5 (cotas en cm).

El paño de mampostería se construyó a tesón y sogá, posee refuerzo horizontal de varillas No. 3 grado 40 a cada 60 cm colocado en la sisa, y acero vertical de varillas No. 3 a cada 60 cm. Se rellenaron únicamente las celdas en las que se colocó acero vertical.

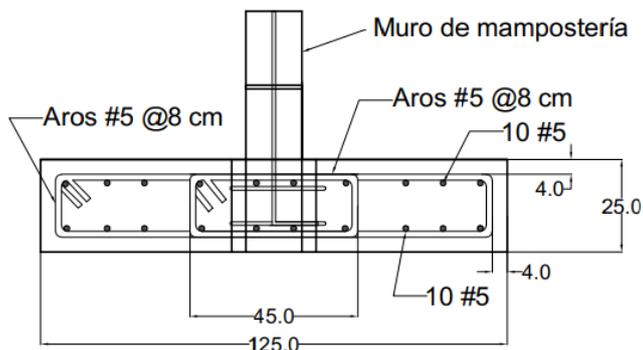


Figura 27. Detalle de la sección transversal de cimentación del Muro D (cotas en cm).

La cimentación del Muro D, mostrada en la Figura 27, tiene 25 cm de altura, 330 cm de largo y 125 cm de ancho. Longitudinalmente posee 24 varillas No. 5 y aros No. 5 a cada 8 cm; ambas grado 60, además contiene 12 ductos de PVC de 3,8 cm de diámetro, confinados por 2 aros de varilla No. 3. A través de estos ductos se colocarán los pernos de anclaje al piso fuerte idénticos a los del Muro A. El elemento fue diseñado con un concreto cuya resistencia en compresión a los 28 días es de 350 kg/cm².

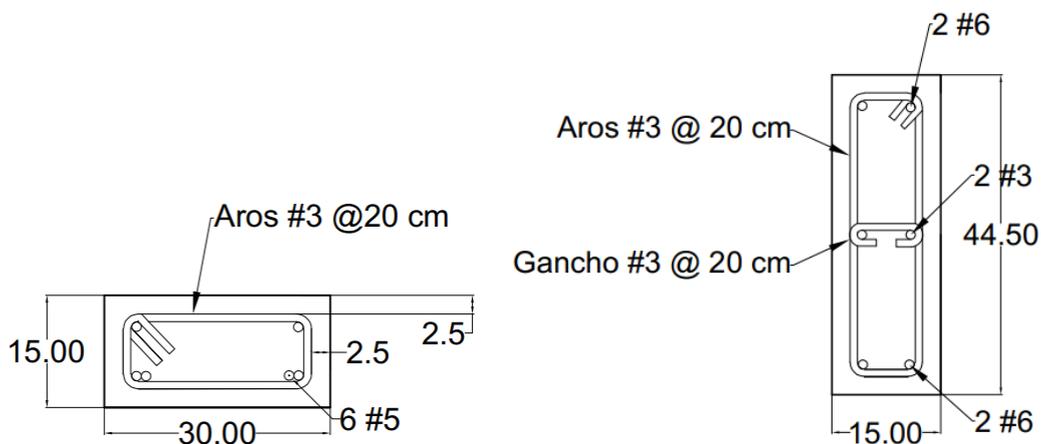


Figura 28. Detalle de sección transversal de columna y viga de los muros D y E (cotas en cm).

Las columnas del marco de confinamiento, mostradas en la Figura 28, tienen una sección transversal de 30 cm x 15 cm, además, poseen longitudinalmente 6 varillas No. 5 grado 60 y aros de varilla No. 3 grado 40 a cada 20 cm. La viga corona posee una sección transversal de 44,5 cm x 15 cm y longitudinalmente lleva como refuerzo 4 varillas No. 6 grado 60 y 2 varillas No. 3 grado 40, con aros de varilla No. 3 grado 40 a cada 15 cm, además, tiene embebidos 3 pernos de acero idénticos a los de la viga del Muro A. Ambos elementos fueron diseñados con un concreto cuya resistencia en compresión a los 28 días es de 210 kg/cm².

2.2.5 Muro E

El Muro E se presenta en la Figura 29. Corresponde al muro con relación de aspecto de aproximadamente 2,0, con una altura total de 284,5 cm y una longitud de 140 cm.

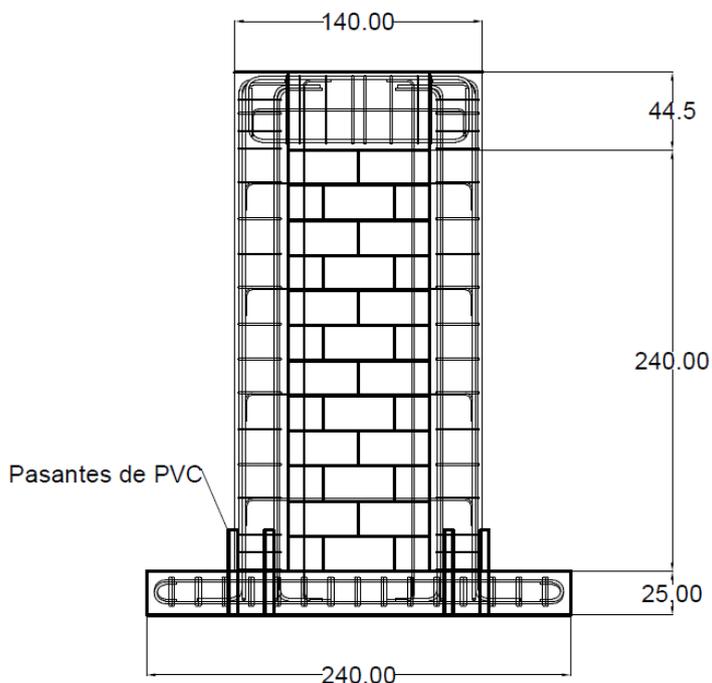


Figura 29. Vista lateral del Muro E, correspondiente a una relación de aspecto de 2,0 (cotas en cm).

El paño de mampostería se construyó a tesón y soga, posee refuerzo horizontal de varillas No. 3 grado 40 a cada 60 cm colocado en la sisa, y acero vertical de varillas No. 3 a cada 60 cm. Se rellenaron únicamente las celdas en las que se colocó acero vertical.

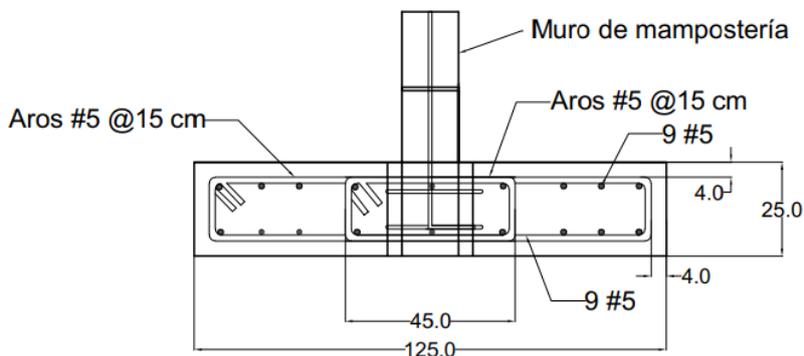


Figura 30. Detalle de la sección transversal de cimentación del Muro E (cotas en cm).

La cimentación del Muro E, mostrada en la Figura 30, tiene 25 cm de altura, 240 cm de largo y 125 cm de ancho. Longitudinalmente posee 18 varillas No. 5 y aros No. 5 a cada 15 cm; ambas grado 60, además contiene 8 ductos de PVC de 3,8 cm de diámetro, confinados

por 2 aros de varilla No 3. A través de estos ductos se colocarán los pernos de anclaje al piso fuerte idénticos a los del Muro A. El elemento fue diseñado con un concreto cuya resistencia en compresión a los 28 días es de 350 kg/cm².

Las columnas del marco de confinamiento y la viga corona son idénticas a las del muro D y se muestran en la Figura 28. Ambos elementos fueron diseñados con un concreto cuya resistencia en compresión a los 28 días es de 210 kg/cm².

2.3 Capacidad nominal de los muros

La capacidad de los muros de resistir fuerzas paralelas a su plano, se calculó de acuerdo con la metodología del Apéndice 1, la cual sigue los lineamientos provistos por el CSCR-10/14 (2016) y el manual ACI-318S-14 (2014). Se obtuvo la capacidad para dos escenarios, el primero utiliza las resistencias teóricas de los materiales, mientras que el segundo emplea las resistencias reales de los materiales medidas en el laboratorio. En el Cuadro 13 se muestran las resistencias nominales en cortante y flexión.

Cuadro 13. Capacidades nominales teóricas de los especímenes.

Muro	Nominal Teórica		Nominal Experimental	
	V _n (T)	M _n (T·m)	V _n (T)	M _n (T·m)
A	39,40	280,86	55,85	316,39
B	28,91	177,83	39,19	198,90
C	23,74	126,79	31,02	141,29
D	20,10	76,20	25,39	84,08
E	18,65	57,24	22,02	62,64

Cabe destacar que, para el Muro E, en el segundo escenario, se tiene que el cortante por flexión es ligeramente menor que la resistencia nominal, por lo que dicho valor pasa a regir la resistencia al corte.

2.4 Proceso constructivo

El proceso constructivo de los muros fue el mismo para los 5 especímenes, ya que se llevó a cabo en forma simultánea. Las paredes se construyeron en el LanammeUCR, la mano de obra fue contratada por el director del presente proyecto y se realizó inspección diaria.

2.4.1 Cimentación

La cimentación es la primera etapa de construcción y se comenzó confeccionando las armaduras, tal como se muestra en la Figura 31.



Figura 31. Armadura de la cimentación para el Muro A.

Como se observa en la Figura 32, esta se introdujo en el laboratorio de fuerza para ajustar los ductos de los pernos con los agujeros del piso fuerte.



Figura 32. Ductos de pernos y ajuste en el piso fuerte.

Una vez amarrados los ductos, se procedió a encofrar la armadura en el patio exterior y colocar el acero vertical de la mampostería, así como el acero longitudinal de las columnas; tal y como muestra la Figura 33.



Figura 33. Cimentación encofrada con acero vertical colocado.

Posteriormente, se procedió con la colocación de las galgas extensométricas en varillas verticales del paño de mampostería y de las columnas, así como en una varilla del refuerzo horizontal. Se prepararon al envolverlas en cinta aislante, se cubrieron con parafina y luego nuevamente se envolvieron con cinta, como muestra la Figura 34.

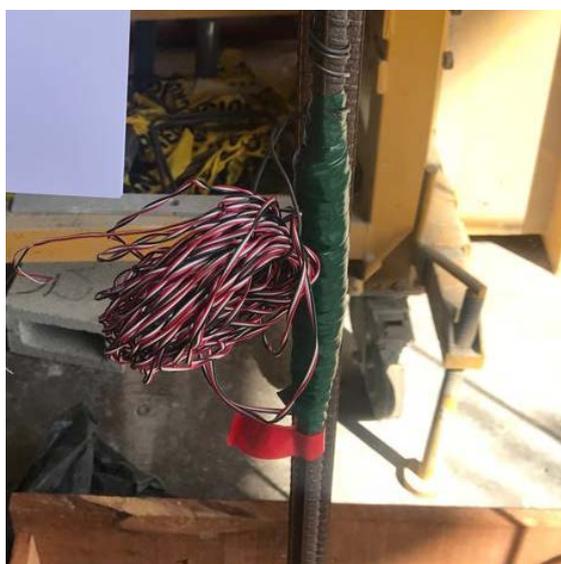


Figura 34. Preparación de galga extensométrica en varilla vertical.

Después de colocadas las galgas, se procedió con el colado de la cimentación; para ello se utilizó concreto premezclado de AMCO y se aprovechó para colar las 5 cimentaciones de una sola vez. La colada se muestra en la Figura 35.



Figura 35. Colado de las cimentaciones con concreto premezclado.

Una vez coladas las cimentaciones, se curaron durante 4 días antes de iniciar con el proceso constructivo del paño de mampostería.

2.4.2 Paño de mampostería

El paño de mampostería se colocó en tres partes para evitar una desnivelación entre los bloques. Se construyeron primero las primeras 4 filas, se esperó a que el mortero fraguara y se procedió con las siguientes 4 filas, se repitió el proceso y se construyeron las últimas 4 filas. Esto se muestra en la Figura 36.



Figura 36. Construcción de las primeras 4 hiladas del Muro E.

Durante la colocación de las hiladas de bloques, se colocó el acero horizontal y no se rellenaron las celdas. En la Figura 37 se muestra el paño construido. Debido a que se emplea concreto de relleno autocompactable, se debe garantizar que las juntas de las celdas verticales estén completamente selladas en sus 4 caras para evitar el paso del concreto en estado líquido.



Figura 37. Paño terminado del Muro E.

Una vez terminado el paño, se procedió a hacer ventanas de inspección en la base del muro, las cuales permitieron conocer si el concreto de relleno llegó hasta la primera hilada, estas se muestran en la Figura 38.

Figura 38. Ventanas de inspección.

Seguidamente, se procedió a mezclar el concreto relleno de las celdas, el cual se utiliza en el colado de altura. Para este objetivo, se empleó un material preempacado con bastante fluidez, cuya prueba de asentamiento se muestra en la Figura 39.



Figura 39. Prueba de fluidez del concreto de relleno.

Para colocar el concreto de relleno se utilizó una bomba (Monomix) suministrada por Intaco, la cual se muestra en la Figura 40.

Figura 40. Equipo Monomix para mezcla y bombeo del concreto de relleno.

Este equipo permitió rellenar las celdas desde la base hasta la mitad de la última hilada, tal como muestra la Figura 41, esto con el objetivo de garantizar una mejor adherencia entre el paño y la viga corona.

Figura 41. Última celda de muro rellena con concreto.

Una vez colocado el concreto de relleno, se dejó fraguar y se curó el espécimen el tiempo posible; ya que la fecha coincidió con el receso navideño y por ende se tuvo que preparar los muros para garantizar que se iban a mantener en una condición húmeda. Para esto, se empaparon los muros y se envolvieron en plástico, lo cual permitió simular una condición de cámara húmeda; tal como se muestra en la Figura 42.

Figura 42. Muro envuelto con plástico para garantizar fraguado del concreto.

2.4.3 Elementos de confinamiento

Los elementos de confinamiento se construyeron en 2 etapas, primero las columnas y luego las vigas. Para esto, se procedió a colocar las armaduras de la viga corona y luego encofrar los elementos de borde hasta $\frac{3}{4}$ de la altura; esto con el fin de evitar una junta fría en el plano de unión viga-paño de mampostería. Este arreglo de encofrado se muestra en la Figura 43.

Figura 43. Muros con elementos de borde verticales encofrados.

Una vez listo el encofrado, se procedió a colar las $\frac{3}{4}$ partes de la columna con concreto hecho en obra, el cual posee una relación de dosificación de masa de 1:2:2. Luego, se ajustaron los pernos en la viga corona y su encofrado correspondiente, tal como se observa en la Figura 44.

Figura 44. Encofrado de la viga corona.

Posteriormente, se mezcló más concreto y se procedió a colar la viga corona, tal como muestra la Figura 45.

Figura 45. Colado de la viga corona.

Finalmente, una vez que el concreto hubo fraguado, se procedió a remover el encofrado y curar los elementos durante 28 días. El estado final se muestra en la Figura 46.

Figura 46. Muros finalizados en proceso de curado.

2.5 Montaje experimental

2.5.1 Instrumentación

La falla de los muros tiene como objetivo obtener datos de su comportamiento, esto implica deformaciones en el acero y desplazamientos en la estructura. Para este fin se utilizaron galgas extensométricas en 6 varillas verticales y una horizontal, así como 5 transformadores diferenciales de variación lineal (LVDT por sus siglas en inglés). La distribución se muestra en la Figura 47. El esquema de instrumentación presentado se aplicó a los 5 muros y se muestra con más detalle en el Apéndice 2.

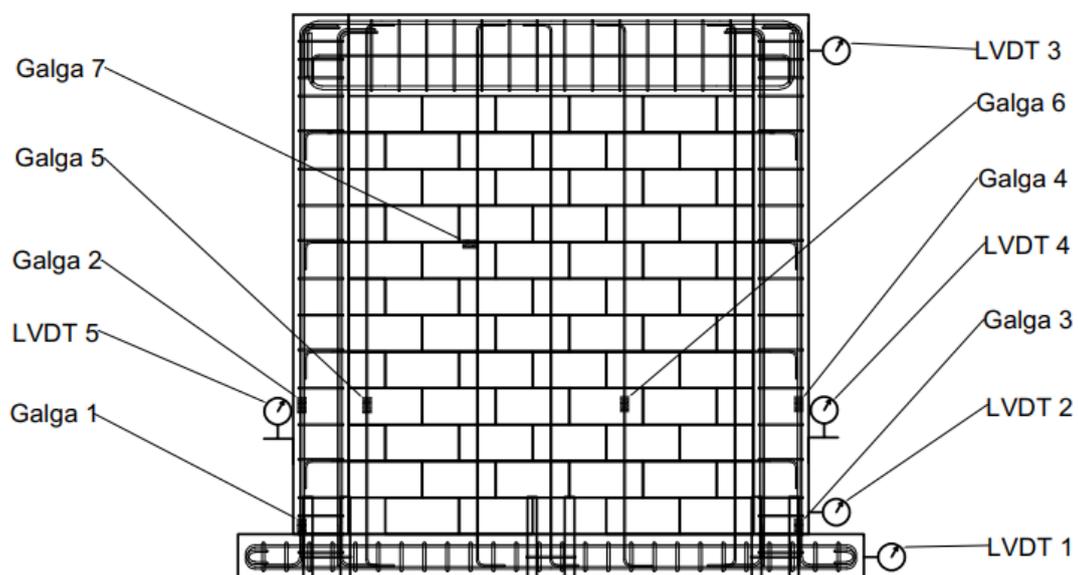


Figura 47. Instrumentación esquemática de los muros.

Las galgas 1 y 3 se colocaron con el fin de obtener la deformación del acero en la base, es decir, la sección de momento máximo; similarmente las galgas 2 y 4 se situaron más arriba con el fin de detectar si el acero fluye un poco más lejos de la base. En lo que respecta a las galgas 5 y 6, estas se ubicaron en el acero de la mampostería con el fin de comparar el acero longitudinal de la columna con acero embebido en la celda, y para comprobar deformaciones a distintas distancias desde el eje neutro, respectivamente. La galga 7 se colocó en el acero horizontal a una distancia para la cual se estimó que cruzaría la grieta diagonal de cortante.

Los LVDT 1 y 2; cimentación y base del muro, respectivamente, se colocaron para medir cualquier desplazamiento inferior; lo cual es de utilidad para obtener deformaciones reales sin efecto del deslizamiento del muro. En el caso del LVDT 3, este tiene el objetivo de medir

información de la deflexión máxima, la cual ocurre en el tope del muro. Finalmente, los LVDT 4 y 5 se ubicaron verticalmente a cada lado del muro con el fin de medir la rotación del muro, que está ligada a la deformación por cortante.

Este esquema cumple con lo estipulado por la norma ASTM E2126 (ref), la cual menciona que se debe instrumentar el espécimen para detectar desplazamiento horizontal en su parte superior, el desplazamiento vertical en ambas columnas con el medidor ubicado lateralmente en la cara exterior, así como otra medida horizontal en la losa de fundación.

2.5.2 Montaje en el piso fuerte

El montaje utilizado en los 5 muros se encuentra descrito en la norma ASTM E2126 (ref). El esquema se muestra en la Figura 48.

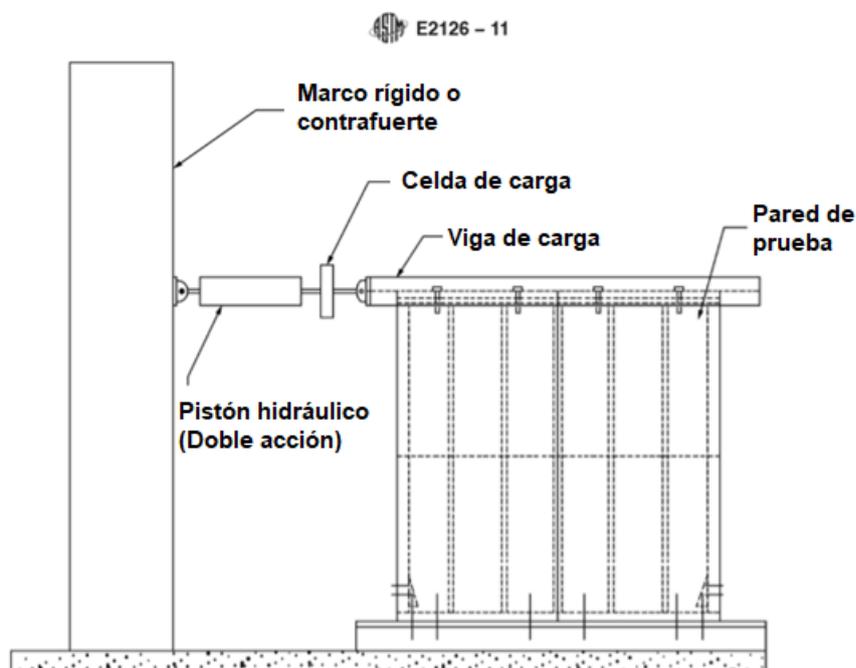


Figura 48. Ejemplo de preparación experimental del espécimen de muro de corte, ASTM E2126 (ref).

El proceso implica ajustar con arandelas y tuercas los pernos dentro de los ductos de la cimentación; esto con el fin de evitar el deslizamiento de la estructura. Seguidamente, se sujeta a la viga corona una viga metálica de carga, la cual debe estar adecuada al tamaño del muro; ya que se busca evitar la adición de esfuerzos no contemplados y garantizar una transmisión adecuada de la fuerza del pistón durante el proceso de falla. La Figura 49 muestra uno de los especímenes durante el proceso de montaje.



Figura 49. Montaje del muro en el laboratorio de fuerza.

A continuación, se coloca el pistón hidráulico en el contrafuerte y se une por medio de pernos a la viga de carga. Finalmente, se colocan riostras; mostradas en la Figura 50, para evitar el la deformación lateral (pandeo) del muro durante el proceso de carga.



Figura 50. Riostras laterales, pistón hidráulico y viga de carga sobre muro de mampostería.

La norma ASTM E2126 (ref) propone tres métodos para aplicar la falla, de los cuales: el método A corresponde a ciclos crecientes con pequeñas caídas cíclicas, el método B consiste en una aplicación creciente en la que se busca llegar a porcentajes específicos del desplazamiento último (1,25%, 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, etc), mientras que el método C se caracteriza por picos fuertes de crecimiento cada vez mayores y cíclicamente espaciados. Se utilizó el método B para crear los protocolos de falla de los 5 muros, los cuales se muestran en el Apéndice 3.

3. Presentación y Análisis de Resultados

3.1 Resultados del Muro A

3.1.1 Proceso de falla

El proceso de carga del muro fue ininterrumpido, ya que no se dio la necesidad de ajustar adicionalmente los pernos de amarre al piso fuerte. Además, se observó que los pistones hidráulicos poseían un ángulo muy pequeño en la horizontal, por lo que la fuerza horizontal no es la que aparece en los datos, sino una componente de esta; sin embargo, una vez realizados los cálculos se determinó que dicho ángulo es menor a $4,2^\circ$, por lo que la componente respectiva y la fuerza son casi iguales; ya que el factor de corrección es de 0,997, por esta razón se consideró dicho efecto como despreciable.

La primera grieta se presentó durante el primer ciclo de la séptima serie (± 26 mm), esta se ubicó en la esquina superior cerca del punto de aplicación de carga, con orientación diagonal, y se extendió tanto en la mampostería como en el concreto. Durante este mismo ciclo, se alcanzó la resistencia máxima del muro. A partir de este momento se comenzó a presentar deslizamiento entre la última y penúltima fila del paño de mampostería, así como agrietamiento diagonal en múltiples partes del paño, tal y como se muestra en la Figura 51.



Figura 51. Agrietamiento parcial del paño de mampostería del Muro A, para el 2° ciclo de la 9° serie (± 52 mm).

A partir de la figura anterior, se muestra también que una grieta similar a la grieta inicial se desarrolló también en la esquina opuesta y se propagó rápidamente por el nudo viga-

columna. La fluencia del acero horizontal se dio durante el primer ciclo de la última (décima) serie (± 65 mm).

Durante el resto del proceso de falla, se dio degradación del paño, desarrollo de más grietas diagonales y verticales, escalerillas en las juntas de mortero, y desprendimiento de concreto en los nudos viga-columna. El estado final del muro se muestra en la Figura 52 mientras que la condición final de la mampostería se presenta en la Figura 53.



Figura 52. Condición final del nudo superior izquierdo del Muro A.



Figura 53. Condición final del Muro A.

3.1.2 Fluencia del acero

Los resultados para el Muro A se muestran en el Cuadro 14; sin embargo, cabe destacar que en el caso de las galgas con datos fuera de rango, a diferencia de las galgas dañadas que no tomaron ningún dato, registraron información desde el principio de la prueba; no obstante, esta carecía de sentido, ya que eran valores en órdenes de magnitud muy superiores a los datos que inicialmente venían registrando.

Cuadro 14. Resumen de información de las galgas del Muro A.

Galga	Estado
1	No se presentó fluencia
2	Se encontraba dañada
3	Datos fuera de rango
4	Datos fuera de rango
5	Datos fuera de rango
6	Datos fuera de rango
7	Se presentó fluencia

3.1.3 Curva histérica

La curva de histéresis obtenida durante el ensayo se muestra en la Figura 54. Los valores máximos de cada ciclo se muestran en el Apéndice 4.

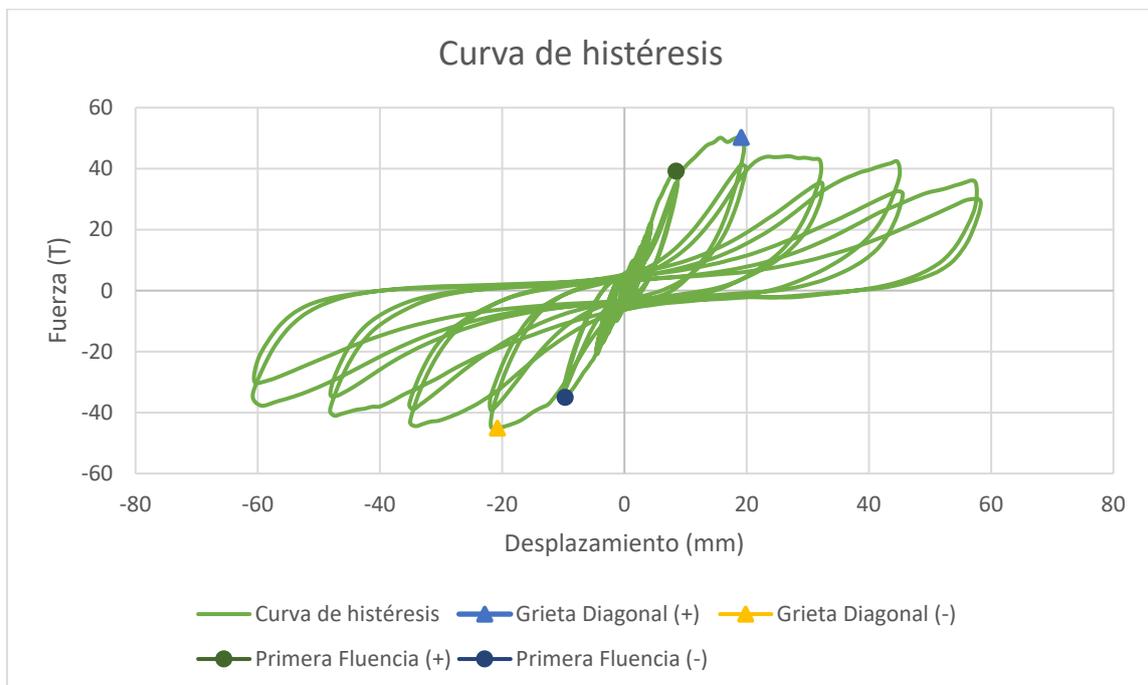


Figura 54. Curva de histéresis del Muro A.

A partir de la curva de histéresis, y con la metodología propuesta en la norma ASTM E2126 (ref), fue posible obtener los datos mostrados en el Cuadro 15.

Cuadro 15. Resultados generales del Muro A.

Característica	Sentido Positivo	Sentido Negativo
Fuerza fluencia (T)	44,00	41,04
Desplazamiento fluencia (mm)	8,42	8,69
Fuerza máxima (T)	50,25	45,11
Desplazamiento máximo (mm)	19,11	20,77
Fuerza última (T)	40,20	36,09
Desplazamiento último (mm)	48,66	65,32
Ductilidad	5,78	7,52
Rigidez (T/mm)	5,22	4,72
Energía disipada (T·m)	10,27	

Una vez obtenida la información anterior y con la curva envolvente, es posible trazar la curva de energía elastoplástica equivalente (EEEP), ambas se muestran en la Figura 55.

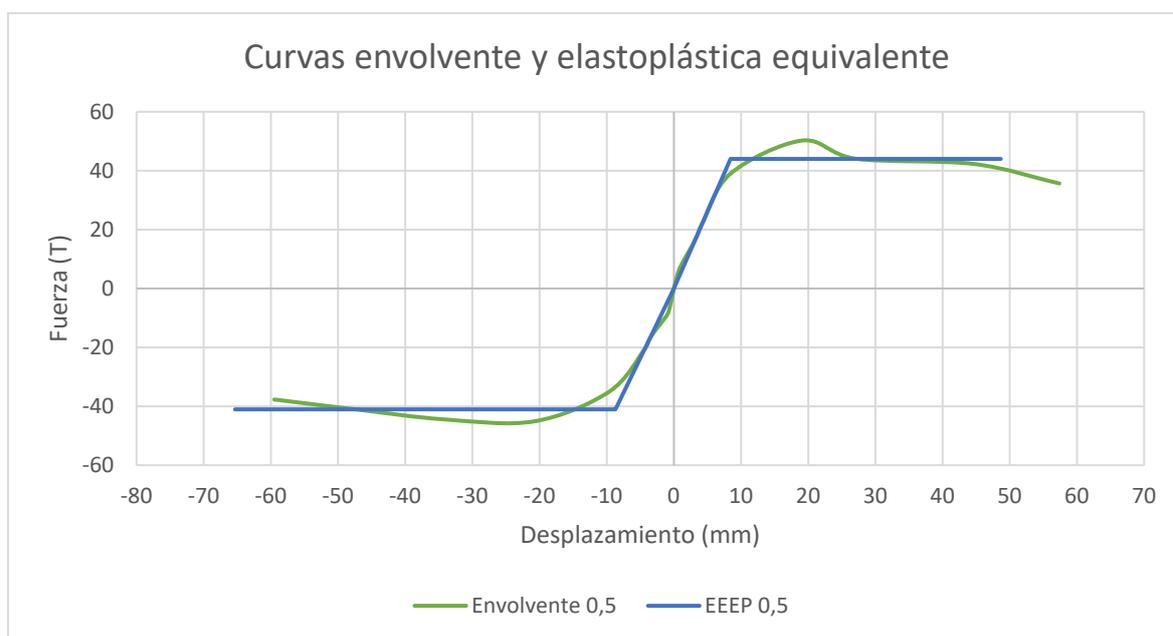


Figura 55. Curvas envolvente y EEEP del Muro A.

3.2 Análisis del Muro A

El desarrollo del patrón de grietas del Muro A comenzó en la esquina superior del paño más cercana al muro fuerte, a su vez, cuando la carga se revirtió, ocurrió lo mismo en la esquina opuesta, lo cual se debe a esfuerzos de tracción producto del desplazamiento y la fuerza de compresión en el puntal diagonal, así como la consecuente interacción entre el paño y

el marco confinante, ya que como mencionan Paulay & Priestley (1992) ambos tienden a desligarse uno del otro.

Debido a que el agrietamiento mostrado en la Figura 51 fue importante, se desarrolló una grieta entre la última y penúltima hiladas de mampostería, que en los siguientes ciclos permitió el deslizamiento de la última hilada y la viga corona como un solo bloque trapezoidal. Este plano de falla surge a dicha altura debido al agrietamiento previo de los nudos y un área transversal menor, ya que en la interfaz entre la viga corona y la última fila existe concreto que penetró en las celdas, lo cual provoca llaves de cortante que favorecen la falla en el plano de unión siguiente.

La Figura 52 muestra la condición final del nudo viga-columna, que consiste en un marcado deterioro debido a la grieta diagonal formada durante la séptima serie de carga, la cual se debe a la ausencia de aros de confinamiento y su ubicación en una zona de concentración de esfuerzos, ya que corresponde a un cambio de geometría y material.

El deslizamiento entre las últimas filas del paño también fue observado durante los ensayos realizados por Cordero (2012), quien menciona que además se dio la expulsión de los bloques en la segunda hilada; este hecho también se dio durante el ensayo del Muro A, tal como muestra la Figura 53. La fuerza cortante que podría provocar falla por deslizamiento se predijo para una carga de 52,15 T, cuyo cálculo para los Muros A-B-C, se encuentra en el Apéndice 6.

El patrón de agrietamiento en el paño, presentado en la Figura 51 muestra la formación de grietas por tracción diagonal, ya que muchas de estas se presentan a 45° , lo cual concuerda con lo observado por Sandoval et al. (2018), ya que en su investigación, el modo de falla en un muro de relación de aspecto de 0,44, fue por tracción diagonal. Sin embargo, en la Figura 53; hacia el final de la prueba, se observa una distribución vertical e incluso la aparición de grietas verticales. Este patrón se repite varias veces a lo largo del paño pero con más intensidad cerca de los elementos de confinamiento, lo cual podría deberse a la tendencia del paño y marco a desligarse, en especial porque en ese momento, el bloque trapezoidal y la sección inferior dejaron de comportarse como un conjunto, por lo que el empuje de la viga se concentraría en las columnas y en menor medida en el acero de refuerzo de la mampostería, lo cual explicaría el menor agrietamiento en sus secciones baja y central. Asimismo, debido a que la mampostería es un material menos resistente que el concreto, es de esperar que esta se agriete más.

La fluencia del acero horizontal se dio en la serie final de la prueba, lo cual muestra que la condición de agrietamiento en el paño y pérdida de resistencia de la mampostería y el concreto no fue suficiente hasta 3 series después de haberse alcanzado la resistencia máxima. El Cuadro 14 muestra que el acero vertical de la columna más cercana al muro fuerte no llegó a la fluencia, sin embargo, estuvo cerca de alcanzar dicho estado; en el caso de la otra columna, las galgas presentan consistentemente deformaciones mayores a las del elemento anterior, no obstante se dañaron antes de registrar datos de fluencia. De igual forma ocurrió con las galgas del acero de la mampostería.

La curva de histéresis, mostrada en la Figura 54, presenta una pendiente considerablemente empinada que disminuye conforme se incrementan los ciclos de cada serie, lo cual según Acuña (2014), es un comportamiento común del concreto reforzado y concuerda con la degradación de la resistencia observada con el incremento en los ciclos. A su vez, el estrechamiento de los lazos es evidente y propio de un elemento frágil; sin embargo, la baja pendiente de descarga se debe a que durante la reversión se da la apertura de grietas en la zona en tracción antes de que las grietas del ciclo anterior se cierren. También se observó más resistencia en el sentido positivo de la prueba, lo cual se debe a que es la dirección en que se comenzaron los ciclos y por ende el primer agrietamiento se generó en dicho sentido, lo que ante la reversión de carga se traduce en una sección con más daño y menor capacidad.

La curva histerética, a diferencia de lo mostrado en la Figura 12, presentó las grietas diagonales después del valor de la fluencia, lo cual concuerda más con la Figura 11, que demuestra un comportamiento dúctil y dominado por flexión; hecho que es reforzado por los datos del Cuadro 15, en el que se pueden observar valores altos de ductilidad, tal como 5,78 y 7,52. Por otro lado, si se considera el momento en el que se dio la primera grieta y el instante en el que se alcanzó la resistencia máxima (50,25 T), se puede apreciar que ambos ocurrieron simultáneamente, lo cual se puede interpretar como un comportamiento frágil, no obstante, a partir de este momento se dio también el plano de falla por cortante deslizante entre las hiladas de mampostería (predicho para 52,15 T), lo cual dividió el elemento en dos secciones; hecho que debido a la nueva libertad de desplazamiento, pudo haber contribuido al consiguiente comportamiento dúctil reflejado en los datos.

En la Figura 55 se muestra que del lado positivo de la curva envolvente, luego de alcanzar el máximo, se da un considerable descenso en la resistencia, sin embargo, cambia rápidamente a una sección plana con pendiente cercana a cero, que corresponde a dos series con resistencias máximas muy similares. Esto puede deberse a la aparición del plano

de falla entre las últimas dos hiladas del paño de mampostería, que como se mencionó anteriormente, generó una libertad de desplazamiento. Además, cabe destacar que la diferencia entre los desplazamientos últimos en el sentido positivo y negativo mostrados en el Cuadro 15 se debe a que el lado negativo de la curva nunca descendió al 80% de su capacidad máxima, por lo que, de acuerdo con la norma ASTM E2126 (ref), fue necesario extrapolar dicho valor de fuerza y su deformación asociada con base en los últimos datos de la envolvente. Esta es la razón por la que la curva EEEP en su sentido negativo se extiende más que la curva envolvente.

Por lo tanto, el modo de falla coincide con cortante deslizante con agrietamiento diagonal previo, especialmente porque es común en muros como este, con baja relación de aspecto y poca carga axial; además cabe destacar que también se dieron grietas diagonales en diversas partes del paño, sin embargo, no fueron dominantes. La falla por cortante deslizante fue favorecida a la altura de la onceava hilada por la formación de rótulas en los nudos viga-columna. El comportamiento fue inicialmente frágil, pero después de la formación de la grieta horizontal, se volvió sustancialmente dúctil, no obstante, esta ductilidad no corresponde a la ductilidad intrínseca del material.

3.3 Resultados del Muro B

3.3.1 Proceso de falla

La primera grieta se presentó durante el primer ciclo de la séptima serie (± 32 mm), y consistió en una escalerilla diagonal que empezó en el punto de aplicación de la carga en la esquina superior y se propagó hasta al menos la tercera fila del paño. La resistencia máxima se alcanzó en el primer ciclo de la octava serie (± 48 mm) y se dieron valores de fuerza muy similares a los de la serie anterior. Un par de ciclos después se dio el grado de agrietamiento considerable mostrado en la Figura 56.



Figura 56. Agrietamiento parcial del Muro B para el 3° ciclo de la 8° serie (± 48 mm).

Durante el proceso de falla se presentó degradación del paño de mampostería por medio de grietas diagonales y escalerillas, así como la formación de una grieta similar a la grieta inicial en la esquina superior opuesta. A partir del segundo ciclo de la séptima serie, se desarrolló deslizamiento entre la última y penúltima fila del paño de mampostería. El acero horizontal presentó fluencia durante el primer ciclo de la novena serie (± 64 mm), a su vez la aparición de grietas en la base de las columnas se muestra en la Figura 57.



Figura 57. Agrietamiento final en la base del Muro B.

La condición final del nudo superior opuesto a la aplicación de la fuerza se muestra en la Figura 58.



Figura 58. Condición final del nudo del Muro B.

La condición final del muro se presenta en la Figura 59.



Figura 59. Condición final del Muro B.

3.3.2 Fluencia del acero

Los datos provenientes de las galgas extensométricas se muestran en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Resumen de información de las galgas del Muro B.

Galga	Estado
1	Se presentó fluencia, datos fuera de rango
2	No se presentó fluencia
3	Se presentó fluencia, datos fuera de rango
4	Se encontraba dañada
5	Se presentó fluencia
6	Se presentó fluencia
7	Se presentó fluencia, datos fuera de rango

3.3.3 Curva histérica

La curva de histéresis obtenida durante el ensayo se muestra en la Figura 60. Los valores máximos de cada ciclo se muestran en el Apéndice 4.



Figura 60. Curva de histéresis del Muro B.

La información general derivada de la curva de histéresis se muestra en el Cuadro 17.

Cuadro 17. Resultados generales del Muro B.

Característica	Sentido Positivo	Sentido Negativo
Fuerza fluencia (T)	36,86	31,92
Desplazamiento fluencia (mm)	14,62	14,33
Fuerza máxima (T)	39,34	36,22
Desplazamiento máximo (mm)	43,84	28,30
Fuerza última (T)	31,47	28,98
Desplazamiento último (mm)	58,47	58,16
Ductilidad	4,00	4,06
Rigidez (T/mm)	2,52	2,23
Energía disipada (T·m)	7,41	

Las curvas envolvente y EEEP se muestran en la Figura 61.

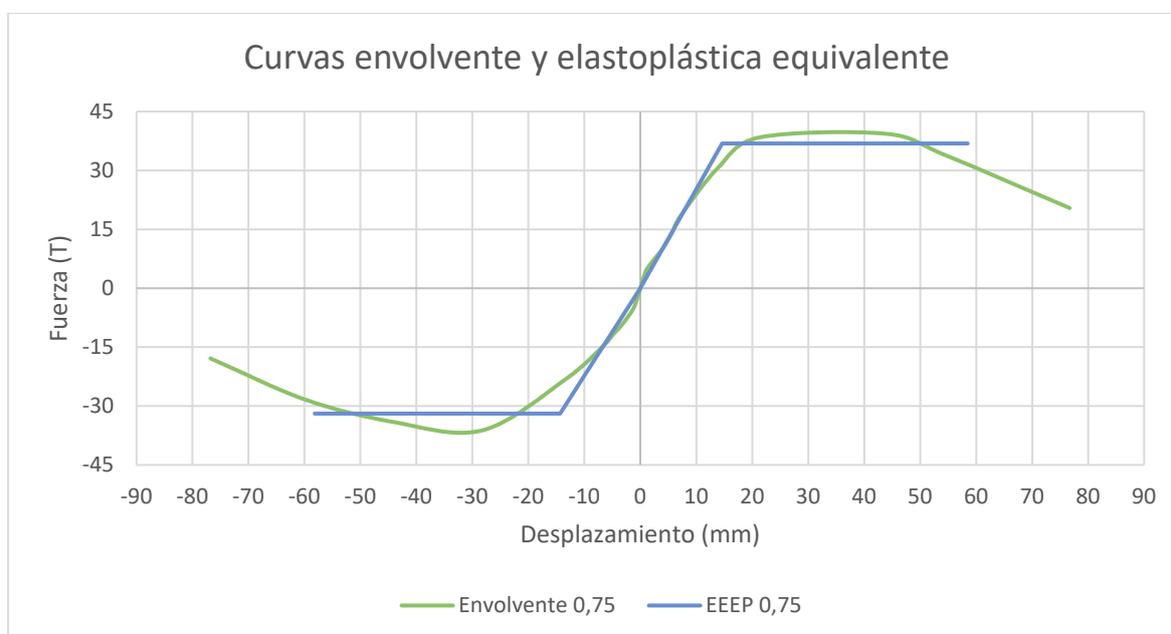


Figura 61. Curvas envolvente y EEEP del Muro B.

3.4 Análisis del Muro B

El desarrollo del patrón de grietas del Muro B comenzó con una fisura diagonal principal ubicada en la esquina más cercana al muro fuerte y se extendió a lo largo del paño hasta al menos la tercera hilada. Las otras fracturas se presentaron paralelas a la grieta principal, tal como muestra la Figura 56. El mismo comportamiento se observó cuando se dio la reversión de la carga.

El deslizamiento entre las dos últimas filas de la mampostería se desarrolló después del agrietamiento por cortante en los nudos viga-columna, los cuales favorecieron dicho tipo

de falla. Esto ocurrió durante el segundo ciclo de la séptima serie (33,36 T), lo cual concuerda aproximadamente con la predicción de cortante deslizante a partir de 36,60 T. Este plano de falla nuevamente favoreció el desarrollo de un bloque trapezoidal que se separaría de la sección inferior, e incluso, a través de los ciclos; iría degradando por completo la fila inmediatamente inferior hasta expulsar varios de los bloques.

En comparación con otros estudios, los muros de mampostería de Acuña (2014), que tenían una relación de aspecto de 0,87, también presentaron agrietamiento diagonal, y dos de ellos tuvieron grietas horizontales en la mampostería cerca de la mitad de la altura; no obstante, a diferencia del presente muro, se presentó aplastamiento en la base. En el caso de Cordero (2012), las paredes en estudio también tenían una relación de aspecto de 0,75 y fallaron en forma muy similar, ya que presentaron tanto agrietamiento diagonal como grietas horizontales, y una en específico, al igual que el Muro B, presentó la grieta horizontal entre la última y penúltima fila de bloques.

La Figura 57 muestra que en este muro, a diferencia del anterior, el agrietamiento de la diagonal llegó hasta las filas más bajas del paño, e incluso penetró levemente en las columnas de concreto, lo cual indica que se dio un comportamiento un poco más en conjunto entre la sección trapezoidal y el resto del muro. Esto podría deberse a que el nudo viga-columna es el mismo que el del muro anterior, pero se le está aplicando menos fuerza, por lo que su resistencia debería degradarse con menor intensidad.

El grado de degradación final del nudo viga-columna, mostrado en la Figura 58, corresponde a una grieta diagonal importante y desprendimiento de la capa externa del concreto que recubre el acero de refuerzo. Dicha grieta es provocada por los esfuerzos en tracción que generan una apertura en el nudo, los cuales se dan por la interacción paño-marco confinante, ya que como se mencionó anteriormente, ambos van a intentar desligarse (Paulay & Priestley, 1992).

A partir de la condición final, mostrada en la Figura 59, se observa un patrón parecido al del muro A, con grietas verticales cerca de los elementos de confinamiento, grietas diagonales locales y un plano de falla horizontal entre la última y penúltima fila de mampostería; con esta fuertemente degradada. Las grietas verticales en la mampostería cercanas a los elementos de borde podrían deberse al aplastamiento generado por la sección trapezoidal sobre las columnas durante el proceso de carga, el cual la intenta separar del paño.

La fluencia del acero horizontal se dio cerca del final de la prueba, lo cual indica que durante la mayoría del proceso, la mampostería y el concreto se encargaron de resistir gran parte de la degradación plástica del muro. En lo que respecta al acero vertical, el Cuadro 16 muestra que ninguna de las galgas de las columnas presentó datos que sugieran la fluencia, mientras que las de la mampostería presentaron datos fuera de rango antes de poder medir valores que indicaran cedencia.

La curva de histéresis, presentada en la Figura 60, muestra que a partir del valor de fluencia se da una degradación de la rigidez con el incremento de las series, y la pérdida de la resistencia con cada ciclo. Se aprecia también un importante estrechamiento de los lazos, provocado por el constante agrietamiento en el paño y marco confinante; y de igual forma que el muro anterior, se presentó una mayor resistencia en la dirección positiva. Cabe destacar el primer lazo de la séptima serie, el cual presenta una punta aplanada que impidió la llegada de la resistencia máxima en dicha serie; a diferencia del sentido negativo, lo cual provocó la fuerte diferencia entre los desplazamientos máximos, mostrados en el Cuadro 17.

Se puede observar que en ambas direcciones, la grieta diagonal se encuentra antes del valor de cedencia; hecho que coincide con lo mostrado en la Figura 12, y es un indicador de un comportamiento frágil; dominado por cortante. Además, la primera grieta se presentó en la séptima serie, mientras que la resistencia máxima se presentó en la serie siguiente, ambas con valores muy similares de fuerza; asimismo, si se analiza en la dirección opuesta, el agrietamiento se dio segundos antes de alcanzar la resistencia máxima negativa, lo cual es un indicador de un comportamiento frágil.

Es importante mencionar que a pesar del desarrollo de la grieta horizontal durante el segundo ciclo de la séptima serie, el muro ganó un poco más de resistencia, y de hecho llegó al máximo en la siguiente serie. Esto se debe a que la grieta diagonal en la esquina superior opuesta al punto de aplicación de la carga se desarrolló completamente hasta la carga negativa del primer ciclo de la octava serie, lo cual dio paso a dos rótulas, una mayor libertad de desplazamiento entre las filas; y por ende una pérdida en la resistencia.

En el Cuadro 17 se muestra una rigidez bastante parecida en ambas direcciones, con órdenes de magnitud similares a las de Cordero (2012) y Acuña (2014), además la ductilidad es casi idéntica para ambas direcciones, con 4,00 del lado positivo y 4,06 del lado negativo, cuyos valores son bastante parecidos a los de Acuña (2014), mostrados en el Cuadro 2; y notablemente menores a los de Cordero (2012), mostrados en el Cuadro 3. Ambas

ductilidades son considerablemente altas para un elemento frágil, lo cual podría deberse en forma similar al caso anterior por el plano de falla horizontal.

La Figura 61 muestra que del lado negativo de la envolvente hay una caída de la resistencia una vez alcanzado el máximo, mientras que del lado positivo hay una zona plana con valores cercanos a la resistencia máxima, lo cual se debe al lazo con forma aplanada de la séptima serie.

Por lo tanto, el modo de falla coincide por cortante deslizante con agrietamiento diagonal previo, como ya se mencionó, es común en muros como este, con baja relación de aspecto y poca carga axial. Es importante mencionar que también se dieron grietas diagonales en diversas partes del paño, con un poco más de intensidad que en el Muro A y mayor propagación. La falla por cortante deslizante fue favorecida a la altura de la onceava hilada por la formación de rótulas en los nudos viga-columna. El comportamiento fue inicialmente frágil, pero después de la formación de la grieta horizontal, se volvió más dúctil debido a la libertad de deslizamiento, no obstante, igual que en el caso anterior, esta no es representativa de la ductilidad intrínseca del material.

3.5 Resultados del Muro C

3.5.1 Proceso de falla

La primera grieta se presentó en el primer ciclo de la séptima serie (± 38 mm). Esta se ubicó en el paño de mampostería y nudo viga-columna, y tenía la forma de una escalerilla a lo largo de la diagonal, la cual comenzó en la esquina de aplicación de la carga y finalizó en la base. Durante el mismo ciclo, se alcanzó la resistencia máxima y se presentó la fluencia en el acero de refuerzo de las columnas.

Durante el proceso de falla se desarrollaron escalerillas a lo largo del paño, tal como se muestra en la Figura 62. Además, se presentó agrietamiento en los nudos viga-columna alineado con las grietas diagonales del paño, las cuales se multiplicaron y llegaron incluso a afectar el concreto de la base de las columnas. La grieta del nudo se muestra en la Figura 63.

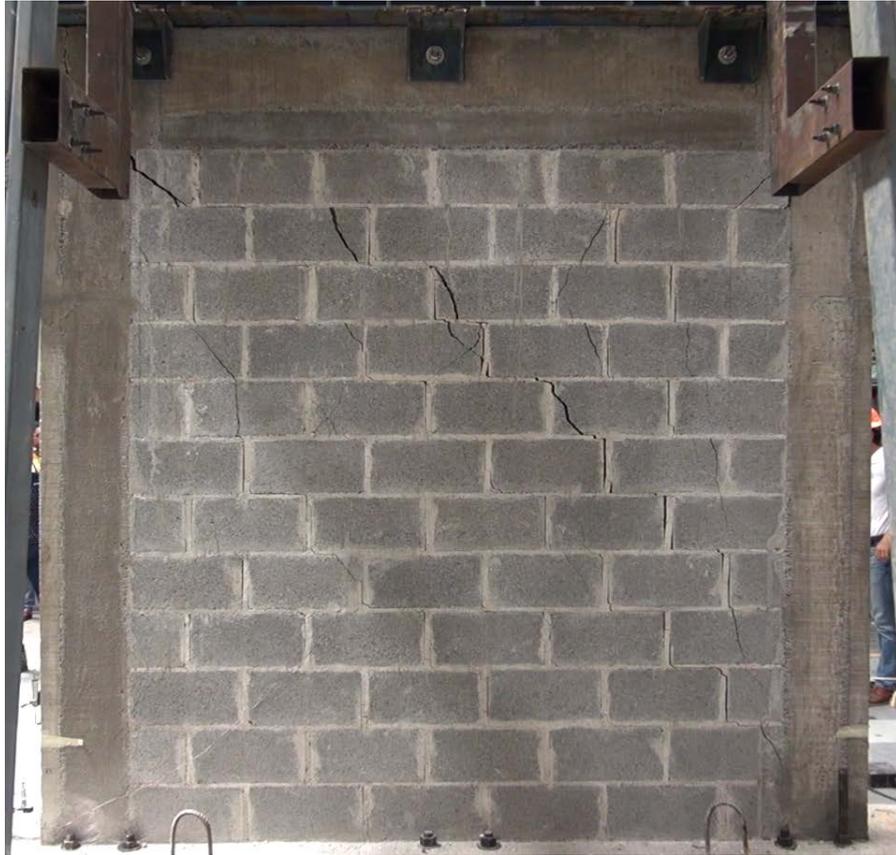


Figura 62. Agrietamiento parcial en el Muro C para el 1° ciclo de la 8° serie (± 57 mm).



Figura 63. Condición final del nudo del Muro C.

El deslizamiento entre la última y penúltima fila del paño de mampostería se dio a partir del primer ciclo de la novena serie (± 76 mm), en donde también comenzó el desmoronamiento

de los bloques de la penúltima fila. El acero horizontal presentó fluencia durante el segundo ciclo de la séptima serie en un momento de abertura de la grieta diagonal. Se presentó un muy leve aplastamiento en la base de la columna, así como la continuación de una grieta diagonal de la mampostería, ambas condiciones se muestran en la Figura 64.



Figura 64. Aplastamiento final en la base de la columna del Muro C.

La condición final del muro se presenta en la Figura 65.



Figura 65. Condición final del Muro C.

3.5.2 Fluencia del acero

Los datos provenientes de las galgas extensométricas se muestran en el Cuadro 18.

Cuadro 18. Resumen de información de las galgas del Muro C.

Galga	Estado
1	Se presentó fluencia
2	Se encontraba dañada
3	Se presentó fluencia
4	Se presentó fluencia
5	Se presentó fluencia, datos fuera de rango
6	Se presentó fluencia
7	Se presentó fluencia

3.5.3 Curva histérica

La curva de histéresis obtenida durante el ensayo se muestra en la Figura 66. Los máximos de cada ciclo se muestran en el Apéndice 4.

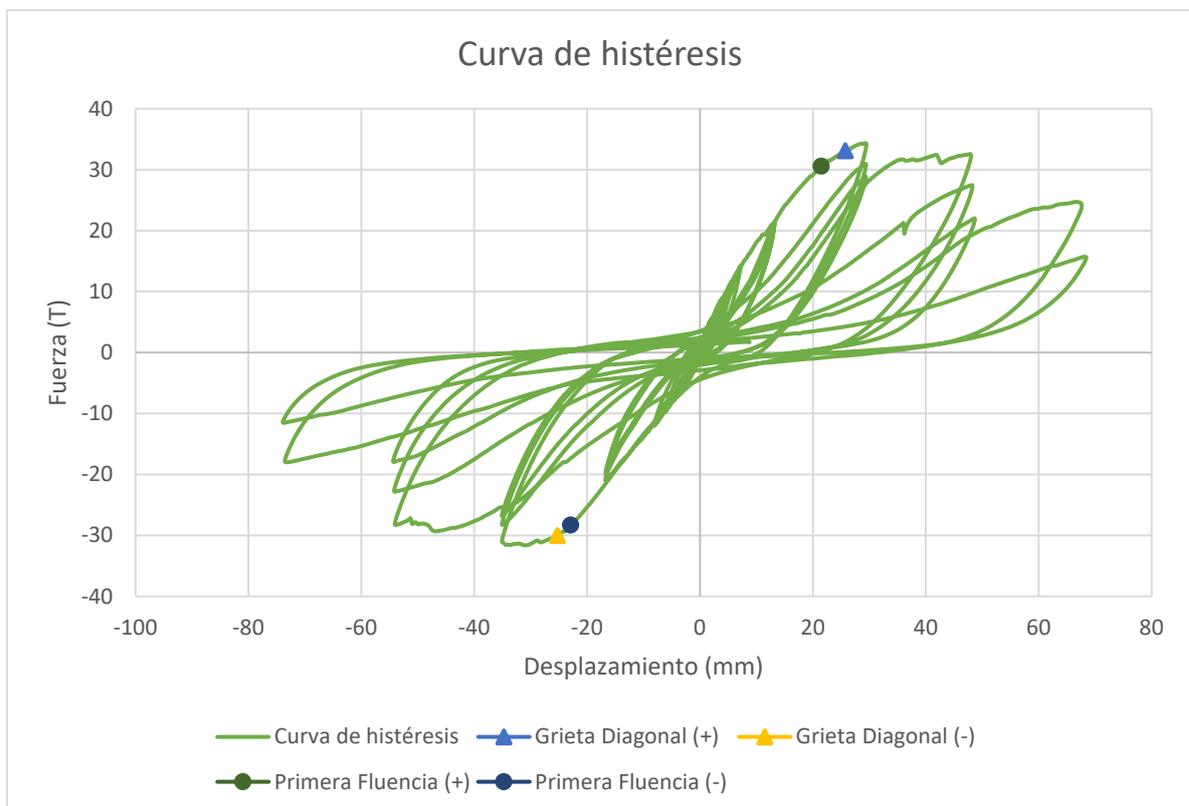


Figura 66. Curva de histéresis del Muro C.

La información general derivada de la curva de histéresis se muestra en el Cuadro 19.

Cuadro 19. Resultados generales del Muro C.

Característica	Sentido Positivo	Sentido Negativo
Fuerza fluencia (T)	30,52	28,25
Desplazamiento fluencia (mm)	15,21	19,45
Fuerza máxima (T)	34,34	31,63
Desplazamiento máximo (mm)	29,23	30,87
Fuerza última (T)	27,47	25,31
Desplazamiento último (mm)	60,17	56,05
Ductilidad	3,96	2,88
Rigidez (T/mm)	2,01	1,45
Energía disipada (T·m)	5,85	

Las curvas envolvente y EEEP se muestran en la Figura 67.

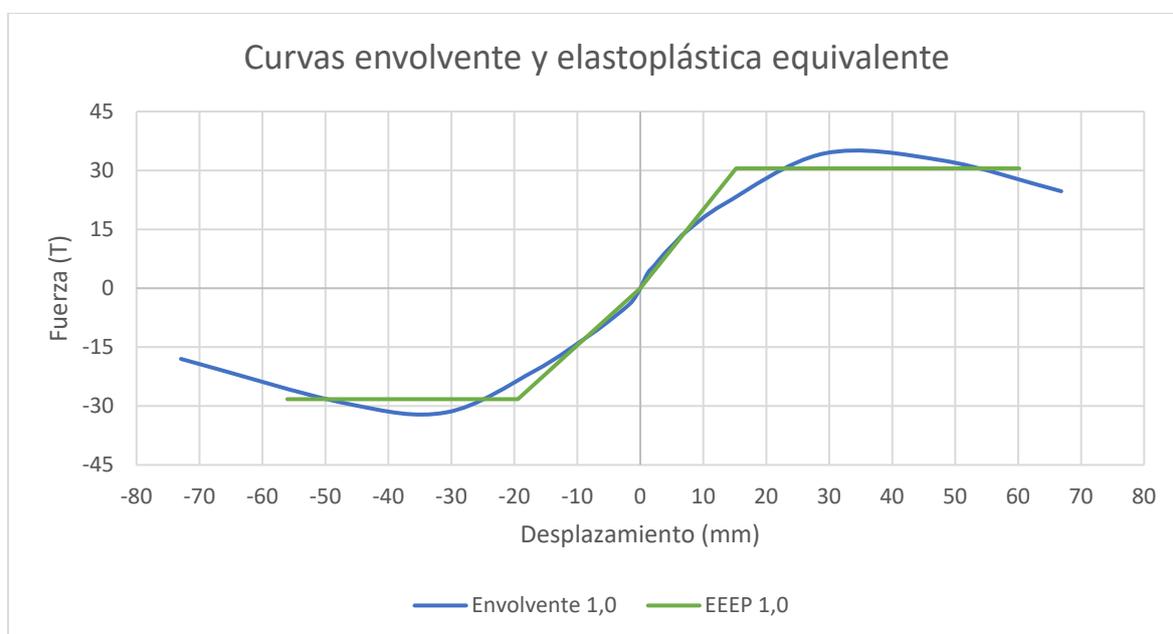


Figura 67. Curvas envolvente y EEEP del Muro C.

3.6 Análisis del Muro C

El desarrollo del patrón de grietas del Muro C comenzó con una grieta diagonal principal en la esquina del muro más cercana al muro fuerte, la cual atravesó el paño hasta aproximadamente la tercera hilada; además, se presentaron grietas similares paralelas a través de las juntas de mortero. Cuando se dio la reversión de la carga, se observó el mismo efecto, pero con mayor intensidad, tal como se muestra en la Figura 62, en la que se pueden apreciar varias grietas diagonales de espesor considerable.

Durante gran parte del proceso de falla se continuó con la degradación del paño, debido a la aparición y ensanchamiento de grietas diagonales, hasta que en el primer ciclo de la novena serie se desarrollaron completamente las grietas diagonales en los nudos viga-columna, lo cual permitió la formación de una grieta horizontal y por ende la separación de la viga corona y la última fila del resto del paño en un bloque trapezoidal que provocó la falla de casi todos los bloques de la penúltima hilada.

La falla por cortante deslizante se predijo para una carga de 30,33 T, sin embargo esta se alcanzó hasta dos series después a la serie en la que se obtuvo la resistencia máxima (34,34 T), lo cual demuestra que en estos especímenes la falla por cortante deslizante se desarrolló producto del importante agrietamiento en los nudos viga-columna; mostrado en la Figura 63, ya que incluso sobrepasada la capacidad predicha, esta no se presentó hasta que las condiciones del nudo favorecieron su desarrollo.

La aparición de la primera grieta y la resistencia máxima; se alcanzaron en el mismo ciclo, a su vez, el acero de refuerzo de las columnas alcanzó la fluencia en ese momento; y en el siguiente ciclo, el refuerzo horizontal también fluyó. Esto implica que todas las condiciones anteriores se alcanzaron casi simultáneamente, lo cual es propio de un comportamiento frágil de falla rápida. Por su parte, el Cuadro 18 muestra que el acero de la mampostería también alcanzó la fluencia.

Al igual que en el Muro B, también se presentaron grietas diagonales en la base de las columnas de concreto, tal como se muestra en la Figura 64, sin embargo, estas lograron penetrar más en el elemento. A su vez, la condición de falla; mostrada en la Figura 65, presenta una condición de agrietamiento severa en la que se pueden observar grietas diagonales en forma de escalerilla, así como grietas verticales cerca de los elementos de borde, que aumentan de tamaño conforme se sube en la altura del elemento; esto debido a que el desplazamiento lateral se incrementa con la altura. Estas grietas verticales se deben al empuje del bloque trapezoidal, ya que una vez desarrollada la grieta diagonal principal, la fuerza del bloque se concentra en la columna en compresión, lo cual intenta desligar un conjunto columna-bloques rellenos de la mitad diagonal superior del paño, que pasa a funcionar como voladizo y por su propio peso intenta cerrar la grieta diagonal.

En los casos de Venegas (1997) y Hernández (1998), las paredes ensayadas poseían una relación de aspecto cercana a 1,0 y al igual que el Muro C, presentaron una resistencia asimétrica, grietas diagonales, escalerillas y una falla por cortante deslizante, sin embargo, en los muros de Venegas (1997) no se presentó a la altura de la última y penúltima hilada,

mientras que en los de Hernández (1998) se desarrolló en el plano de unión entre el paño de mampostería y la viga corona.

A diferencia del Muro C, Acón (1999) menciona que, en su ensayo en muros con relación de aspecto de 1,13, se observó un modo de falla tanto por flexión como cortante, con una grieta por tracción diagonal y grietas horizontales en las columnas. Por su parte, Salazar (2013) menciona que sus muros, con relación de aspecto 0,92, también presentaron agrietamiento diagonal que penetró en los elementos de borde y fisuras horizontales en las columnas, así como ductilidades; mostradas en el Cuadro 4, con órdenes de magnitud entre 13,23 y 36,01; a diferencia del Muro C, que como se expone en el Cuadro 19, presentó las ductilidades de 3,96 y 2,88. En el caso de la investigación de Sandoval et al. (2018), los muros con relación de aspecto de 0,97 presentaron falla por cortante dominada por agrietamiento diagonal y ductilidades cercanas a 3,0, lo cual se asemeja más a lo observado en el Muro C.

La curva de histéresis, mostrada en la Figura 66, presenta un evidente estrechamiento de los lazos, así como asimetría presente en la resistencia entre las dos direcciones; a su vez, también se observó una degradación de la resistencia con el incremento de los ciclos. Las grietas diagonales se desarrollaron una vez alcanzada la fluencia, lo cual se ajusta a la Figura 11 e implica un comportamiento dúctil, con la excepción de que el aplastamiento en la base fue casi nulo; razón por la que no se indica.

La Figura 67 muestra que tanto del lado negativo como positivo de la envolvente hay una moderada degradación de la resistencia una vez alcanzado el valor de capacidad máxima; lo cual es algo propio de un comportamiento transitorio entre frágil y dúctil. La rigidez mostrada en el Cuadro 19, es mayor del lado positivo, lo cual concuerda con la asimetría observada en los valores de resistencia.

Por lo tanto, el modo de falla coincide con agrietamiento diagonal por cortante; tanto en el paño como en los nudos, seguido por cortante deslizante. Cabe destacar que las grietas diagonales se dieron con mayor claridad, amplitud y propagación que en los Muros A y B. La falla por cortante deslizante fue favorecida a la altura de la onceava hilada por la formación de rótulas en los nudos viga-columna.

El comportamiento fue mixto, ya que se presentaron características frágiles como el modo de falla y la rapidez con la que se desarrollaron las grietas, resistencia máxima y fluencia en el acero, mientras que los datos de ductilidad y el orden de aparición de las grietas con respecto a la fluencia muestran un comportamiento dúctil.

3.7 Resultados del Muro D

3.7.1 Proceso de falla

El Muro D tiene la particularidad de que se dieron problemas con el arriostramiento, esto provocó que se diera una ligera torsión y posterior pandeo del muro, lo cual distorsionó considerablemente los datos del lado positivo de la curva de histéresis.

La primera grieta se presentó en el paño de mampostería, en forma diagonal y comenzando en la esquina superior opuesta a la aplicación de la carga; esto sucedió durante el primer ciclo de la octava serie (± 51 mm). En este mismo ciclo también se presentó la fluencia del acero vertical de refuerzo de las columnas.

Durante el proceso de falla, se presentó más agrietamiento diagonal, el cual provocó la fluencia del acero horizontal durante el primer ciclo de la novena serie (± 68 mm), y se extendió por el nudo viga-columna opuesto al punto de aplicación de la carga e incluso penetró en la base de las columnas. Además, justamente después de alcanzar la resistencia máxima, ocurrió aplastamiento en la base de la columna opuesta al punto de aplicación de la carga; tal como se muestra en la Figura 68, lo cual se dio durante el primer ciclo de la décima serie (± 85 mm).



Figura 68. Agrietamiento parcial del Muro D para el 1° ciclo de la 10° serie (± 85 mm).

El aplastamiento en la base de la columna provocó pandeo en el acero de refuerzo, tal como se muestra en la Figura 69.



Figura 69. Pandeo del acero en la base de la columna del Muro D.

La condición final del muro se presenta en la Figura 70.



Figura 70. Condición final del Muro D.

3.7.2 Fluencia del acero

Los datos provenientes de las galgas extensométricas se muestran en el Cuadro 20.

Cuadro 20. Resumen de información de las galgas del Muro D.

Galga	Estado
1	Se presentó fluencia, datos fuera de rango
2	Se presentó fluencia, datos fuera de rango
3	Se presentó fluencia
4	Se encontraba dañada
5	Se presentó fluencia
6	Se encontraba dañada
7	Se presentó fluencia

3.7.3 Curva histéretica

La curva de histéresis obtenida durante el ensayo se muestra en la Figura 71. Los máximos de cada ciclo se muestran en el Apéndice 4.

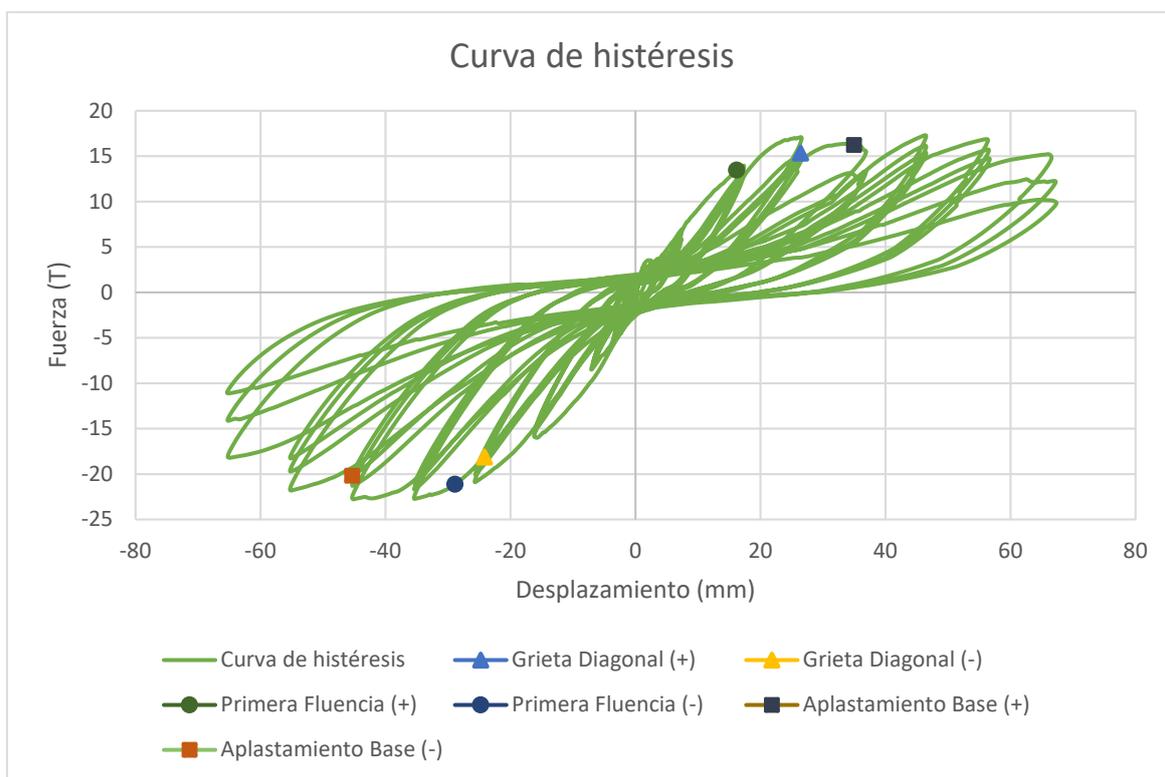


Figura 71. Curva de histéresis del Muro D.

La información general derivada de la curva de histéresis se muestra en el Cuadro 21.

Cuadro 21. Resultados generales del Muro D.

Característica	Sentido Positivo	Sentido Negativo
Fuerza fluencia (T)	13,35	21,07
Desplazamiento fluencia (mm)	14,25	17,99
Fuerza máxima (T)	17,30	22,78
Desplazamiento máximo (mm)	46,25	45,15
Fuerza última (T)	13,84	18,22
Desplazamiento último (mm)	74,30	64,89
Ductilidad	5,21	3,61
Rigidez (T/mm)	0,94	1,17
Energía disipada (T·m)	6,78	

Las curvas envolvente y EEEP se muestran en la Figura 72. Cabe destacar que debido a la perturbación producida por el pandeo del muro en el sentido positivo, este no alcanzó el 80% de la carga máxima en dicha dirección, por lo que nuevamente bajo la sugerencia de la ASTM E2126 (ref), se interpoló entre los últimos valores de la envolvente para obtener la fuerza y desplazamiento últimos. Por esta razón la curva EEEP se extiende más allá que la curva envolvente.

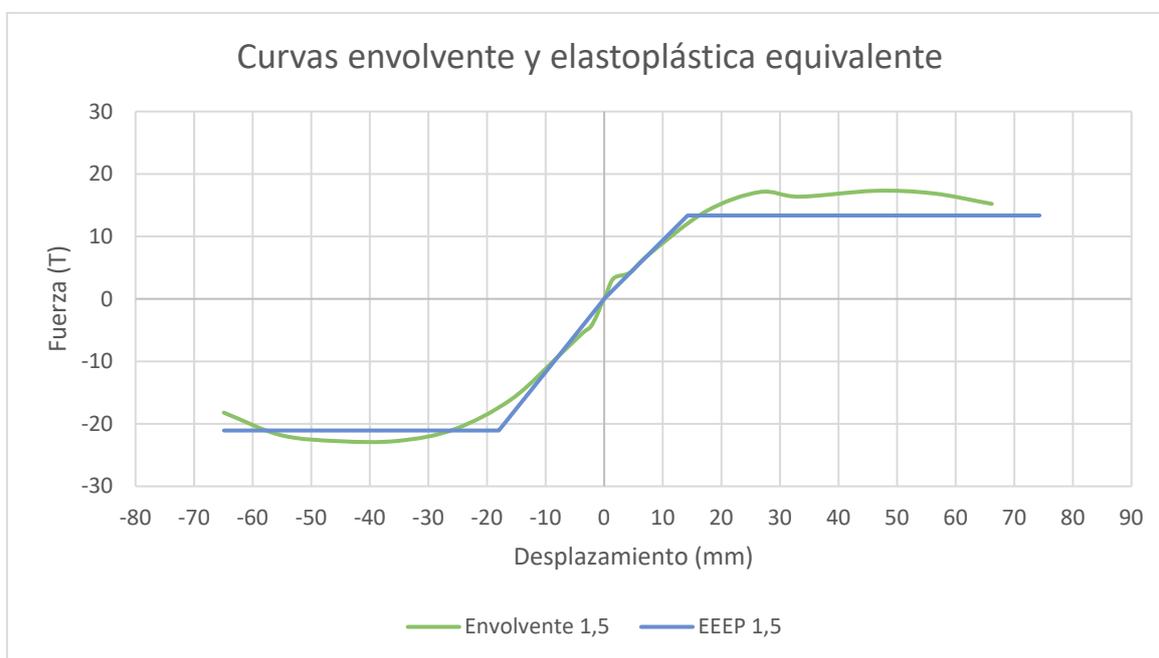


Figura 72. Curvas envolvente y EEEP del Muro D.

3.8 Análisis del Muro D

El desarrollo del patrón de grietas del Muro D comenzó, al igual que con los muros anteriores, con una grieta diagonal en la esquina superior, pero en este caso del lado

opuesto al punto de aplicación de la carga, lo cual se debe al torcimiento del muro provocado por un inadecuado arriostramiento cuando el equipo hidráulico operaba en compresión. Dicha grieta principal comenzó muy leve, con forma de escalerilla y atravesó prácticamente todo el paño; además, cuando se dio la reversión de la carga, el efecto no se observó en la otra dirección; debido a la menor carga tomada por el muro. Durante el proceso de falla se siguió dando una desviación lateral del lado en compresión, así como agrietamiento marcado del lado de la tracción y aplastamiento de la base de la columna.

Dicho aplastamiento se desarrolló primeramente del lado más alejado del muro fuerte, mientras que la sección más cercana se mantuvo intacta, tal como muestra la Figura 68. Esto es de especial interés si se considera que el lado con más daño es en el que se observó la desviación lateral del muro y se tomó menos carga; lo cual puede deberse a que la ausencia de grietas diagonales en dicha dirección y el cierre por compresión de las fisuras del otro sentido generara un mejor comportamiento como cuerpo rígido, lo que pudo haber contribuido a la redistribución de las fuerzas hacia la base del muro; de esta forma, en la dirección contraria la apertura de las grietas cambiaría el esquema de redistribución de los esfuerzos y no cargaría de igual forma la base de la otra columna.

El aplastamiento en la base de ambas columnas se desarrolló hasta que las grietas diagonales penetraron en los elementos de borde, lo cual indica que primero hay una falla debida a esfuerzos de cortante; probablemente aminorada por los aros de la columna, y luego hay aplastamiento en el concreto debido a esfuerzos de compresión, lo cual también fue observado durante los ensayos de Acuña (2014) y Salazar (2013).

En la Figura 69 se muestra el pandeo en la base de la columna, lo cual indica importantes esfuerzos de compresión; dicho pandeo se dio en el espacio entre aros de la columna, lo cual indica que utilizar un espaciamiento menor al especificado por el CSCR-10/14 (2016) podría evitar dicha condición. A su vez, la Figura 70 muestra un marcado patrón de agrietamiento diagonal en el paño del muro y los extremos de los elementos de borde, así como aplastamiento en las bases de las columnas, lo cual coincide con un comportamiento esperable en elementos de mayor esbeltez, y por ende, dúctil.

La fluencia del acero vertical de las columnas se dio durante la octava serie y coincidió con la aparición de la primera grieta, lo cual indica que dichos elementos se encontraban trabajando estructuralmente. A su vez, en la novena serie se dio la fluencia del acero horizontal; esto debido al agrietamiento diagonal; mientras que la resistencia máxima se logró hasta en la décima serie; lo cual permite intuir un comportamiento dúctil, ya que

incluso con agrietamiento importante y la fluencia del acero de refuerzo, el muro fue capaz de seguir exhibiendo más resistencia. El Cuadro 20 muestra que el acero de la mampostería también alcanzó la fluencia.

La curva de histéresis, mostrada en la Figura 71, muestra numéricamente el efecto del pandeo en el muro, ya que los lazos del lado positivo son menores que los del lado negativo. Además, se puede apreciar el estrechamiento de los lazos y la degradación de la resistencia con cada ciclo. Adicionalmente, cabe destacar que del lado negativo, primero ocurrió el agrietamiento, luego la fluencia y posteriormente el aplastamiento en la base, lo cual se ajusta con un comportamiento frágil, como el mostrado en la Figura 11, a su vez; del lado positivo, el dato de fluencia se vio afectado por la desviación del muro, lo que da como resultado un comportamiento distinto. A su vez, cabe destacar que en los lazos correspondientes a las series 10 y 11 (antepenúltimo y penúltimo), se puede observar una menor degradación de la rigidez y la resistencia conforme se incrementan los ciclos, lo que según NIST (2014) concuerda con un comportamiento dúctil.

El Cuadro 21 muestra que la ductilidad del sentido positivo (5,21) es mayor que la del sentido negativo (3,61), lo cual es de esperar, dada la menor y consistente resistencia positiva obtenida durante varias series, tal como se puede observar en la Figura 72, que muestra además una baja reducción en la resistencia para distintos niveles de deformación.

Por lo tanto, el modo de falla fue predominantemente dúctil, con grietas por tracción diagonal en el paño y elementos de borde, así como un posterior aplastamiento en la base de las columnas. Además, la fluencia del acero se dio antes de la falla del concreto y se incrementó o incluso se mantuvo la resistencia durante varias series, a pesar del agrietamiento del muro, lo que corrobora la presencia de un comportamiento dúctil.

3.9 Resultados del Muro E

3.9.1 Proceso de falla

El proceso de falla del Muro E presentó un contratiempo relacionado con el ajuste de los pernos de anclaje al piso fuerte, esto provocó que el muro se deslizara en la base levemente durante algunos ciclos, por lo que se tuvo que detener en varias ocasiones la prueba para ajustar nuevamente los pernos. Además, avanzada la prueba, hubo levantamiento vertical de los extremos de cimentación conforme se cargaba y descargaba.

La primera grieta se presentó en forma de escalerilla, desde el punto de aplicación de la carga hasta la base del muro; esto ocurrió durante el primero ciclo de la séptima serie (± 36

mm). Durante el proceso de falla del muro se fueron incrementando las grietas diagonales en el paño de mampostería, mientras que a partir del primer ciclo de la octava serie (± 54 mm) empezaron a presentarse grietas horizontales en las columnas, lo cual coincidió con el momento en el que se comenzó a detectar fluencia en el acero vertical de refuerzo. Conforme siguió la prueba, las grietas diagonales de la mampostería penetraron en las columnas e incrementaron su tamaño, tal como se muestra en la Figura 73.



Figura 73. Agrietamiento parcial en el Muro E para el 1° ciclo de la 10° serie (± 90 mm).

La resistencia máxima se alcanzó en el primer ciclo de la novena serie (± 72 mm) y coincidió con el aplastamiento en la base de las columnas, mientras que la fluencia del acero horizontal se dio durante el primer ciclo de la décima serie (± 90 mm). Durante el proceso, se dio desprendimiento del concreto en la base de las columnas debido a los esfuerzos de compresión, así como la falla en tracción del acero, tal como muestra la Figura 74.



Figura 74. Aplastamiento del concreto y ruptura del acero de refuerzo de la columna del Muro E.
La condición final del muro se presenta en la Figura 75.



Figura 75. Condición final del Muro E.

3.9.2 Fluencia del acero

Los datos provenientes de las galgas extensométricas se muestran en el Cuadro 22.

Cuadro 22. Resumen de información de las galgas del Muro E.

Galga	Estado
1	Se presentó fluencia
2	Se presentó fluencia
3	Se presentó fluencia
4	Se encontraba dañada
5	Se presentó fluencia
6	Se presentó fluencia
7	Se presentó fluencia

3.9.3 Curva histérica

La curva de histéresis obtenida durante el ensayo se muestra en la Figura 76. Los máximos de cada ciclo se muestran en el Apéndice 4.

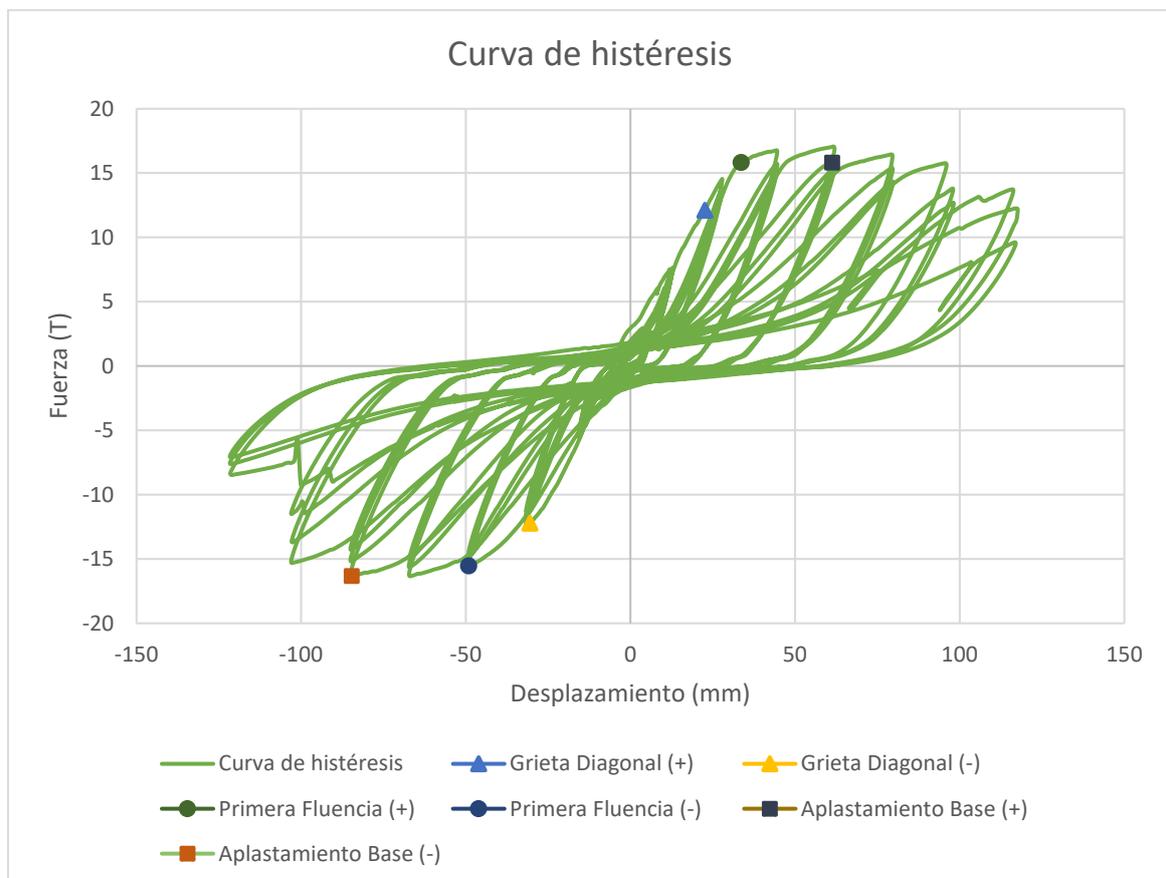


Figura 76. Curva de histéresis del Muro E.

La información general derivada de la curva de histéresis se muestra en el Cuadro 23.

Cuadro 23. Resultados generales del Muro E.

Característica	Sentido Positivo	Sentido Negativo
Fuerza fluencia (T)	15,81	15,82
Desplazamiento fluencia (mm)	26,45	43,70
Fuerza máxima (T)	17,06	16,34
Desplazamiento máximo (mm)	61,79	67,08
Fuerza última (T)	13,65	13,07
Desplazamiento último (mm)	116,85	108,91
Ductilidad	4,42	2,23
Rigidez (T/mm)	0,60	0,37
Energía disipada (T·m)	9,56	

Las curvas envolvente y EEEP se muestran en la Figura 77.

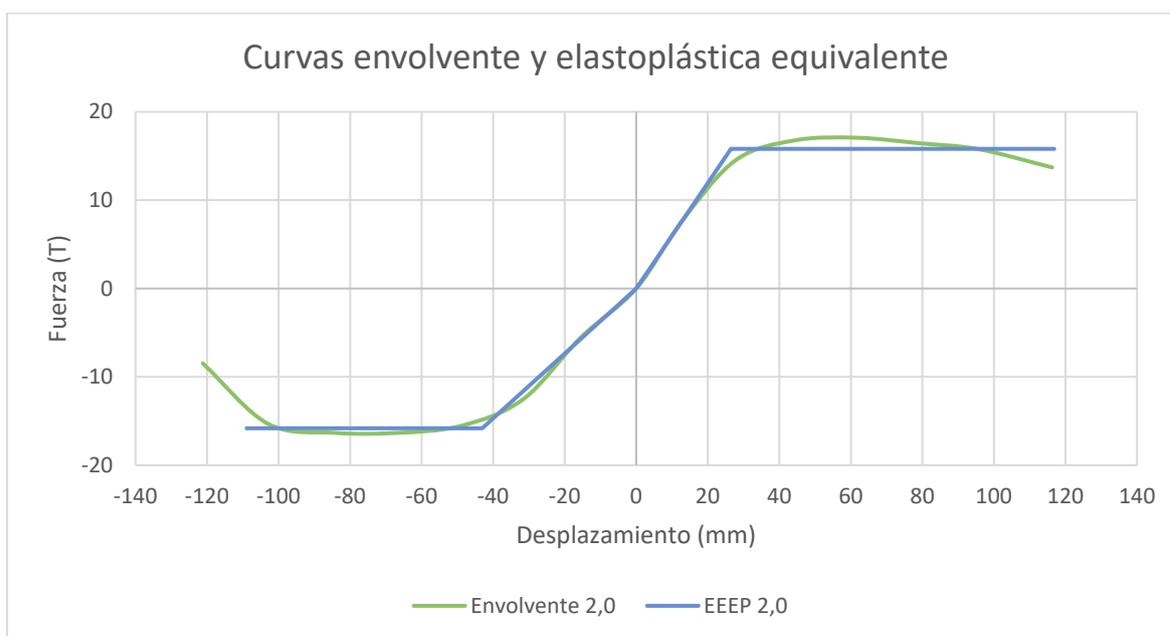


Figura 77. Curvas envolvente y EEEP del Muro E.

3.10 Análisis del Muro E

El desarrollo del patrón de grietas del Muro E comenzó cerca de la mitad de la altura del paño, por medio de una fisura diagonal orientada hacia la esquina superior más cercana al muro fuerte. Dicha grieta se fue incrementando hasta cruzar el paño de lado a lado, en algunas zonas con forma de escalerilla, mientras que en otras a través de bloques. Ante la reversión de carga, se observó el mismo comportamiento en el otro sentido.

Durante el proceso de falla, se fue incrementando el agrietamiento diagonal en el paño y aparecieron fisuras horizontales cerca de la base de la columna; las cuales son características de esfuerzos de flexión. Dichas grietas coincidieron con la fluencia del acero de refuerzo de las columnas, tan solo una serie después de las primeras señales de agrietamiento en el paño. Conforme se continuó con la prueba, las grietas diagonales comenzaron a penetrar en los elementos de borde, por lo que se dio la condición mostrada en la Figura 73, la cual presenta que la mayoría del agrietamiento se da en la mitad inferior del muro, lo que de acuerdo con la Figura 1, corresponde a la zona de momento flector máximo y por ende mayores esfuerzos.

La fluencia del acero horizontal se dio en la décima serie, mientras que la resistencia máxima se presentó en la novena y la primera grieta en la séptima, lo cual permite intuir que a pesar de un grado importante de agrietamiento, el muro fue capaz de seguir ganando resistencia. Además, debido a que la fluencia del acero horizontal; colocado principalmente para resistir fuerzas de corte, se dio hasta ya avanzada la prueba, muestra que los esfuerzos de cortante no fueron predominantes. A su vez, el Cuadro 22 muestra que prácticamente todo el acero del muro entró en cedencia, lo que sugiere la presencia de altas deformaciones y por ende, un comportamiento dúctil.

La Figura 74 muestra que la base de las columnas estuvo sometida a esfuerzos importantes, ya que hubo una degradación considerable del material, así como aplastamiento del concreto e incluso ruptura a tracción del acero de refuerzo longitudinal, lo cual indica que gran parte del comportamiento observado se debe a esfuerzos de flexión en el muro. Adicionalmente, el aplastamiento en la base se alcanzó en conjunto con la resistencia máxima, lo cual quiere decir que la degradación de la capacidad del muro se da a partir del aplastamiento, debido a que se alcanzó el estado límite del material.

A partir de la Figura 75 se puede observar que se desarrollaron completamente grietas por tracción diagonal a lo largo del paño, mientras que cerca de la base de las columnas, hay fisuras horizontales y degradación significativa, propias de una falla en flexión. En el centro del paño, debido a la ausencia de refuerzo, se generó un agujero de al menos un bloque de ancho y tres hiladas de altura debido a la falla de los bloques provocada por el agrietamiento diagonal, lo cual demuestra que en elementos esbeltos es mejor colocar refuerzo cerca del centro del panel, ya que es un punto de confluencia de múltiples grietas.

La curva de histéresis, mostrada en la Figura 76, muestra altos niveles de desplazamiento, así como el estrechamiento de los lazos y la degradación de las resistencias conforme

avanzan las series, sin embargo, no así con los ciclos; los cuales poseen prácticamente la misma rigidez de descarga. Además, es perceptible que a partir del aplastamiento de la base se comienza con la pérdida de resistencia y una mayor degradación de la rigidez. Se puede apreciar además que ante los desplazamientos altos, se comienza a mostrar resistencia, lo que se debe a la ganancia de capacidad producto del cierre de las grietas del ciclo anterior.

A partir de la curva de histéresis, se puede observar que el comportamiento es similar a la curva frágil de la Figura 11, en la que el agrietamiento ocurrió antes que la fluencia del elemento; lo que se asemeja a una viga de concreto, la cual posee un momento de agrietamiento menor al límite de fluencia. En la Figura 77 se muestra la similitud entre la EEEP y la curva envolvente, además, se aprecia que esta tiene bien marcadas las zonas elástica y de fluencia.

En el Cuadro 23 se muestran los valores de rigidez del muro, y unas ductilidades positiva de 4,42 y negativa de 2,23, que se asemejan a los resultados experimentales del estudio realizado por Sandoval et al. (2018) con muros con una relación de aspecto de 1,95 y valores experimentales de ductilidad de 3,47 y 4,57; los cuales son muy cercanos a los del Muro E. Dicho estudio también menciona que los muros esbeltos tuvieron un modo de falla por tracción diagonal y aplastamiento en la base del muro, tal como ocurrió en el Muro E.

Por lo tanto, el modo de falla fue predominantemente dúctil, con grietas por tracción diagonal en el paño y elementos de borde, así como grietas horizontales y un posterior aplastamiento en la base de las columnas; lo cual es común en muros con alta relación de aspecto. Además, la fluencia de todos los tipos de refuerzo se dio antes de la falla del concreto y, a pesar del agrietamiento del muro, se incrementó o incluso se mantuvo la resistencia durante varias series, lo que corrobora un comportamiento dúctil.

3.11 Comparación entre muros

3.11.1 Curvas envolventes y EEEP

A partir de los datos de los 5 muros, es posible realizar una comparación entre sus diversas características, esto permite encontrar patrones de comportamiento a partir de cambios en la relación de aspecto.

La superposición de las curvas envolventes de los 5 muros se muestra en la Figura 78.

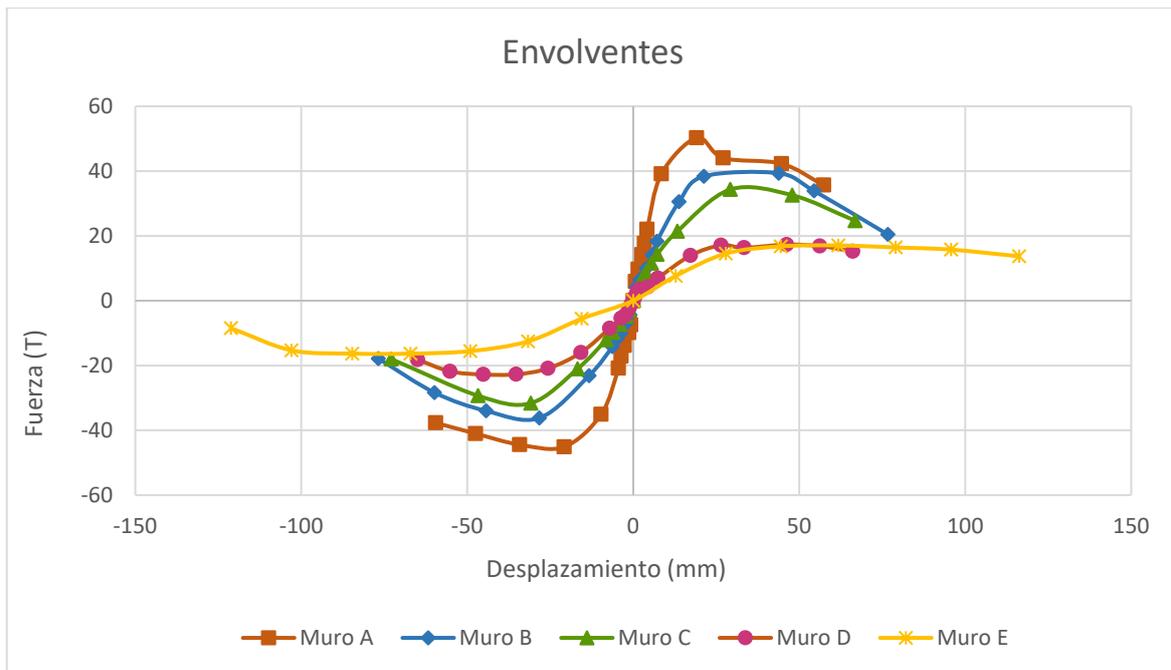


Figura 78. Curvas envolventes de los muros.

A su vez, se muestra la superposición de las EEEP en la Figura 79.

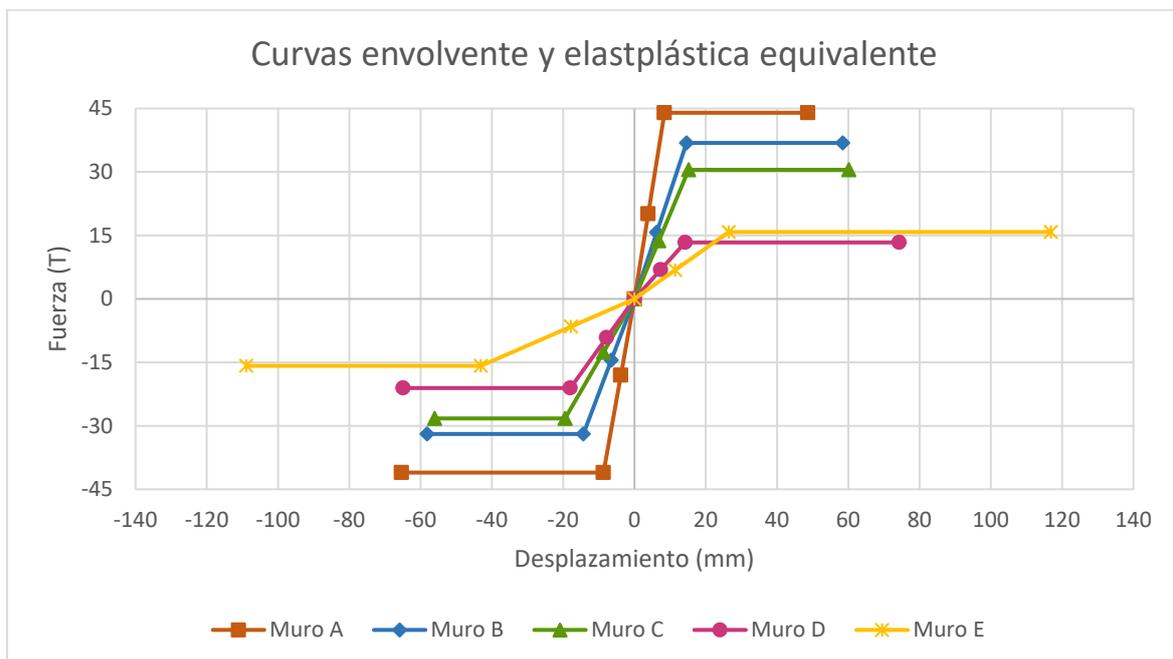


Figura 79. Curvas EEEP de los muros.

La Figura 78 y la Figura 79 muestran que los Muros A-B-C tienen un comportamiento frágil, en los que una vez obtenida la resistencia máxima, hay una leve caída en la capacidad; mientras que en el Muro D, su comportamiento es transitorio con características más propias de ductilidad. En el caso del Muro E; el comportamiento es dúctil, con una alta capacidad de deformación. A partir de las EEEP se puede observar cómo hay un patrón

decreciente en las capacidades de fluencia y las rigideces; lo cual concuerda con lo expuesto por Ramírez et al. (2016) y Sandoval et al. (2018) en la Figura 13, con la excepción del Muro D, debido al pandeo ocurrido en el sentido positivo de la prueba.

3.11.2 Ductilidad y Energía Disipada

Las ductilidades en ambas direcciones y su promedio, se muestran en la Figura 80, mientras que la energía total obtenida a partir del área encerrada por los lazos de la curva de histéresis se muestra en la Figura 81.

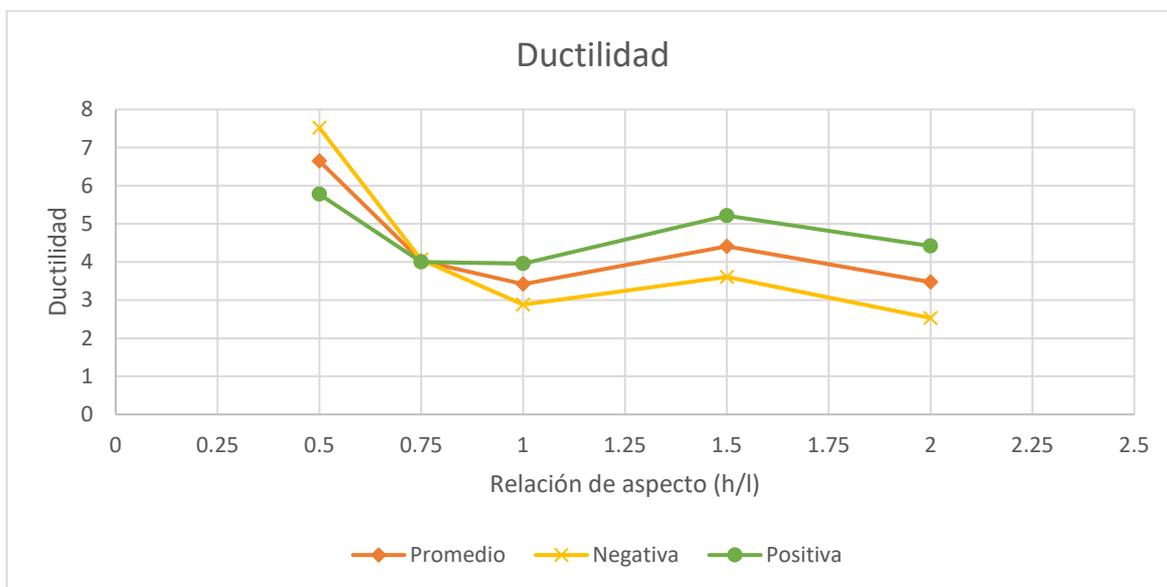


Figura 80. Ductilidad para las direcciones de carga positiva y negativa, así como el valor promedio para cada muro.

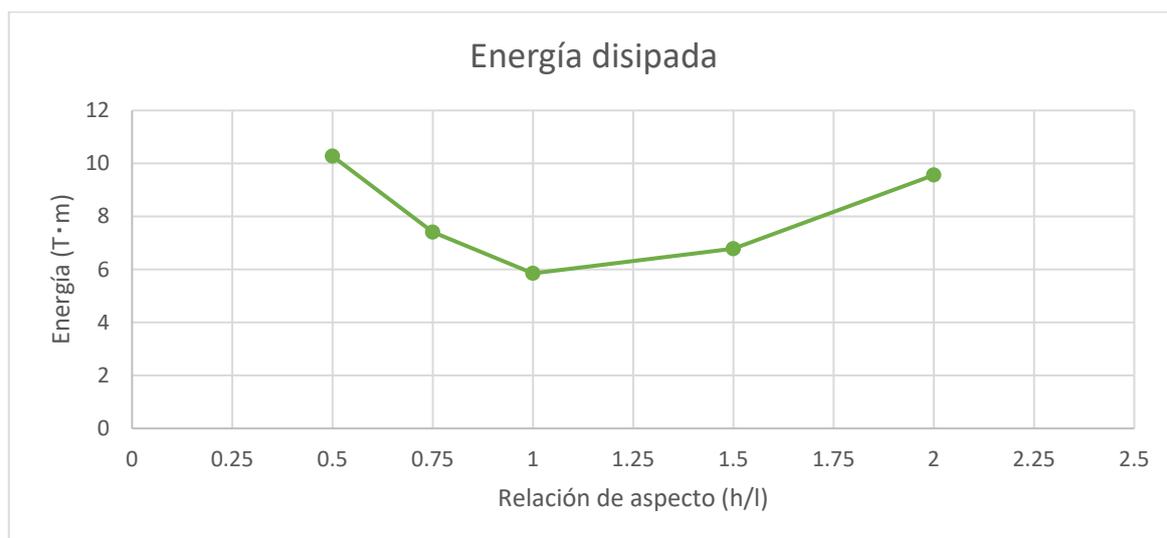


Figura 81. Energía disipada en cada muro.

La Figura 80 muestra que, tal como mencionan Ramírez et al. (2016) y Sandoval et al. (2018), el variar la relación de aspecto no provoca cambios importantes en la ductilidad de los muros, ya que no se muestra un patrón definido. Esto puede deberse a una baja degradación de la resistencia, ya que para todos los muros; como se observa en la Figura 78, la caída después de la resistencia máxima no es tan pronunciada, e incluso para los Muros A y D, no se alcanzó degradar a un 80% la resistencia en una de las dos direcciones.

Cabe destacar que dichos valores de ductilidad en los muros A-B-C se encuentran ligeramente perturbados por la libertad de movimiento producida por el agrietamiento de los nudos viga-columna y formación del bloque trapezoidal entre la viga corona y la última hilada de bloques.

Por su parte, en la Figura 81 se muestra que los Muros A y E son los que fueron capaces de disipar la mayor cantidad de energía, mientras que el Muro C, fue el que presentó la menor capacidad. Esto puede deberse a que la energía se compone de fuerza y desplazamiento, por lo que el Muro A; al tener alta resistencia y bajo desplazamiento logra contener un área importante, mientras que el Muro E a la inversa; con baja resistencia pero alto desplazamiento logra disipar cantidades similares de energía. Por su parte, el Muro C, al tener valores moderados de resistencia y desplazamiento no logra encerrar tanta área como los dos muros anteriores.

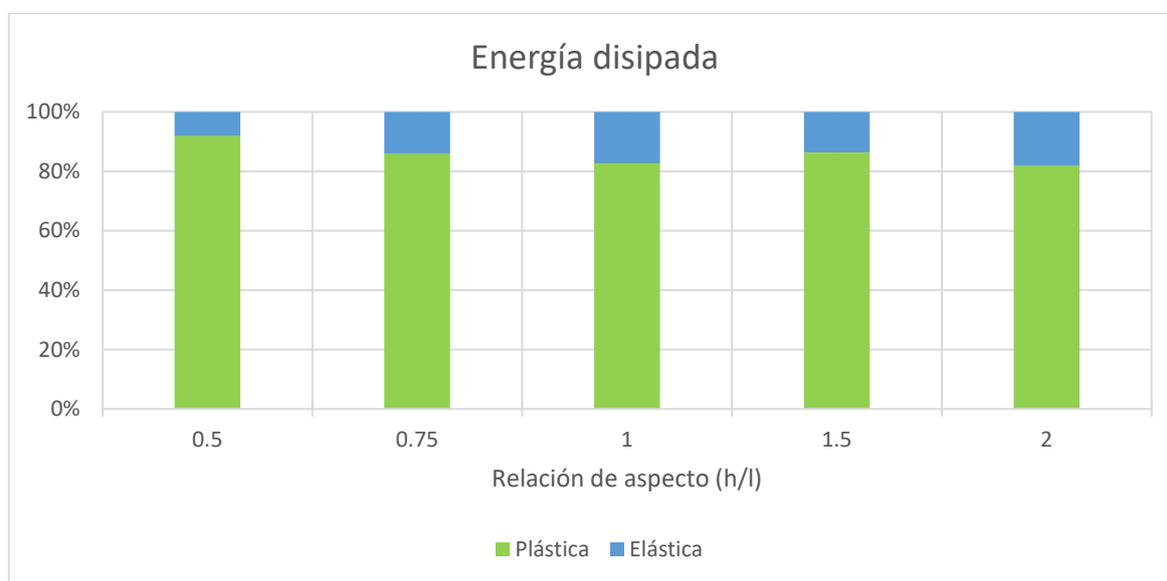


Figura 82. Porcentajes de energía elástica y plástica disipada en cada muro.

A partir de la Figura 82, se puede apreciar en todos los muros la energía plástica corresponde a más del 80% de la energía total, lo que permite inferir un comportamiento

dúctil, ya que la gran mayoría de la energía disipada por el elemento se da en el rango inelástico, el cual está ligado a una mayor deformabilidad.

3.11.3 Resistencias y desplazamientos

La resistencia máxima en ambas direcciones se muestra en la Figura 83, mientras que la resistencia de fluencia se muestra en la Figura 84.

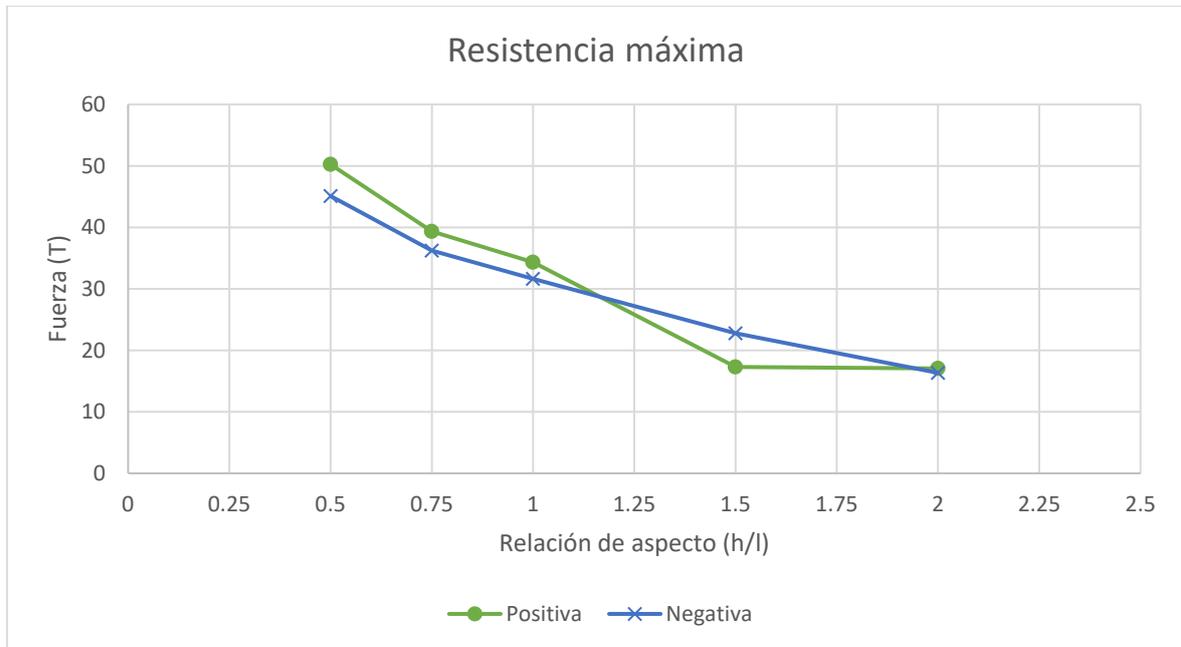


Figura 83. Resistencia máxima de los muros.

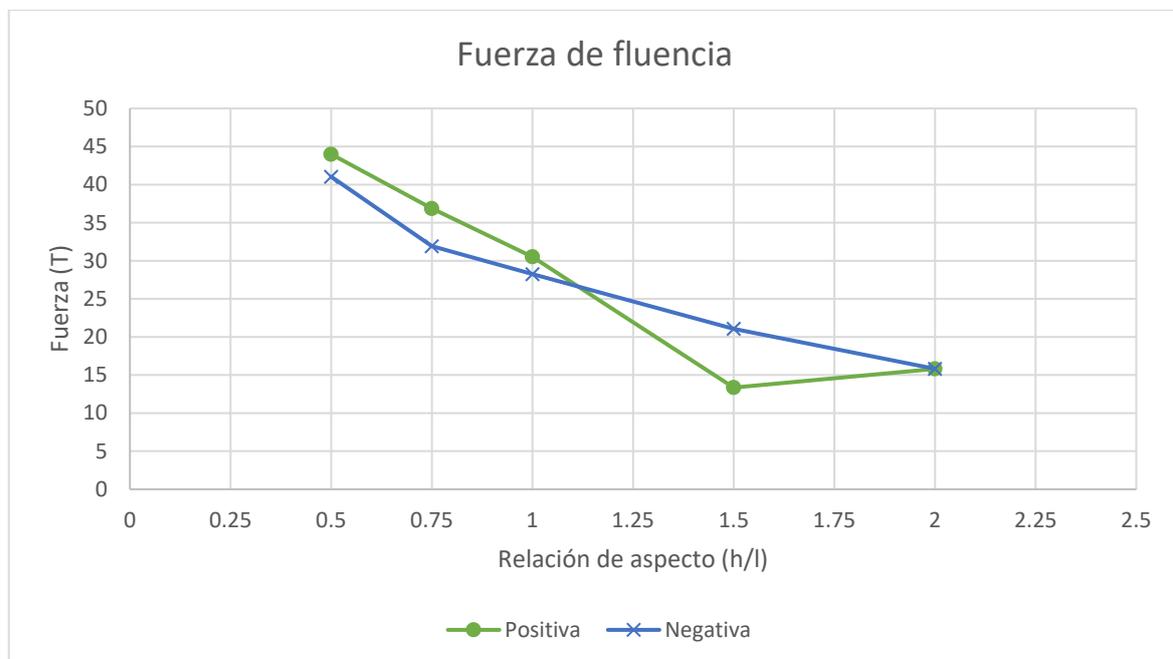


Figura 84. Fuerza de fluencia de los muros.

En la Figura 83 y la Figura 84, se muestra un comportamiento parecido entre las resistencias máximas y de fluencia, con valores sustancialmente mayores en el sentido positivo; excepto en el Muro D, por las razones previamente expuestas. En ambos casos la resistencia lateral decrece; tal como expusieron Ramírez et al. (2016) y Sandoval et al. (2018), y lo cual concuerda con el patrón de las capacidades calculadas en el Cuadro 13, ya que el coeficiente de la Ecuación 1 afecta los cálculos correspondientes de resistencia.

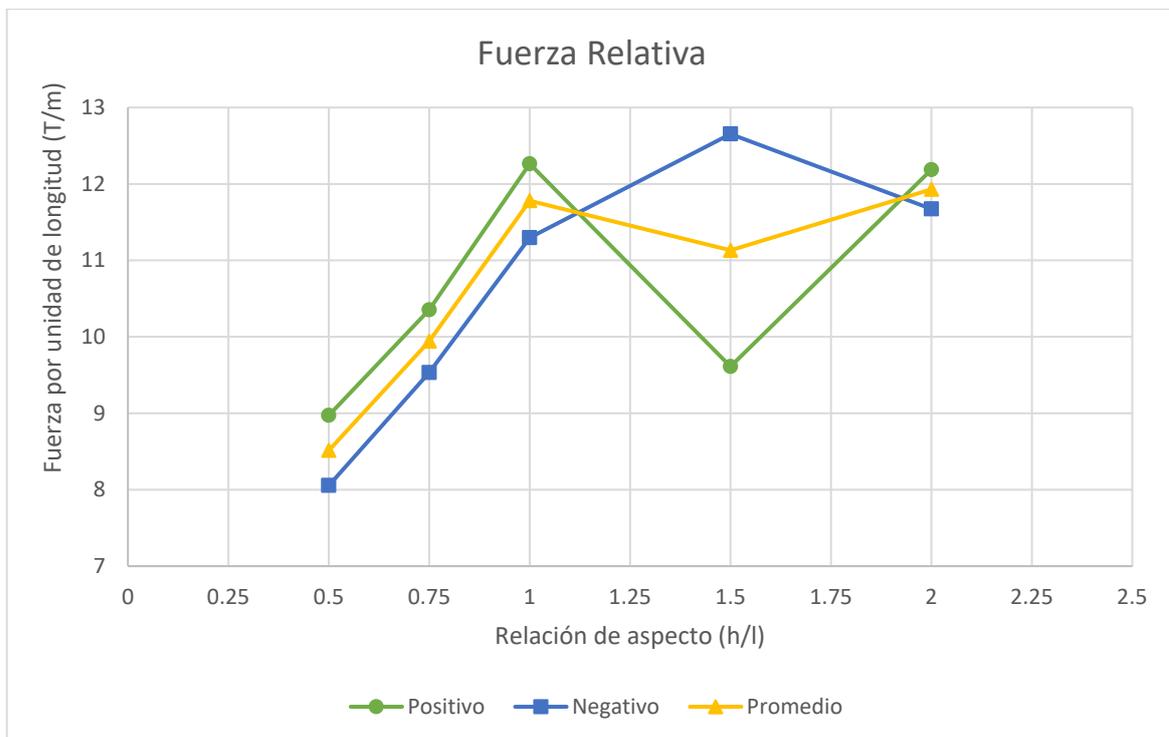


Figura 85. Fuerza por unidad de longitud.

A partir de la Figura 85 se puede observar que al incrementar la relación de aspecto, los muros más chatos comienzan a tomar más carga por metro de longitud, sin embargo, los muros más esbeltos rompen el patrón, por lo que en conjunto no hay una tendencia definida.

El desplazamiento máximo en ambas direcciones se observa en la Figura 86, mientras que el desplazamiento de fluencia se muestra en la Figura 87.

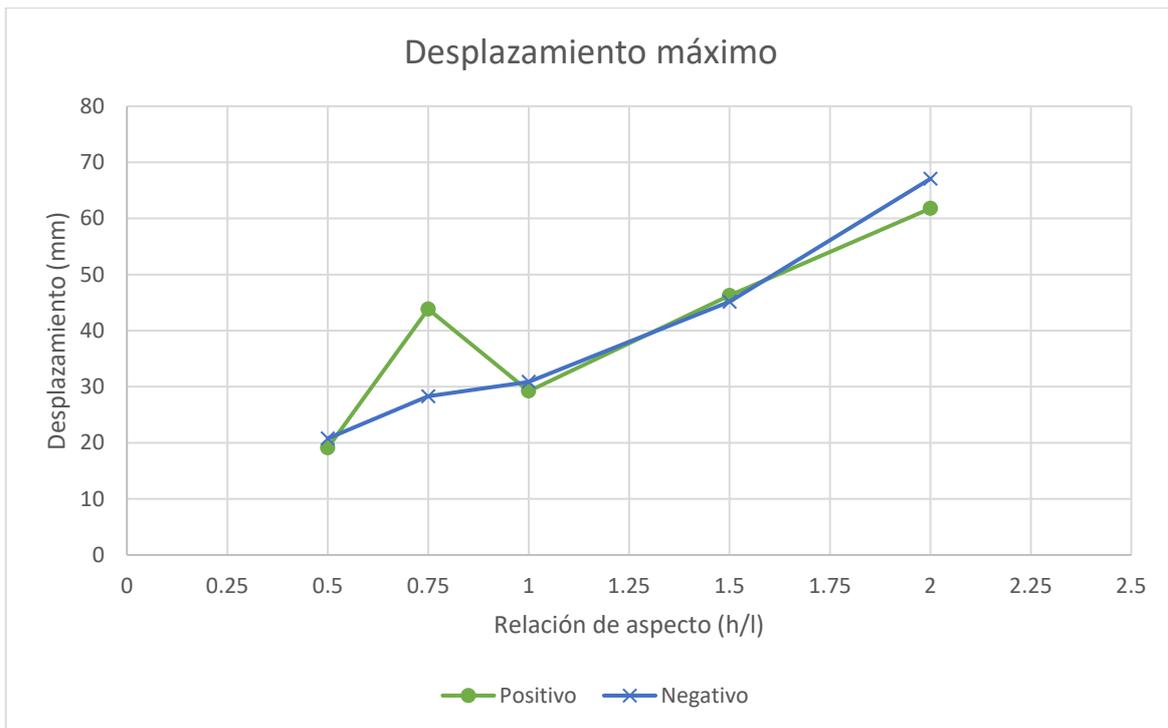


Figura 86. Desplazamiento máximo de los muros.

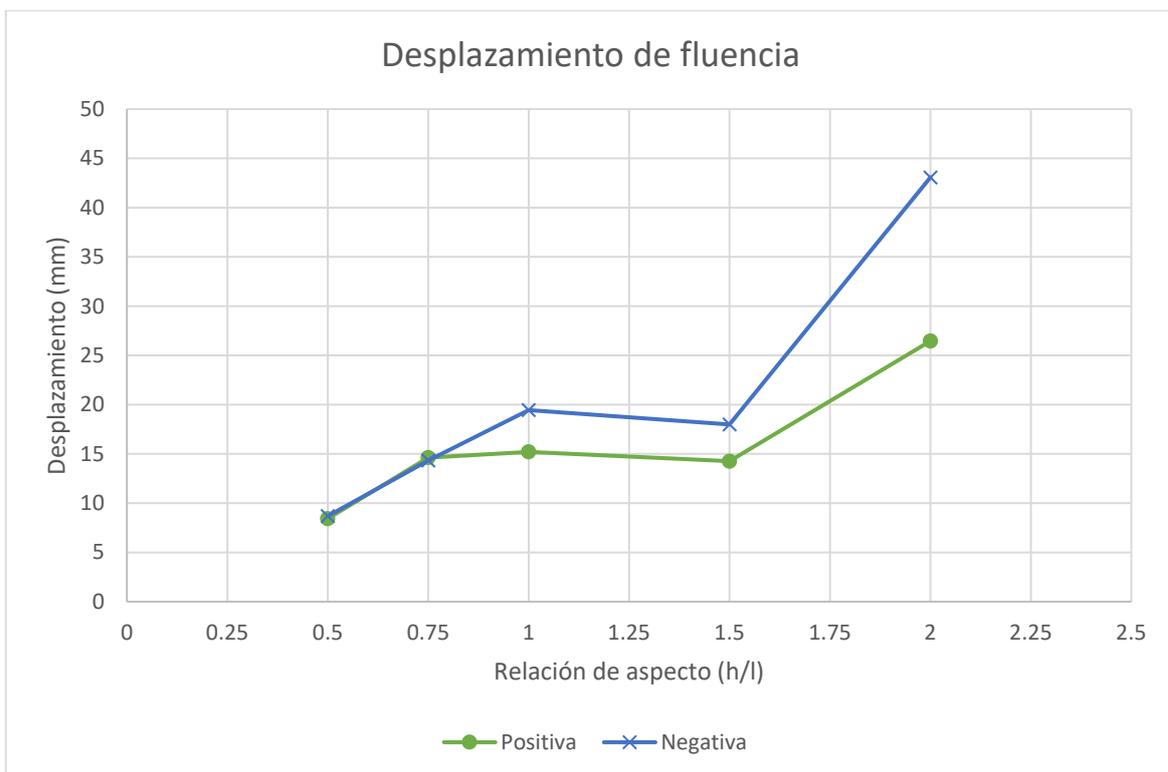


Figura 87. Desplazamiento de fluencia de los muros.

En la Figura 86 y la Figura 87 se observa que al incrementar la relación de aspecto, aumenta la capacidad de deformación del muro; tal y como obtuvieron Ramírez et al. (2016) y Sandoval et al. (2018) en sus respectivas investigaciones. Cabe destacar que el

desplazamiento máximo en el sentido positivo del Muro B difiere del patrón debido a que el máximo se alcanzó en la octava serie, con valores de resistencia similares a los de la séptima, mientras que la resistencia máxima negativa sí se obtuvo en la séptima serie. En el caso del desplazamiento de fluencia del Muro D, la ruptura del patrón creciente se debe al efecto de la desviación lateral del muro.

3.11.4 Rigideces elásticas

La rigidez elástica experimental en ambas direcciones se presenta en la Figura 88.

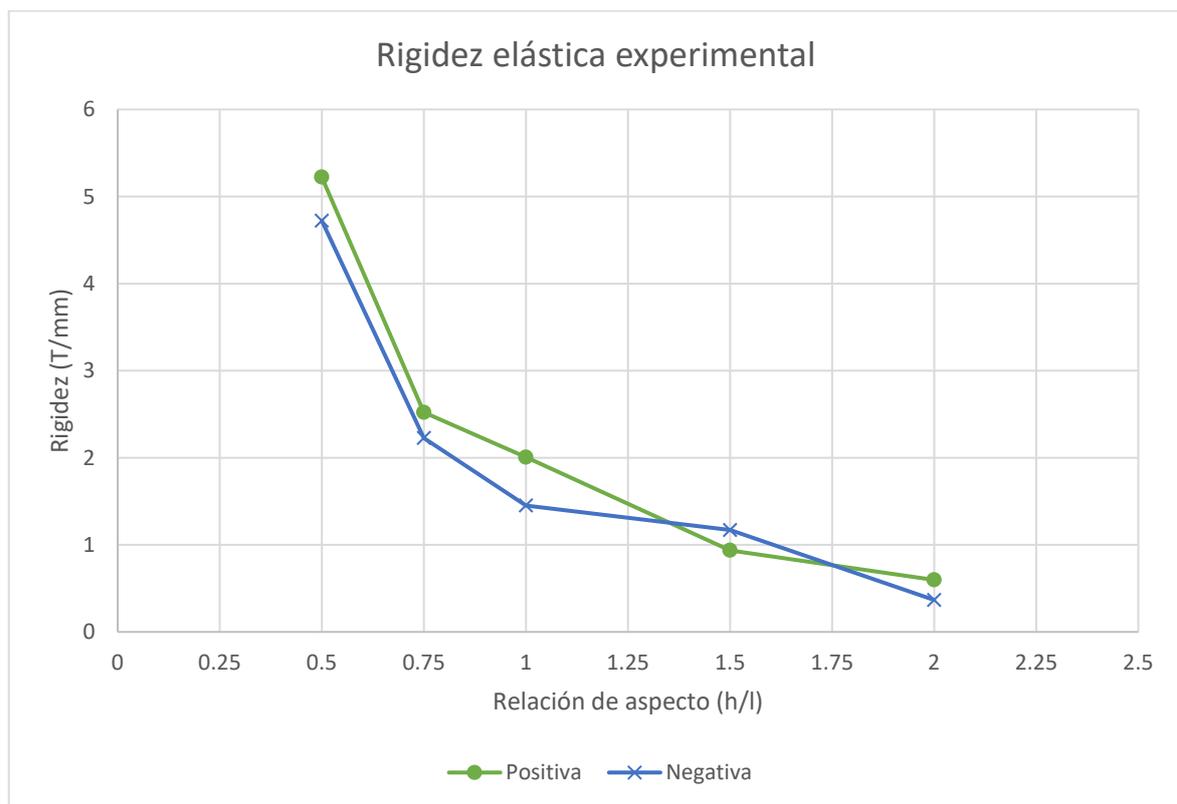


Figura 88. Rigidez elástica experimental de los muros.

A partir de la Figura 88 se puede observar que, en concordancia con lo observado en la Figura 13, la rigidez de los muros disminuye conforme aumenta la relación de aspecto, lo cual se debe implícitamente a los patrones decrecientes de las resistencias y crecientes de los desplazamientos, así como a la reducción de las inercias y áreas de cortante. Cabe destacar que los datos de rigidez de la investigación de Acuña (2014) muestran valores con órdenes de magnitud similares a los obtenidos en la presente investigación.

La rigidez elástica teórica de flexión, cortante y total, se muestra en la Figura 89.

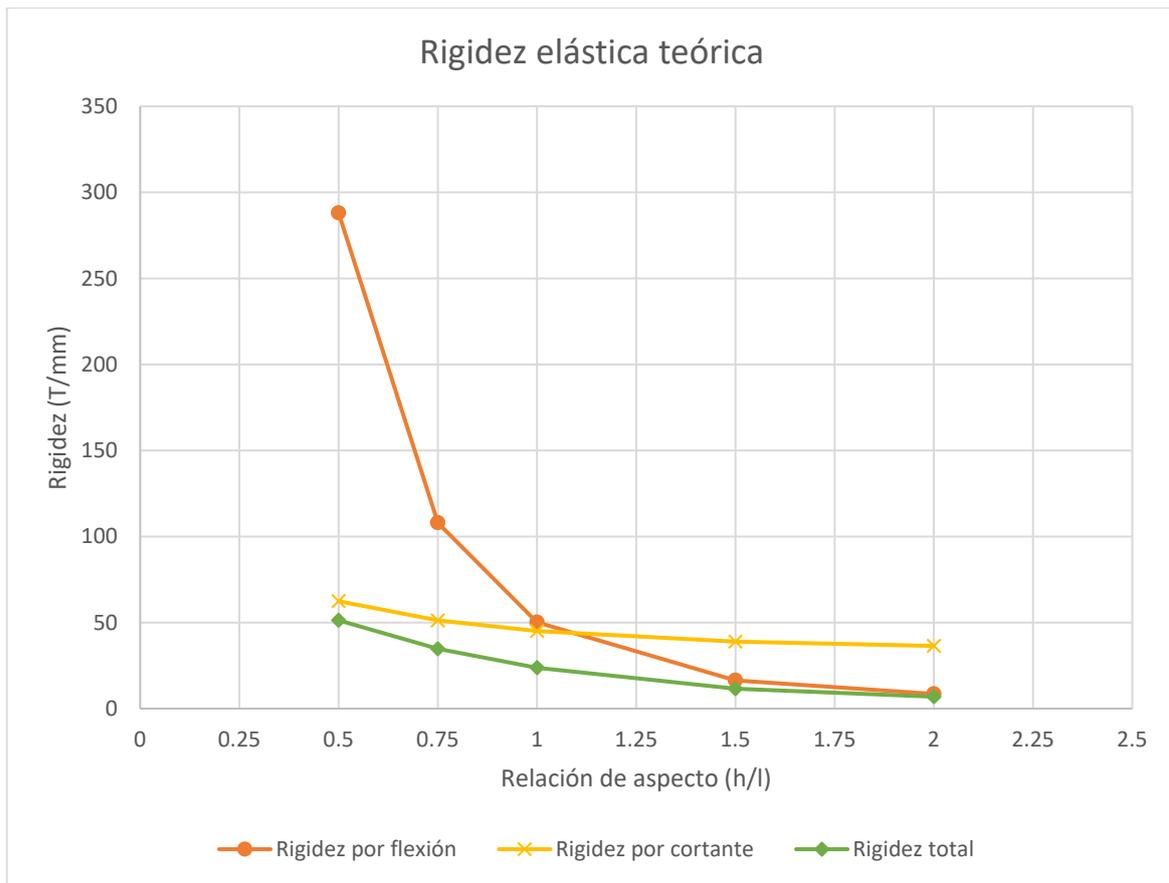


Figura 89. Rigidez elástica teórica de los muros.

Por su parte, la Figura 89 muestra cómo el cambio en la dominancia; o bien, intersección, de las rigideces teóricas por cortante y flexión se da entre las relaciones de aspecto 1 y 1,5, lo cual concuerda con el comportamiento observado, ya que los Muros A-B-C presentaron modos de falla similares y dominados por cortante, mientras que los Muros D-E; ubicados después del cambio de la dominancia, fallaron en un modo dúctil y más bien regido por esfuerzos de flexión.

La comparación entre las diferentes rigideces teóricas y la rigidez experimental promedio, se presenta en la Figura 90.

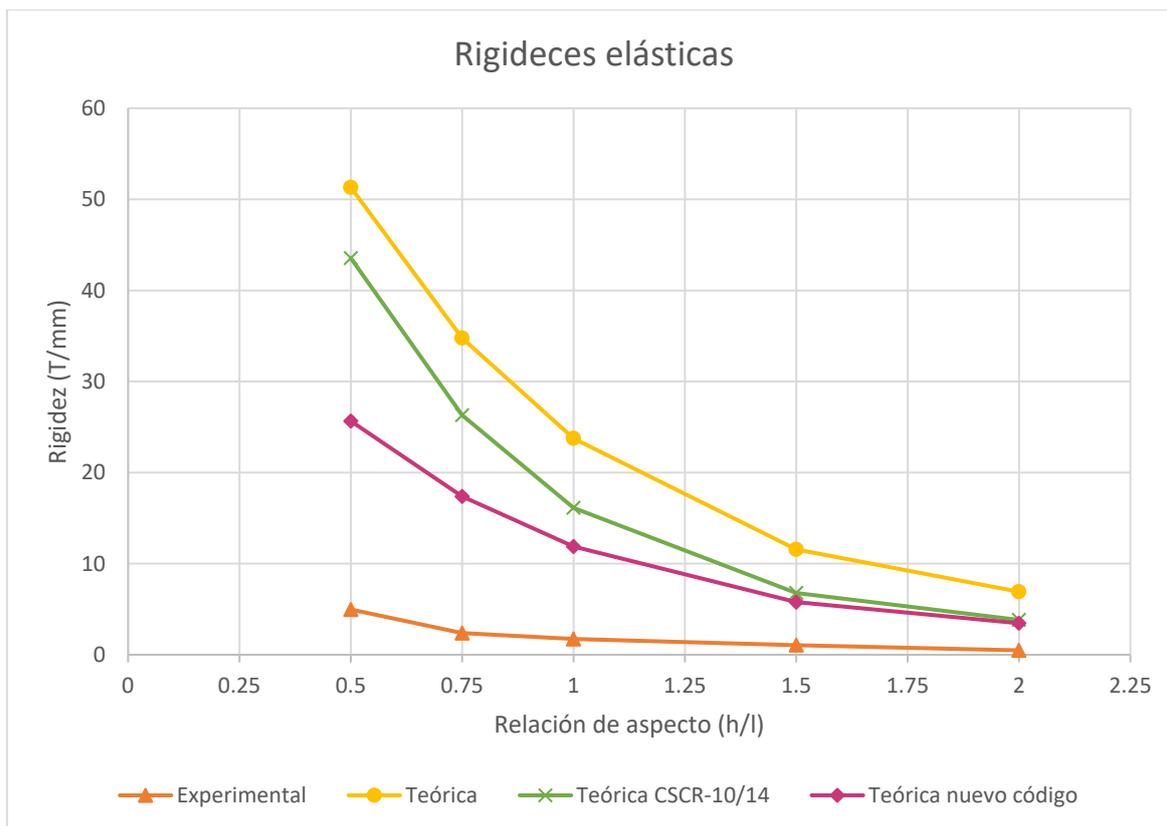


Figura 90. Comparación entre rigideces.

Ahora bien, al comparar las rigideces en la Figura 90, se puede observar una gran diferencia entre todos los valores teóricos y experimentales, incluso a pesar de que los factores de reducción del CSCR-10/14 (2016) y su nueva versión buscan representar el agrietamiento de la sección y producen ligeramente mejores aproximaciones.

Los coeficientes que mejor ajustan los valores teóricos a los resultados experimentales, se obtuvieron a partir de la minimización de la suma de los errores al cuadrado de los 5 especímenes. Dicho ajuste fue graficado en la Figura 91, y se aplicaron coeficientes de ajuste a la rigidez teórica sin las correcciones de los códigos, tanto en la influencia por flexión como en cortante. El coeficiente a aplicar a la inercia es de 0,046, mientras que el del área efectiva de cortante es de 0,122.

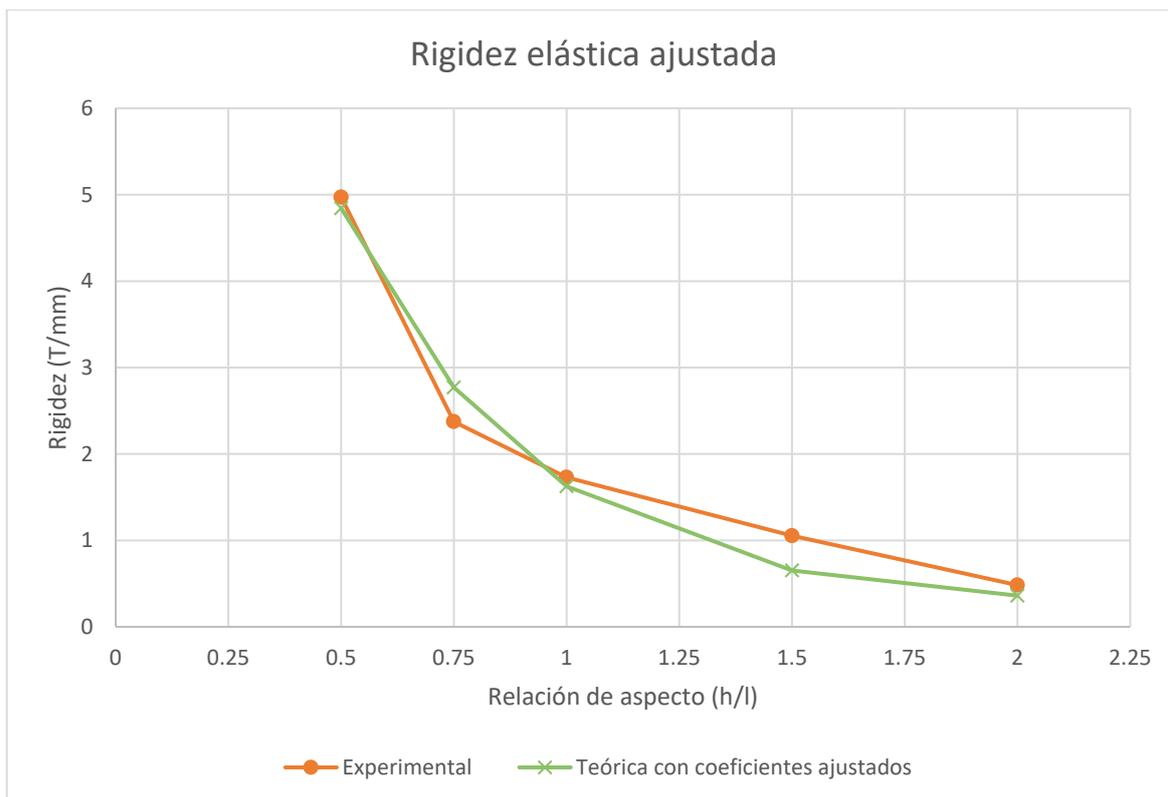


Figura 91. Rigidez elástica de los muros con coeficientes de ajuste.

La Figura 91 muestra que el ajuste de los datos teóricos se logra al utilizar un 4,6% de la inercia y un 12,2% del área de cortante. Debido a que el cambio es tan radical, surge la inquietud sobre si las ecuaciones elásticas de rigidez son las más adecuadas para representar dicha característica en los muros de corte de mampostería confinada reforzada. Además, el hecho de que ambos coeficientes no sean similares en magnitud; tal y como propone el nuevo código, provoca diferencias a la hora de distribuir las fuerzas en los elementos durante el análisis estructural, lo cual puede llevar sub y sobreestimar las cargas en los elementos.

La diferencia importante entre los datos teóricos y experimentales se puede deber a problemas con la aproximación del módulo de elasticidad, ya que la rigidez a pesar de haber sido calculada con una sección totalmente transformada a mampostería, corresponde a una sección transversal de dos materiales inherentemente heterogéneos.

A su vez, la degradación de la rigidez, obtenida en la Ecuación 5 como la razón entre la rigidez secante de cada lazo y la rigidez secante del primer lazo del ensayo, se muestra en la Figura 92. Dichos datos se presentan numéricamente en el Apéndice 5.

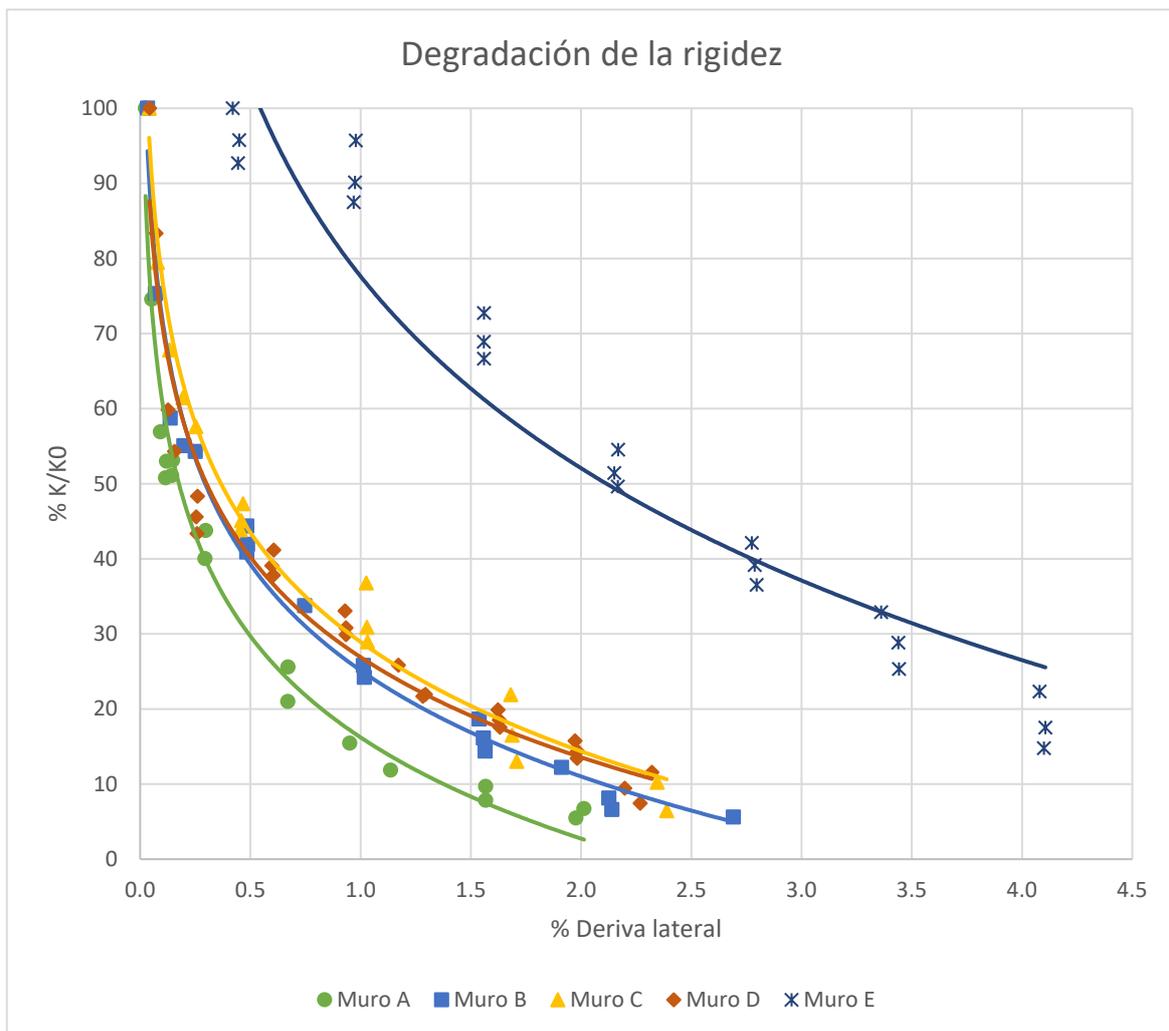


Figura 92. Degradación de la rigidez con respecto a la deformación lateral en los muros.

A partir de los datos mostrados en la Figura 92, es importante mencionar que en el caso de la curva del Muro E, se le suprimieron los datos de los primeros ciclos debido al inadecuado ajuste de los pernos, lo que provocó el desplazamiento a la derecha de la curva; sin embargo, esto no supone gran afectación en el análisis, ya que su pendiente es el objeto de interés.

Es importante observar que conforme aumenta la relación de aspecto, la velocidad de degradación de la rigidez se reduce, ya que los muros más chatos alcanzan antes las pérdidas de rigidez, mientras que el muro esbelto; con una pendiente más suave logra mantener todavía un porcentaje considerable de su rigidez inicial. Esto coincide con lo observado por Ramírez et al. (2016) y Sandoval et al. (2018), y además mostrado en la Figura 14.

3.11.5 Galgas extensométricas

La información de fluencia del acero de refuerzo obtenida por medio de las galgas extensométricas colocadas en los 5 muros se muestra en el Cuadro 24.

Cuadro 24. Comparación de la información de las galgas.

Galga	Muro A	Muro B	Muro C	Muro D	Muro E
1	No fluyó	Fuera de rango	Fluyó	Fluyó	Fluyó
2	Dañada	No fluyó	Dañada	Fluyó	Fluyó
3	Fuera de rango	Fuera de rango	Fluyó	Fluyó	Fluyó
4	Fuera de rango	Dañada	Fluyó	Dañada	Dañada
5	Fuera de rango	Fluyó	Fluyó	Fluyó	Fluyó
6	Fuera de rango	Fluyó	Fluyó	Dañada	Fluyó
7	Fluyó	Fluyó	Fluyó	Fluyó	Fluyó

El Cuadro 24 permite observar cómo al aumentar la relación de aspecto se comienza a dar un mayor uso y fluencia del acero vertical de las columnas; destinado a soportar esfuerzos de flexión. De igual forma; pero en menor medida, sucede con el refuerzo vertical de la mampostería. Además, el acero horizontal consistentemente fluyó en todos los casos, lo cual fue favorecido por la ubicación de la galga extensométrica en la zona de aparición de la grieta diagonal.

3.11.6 Modo de falla

El comportamiento de falla fue similar para los Muros A-B-C, sin embargo, conforme aumentó la relación de aspecto, el daño en los nudos viga-columna se dio con menor intensidad y permitió que el elemento se comportara como un conjunto, lo cual se refleja como un incremento en las grietas diagonales en la base de las columnas. Por su parte, el Muro C presentó un leve aplastamiento en la base, que se desarrolló con un poco más de intensidad en el Muro D e incluso en mayor medida en el Muro E. Esto demuestra que los primeros tres muros presentaron tipos de falla frágiles, dominados por cortante que sutilmente fueron cambiando sutilmente hacia modos de falla dúctiles y regidos por flexión en los últimos dos muros.

El paño de mampostería, conforme se incrementó la relación de aspecto, mostró una degradación cada vez mayor, ya que el Muro A presentó un agrietamiento modesto, mientras que este se fue intensificando hasta en el Muro E afectar no solo el paño, sino también la base de la columna. A partir de esto se puede concluir que el daño en el paño se incrementa al aumentar la relación de aspecto.

Finalmente, al incrementar la relación de aspecto, se pudo notar que el tiempo entre el agrietamiento inicial y la resistencia máxima se fue alargando, lo que quiere decir que, con una condición de mayor de agrietamiento, se dio una constancia relativa en la resistencia durante los ciclos de carga y descarga; es decir, fueron capaces de resistencia más desgaste y mostrar un comportamiento más dúctil.

4. Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

Con base en el análisis de resultados y la información obtenida por medio de ensayos experimentales en muros de mampostería confinada reforzada, se concluye que:

- La resistencia de los muros ante carga lateral disminuye al incrementar la relación de aspecto, mientras que el desplazamiento lateral aumenta.
- La rigidez lateral de los muros se reduce al incrementar la relación de aspecto, así como su velocidad de degradación, ya que la pendiente de la curva de rigidez relativa contra deriva lateral fue cada vez menos pronunciada.
- Al comparar la degradación de la rigidez de la MCR con los resultados obtenidos para muros de mampostería de arcilla por Sandoval et. al (2018) y los muros de mampostería de concreto por Ramírez et al. (2016), se observa una mayor capacidad de deformación en los muros con MCR, manteniendo para todos los casos un porcentaje de la rigidez inicial superior al 20% para niveles de deriva igual o mayor a 0,75%, mientras que para el caso de mampostería integral de arcilla dicha condición se dará para derivas en el orden de 0,2% y 0,5%, y en el caso de mampostería integral de concreto para valores entre 0,15% y 0,6%.
- La ductilidad no se ve notablemente influenciada por variaciones en la relación de aspecto, ya que no presenta un patrón definido ante dichos cambios.
- La capacidad de disipar energía es mayor en muros con relación de aspecto suficientemente menor o mayor a 1,0 debido a su dominante resistencia o desplazamiento, mientras que en valores cercanos alrededor de 1,0 se presentan los valores mínimos.
- Las ecuaciones teóricas de la rigidez no brindan una buena aproximación de los datos experimentales obtenidos, incluso si se considera el agrietamiento de la sección, ya que induce a factores de corrección bajos, como 12,2% para el área de cortante y 4,6 % para la inercia gruesa.
- La mampostería confinada sugiere por el estrechamiento de los lazos de histéresis tener un comportamiento frágil, ya que esto indica una menor capacidad de disipación de energía, así como un modo de falla frágil que incluyó tracción diagonal. No obstante, esto contrasta con los valores de ductilidad y la gran cantidad porcentual de energía disipada en el rango inelástico, lo cual indica que más bien es un material semi-dúctil.

- Los 5 muros presentaron dentro de su modo de falla el agrietamiento diagonal, ya que se observaron grietas a 45° tanto en el paño como en los extremos de los elementos de confinamiento. No obstante, en los Muros A-B-C ($h/l=0,5, 0,75$ y $1,0$) la falla del muro se da por deslizamiento, es decir una falla de corte horizontal sobre la junta; hecho influenciado por las rótulas de los nudos viga-columna, mientras que en los Muros D-E ($h/l=1,5$ y $2,0$), la falla se dio por aplastamiento en la base de las columnas.
- El comportamiento del paño y el marco fue más integral conforme se incrementó la relación de aspecto, ya que en el Muro A, el agrietamiento de la mampostería y columnas se dio con poca intensidad cerca de su zona central y en la base, mientras que en los siguientes muros se fue presentando agrietamiento con mayor intensidad en dichas zonas.
- El aplastamiento en la base de las columnas se incrementó al aumentar la relación de aspecto, siendo casi imperceptible en los Muros A y B, leve en el Muro C, notable en el Muro D y totalmente presente en el Muro E.
- El modo de falla por cortante deslizante en los Muros A-B-C es propio de muros frágiles y dominados por cortante, mientras que los Muros D-E, presentaron aplastamiento en la base y agrietamiento horizontal en la base de las columnas, lo cual es propio de muros con comportamiento dúctil y dominado por flexión.
- El intervalo de tiempo entre la aparición de la primera grieta y la resistencia máxima, se fue alargando al incrementar la relación de aspecto, lo cual muestra la mayor capacidad de los muros de ofrecer resistencia a pesar de tener una condición de daño visible. Este comportamiento cada vez más dúctil es deseable, ya que permite tener noción sobre la falla inminente antes de que suceda.
- El acero de refuerzo vertical alcanzó con más frecuencia valores de fluencia conforme se incrementó la relación de aspecto, y a partir del Muro D, este hecho ocurrió antes de alcanzar la resistencia máxima, lo cual demuestra un comportamiento dúctil en el que el acero vertical alcanza el estado límite antes que el concreto de las columnas.
- El acero de refuerzo horizontal fluyó consistentemente en los 5 especímenes, esto es de esperar, ya que este se coloca y está diseñado para resistir esfuerzos de corte en el paño de mampostería, la cual es la condición de carga a la que se sometieron los especímenes ensayados.
- Se comprobó la hipótesis inicial del proyecto, ya que al aumentar la relación de aspecto el modo de falla se asemejó más a una falla dominada por flexión y el

comportamiento fue más dúctil. Además, el Muro C presentó el comportamiento transitorio entre falla frágil y dúctil.

4.2 Recomendaciones

Se presentan a continuación una serie de recomendaciones de utilidad a investigaciones futuras, las cuales se basan en los resultados obtenidos:

- Realizar una rigurosa inspección del proceso constructivo para corroborar que lo dispuesto en el diseño y los planos se lleve a cabalidad en los especímenes de prueba.
- Verificar el cumplimiento de las longitudes de desarrollo en los extremos de todas las varillas longitudinales, tanto de la mampostería como de los elementos de confinamiento.
- Confinar debidamente los nudos de unión viga-columna para evitar la falla local de dichos elementos ante la aparición de esfuerzos cortantes.
- Utilizar un espaciamiento máximo entre aros, menor que el sugerido por el CSCR-10/14 (2016), ya que se presentó pandeo del refuerzo longitudinal entre los aros. Dicho espaciamiento se podría aplicar en el tercio inferior de la columna debido a que es la zona de mayor momento flector, además, se debería realizar especialmente en muros con relaciones de aspecto mayores a 1,0, puesto que en ellos los esfuerzos de flexión ejercen una mayor influencia.
- Colocar refuerzo vertical cerca del centro del paño de mampostería en muros esbeltos, ya que es una zona con alta degradación debido a la confluencia de múltiples grietas.
- Arriostrar adecuadamente los especímenes estructurales durante el ensayo, esto con el fin de evitar un pandeo o desviación lateral indeseada que afecte los datos.
- Distribuir adecuadamente los pernos de amarre al piso fuerte, en suficiente cantidad y con el brazo de palanca necesario para evitar deslizamiento y levantamiento vertical de la placa de cimentación.
- Evitar detener el ensayo una vez iniciado para ajustar los pernos, ya que produce perturbaciones, tal como saltos, en los datos registrados por las galgas extensométricas
- Realizar más investigación sobre las ecuaciones de cálculo de las rigideces, dada la gran diferencia entre los datos teóricos y experimentales.

5. Bibliografía

5.1 Fuentes de información

- Abdelkhalik, A., Abdelrahman, A., Metwaly, M. & Okail, H. (2014). *Experimental and analytical investigation of the lateral load response of confined masonry walls*. Egipto, El Cairo: Ain Shams University.
- ACI 211 (2002). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. (ACI 211.1-91). American Concrete Institute.
- ACI 318 (2014): *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural* (ACI 318S-14) y Comentario (ACI 318R-14). American Concrete Institute.
- Acón, Federico. (1999). *Capacidad soportante de paredes de mampostería confinada ante cargas laterales*. Universidad de Costa Rica.
- Acuña, Daniel. (2014). *Efecto del detallado horizontal sobre el comportamiento de muros cortantes de mampostería de concreto*. Universidad de Costa Rica.
- Barahona, S. (2019). *Determinación del módulo de ruptura en mampostería traslapada con esfuerzos de tracción por flexión paralelos a las juntas horizontales*. Universidad de Costa Rica.
- Carter, E. (1988). *Effects of confinement Steel on flexural behavior of reinforced masonry shear walls*. University of Cincinnati.
- Cemex (2015). *Especificaciones Técnicas*. <https://www.cemexcostarica.com/documents/46130096/46404613/cemento-uso-general.pdf/029e0deb-b5cf-998b-9e4a-21ca3ecd01c5>. Consultado el 3 de Junio del 2019.
- CFIA. (2010). *Código Sísmico de Costa Rica 2010*. Revisión 2014. Editorial Tecnológico.
- Chenghao, L., Jung-Han, L., Sang-Hoon, O., Waon-Ho, Y. & Won-Jik, Y. (2008). *Evaluation of Rocking and Toe Crushing Failure of Unreinforced Masonry Walls*. Corea del Sur.
- Cordero, Mariela. (2013). *Comportamiento en cortante de muros de mampostería con el refuerzo embebido en concreto colocado en las sisas de los bloques*. (Spanish). *Ingeniería*, 23(1), 75-92.
- García, T. (2019). *Determinación del módulo de ruptura de la mampostería traslapada con esfuerzos de tracción por flexión perpendicular a las juntas horizontales*. Universidad de Costa Rica.
- Hernández, Luis Fernando. (1998). *Paredes de mampostería confinada sometidas a carga estática y cíclica*. Universidad de Costa Rica.

- Ingham, J. & Voon, K. (2006). *Experimental In-Plane Shear Strength Investigation of Reinforced Concrete Masonry Walls*. Australia, Adelaida.
- NIST. (2014). *Seismic Design of Special Reinforced Masonry Shear Walls: A Guide for Practicing Engineers*, NIST GCR 14-917-31, prepared by the Applied Technology Council for the National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, pp 42.
- Park, R. & Paulay, T. (1988). *Estructuras de concreto reforzado*. Nueva Zelanda: Universidad de Canterbury, 633-650.
- Paulay, T & Priestley, M. (1992). *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*. Estados Unidos de América: Universidad de California, 587-592.
- Popov, E. (2000). *Mecánica de Sólidos*. 2da Edición. Pearson Educación: México.
- Poveda, A. (2018). *Notas del curso: Estructuras de mampostería IC-1014*. Universidad de Costa Rica.
- Ramírez, P., Sandoval, C. & Almazán, J. L. (2016). *Experimental study on in-plane cyclic response of partially grouted reinforced concrete masonry shear walls*. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Sánchez, N. (2019). *Verificación de la capacidad de muros de mampostería confinada reforzada al variar la relación de aspecto*. Universidad de Costa Rica.
- Sandoval, C., Calderón, S., & Almazán, J. L. (2018). *Experimental cyclic response assessment of partially grouted reinforced clay brick masonry walls*. Bulletin of Earthquake Engineering, 1–26.
- Salazar, Estefan. (2013). *Consideraciones sobre el comportamiento a cortante de los elementos de borde en los muros de mampostería confinada por marcos de concreto*. Universidad de Costa Rica.
- TMS (2016). *Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures, TMS 402/602-16, Longmont, pp C-31*.
- Venegas, Sergio. (1997). *Comportamiento histerético de paredes de mampostería confinada*. Universidad de Costa Rica.
- Viu, A. (2009). *Modelamiento puntal tensor para muros cortos*. Chile, Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Zúñiga, F. (2018). *Análisis de muros esbeltos de mampostería de 15 cm de espesor, con empalmes verticales*. Universidad de Costa Rica.

5.2 Normas consultadas

- ASTM A370, 2019: *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. (ASTM A370/A370M). ASTM International.
- ASTM A615, 2018: *Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement*. (ASTM A615/A615M). ASTM International.
- ASTM A706, 2016: *Standard Specification for Deformed and Plain Low-Alloy Steel Bars for Concrete Reinforcement*. (ASTM A706/A706M). ASTM International.
- ASTM C29, 2017: *Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*. (ASTM C29/C29M). ASTM International.
- ASTM C31, 2011: *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field*. (ASTM C31/C31M). ASTM International.
- ASTM C33, 2016: *Standard Specification for Concrete Aggregates*. (ASTM C33/C33M). ASTM International.
- ASTM C39, 2018: *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. (ASTM C39/C39M). ASTM International.
- ASTM C109, 2016: *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. (ASTM C109/C109M). ASTM International.
- ASTM C117, 2017: *Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing*. (ASTM C117). ASTM International.
- ASTM C127, 2015: *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. (ASTM C127). ASTM International.
- ASTM C128, 2015: *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. (ASTM C128). ASTM International.
- ASTM C136, 2014: *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. (ASTM C136/C136M). ASTM International.
- ASTM C140, 2017: *Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units*. (ASTM C140/140M). ASTM International.
- ASTM C143, 2015: *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. (ASTM C143/C143M). ASTM International.
- ASTM C188, 2017: *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*. (ASTM C188/C188M). ASTM International.
- ASTM C270, 2017: *Standard Specification for Mortar for Unit Masonry*. (ASTM C270). ASTM International.

- ASTM C1019, 2018: *Standard Test Method for Sampling and Testing Grout*. (ASTM C1019). ASTM International.
- ASTM C1314, 2016: *Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms*. (ASTM C1314). ASTM International.
- ASTM E2126, 2011: *Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Building*. (ASTM E2126). ASTM International.
- INTE C15, 2018; *Agregados para Concreto. Requisitos (MOD)*. (INTE C15). Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica.
- INTE C19, 2019; *Práctica normalizada para hacer y curar especímenes de concreto para ensayo en el campo*. (INTE C19). Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica.
- INTE C39, 2018; *Resistencia a la compresión uniaxial de especímenes cilíndricos de concreto. Método de ensayo*. (INTE C39). Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica.
- INTE C41, 2017; *Método de ensayo para el asentamiento en el concreto del cemento hidráulico*. (INTE C41). Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica.
- INTE C46, 2016; *Concreto. Análisis granulométrico en tamices de agregado fino y grueso. Método de ensayo*. (INTE C46). Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica.
- INTE C49, 2018; *Determinación por lavado del material que pasa por el tamiz de 75 μm (N° 200) en agregados minerales. Método de ensayo*. (INTE C49). Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica.
- INTE C50, 2018; *Unidades de mampostería de concreto y unidades relacionadas. Muestreo y método de ensayo (MOD)*. (INTE C50). Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica.
- INTE C55, 2015; *Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de prismas de mampostería*. (INTE C55). Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica.
- INTE C56, 2018; *Concreto de relleno para mampostería. Muestreo y método de ensayo (MOD)*. (INTE C56). Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica.
- INTE C57, 2018; *Resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico. Usando especímenes cúbicos de 50 mm (2 pulgadas). Método de ensayo*. (INTE C57). Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica.
- INTE C58, 2013; *Método de ensayo para determinar la densidad masiva (peso unitario) y los vacíos en agregado*. (INTE C58). Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica.

- INTE C68, 2016; *Construcción. Determinación de la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso. Método de ensayo.* (INTE C68). Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica.
- INTE C69, 2016; *Construcción. Determinación de la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción del agregado fino. Método de ensayo.* (INTE C69). Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica.
- INTE C141, 2018; *Método de ensayo para la determinación de la densidad del cemento hidráulico.* (INTE C141). Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica.
- INTE C400, 2019; *Barras de acero al carbono lisas y corrugadas para refuerzo de concreto. Requisitos.* (INTE C400). Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica.
- INTE C401, 2017; *Barras de acero de baja aleación, lisas y corrugadas para refuerzo de concreto. Requisitos.* (INTE C401). Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica.
- INTE C403, 2014; *Métodos de ensayo y definiciones para ensayos mecánicos de productos de acero.* (INTE C403). Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica.

6. Apéndice 1

6.1 Metodología de diseño de los muros

6.1.1 Diseño para resistir flexocompresión

La resistencia a flexocompresión contra cargas en el plano del muro se obtiene a partir del diagrama de interacción, que se construye a partir de variaciones en la ubicación del eje neutro, lo cual permite variar el área en compresión y con ello el equilibrio de fuerzas axiales y momentos nominales en el muro. En la Figura 93 se muestra un diagrama de interacción.

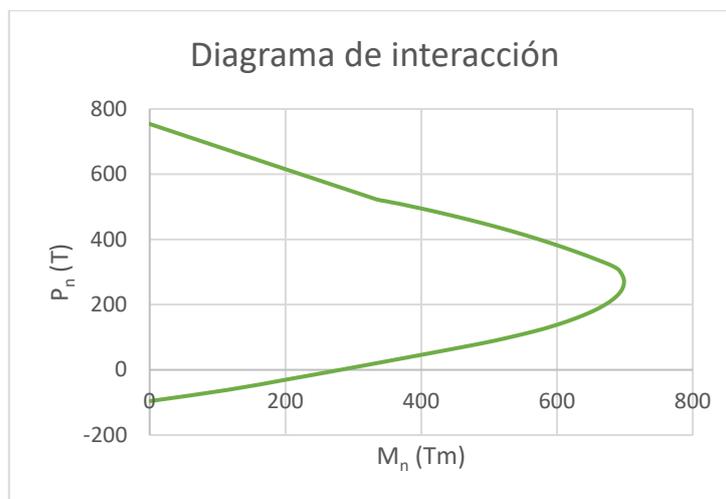


Figura 93. Diagrama de interacción típico.

A la hora de confeccionar el diagrama de interacción se tomaron en cuenta algunas consideraciones:

- Se despreció el acero vertical en compresión de la mampostería, ya que este no posee confinamiento.
- El área del bloque en compresión no incluye el área del acero vertical en compresión ni los vacíos provocados por las celdas no rellenas.
- Los paquetes de varillas en las columnas se consideraron como una sola capa y su respectiva distancia (d) está medida al centroide del paquete.
- Se utilizó sección transformada debido a que las columnas y el paño son de distintos materiales.

Inicialmente, se proponen varias ubicaciones del eje neutro y se calcula la altura del bloque en compresión (a) de acuerdo con la Ecuación 8.

$$a = 0,85 \cdot c$$

Seguidamente, para cada capa de acero, se obtiene su deformación unitaria de acuerdo con la relación lineal propuesta en la teoría de flexión y la condición última de compresión en la fibra extrema del concreto.

$$\varepsilon = \frac{c - d}{c} \cdot \varepsilon_c$$

Ecuación 9

A su vez, con la deformación unitaria calculada, se procede a obtener los esfuerzos en las capas de acero de acuerdo con la Ecuación 10.

$$\text{Si } \varepsilon \leq \varepsilon_y$$

$$f_s = E \cdot \varepsilon$$

$$\text{Si } \varepsilon \geq \varepsilon_y$$

$$f_s = f_y$$

Ecuación 10

Por lo tanto, las fuerzas se obtendrían a partir del producto del esfuerzo por el acero en la capa correspondiente.

$$F_s = f_s \cdot A_s$$

Ecuación 11

A la hora de calcular la fuerza en compresión, se requiere realizar una transformación de las columnas a mampostería, por lo que se utiliza el factor mostrado en la Ecuación 12.

$$n = \frac{E_c}{E_m}$$

Ecuación 12

De esta forma, el ancho de las columnas pasaría a ser:

$$b_{col} = n \cdot b$$

Ecuación 13

Gráficamente se puede observar la idealización en la Figura 94.

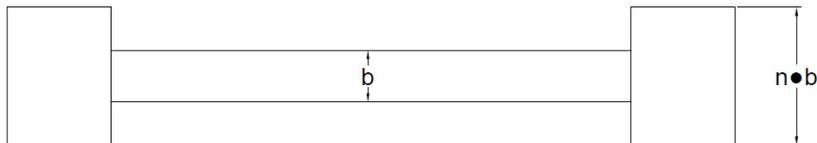


Figura 94. Sección transformada.

Por lo tanto, la fuerza en compresión se calcularía tal y como se muestra en la Ecuación 14.

$$F_c = 0,85 \cdot f'_m \cdot A_{compresión}$$

Ecuación 14

Así, la fuerza axial nominal del muro se define como:

$$P_n = F_c + \sum_1^{\# \text{ capas}} F_s$$

Ecuación 15

De esta forma el momento nominal se calcula a partir de la Ecuación 16.

$$M_n = F_c \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) - P_n \cdot \left(\frac{l}{2} - d_{rec} - \frac{3}{2} \cdot d_{\#4}\right) + \sum_1^{\# \text{ capas}} (f_s \cdot d_i)$$

Ecuación 16

Una vez realizado el cálculo, cambiar la ubicación del eje neutro y repetir. Posteriormente, para calcular los extremos del diagrama, el momento nominal es nulo, por lo que únicamente se debe obtener la fuerza axial. En este caso se asume compresión pura y tracción pura en toda la sección del elemento. Su cálculo se muestra a continuación:

$$P_C = 0,85 \cdot f'_c \cdot A_{compresión} + f_y \cdot A_{s \text{ columnas}}$$

Ecuación 17

$$P_T = \sum_1^{\# \text{ capas}} (f_y \cdot A_s)$$

Ecuación 18

Una vez calculados los puntos del diagrama y conociendo el valor de la carga axial de diseño, se debe obtener el par ordenado de fuerza y momento nominales correspondientes del diagrama de interacción, ya sea porque se tiene el dato directo o por interpolación entre dos puntos cercanos, y verificar que sean mayores a las cargas de diseño.

6.1.2 Diseño para resistir fuerzas cortantes

La fuerza cortante, tal y como se mostró en la Figura 1, es constante en toda la altura del muro, por lo que ese será el valor de diseño. La capacidad de cortante del muro viene dada por la Ecuación 19, esta consiste en una suma de las capacidades de la mampostería, el acero horizontal y las columnas de concreto:

$$V_n = V_m + V_s + V_c$$

Ecuación 19

La capacidad del acero horizontal viene dado en la Ecuación 20, las columnas en la Ecuación 21 y la mampostería en la Ecuación 22. Cabe destacar que P_u es la carga axial mayorada.

$$V_s = \frac{0,25 \cdot A_{sh} \cdot f_y \cdot d_m}{S_h}$$

Ecuación 20

$$V_c = 0,53 \cdot \left(1 + \frac{P_u}{140 \cdot A_{gc}}\right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_{wc} \cdot d_c + \frac{A_v \cdot f_{yt} \cdot d_c}{s}$$

$$\text{con } \frac{A_v \cdot f_{yt} \cdot d_c}{s} < 2,2 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_{wc} \cdot d_c$$

Ecuación 21

$$V_m = \left[\left(1 - 0,44 \cdot \left(\frac{M_u}{V_u \cdot d_m}\right)\right) \cdot \sqrt{f'_m} + 0,25 \cdot \left(\frac{P_u}{A_{gm}}\right) \right] \cdot d_m \cdot b_{wm}$$

$$\text{con } \left(\frac{M_u}{V_u \cdot d_m}\right) \leq 1,0$$

Ecuación 22

En el caso de las capacidades de la mampostería y el acero deben tomarse en cuenta las consideraciones mostradas en la Ecuación 23 y Ecuación 24.

$$V_m + V_s \leq \left(1,6 \cdot \sqrt{f'_m}\right) \cdot d_m \cdot b_{wm}$$

$$\text{si } \left(\frac{M_u}{V_u \cdot d_m}\right) \leq 0,25$$

Ecuación 23

$$V_m + V_s \leq \left(1,06 \cdot \sqrt{f'_m}\right) \cdot d_m \cdot b_{wm}$$

$$\text{si } \left(\frac{M_u}{V_u \cdot d_m}\right) \geq 1,0$$

Ecuación 24

Si el cociente del momento flector y la fuerza cortante con la distancia (d_m) se encuentra entre 0,25 y 1,0, se debe interpolar linealmente entre ellos. En lo que respecta al espesor (b_{wm}), en mampostería rellena este debe tomarse como el ancho (t) del muro, mientras que si está parcialmente rellena se le debe restar el ancho máximo del hueco interno del bloque en la dirección perpendicular a la fuerza cortante (b_i).

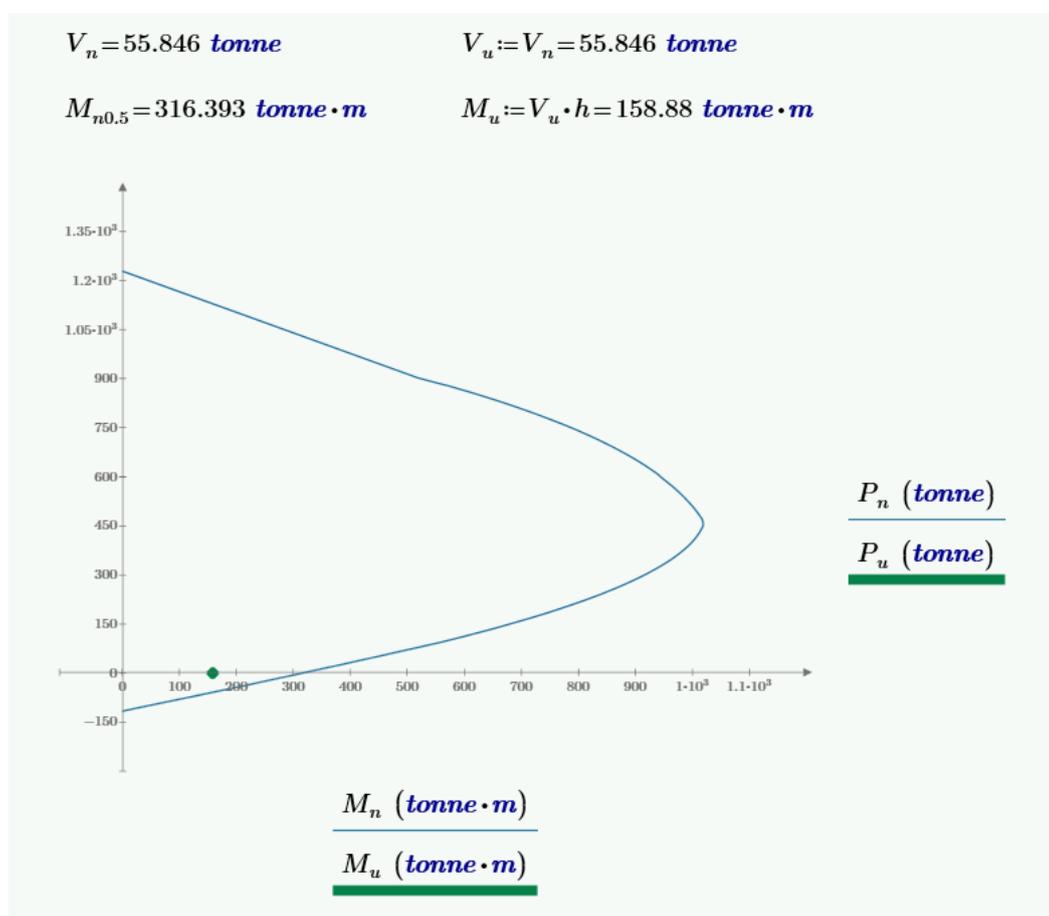
Además, se debe revisar la fuerza cortante asociada a la capacidad esperada en flexión, la cual debe ser menor a la capacidad nominal en cortante de la sección. Esta se muestra en la Ecuación 25.

$$V_{flexión} = \frac{M_n}{h}$$

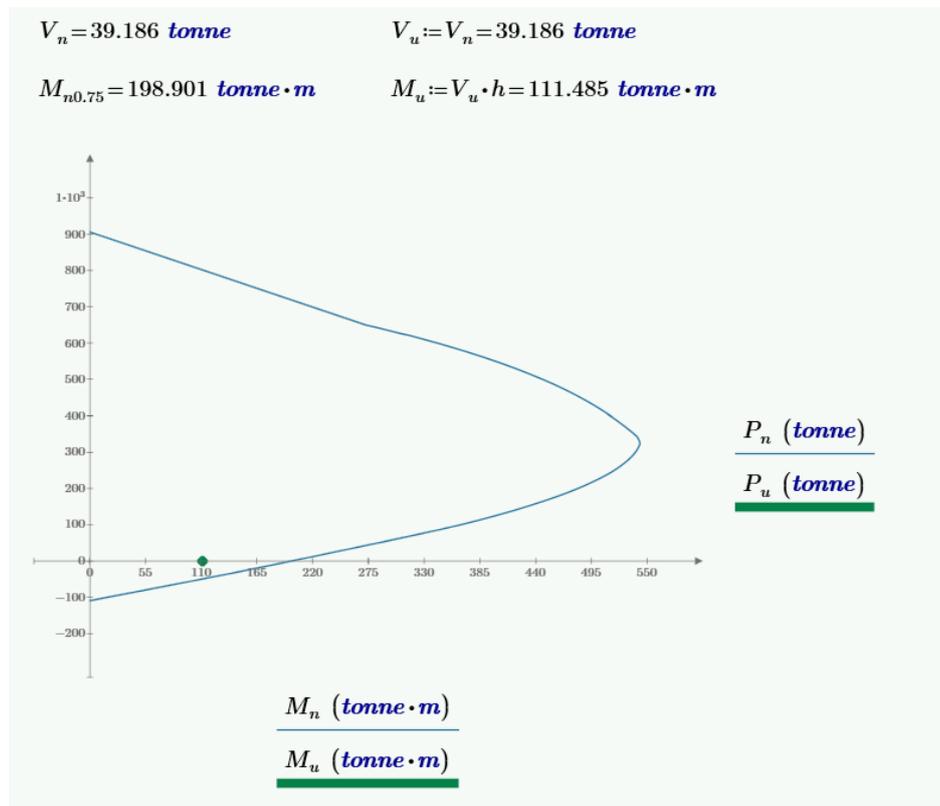
Ecuación 25

Si la fuerza cortante desarrollada por la capacidad en flexión es 2,5 veces mayor a las cargas cortantes de diseño, la condición de falla será fuertemente dominada por cortante, con todo el comportamiento frágil que conlleva (NIST, 2014).

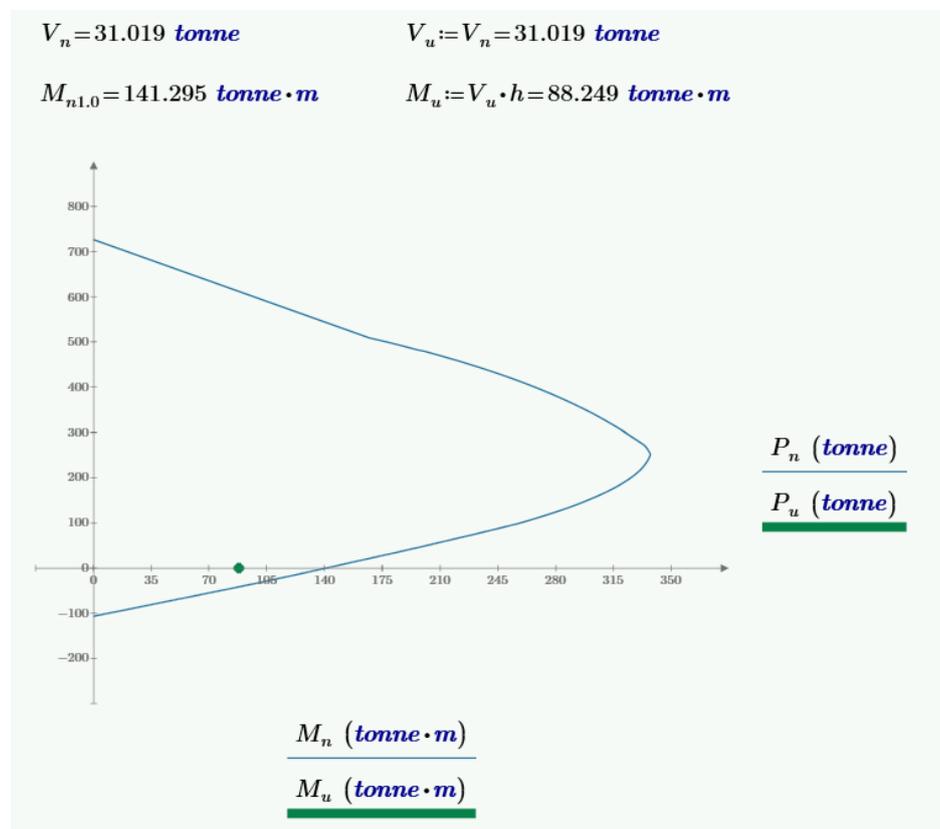
A continuación se muestra el resumen de cálculos obtenidos de capacidad del Muro A:



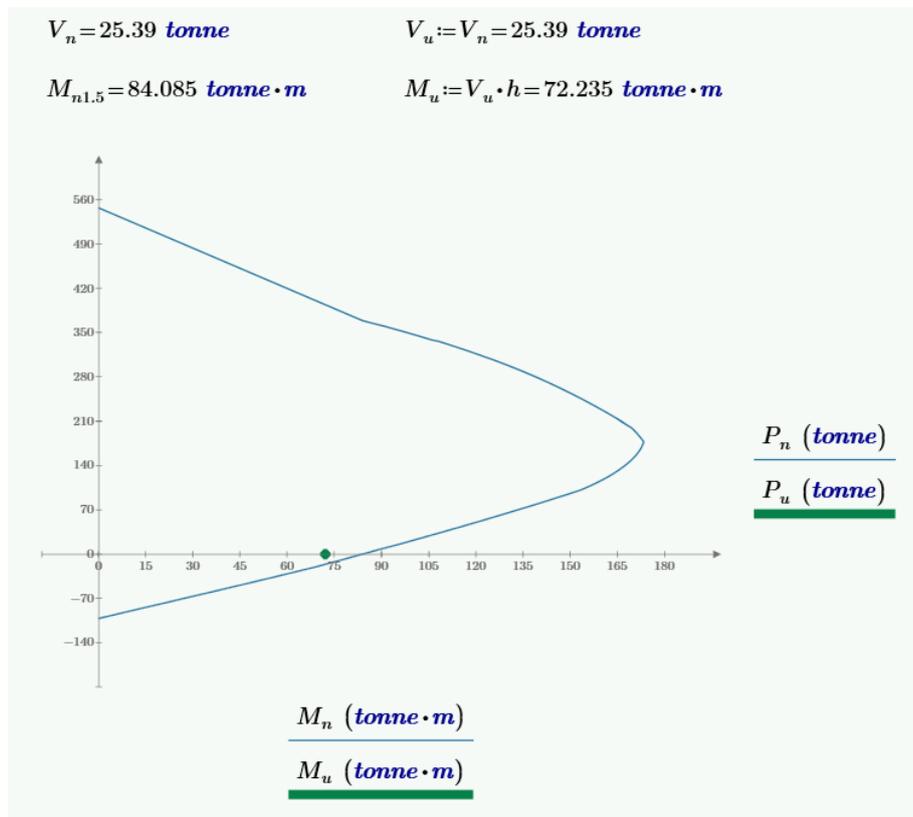
Para el Muro B:



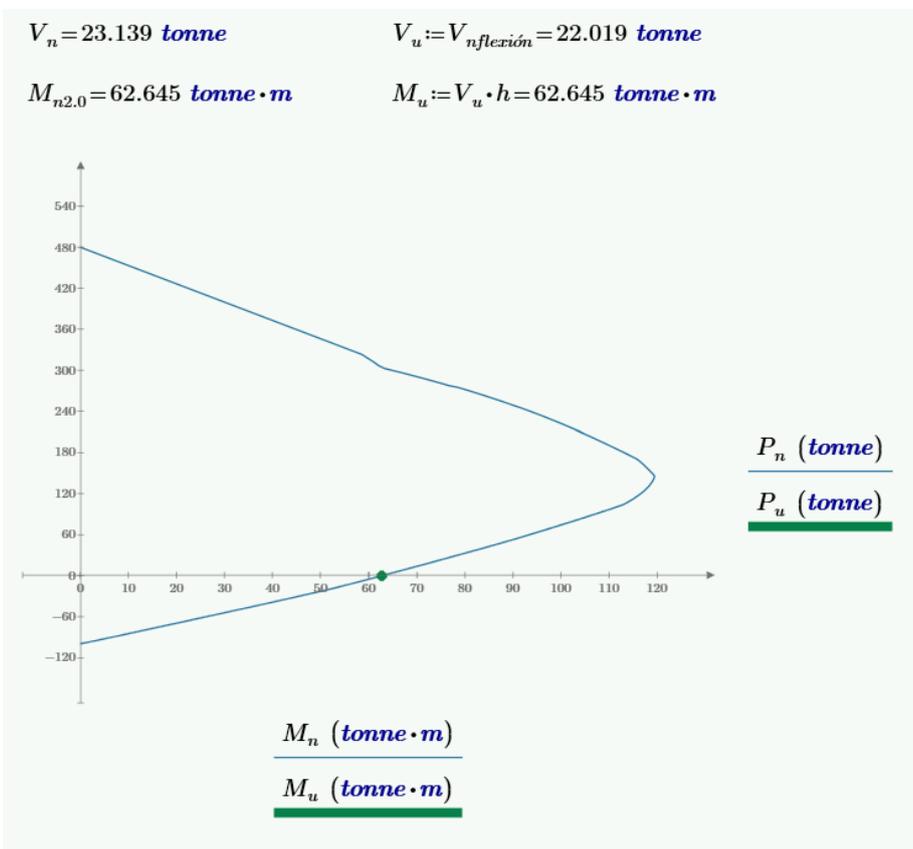
Para el Muro C:



Para el Muro D:



Para el Muro E:



7. Apéndice 2

7.1 Instrumentación de los muros

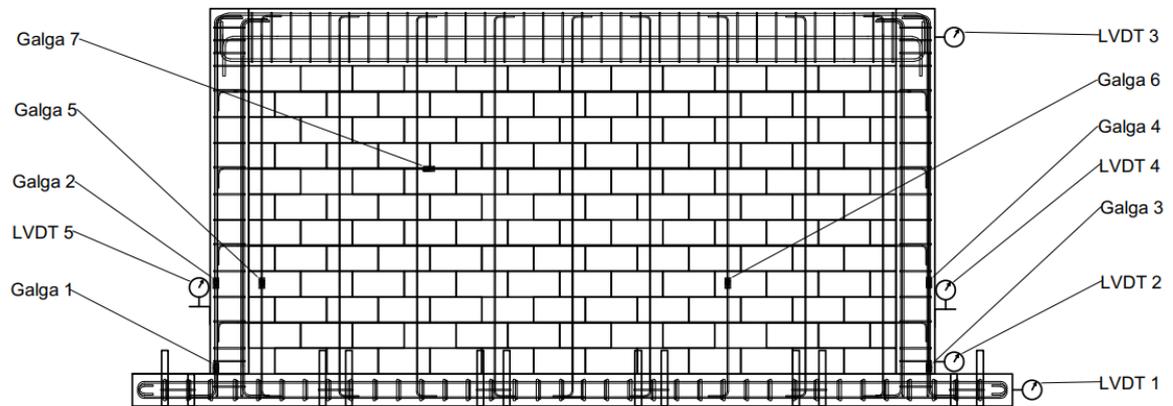


Figura 95. Instrumentación del Muro A.

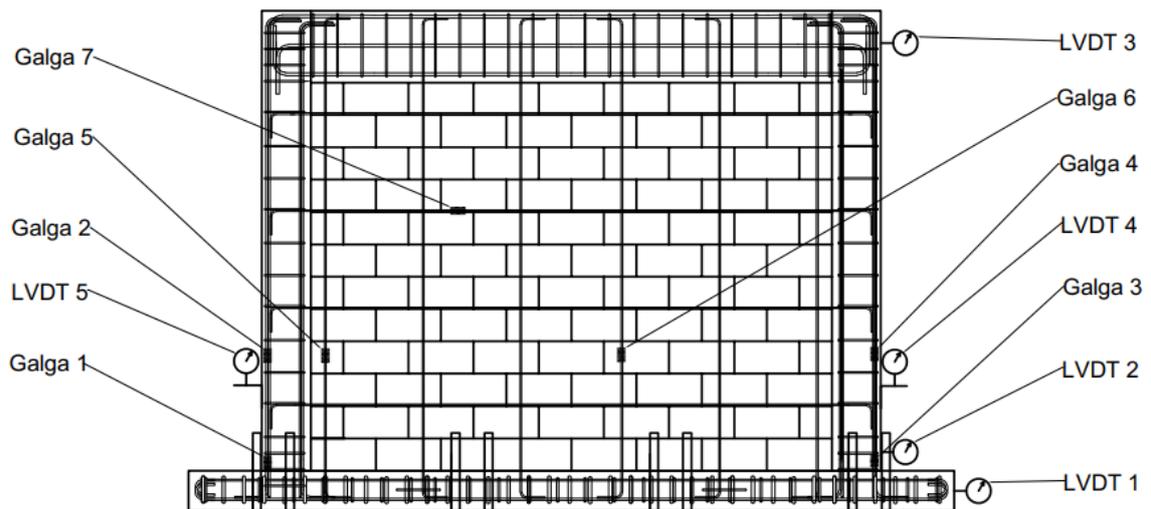


Figura 96. Instrumentación del Muro B.

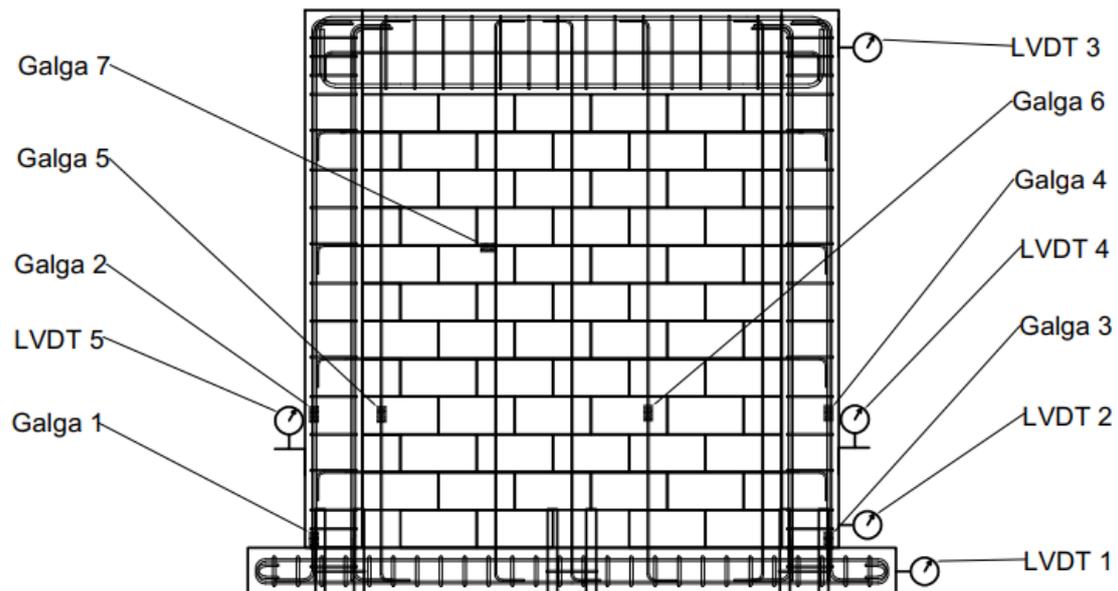


Figura 97. Instrumentación del Muro C.

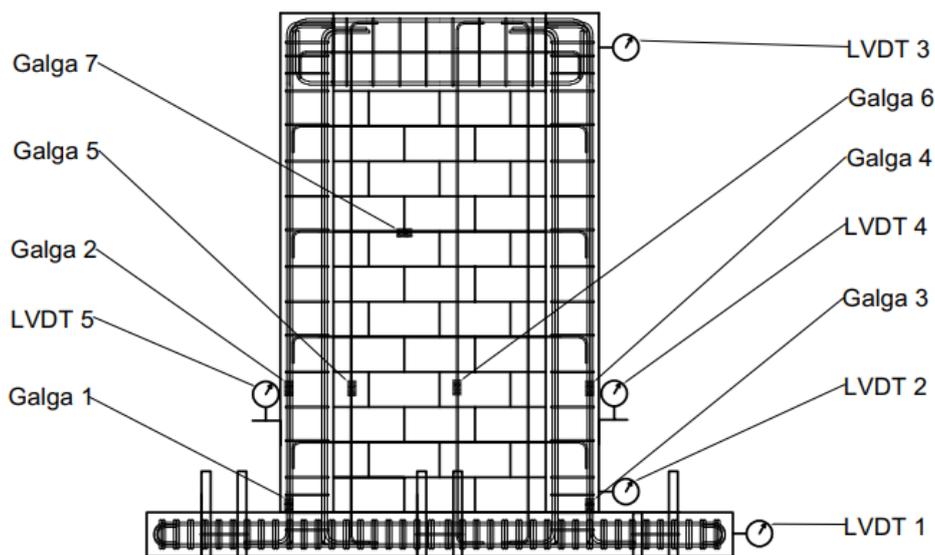


Figura 98. Instrumentación del Muro D.

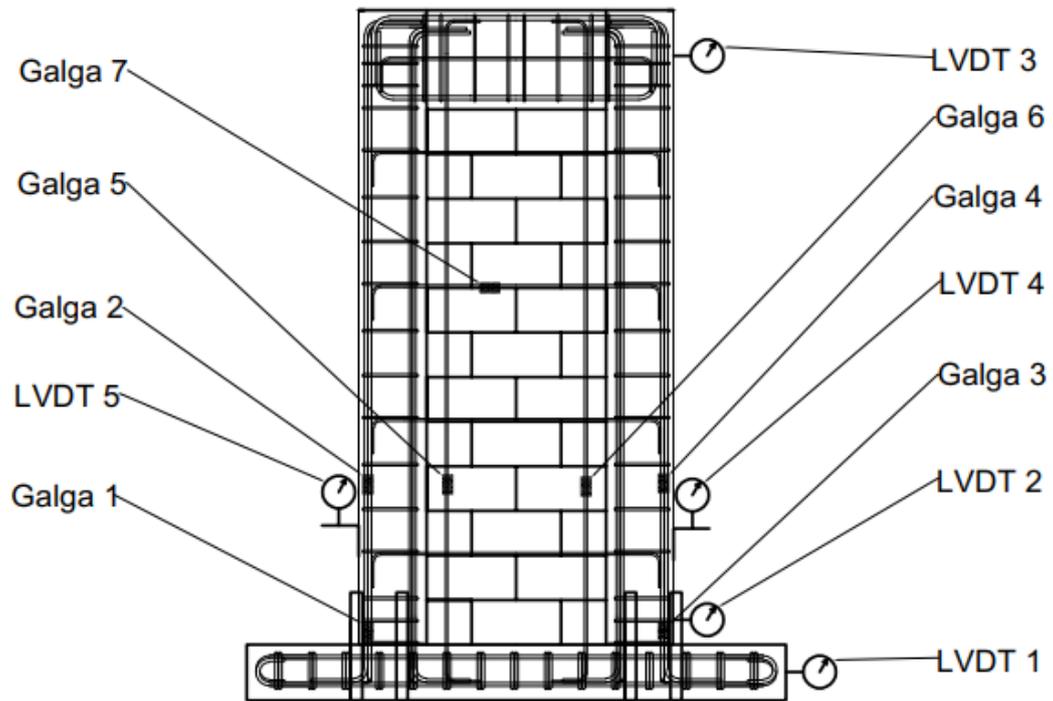


Figura 99. Instrumentación del Muro E.

8. Apéndice 3

8.1 Protocolos de carga

8.1.1 Muro A

Cuadro 25. Protocolo de carga del Muro A.

Serie	Ciclo	% Δ_m	Amplitud (mm)
1	1	1,25	0,81
2	1	2,50	1,63
3	1	5,00	3,25
4	2	7,50	4,88
5	2	10,00	6,50
6	2	20,00	13,00
7	2	40,00	26,00
8	2	60,00	39,00
9	2	80,00	52,00
10	2	100,00	65,00

8.1.2 Muro B

Cuadro 26. Protocolo de carga del Muro B.

Serie	Ciclo	% Δ_m	Amplitud (mm)
1	1	1,25	1,00
2	1	2,50	2,00
3	1	5,00	4,00
4	1	7,50	6,00
5	1	10,00	8,00
6	3	20,00	16,00
7	3	40,00	32,00
8	3	60,00	48,00
9	3	80,00	64,00
10	3	100,00	80,00
11	3	120,00	96,00
12	3	140,00	112,00

8.1.3 Muro C

Cuadro 27. Protocolo de carga del Muro C

Serie	Ciclo	% Δ_m	Amplitud (mm)
1	1	1,25	1,19
2	1	2,50	2,38
3	1	5,00	4,75
4	1	7,50	7,13
5	1	10,00	9,50
6	3	20,00	19,00
7	3	40,00	38,00
8	3	60,00	57,00
9	3	80,00	76,00
10	3	100,00	95,00
11	3	120,00	114,00
12	3	140,00	133,00

8.1.4 Muro D

Cuadro 28. Protocolo de carga del Muro D.

Serie	Ciclo	% Δ_m	Amplitud (mm)
1	1	1,25	1,06
2	1	2,50	2,13
3	1	5,00	4,25
4	1	7,50	6,38
5	1	10,00	8,50
6	3	20,00	17,00
7	3	40,00	34,00
8	3	60,00	51,00
9	3	80,00	68,00
10	3	100,00	85,00
11	3	120,00	102,00
12	3	140,00	119,00

8.1.5 Muro E

Cuadro 29. Protocolo de carga del Muro E.

Serie	Ciclo	%Δ_m	Amplitud (mm)
1	1	1,25	1,13
2	1	2,50	2,25
3	1	5,00	4,50
4	1	7,50	6,75
5	1	10,00	9,00
6	3	20,00	18,00
7	3	40,00	36,00
8	3	60,00	54,00
9	3	80,00	72,00
10	3	100,00	90,00
11	3	120,00	108,00
12	3	140,00	126,00

9. Apéndice 4

9.1 Valores máximos de cada ciclo de histéresis

9.1.1 Muro A

Cuadro 30. Valores extremos de cada ciclo de histéresis del Muro A.

Serie	Fuerza (T)	Deformación (mm)
1	5,918	0,699
	-7,508	-0,737
2	9,705	1,512
	-9,922	-1,304
3	14,217	2,629
	-13,865	-2,650
4	17,694	3,408
	-17,152	-3,626
	16,752	3,299
	-15,785	-3,555
5	22,006	4,199
	-20,852	-4,432
	20,714	4,076
	-19,553	-4,358
6	39,121	8,478
	-35,086	-9,661
	35,247	8,395
	-32,246	-9,649
7	50,249	19,109
	-45,106	-20,773
	41,166	19,086
	-39,187	-21,853
8	44,054	27,097
	-44,448	-34,192
	35,150	32,392
	-38,922	-34,549
9	42,275	44,675
	-41,021	-47,460
	32,592	44,673
	-34,500	-47,064
10	35,661	57,384
	-37,697	-59,488
	29,866	56,343
	-29,837	-60,534

9.1.2 Muro B

Cuadro 31. Valores extremos de cada ciclo de histéresis del Muro B.

Serie	Fuerza (T)	Deformación (mm)
1	4,255	0,956
	-4,361	-0,975
2	6,506	1,989
	-6,835	-1,981
3	9,916	3,899
	-10,044	-3,718
4	14,086	5,663
	-11,766	-4,861
5	18,321	7,148
	-14,207	-6,283
6	30,540	13,795
	-23,154	-13,336
	28,706	13,893
	-21,962	-13,210
	27,724	13,799
	-21,511	-13,188
7	38,407	21,284
	-36,222	-28,298
	33,358	28,873
	-32,558	-28,397
	31,178	28,987
	-30,851	-28,486
8	39,343	43,835
	-34,002	-44,324
	35,105	44,389
	-28,855	-44,537
	30,928	44,606
	-26,359	-44,652
9	33,891	54,481
	-28,362	-59,860
	21,186	60,604
	-22,692	-60,565
	18,083	61,003
	-17,762	-60,946
10	20,431	76,695
	-17,862	-76,794
	14,885	77,285

9.1.3 Muro C

Cuadro 32. Valores extremos de cada ciclo de histéresis del Muro C.

Serie	Fuerza (T)	Deformación (mm)
1	3,838	1,167
	-2,983	-1,119
2	5,789	2,242
	-4,758	-2,204
3	8,756	3,790
	-7,253	-4,121
4	11,591	5,510
	-9,741	-6,123
5	14,303	7,198
	-12,053	-8,136
6	21,444	13,296
	-21,032	-16,777
	20,104	13,088
	-20,005	-16,734
	19,274	12,935
	-19,512	-16,693
7	34,337	29,226
	-31,632	-30,871
	30,966	29,309
	-28,301	-35,003
	28,867	29,387
	-26,822	-35,086
8	32,563	47,899
	-29,332	-46,753
	27,453	48,074
	-22,859	-54,071
	22,005	48,665
	-17,972	-54,202
9	24,700	66,835
	-17,994	-72,935
	15,716	68,073
	-11,555	-73,741

9.1.4 Muro D

Cuadro 33. Valores extremos de cada ciclo de histéresis del Muro D.

Serie	Fuerza (T)	Deformación (mm)
1	1,297	0,581
	-1,091	-0,586
2	2,789	1,211
	-2,598	-1,231
3	3,549	2,044
	-4,471	-2,320
4	3,722	3,610
	-5,121	-3,094
5	4,225	4,429
	-5,433	-3,639
6	6,942	7,411
	-8,508	-7,086
	6,320	7,249
	-7,794	-6,790
	5,878	7,351
	-7,397	-6,534
7	13,953	17,260
	-16,001	-15,742
	13,247	17,007
	-15,230	-16,040
	12,740	17,202
	-14,876	-15,935
8	17,095	26,472
	-20,897	-25,645
	15,411	26,608
	-20,073	-25,618
	14,840	26,605
	-19,530	-25,540
9	16,361	33,381
	-22,729	-35,257
	13,320	36,884
	-21,684	-35,424
	13,301	36,539
	-21,065	-35,321
10	17,301	46,254
	-22,776	-45,148
	16,157	46,416
	-21,300	-45,283
	15,379	46,502
	-20,183	-45,332
11	16,880	56,219

Serie	Fuerza (T)	Deformación (mm)
11	-21,817	-55,159
	15,727	56,522
	-19,704	-55,264
	14,756	56,491
	-18,279	-55,140
12	15,210	66,156
	-18,209	-64,918
	12,457	62,647
	-14,141	-65,190
	10,202	64,632
	-11,120	-65,106

9.1.5 Muro E

Cuadro 34. Valores extremos de cada ciclo de histéresis del Muro E.

Serie	Fuerza (T)	Deformación (mm)
1	0,277	1,055
	-0,205	-0,941
2	0,432	2,150
	-0,359	-2,179
3	1,226	4,144
	-0,716	-4,519
4	1,459	4,943
	-1,475	-8,172
5	1,729	5,317
	-2,819	-11,947
6	7,522	11,973
	-5,555	-15,535
	7,639	12,787
	-5,294	-15,625
	7,339	12,641
	-5,099	-15,587
7	14,546	27,876
	-12,548	-31,669
	13,807	27,770
	-11,664	-31,676
	13,364	27,605
	-11,295	-31,684
8	16,778	44,450
	-15,555	-49,075
	15,712	44,425
	-14,894	-49,005
	15,129	44,435

Serie	Fuerza (T)	Deformación (mm)
8	-14,522	-49,145
9	17,062	61,792
	-16,342	-67,080
	15,815	61,288
	-15,626	-67,290
	15,326	61,739
	-15,054	-67,048
10	16,446	79,062
	-16,330	-84,627
	15,404	79,437
	-15,191	-84,923
	14,344	79,694
	-14,261	-85,040
11	15,766	95,777
	-15,313	-102,944
	13,778	98,002
	-13,713	-102,573
	12,696	98,098
	-11,513	-103,017
12	13,709	116,256
	-9,249	-100,103
	12,259	117,014
	-7,614	-121,604
	9,621	116,830
	-7,097	-121,123

10. Apéndice 5

10.1 Degradación de la rigidez

10.1.1 Muro A

Cuadro 35. Degradación de rigidez para el Muro A.

Rigidez secante (T/mm)	K_s/K_0 (%)	Deriva Lateral (%)
9,35	100,00	0,02
6,97	74,55	0,05
5,32	56,89	0,09
4,95	52,98	0,12
4,75	50,77	0,12
4,97	53,11	0,15
4,77	51,06	0,14
4,09	43,76	0,30
3,74	40,00	0,29
2,39	25,57	0,67
1,96	20,99	0,67
1,44	15,44	0,95
1,11	11,83	1,14
0,90	9,67	1,57
0,73	7,82	1,57
0,63	6,71	2,01
0,51	5,46	1,98

10.1.2 Muro B

Cuadro 36. Degradación de rigidez para el Muro B.

Rigidez secante (T/mm)	K_s/K_0 (%)	Deriva Lateral (%)
4,46	100,00	0,03
3,36	75,31	0,07
2,62	58,72	0,14
2,46	55,05	0,20
2,42	54,28	0,25
1,98	44,35	0,48
1,87	41,90	0,49
1,82	40,89	0,48
1,51	33,73	0,75
1,15	25,79	1,01
1,08	24,19	1,02
0,83	18,64	1,54
0,72	16,12	1,56
0,64	14,38	1,57

Rigidez secante (T/mm)	K_s/K_0 (%)	Deriva Lateral (%)
0,54	12,20	1,91
0,36	8,12	2,13
0,29	6,59	2,14
0,25	5,59	2,69

10.1.3 Muro C

Cuadro 37. Degradación de rigidez para el Muro C.

Rigidez secante (T/mm)	K_s/K_0 (%)	Deriva Lateral (%)
2,98	100,00	0,04
2,37	79,47	0,08
2,02	67,81	0,13
1,83	61,44	0,19
1,72	57,59	0,25
1,41	47,32	0,47
1,34	45,06	0,46
1,31	43,86	0,45
1,10	36,78	1,03
0,92	30,88	1,03
0,86	28,94	1,03
0,65	21,91	1,68
0,49	16,50	1,69
0,39	13,02	1,71
0,31	10,23	2,35
0,19	6,44	2,39

10.1.4 Muro D

Cuadro 38. Degradación de rigidez para el Muro D.

Rigidez secante (T/mm)	K_s/K_0 (%)	Deriva Lateral (%)
2,21	100,00	0,04
1,84	83,34	0,07
1,32	59,82	0,13
1,20	54,29	0,16
1,07	48,33	0,26
1,01	45,59	0,25
0,96	43,35	0,26
0,91	41,16	0,61
0,86	39,08	0,60
0,83	37,79	0,60
0,73	33,06	0,93
0,68	30,81	0,93

Rigidez secante (T/mm)	K_s/K_0 (%)	Deriva Lateral (%)
0,66	29,89	0,93
0,57	25,83	1,17
0,48	21,95	1,29
0,48	21,69	1,28
0,44	19,88	1,62
0,41	18,52	1,63
0,39	17,56	1,63
0,35	15,76	1,97
0,32	14,37	1,98
0,30	13,42	1,98
0,25	11,56	2,32
0,21	9,44	2,20
0,16	7,45	2,27

10.1.5 Muro E

Cuadro 39. Degradación de rigidez del Muro E.

Rigidez secante (T/mm)	K_s/K_0 (%)	Deriva Lateral (%)
0,48	100,00	0,42
0,46	95,75	0,45
0,44	92,69	0,44
0,46	95,71	0,98
0,43	90,13	0,97
0,42	87,49	0,97
0,35	72,72	1,56
0,33	68,91	1,56
0,32	66,65	1,56
0,26	54,52	2,17
0,24	51,44	2,15
0,24	49,62	2,17
0,20	42,12	2,77
0,19	39,15	2,79
0,17	36,53	2,80
0,16	32,90	3,36
0,14	28,83	3,44
0,12	25,32	3,44
0,11	22,32	4,08
0,08	17,52	4,11
0,07	14,78	4,10

11. Apéndice 6

11.1 Cálculos adicionales

11.1.1 Cortante por deslizamiento del Muro A

Según la Ecuación 7, propuesta por Paulay & Priestley (1992), la fuerza cortante que provoca cortante por deslizamiento se obtiene a partir de la componente horizontal de la fuerza del puntal:

$$\left(\frac{0,03 \cdot 197 \frac{kg}{cm^2}}{1 - 0,3 \cdot 0,48} \cdot \sqrt{(240 \text{ cm})^2 + (500 \text{ cm})^2} \cdot 15 \text{ cm} \right) \cdot \cos(25,641^\circ) = 51,78 \text{ T}$$

11.1.2 Cortante por deslizamiento del Muro B

Según la Ecuación 7:

$$\left(\frac{0,03 \cdot 197 \frac{kg}{cm^2}}{1 - 0,3 \cdot 0,75} \cdot \sqrt{(240 \text{ cm})^2 + (320 \text{ cm})^2} \cdot 15 \text{ cm} \right) \cdot \cos(36,87^\circ) = 36,60 \text{ T}$$

11.1.3 Cortante por deslizamiento del Muro C

Según la Ecuación 7:

$$\left(\frac{0,03 \cdot 197 \frac{kg}{cm^2}}{1 - 0,3 \cdot 1,09} \cdot \sqrt{(240 \text{ cm})^2 + (240 \text{ cm})^2} \cdot 15 \text{ cm} \right) \cdot \cos(45^\circ) = 30,33 \text{ T}$$