

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

**Verificación de la capacidad de muros de mampostería confinada reforzada  
al variar la relación de aspecto**

**Trabajo de Graduación**

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

**Tara Natalia Sánchez Vargas**

Director del proyecto de graduación:

**Dr.-Ing. Diego Hidalgo Leiva**

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Dr.-Ing. Diego Hidalgo Leiva

**Director**

Ing. Álvaro Poveda Vargas, M.Sc

**Asesor**

Ing. Alejandro Navas Carro, M.Sc

**Asesor**

Tara Natalia Sánchez Vargas

**Candidata**

**Fecha:** 2019, Diciembre, 13

**La suscrita, Tara Natalia Sánchez Vargas**, 1-1586-0951, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con numero de carne **B26268**, manifiesta que es autora del Proyecto Final de Graduación **Verificación de la capacidad de muros de mampostería confinada reforzada al variar la relación 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 Derecho Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada 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 información contenida en esta obra.

## **Dedicatoria**

A toda mi hermosa familia.

## **Agradecimientos**

A mi familia, en especial a mis papas, por siempre brindarme todo lo necesario para lograr cumplir mis objetivos, además, por su apoyo incondicional, paciencia y confianza.

A mis tías, por siempre estar pendientes de mí con su apoyo incondicional.

Al director de este proyecto el Dr.-Ing. Diego Hidalgo, por su apoyo durante todo el proceso, así como su paciencia y motivación.

A mis asesores, el Ing. Alejandro Navas y el Ing. Álvaro Poveda, por toda la ayuda y enseñanzas durante estos últimos años de carrera y por la guía suministrada para esta investigación.

A Ernesto por su aporte y guía en la etapa de construcción de este proyecto, además de su amabilidad y buen humor.

Al Lanname-UCR, por brindar las instalaciones para el desarrollo de este proyecto, así como al personal y a los técnicos que siempre fueron muy atentos. Gracias por todo.

Al CONICIT, por suministrar los fondos necesarios para el desarrollo de esta investigación, así como a las empresas, Pedregal, AMCO e INTACO por proveer y donar el material.

A Andrés, por el apoyo y la ayuda que juntos compartimos en este proyecto, además, a todos mis amigos, por la motivación y los buenos recuerdos.

## Índice de Contenido

Capítulo 1. Introducción .....	1
1.1 Generalidades .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos .....	3
1.3 Antecedentes teóricos y experimentales .....	3
1.4 Marco Teórico .....	7
1.4.1 Mampostería .....	7
1.4.2 Relación de aspecto.....	7
1.4.3 Capacidad a cortante de muros mampostería reforzada.....	8
1.4.4 Mampostería confinada .....	17
1.5 Alcances y limitaciones .....	21
1.6 Metodología .....	22
1.6.1 Fase teórica .....	23
1.6.2 Fase Experimental .....	23
1.6.3 Fase de análisis.....	24
Capítulo 2. Materiales.....	26
2.1 Cemento .....	26
2.2 Agregados.....	26
2.3 Unidades de mampostería .....	26
2.4 Mortero .....	28
2.5 Concreto .....	28
2.5.1 Cimentaciones .....	28
2.5.2 Elementos de confinamiento.....	29

2.5.3	Relleno de unidades de mampostería .....	29
2.6	Mampostería .....	30
2.7	Acero de refuerzo .....	30
Capítulo 3.	Características de los especímenes de prueba .....	32
3.1	Geometría de las paredes de mampostería confinada .....	32
3.2	Elementos de confinamiento .....	35
3.2.1	Columnas .....	35
3.2.2	Viga corona .....	36
3.3	Cimentaciones.....	37
3.4	Proceso constructivo .....	40
3.5	Instrumentación y montaje de los muros.....	45
Capítulo 4.	Capacidad nominal teórica de los especímenes según códigos CSCR-10/14, TMS 402/602-16 y Borrador CSCR .....	49
4.1	Capacidad nominal a cortante .....	49
4.1.1	Datos iniciales.....	49
4.1.2	Factores de reducción cortante .....	50
4.1.3	Relación de aspecto.....	50
4.1.4	Capacidad al considerar el paño de mampostería como elemento individual ( $V_{nPM}$ )	50
4.1.5	Capacidad al considerar toda la longitud del muro como mampostería ( $V_{nTM}$ )	52
4.1.6	Capacidad del paño de mampostería y los elementos de borde sumados individualmente ( $V_{nEB}$ ). .....	54
4.2	Resumen de capacidades calculadas con propiedades teóricas de los materiales ...	56
4.3	Capacidad en flexión .....	59
4.3.1	Factores de reducción para flexión .....	59
Capítulo 5.	Resultados experimentales.....	61

5.1	Capacidades nominales de los muros calculadas con propiedades experimentales de los materiales .....	61
5.1.1	Datos iniciales.....	61
5.1.2	Capacidad a cortante .....	62
5.1.3	Capacidad a flexión .....	65
5.2	Fallas de los especímenes.....	66
5.2.1	Muro RA.5 .....	66
5.2.2	Muro RA.75 .....	69
5.2.3	Muro RA1 .....	71
5.2.4	Muro RA1.5 .....	73
5.2.5	Muro RA2 .....	75
Capítulo 6.	Análisis de resultados .....	78
6.1	Descripción de la falla .....	78
6.1.1	Muro RA.5 .....	78
6.1.2	Muro RA.75 .....	78
6.1.3	Muro RA1 .....	79
6.1.4	Muro RA1.5 .....	80
6.1.5	Muro RA2 .....	81
6.2	Capacidad a cortante .....	82
6.2.1	Capacidad experimental de los muros.....	82
6.2.2	Comparación de capacidades nominales entre códigos y métodos .....	83
6.2.3	Comparación entre capacidades nominales y experimentales .....	86
Capítulo 7.	Conclusiones y recomendaciones .....	93
7.1	Conclusiones .....	93
7.2	Recomendaciones .....	95
Bibliografía.....		96



Apéndice 1. Valores de $V_{exp}/V_n$ .....	101
Apéndice 2. Cálculos adicionales.....	105
Apéndice 3. Valores de las envolventes .....	119
Apéndice 4. Protocolos de carga.....	122

## Índice de Figuras

Figura 1. Variación entre los valores de capacidad a cortante teóricos y experimentales,.....	4
Figura 2. $V_{exp}/V_n$ para diferentes relaciones de aspecto, (Ramírez et al. 2016) .....	6
Figura 3. Diagramas de fuerzas de corte y flexión en los muros estudiados.....	8
Figura 4. Modelo de cargas aplicadas a muros de corte de mampostería reforzada .....	9
Figura 5. Área utilizada para calcular la capacidad a cortante en muros parcialmente rellenos para el CSCR 10/14.....	11
Figura 6. Área de cortante $A_{nv}$ para mampostería parcialmente rellena a considerar en el cálculo de la capacidad $V_m$ en el TMS 402/602-16 y Borrador CSCR.....	12
Figura 7. Modelaje de resistencia a cortante debido al refuerzo (Klingner, 2010). .....	14
Figura 8. Máxima capacidad $V_n$ permitida según $M_u/V_{ud}$ .....	16
Figura 9. Modelo teórico del comportamiento de mampostería confinada.....	18
Figura 10. Cortante relativo tomado por las columnas en un muro de mampostería confinada (Salazar, 2013).....	19
Figura 11. Diagrama de flujo de la metodología a utilizar en el proyecto.....	22
Figura 12. Nomenclatura de dimensiones utilizadas para las unidades de mampostería .....	27
Figura 13. Curva esfuerzo vs deformación unitaria para una varilla No. 3.....	31
Figura 14. Vista lateral de muro RA.5.....	32
Figura 15. Vista lateral de muro RA.75. ....	33
Figura 16. Vista lateral de muro RA.1.....	33
Figura 17. Vista lateral de muro RA1.5. ....	34
Figura 18. Vista lateral de muro RA2.....	34
Figura 19. Detalle de columna en muros RA.5, RA.75 y RA1. ....	35
Figura 20. Detalle de columna en muros RA1.5 y RA2.....	35
Figura 21. Detalle de viga corona muro RA.5. ....	37
Figura 22. Detalle de viga corona muros RA.75, RA1, RA1.5 y RA2. ....	37
Figura 23. Sección transversal de la cimentación del muro RA.5. ....	38
Figura 24. Sección transversal de la cimentación del muro RA.75.....	38
Figura 25. Sección transversal de la cimentación del muro RA.1. ....	39
Figura 26. Sección transversal de la cimentación del muro RA.1.5.....	39
Figura 27. Sección transversal de la cimentación del muro RA.2. ....	40
Figura 28. Armadura de cimentación en proceso de construcción.....	40

Figura 29. Colocación de pasantes de PVC en armadura de cimentación.....	41
Figura 30. Galgas en refuerzo vertical. ....	41
Figura 31. Encofrado de armadura de cimentación. ....	41
Figura 32. Colocado de concreto de las cimentaciones.....	42
Figura 33. Cimentaciones coladas.....	42
Figura 34. Primeras hiladas de bloques colocadas. ....	42
Figura 35. Paño de mampostería completado sin relleno.....	43
Figura 36. Ventanas de inspección para el colado de altura. ....	43
Figura 37. Equipo Monomix para el colado del concreto de relleno.....	43
Figura 38. Prueba de flujo del concreto CRC autocompactable.....	43
Figura 39. Llenado de celdas con acero vertical.....	44
Figura 40. Encofrado de columnas y vigas. ....	44
Figura 41. Vigas y columnas coladas.....	45
Figura 42. Muros finalizados.....	45
Figura 43. Instrumentación utilizada en todos los muros.....	46
Figura 44. Montaje utilizado para la falla de los especímenes. ....	47
Figura 45. Montaje muro RA.5.....	47
Figura 46. Anclaje de gato hidráulico a viga de carga. ....	48
Figura 47. Diagrama de interaccion del Muro RA.5. ....	59
Figura 48. Muro RA.5 agrietado desplazamiento $\pm 52$ mm. ....	67
Figura 49. Condición final Muro RA.5. ....	67
Figura 50. Condición final del nudo Muro RA.5.....	68
Figura 51. Curva de histéresis del muro RA.5.....	68
Figura 52. Muro RA.75 agrietado al alcanzar la capacidad máxima $\pm 48$ mm.....	69
Figura 53. Estado final del Muro RA.75.....	69
Figura 54. Estado final del nudo Muro RA.75. ....	70
Figura 55. Curva de histéresis del muro RA.75.....	70
Figura 56. Muro RA1 agrietado desplazamiento $\pm 38$ mm. ....	71
Figura 57. Estado final muro RA1. ....	72
Figura 58. Grietas en la base del muro RA1 .....	72
Figura 59. Estado final del nudo RA1. ....	72
Figura 60. Curva de histéresis del muro RA1.....	73

Figura 61. Agrietamiento Muro RA1.5 para el desplazamiento $\pm 51$ mm. ....	74
Figura 62. Estado final del Muro RA1.5.....	74
Figura 63. Estado final de la base de la columna Muro RA1.5. ....	74
Figura 64. Curva de histéresis muro RA1.5. ....	75
Figura 65. Muro RA2 agrietado al alcanzar a la capacidad máxima. ....	76
Figura 66. Estado final Muro RA2.....	76
Figura 67. Estado final de base de la columna en Muro RA2. ....	76
Figura 68. Curva de histéresis muro RA2.....	77
Figura 69. Capacidad experimental máxima de los muros .....	82
Figura 70. Capacidad experimental máxima por metro lineal de los muros .....	83
Figura 71. Porcentaje de diferencia de las capacidades calculadas según el Borrador CSCR con respecto al CSCR 10/14.....	84
Figura 72. Porcentaje de diferencia de las capacidades calculadas según el TMS 402/602-16 con respecto al CSCR 10/14.....	84
Figura 73. Porcentaje de diferencia de las capacidades calculadas el TMS 402/602-16 con respecto al Borrador CSCR.....	85
Figura 74. $V_{exp}/V_n$ para el caso de $V_{nPM}$ , las líneas continuas representan $V_n$ calculadas con las propiedades experimentales de los materiales, mientras que las discontinuas representan las capacidades con las propiedades teóricas de los materiales.....	87
Figura 75. $V_{exp}/V_n$ para el caso de $V_{nTM}$ .....	88
Figura 76. $V_{exp}/V_n$ para el caso de $V_{nEB}$ . ....	89
Figura 77. $V_{exp}/\phi V_n$ para el caso de $V_{nPM}$ .....	90
Figura 78. $V_{exp}/\phi V_n$ para el caso de $V_{nTM}$ .....	91
Figura 79. $V_{exp}/\phi V_n$ para el caso de $V_{nEB}$ .....	92
Figura 80. Sección transformada para el cálculo del diagrama de interacción. ....	109
Figura 81. Diagrama de interacción del muro RA.75 calculado con propiedades teóricas de los materiales.....	112
Figura 82. Diagrama de interacción del muro RA1 calculado con propiedades teóricas de los materiales.....	113
Figura 83. Diagrama de interacción del muro RA.1.5 calculado con propiedades teóricas de los materiales.....	113

Figura 84. Diagrama de interacción del muro RA2 calculado con propiedades teóricas de los materiales.....	114
Figura 85. Diagrama de interacción calculado con propiedades experimentales RA.5. ....	115
Figura 86. Diagrama de interacción calculado con propiedades experimentales RA.75.....	116
Figura 87. Diagrama de interacción con capacidades obtenidas en laboratorio muro RA1. .	116
Figura 88. Diagrama de interacción con capacidades obtenidas en laboratorio muro RA1.5. .....	117
Figura 89. Diagrama de interacción con capacidades obtenidas en laboratorio muro RA2. .	117

## Índice de Cuadros

Cuadro 1. Capacidades a cortante promedio experimentales de los sistemas, (Lara, 1996)..	5
Cuadro 2. Factores de reducción para mampostería confinada según el CSCR 10/14, el Borrador CSCR y el TMS 402/602-16. ....	10
Cuadro 3. Ecuaciones para determinar la capacidad a cortante de mampostería reforzada según el CSCR 10/14, Borrador CSCR y el TMS 402/602-16. ....	15
Cuadro 4. Límites de capacidad nominal a cortante de mampostería reforzada.....	16
Cuadro 5. Ensayos necesarios para caracterizar los materiales .....	23
Cuadro 6. Dimensiones de las unidades de mampostería .....	27
Cuadro 7. Resistencia a la compresión de las unidades de mampostería. ....	27
Cuadro 8. Resistencia a la compresión del mortero de pega. ....	28
Cuadro 9. Resistencia a la compresión del concreto de las cimentaciones. ....	29
Cuadro 10. Resistencia a la compresión del concreto de los elementos de confinamiento. ...	29
Cuadro 11. Resistencia a la compresión del concreto de relleno.....	30
Cuadro 12. Resistencia a la compresión de la mampostería a los 28 días. ....	30
Cuadro 13. Esfuerzos de cedencia y ultimo para el acero de refuerzo. ....	31
Cuadro 14. Códigos de identificación de los muros. ....	32
Cuadro 15. Proporción de refuerzo vertical y horizontal en el paño de mampostería. ....	34
Cuadro 16. Proporción de acero de refuerzo en una columna. ....	36
Cuadro 17. Proporción de acero en los muros. ....	36
Cuadro 18. $MuVud$ a utilizar en el cálculo de capacidad. ....	50
Cuadro 19. Dimensiones para el cálculo $Anv$ con propiedades teóricas de los materiales.....	51
Cuadro 20. Resultados de capacidades nominales teóricas. ....	56

Cuadro 21. Resultados de capacidades nominales teóricas al aplicar el factor de reducción.	57
Cuadro 22. Porcentaje de diferencia de la capacidad calculada según el Borrador CSCR con respecto al CSCR 10/14.	58
Cuadro 23. Porcentaje de diferencia de la capacidad calculada según el TMS 402/602-16 con respecto al CSCR 10/14.	58
Cuadro 24. Porcentaje de diferencia de la capacidad calculada según el TMS 402/602-16 con respecto al Borrador CSCR.	58
Cuadro 25. Capacidad Mn y Vn flexión de los muros.	60
Cuadro 26. Dimensiones para el cálculo $Anv$ con mediciones reales de los bloques de mampostería.	62
Cuadro 27. Capacidad nominal a cortante obtenida con las propiedades reales de los materiales.	62
Cuadro 28. Capacidad nominal a cortante obtenida con las propiedades reales de los materiales al aplicar los factores de reducción.	63
Cuadro 29. Porcentaje de diferencia de la capacidad calculada según el Borrador CSCR con respecto al CSCR 10/14.	64
Cuadro 30. Porcentaje de diferencia de la capacidad calculada según el TMS 402/602-16 con respecto al CSCR 10/14.	64
Cuadro 31. Porcentaje de diferencia de la capacidad calculada según el TMS 402/602-16 con respecto al Borrador CSCR.	64
Cuadro 32. Variación de resistencia al cortante al considerar la resistencia teórica y la experimental de los materiales.	65
Cuadro 33. Capacidad Mn y Vn flexión de los muros calculadas con propiedades experimentales.	66
Cuadro 34. Carga experimental máxima de los muros.	77
Cuadro 35. Valores de $V_{exp}/V_n$ para las capacidades calculadas con las propiedades teóricas de los materiales.	101
Cuadro 36. Valores de $V_{exp}/\phi V_n$ para las capacidades calculadas con las propiedades teóricas de los materiales.	102
Cuadro 37. Valores de $V_{exp}/V_n$ para las capacidades calculadas con las propiedades experimentales de los materiales.	103

Cuadro 38. Valores de $V_{exp}/\phi V_n$ para las capacidades calculadas con las propiedades experimentales de los materiales.....	104
Cuadro 39. Capacidades nominales límite calculadas con las capacidades teóricas de los materiales.....	106
Cuadro 40. Capacidades nominales límite calculadas con las capacidades experimentales de los materiales.....	107
Cuadro 41. Capacidad en cortante en la base con propiedades teóricas.....	107
Cuadro 42. Capacidad en cortante en la base con propiedades experimentales de los materiales.....	107
Cuadro 43. Capacidad a flexión calculada con propiedades teóricas. ....	114
Cuadro 44. Capacidad a flexión calculada con propiedades experimentales de los materiales. ....	118
Cuadro 45. Puntos de la envolvente para el muro RA.5.....	119
Cuadro 46. Puntos de la envolvente del muro RA.75.....	119
Cuadro 47. Puntos de la envolvente para el muro RA1.....	120
Cuadro 48. Puntos de la envolvente para el muro RA1.5.....	120
Cuadro 49. Puntos de la envolvente del muro RA2. ....	121
Cuadro 50. Protocolo de carga muro RA.5. ....	122
Cuadro 51. Protocolo de carga muro RA.75. ....	122
Cuadro 52. Protocolo de carga muro RA.1. ....	122
Cuadro 53. Protocolo de carga muro RA.1.5. ....	123
Cuadro 54. Protocolo de carga muro RA.2. ....	123

## Índice de abreviaturas

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

$A_c$  = área de la sección del muro en compresión, cm<sup>2</sup>.

$A_g$  = área gruesa del muro, cm<sup>2</sup>.

$A_s$  = área del acero longitudinal en elementos sometidos a flexión, cm<sup>2</sup>.

$A_{s\ col}$  = área del acero longitudinal en las columnas, cm<sup>2</sup>.

$A_v$  = área del acero de aros en las columnas, cm<sup>2</sup>.

$A_{nv}$  = área de cortante del muro, cm<sup>2</sup>.

$A_{nc}$  = área neta de la sección entre el eje neutro y la fibra extrema en compresión calculado para la resistencia nominal de la sección  $M_n$ , cm<sup>2</sup>.

$A_{sh}$  = área del acero horizontal en la mampostería, cm<sup>2</sup>.

$A_{sp}$  = área de acero dentro del área neta en cortante,  $A_{nv}$  perpendicular al plano horizontal de cortante, cm<sup>2</sup>.

$A_{sv}$  = área del acero vertical en la mampostería, cm<sup>2</sup>.

$b$  = ancho del muro, cm.

$b_c$  = ancho de la columna, cm.

$b_w$  = ancho efectivo de la mampostería, cm.

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

$d$  = distancia comprendida entre la fibra extrema en compresión y el centroide del acero en tracción, cm. Aplica para el CSCR 10/14.

$d_{col}$  = distancia de la fibra extrema en compresión de la columna a la capa de acero más alejada, cm.

$d_v$  = distancia comprendida entre la fibra extrema en compresión y el centroide del acero en tracción, cm. Aplica para el Borrado CSCR y TMS 402/602-16.

$E_c$  = módulo de elasticidad del concreto, kg/cm<sup>2</sup>.



$E_m$  = módulo de elasticidad de la mampostería, kg/cm<sup>2</sup>.

$F_c$  = fuerza de compresión en el muro, kg.

$f'_c$  = resistencia a la compresión a los 28 días del concreto, kg/cm<sup>2</sup>.

$f'_m$  = resistencia a la compresión de la mampostería a los 28 días, kg/cm<sup>2</sup>.

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

$f_y$  = esfuerzo de fluencia del acero, kg/cm<sup>2</sup>.

$f_{yt}$  = esfuerzo de fluencia del acero de los aros en las columnas, kg/cm<sup>2</sup>.

$h$  = altura del paño de mampostería y la viga corona del muro, cm.

$L$  = largo del paño y las columnas, cm.

$L_m$  = largo del paño de mampostería, cm.

$l_c$  = longitud de una celda de la unidad 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.

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

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

$S_v$  = espaciamiento entre el acero vertical de la mampostería, cm.

$t_{fe}$  = Espesor de la cara externa de la unidad, cm.

$t_{we}$  = Espesor del alma externa de la unidad, cm.

$t_{wi}$  = Espesor del alma interna de la unidad, cm.

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

$V_c$  = capacidad de cortante del concreto, kg.

$V_m$  = capacidad a cortante de la mampostería, kg.

$V_{nm}$  = capacidad a cortante de la mampostería, kg. Aplica para el TMS 402/602-16

$V_n$  = capacidad nominal a cortante, kg.

$V_{nf}$  = capacidad nominal a cortante por fricción, kg.

$V_s$  = capacidad en cortante del acero de refuerzo, kg.

$V_u$  = Cortante último para la sección de máximo esfuerzo del muro, kg.

$\varepsilon$  = deformación unitaria de la sección, mm/mm.

$\varepsilon_c$  = deformación unitaria última del concreto, mm/mm.

$\varepsilon_y$  = deformación unitaria de cedencia del acero de refuerzo, mm/mm.

$\gamma_g$  = factor para paredes de mampostería parcialmente rellenas.

$\phi$  = factor de reducción.

$\mu$  = coeficiente de fricción.

Sánchez Vargas, Tara Natalia

Verificación de la capacidad de muros de mampostería confinada reforzada al variar la relación de aspecto.

Proyecto de Graduación — Ingeniería Civil — San José. C.R.:

T. N. Sánchez V., 2019

xix, 101, [25]h, ils. col. — 62 refs.

### **Resumen**

Este proyecto busca verificar la capacidad nominal a cortante de muros de mampostería confinada reforzada para relaciones de aspecto de la pared de aproximadamente: 0.5, 0.75, 1.0, 1.5 y 2, al aplicar tres diferentes normativas: el Código Sísmico de Costa Rica 2010, Revisión 2014 (CSCR 10/14), el Código de Construcción, Requerimientos y Especificaciones para Estructuras de Mampostería de la Sociedad de Mampostería (TMS 402/602-16) y el Borrador al futuro Código Sísmico de Costa Rica. El objetivo es determinar si existe alguna relación entre el cálculo de capacidad nominal de la mampostería confinada reforzada y la relación de aspecto del muro.

Para esto, se diseñan y construyen cinco muros de mampostería confinada reforzada a escala natural con cinco relaciones de aspecto diferentes. Se procede a determinar su capacidad máxima experimental por medio de la aplicación de una carga cíclica, para luego comparar estos valores con los calculados teóricamente por medio de las tres normas mencionadas.

Como resultado se pudo demostrar que al utilizar las tres normas de diseño estudiadas, se obtienen capacidades nominales más conservadoras al aumentar la relación de aspecto del muro, por otro lado, las propuestas planteadas en el Borrador del Código Sísmico de Costa Rica se probaron como adecuadas ya que produjeron capacidades nominales conservadoras en todas las relaciones de aspecto estudiadas.

MAMPOSTERÍA CONFINADA REFORZADA; RELACIÓN DE ASPECTO; CSCR 10/14; TMS 402/602-16; BORRADOR CÓDIGO SÍSMICO DE COSTA RICA; CAPACIDAD NOMINAL.

Dr.-Ing. Diego Hidalgo Leiva

Escuela de Ingeniería Civil

## Capítulo 1.Introducción

### 1.1 Generalidades

El sistema constructivo a base de mampostería es uno de los más utilizados para viviendas y edificaciones de pocos niveles en Costa Rica. De manera que existen muros de diferentes relaciones de aspecto (altura/largo) en todo tipo de construcciones. En el país la mampostería más utilizada es la que se conoce como mampostería confinada reforzada, que como lo señala su nombre consiste en un paño de mampostería confinado con elementos de concreto. Si no posee estos elementos confinantes al sistema se le llama mampostería integral.

En Costa Rica los lineamientos de diseño, construcción y análisis de edificaciones se encuentran estipulados en el Código Sísmico de Costa Rica 2010, Revisión 2014 (CSCR 10/14) (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, 2016). En este existe el Capítulo 9 *Requisitos para mampostería estructural*, donde se establecen todos aspectos relacionados con la construcción y diseño de mampostería, por otro lado, en la Sección 9.9 *Muros de mampostería confinada*, se plantean regulaciones para los elementos confinantes y el paño de mampostería, sin embargo, no estipula métodos de diseño diferidos a la mampostería integral con respecto al cálculo de la capacidad nominal a cortante de un muro confinado.

Muchos aspectos del Capítulo 9 del CSCR 10/14 están basados en el código Requisitos para estructuras de mampostería en edificaciones (TMS 402-08/ACI 530-08/ASCE 5-08) (Masonry Estandar Joint Comitte, 2008), que fue el código de diseño y construcción de mampostería utilizado en los Estados Unidos. Sin embargo, existe una versión actualizada el cual se conoce como el Código de Construcción, Requerimientos y Especificaciones para Estructuras de Mampostería (TMS 402/602-16) (The Masonry Society, 2016). Este documento es producido por la Sociedad de Mampostería (TMS por sus siglas en inglés), que conforma el comité TMS 402/602 que da mantenimiento a el *Código de requerimientos de construcción para estructuras de mampostería* (TMS 402), las *Especificaciones para estructuras de mampostería* (TMS 602) y sus *Comentarios* (TMS, 2016).

Existe en el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica (CFIA) una Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico, este comité vela por que las estipulaciones de diseño en el país se mantengan actualizados en base a publicaciones nacionales e internacionales. Esta comisión ha desarrollado una propuesta de un borrador para

la futura versión del Código Sísmico de Costa Rica, donde, basados en el TMS 402/602-16, se aplicaron cambios con respecto al cálculo de la capacidad nominal en cortante de la mampostería estructural.

Aunque la determinación de la capacidad de un muro de mampostería reforzada con diferentes relaciones de aspecto ha sido estudiada a fondo en diferentes países como Estados Unidos (Shing et al, (1990a); Shing et al, (1990b)), Nueva Zelanda (Voon & Ingham , 2006), México (NTCM, 2017) y Chile (Ramírez et al, 2016), la mampostería confinada como la utilizada en nuestro país no ha sido verificada debido a sus diferencias con los sistemas constructivos de estos países.

En el presente proyecto se busca determinar si el cálculo de capacidad nominal se ve afectado por la relación de aspecto, además del método de consideración de los elementos de confinamiento y así verificar cual es el más adecuado por medio de la comparación entre los valores teóricos con los obtenidos por medio de la experimentación con muros a escala natural.

Por otro lado, comparar la resistencia nominal calculada no solo con el CSCR 10/14, sino que también con el TMS 402/602-16 y lo estipulado en el borrador del Código Sísmico de Costa Rica 2020 (Borrador CSCR) permitirá comprobar si las propuestas estipuladas por la Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico, son adecuadas para diferentes relaciones de aspecto según los resultados experimentales.

Al diseñar y construir muros a escala natural, se podrá verificar si la resistencia experimental de la mampostería difiere de la calculada teóricamente y así comprobar la exactitud de los diferentes modelos de predicción de resistencia nominal a cortante.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Verificar la resistencia nominal de muros de mampostería confinada reforzada al variar la relación de aspecto, por medio de los modelos de predicción del Código Sísmico de Costa Rica Revisión 2014 (CSCR 10/14), lo propuesto por la Sociedad de Mampostería (TMS) en el código TMS 402/602-16 y la propuesta del Borrador del futuro Código Sísmico de Costa Rica.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- a) Diseñar, construir y probar experimentalmente cinco paredes de mampostería confinada reforzada según lo estipulado en el Código Sísmico de Costa Rica 2010/2014, con relaciones de altura entre largo ( $h/l$ ) de: 0,5, 0,75, 1,0, 1,5 y 2,0 aproximadamente.
- a) Determinar la capacidad teórica de los muros de mampostería confinada reforzada por medio de los modelos descritos en las normas de diseño CSCR 10/14 (CFIA, 2016), Borrador CSCR (CFIA) y la norma estadounidense TMS 402/602-16 (TMS, 2016).
- b) Comparar diferentes modelos de predicción de resistencia nominal para mampostería confinada al variar la relación de aspecto.
- c) Comparar los resultados experimentales de resistencia con las capacidades nominales teóricas calculadas.
- d) Determinar si existe una relación entre la capacidad nominal de los muros de mampostería confinada y la relación de aspecto de la pared.

### 1.3 Antecedentes teóricos y experimentales

En Costa Rica por medio del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (Lanamme-UCR), se han realizado investigaciones sobre la capacidad ante carga lateral de muros de mampostería reforzada a escala natural.

Una de las investigaciones más recientes la desarrolló Salazar (2013) en su tesis de posgrado "Consideraciones sobre el comportamiento a cortante de los elementos de borde en los muros de mampostería confinados por marcos de concreto", en esta investigación fueron construidos cuatro muros de mampostería confinada reforzada, dos fueron fallados por medio de una carga lateral monotónica y los restantes con una carga lateral cíclica. La relación de aspecto promedio de los muros fue de 0,92. Salazar (2013) calculó la capacidad nominal teórica a cortante con lo indicado en el Código Sísmico de Costa Rica 2010 (CFIA, 2011). Para tomar en cuenta el marco de concreto determinó la resistencia de tres maneras diferentes:

- Capacidad del paño de mampostería como un elemento individual. En este caso se determinó la capacidad del paño y se ignoró cualquier contribución de las columnas de concreto.
- Capacidad del paño de mampostería suponiendo todo el muro en mampostería. En este caso se tomaron en cuenta las columnas de concreto como mampostería.

- Capacidad del paño de mampostería y los elementos de borde sumados individualmente.

La variación entre estos valores de capacidad teóricos y los obtenidos experimentales se observan en la Figura 1. Se logró concluir que solo utilizar el paño de mampostería es la opción más conservadora, mientras que sumar las capacidades de la mampostería y el marco de concreto sobreestima la resistencia en promedio un 31%.

Muro	Variación valores teóricos y experimentales		
	Solo paño de mampostería	Todo mampostería	Paño de mampostería y marco de concreto
M1	-43,69%	-15,77%	34,40%
M2	-59,84%	-38,50%	14,13%
M3	-42,69%	-11,23%	47,26%
M4	-55,76%	-31,66%	29,66%
Promedio	-50,5%	-24,3%	31,4%

Figura 1. Variación entre los valores de capacidad a cortante teóricos y experimentales, (Salazar, 2013).

Navas y Segura (2012) desarrollaron la investigación "Comportamiento en cortante de muros de mampostería con el refuerzo embebido en concreto colocado en las sisas de los bloques" en la que se estudió el comportamiento de muros integrales de mampostería con una relación de aspecto de 0,75. Se comparó la resistencia nominal obtenida por medio del CSCR 2002 (CFIA, 2003) y el CSCR 2010 (CFIA, 2011) con la determinada experimentalmente y se logró concluir que ambos cálculos teóricos tienden a ser muy conservadores.

Acón (1999) en su Trabajo Final de Graduación denominado "Capacidad soportante de paredes de mampostería confinada ante cargas laterales" construyó cuatro paredes de mampostería confinada de 3 m de ancho por 3,4 m de alto con una viga medianera y una viga corona. Se determinó el modo de falla y comportamiento de las paredes de mampostería confinada ante cargas laterales, además de la influencia de la calidad constructiva en la resistencia de la mampostería.

Se logró concluir que las fallas en los muros se produjeron por flexión en las columnas inferiores y por cortante a lo largo del paño de mampostería. La capacidad teórica estimada fue calculada con el Código Sísmico de Costa Rica 1986 (CSCR 1986), donde la capacidad nominal teórica fue 23,04 % más baja que lo obtenido experimentalmente, además, en este caso se consideró

la capacidad total del muro como la suma de resistencias del paño de mampostería y las columnas de concreto, ya que esto era lo estipulado en el CSCR 1986.

De igual manera Hernández (1998) en su Trabajo Final de Graduación "Paredes de mampostería confinada sometidas a carga estática y cíclica" elaboró tres especímenes de mampostería confinada a escala natural con una relación de altura entre la distancia comprendida desde la fibra extrema en compresión y el centroide del acero en tracción ( $h/d$ ) de uno, en este caso los muros fueron sometidos a carga cíclica y estática.

Se concluyó que los muros presentaron fallas principalmente a causa del cortante, además, se comprobó que los muros resisten más cuando se aplica la carga de forma carga monotónica que cuando es de forma cíclica. En este caso la capacidad teórica estimada fue calculada con el CSCR 1986 y a diferencia del trabajo de Acón (1999), la resistencia nominal teórica no fue alcanzada por los especímenes, obteniendo un valor promedio de 70,4% de esta cuando fue utilizada una carga cíclica.

Sobre la posibilidad de sumar aritméticamente la capacidad del paño de mampostería con la de los elementos confinantes, Lara (1996) en su trabajo final de graduación "Modelado a Escala Reducida de Paredes de Mampostería Confinada Sometidas a Cortante", construyó tres muros confinados, tres sin confinar y dos marcos de concreto a escala reducida para ser fallados por separado y así determinar si la suma de las capacidades de ambos sistemas se aproximaba a la del muro de mampostería confinada.

Experimentalmente se obtuvieron los resultados que se observan en el Cuadro 1, donde se demostró que la suma de la capacidad del marco de concreto con el paño de mampostería no resultaba en la capacidad total del muro confinado. Esto discrepaba con lo estipulado en el Código Sísmico de Costa Rica 1986 que era el vigente en el momento de la investigación.

Cuadro 1. Capacidades a cortante promedio experimentales de los sistemas, (Lara, 1996).

<b>Sistema</b>	<b>Capacidad a cortante experimental ultimo promedio (kg)</b>
<b>Marco de concreto</b>	246
<b>Paño de mampostería</b>	1051
<b>Muro de mampostería confinado</b>	2161



A nivel internacional Voon & Ingham (2006) realizaron una investigación con muros de corte de mampostería con diferentes relación de aspecto ante carga axial y lateral, donde se compararon los resultados experimentales con el modelo de predicción de capacidad nominal de la norma neozelandesa NZS 4230:1990. Construyeron 10 muros de mampostería, 8 completamente rellenos y 2 parcialmente rellenos, concluyendo que la capacidad nominal se aproxima de manera más precisa para los muros de relación de aspecto menor o igual a uno, pero subestima la capacidad del muro con la relación de aspecto mayor de dos, se concluyó además que al aumentar la relación de aspecto la resistencia al cortante tiende a disminuir.

Por otro lado, Ramírez et al. (2016) desarrolló un proyecto con diez muros de mampostería integral con relaciones de aspecto de 0,44, 0,97 y 1,95. En esta investigación se utilizó la fórmula propuesta por el Comité Conjunto de Normas de Mampostería (MSJC) para predecir la capacidad en cortante de las 10 paredes estudiadas.

En la Figura 2 se observa los resultados del análisis de resistencia  $V_{exp}/V_n$  para los muros estudiados. Las paredes con mayor relación de aspecto (Paredes MBH8, MBH9 y MBH10) poseen los valores de capacidad nominal más conservadores mientras que los muros de relación 0,44 (MH5, MH6 y MH7) poseen capacidades nominales más cercanas a la capacidad máxima obtenida, por último, los muros con relación de aspecto de 0,97 (MH1, MH2, MH3, MH4) obtuvieron cargas máximas experimentales entre un 25% y 50% mayores a la capacidad nominal calculada.

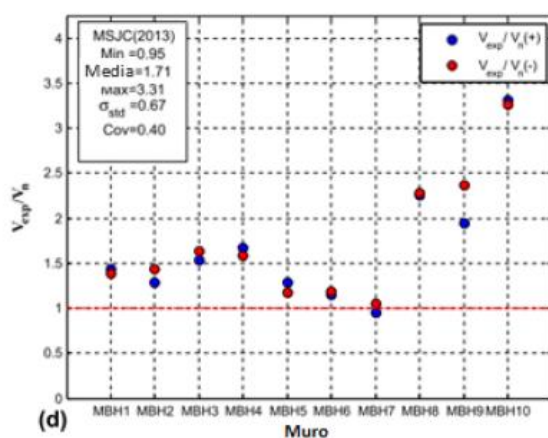


Figura 2.  $V_{exp}/V_n$  para diferentes relaciones de aspecto, (Ramírez et al. 2016)

La investigación de Minaie et al. (2010) estudió paredes de mampostería parcialmente rellenas, donde se construyeron cuatro especímenes con diferente relación de  $h/l$ , y además, se

investigó sobre muros utilizados en otros proyectos similares. Se concluyó que al variar la relación de aspecto la fórmula de la MSJC para determinar la capacidad a cortante, produce valores menos conservadores cuando:

- El área de cortante de la pared aumenta.
- La relación de aspecto de la pared es menor que uno.
- El espaciamiento del acero horizontal y vertical aumenta.

## **1.4 Marco Teórico**

### **1.4.1 Mampostería**

El sistema constructivo a base de mampostería es definido en el CSCR 10/14 (CFIA, 2016) como un componente estructural construido mediante mampuestos o elementos colocados en un determinado orden y unidos por medio de un mortero. La mampostería es reforzada al colocarle integralmente acero vertical y horizontal, si además los bloques son confinados perimetralmente por elementos de concreto armado, acero estructural o madera, se conoce como mampostería confinada reforzada (Poveda, 2018).

### **1.4.2 Relación de aspecto**

La relación de aspecto se refiere a la proporción que existe entre de la altura ( $h$ ) de la pared con respecto a su largo ( $l$ ) y se calculada al dividir estas dos dimensiones ( $h/l$ ). De esta manera se puede inferir que muros con valores de  $h/l$  cercanos a uno corresponden a paredes con formas cuadradas, mientras que al disminuir la relación de aspecto se verán más anchos que altos, lo que se conoce como muros chatos, por último, al aumentar  $h/l$  los muros se vuelven más delgados o esbeltos.

Los muros estudiados corresponden a muros de mampostería confinada reforzada que se encuentran empotrados en la base y libres en la parte superior. Esto resulta en un modelo basado en una viga en voladizo a la que se aplica una carga lateral como se muestra en la Figura 3 , donde el momento en la base corresponde a la carga lateral multiplicada por la altura total del muro.

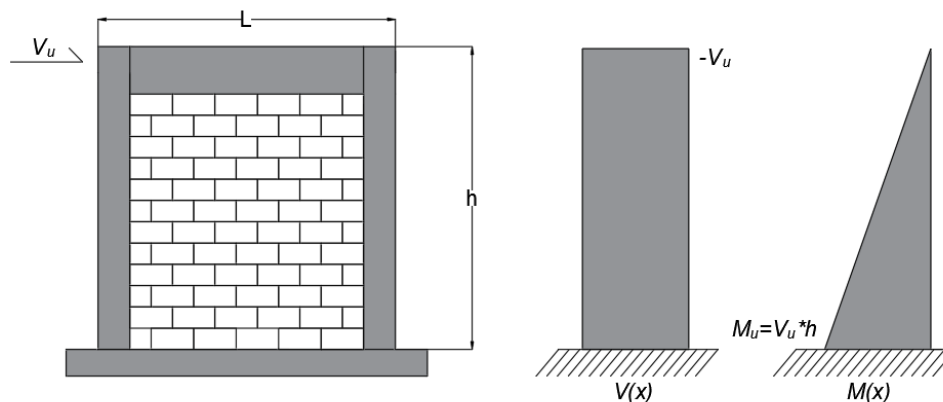


Figura 3. Diagramas de fuerzas de corte y flexión en los muros estudiados.

Al considerar la distancia comprendida entre la fibra extrema en compresión y el centroide del acero en tracción ( $d$ ), como un porcentaje del largo del muro ( $l$ ), se puede transformar el valor  $M_u/V_u d$  a  $h/l$  de la siguiente manera:

$$M_u = (V_u)(h)$$

$$M_u/V_u = h$$

$$M_u/(V_u)(d) = \frac{h}{d} \approx \frac{h}{l}$$

De modo que, se puede observar como  $M_u/V_u d$  corresponde a la relación de aspecto del muro, en la siguiente sección se muestra como este valor influye cuando se pretende determinar la capacidad a cortante de la mampostería.

#### 1.4.3 Capacidad a cortante de muros mampostería reforzada

Según explica Klingner (2010), los muros con cargas paralelas a sus planos, es decir muros de corte, deben diseñarse para las cargas de gravedad y peso propio, además de los momentos y cortantes producidos por cargas laterales paralelas a su plano, el modelo con estas fuerzas se muestra en la Figura 4.

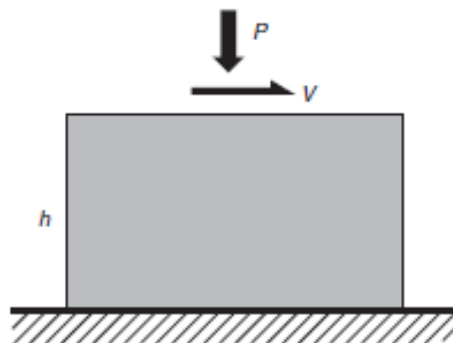


Figura 4. Modelo de cargas aplicadas a muros de corte de mampostería reforzada  
(Klingner, 2010).

Los muros de corte soportan flexión en su propio plano por lo que generalmente poseen varias capas de acero longitudinal para soportarlo. El CSCR 10/14 (CFIA, 2016) en la sección 9.7 *Muros con cargas paralelas a su plano*, se propone una resistencia de nominal ante carga axial, cortante y momento.

El diseño a cortante de mampostería se debe realizar por medio del método de resistencia, donde se verifica el cumplimiento de la ecuación [1-1] para cada elemento diseñado.

$$\phi V_n \geq V_u \quad [1-1]$$

Donde:

$V_n$  : Capacidad nominal a cortante, kg.

$V_u$  : Cortante de diseño, cortante derivado de las fuerzas aplicadas multiplicado por la razón entre el FED correspondiente a la ductilidad global asignada de uno y el FED correspondiente a la ductilidad global asignada utilizada en el análisis, kg.

$\phi$ : Factor de reducción.

Los factores de reducción dependen de la acción que se considera y son diferentes para los tres códigos estudiados cuando se determina la capacidad a cortante. En el Cuadro 2 se muestran los factores para cada código, se puede observar como valor más conservador corresponde al CSCR 10/14, seguido por el Borrador CSCR y el TMS 402/602-16 respectivamente.

Cuadro 2. Factores de reducción para mampostería confinada según el CSCR 10/14, el Borrador CSCR y el TMS 402/602-16.

Acción a considerar	Factor de reducción		
	CSCR 10/14	Borrador CSCR	TMS 402/602-16
	$\phi$	$\phi$	$\phi$
<b>Cortante y torsión</b>	0,60	0,70	0,80
<b>Flexión y carga axial</b>	$\phi = 0,80 - \frac{1,5 P_u}{A_e f'_m}$ $0,60 \leq \phi \leq 0,80$	0,85	0,90

Las fórmulas de capacidad a cortante para mampostería que se encuentran en Capítulo 9 del CSCR 10/14 fueron derivadas de las aplicadas en el código estadounidense TMS 402-08/ACI 530-08/ASCE05-08 (MSJC, 2008), y la norma neozelandesa NZS 4230:2004 (New Zealand Standard, 2004), no obstante, existe una actualización al código americano llamado TMS 402/602-16 (TMS, 2016), donde se realizaron modificaciones a la manera de calcular la capacidad a cortante.

En general la formula se compone de la suma de la capacidad de cortante de la mampostería ( $V_m$ ) y la resistencia del acero de refuerzo ( $V_s$ ), como se observa en la Ecuación [1-2].

$$V_n = V_m + V_s \quad [1-2]$$

El TMS 402/602-16, así como la propuesta de Borrador del nuevo CSCR, estipulan un factor que se considera dependiendo de la colocación del concreto de relleno en la pared ( $\gamma_g$ ), para muros parcialmente rellenos corresponde a 0,75 y si se encuentra completamente relleno se utiliza 1,0, lo que transforma la Ecuación [1-2] en la Ecuación [1-3].

$$V_n = (V_m + V_s)\gamma_g \quad [1-3]$$

Este factor ( $\gamma_g$ ), se aplicó debido a que la fórmula de capacidad de la mampostería ( $V_m$ ) se determinó de manera experimental con los estudios realizados por Shing et al. (1990a) y Shing et al. (1990b). En estas investigaciones se utilizaron paredes de mampostería completamente rellenas y con relación de aspecto promedio de 1,17. El factor de reducción se origina al considerar la disminución en la capacidad de la mampostería al no estar completamente rellena.

La ecuación propuesta en el CSCR 10/14 para determinar la resistencia  $V_m$  de la mampostería se observa en la Ecuación [1-4].

$$V_m = \left\{ \left[ 1 - 0,44 \left( \frac{M_u}{V_u d} \right) \right] \sqrt{f'_m} + 0,25 \left( \frac{P_u}{A_g} \right) \right\} db_w \quad [1-4]$$

Donde:

$M_u$  : Momento último del muro, kg·cm.

$V_u$  : Cortante último para la sección de máximo esfuerzo del muro, kg.

$P_u$  : Carga axial última, kg.

$A_g$  : Área gruesa del muro, cm<sup>2</sup>.

$f'_m$  : Resistencia nominal a la compresión de la mampostería a los 28 días, kg/cm<sup>2</sup>.

$d$ : Distancia comprendida entre la fibra extrema en compresión y el centroide del acero en tracción, cm.

$b_w$ : Ancho del muro, si la pared se encuentra completamente rellena se utiliza el espesor del muro ( $t$ ), de lo contrario se determina como  $b_w = t - b_i$ , donde  $b_i$  es el ancho máximo del hueco interno del bloque en la dirección perpendicular a la fuerza cortante, cm.

El área que se utiliza para resistir la fuerza a cortante en la mampostería, se considera como el área paralela a la fuerza aplicada en el plano del muro, en el caso del CSCR 10/14 es el área bruta transversal del muro hasta la distancia  $d$  cuando se encuentra completamente relleno. Si se utiliza mampostería parcialmente rellena se debe utilizar el área que se muestra en la Figura 5.

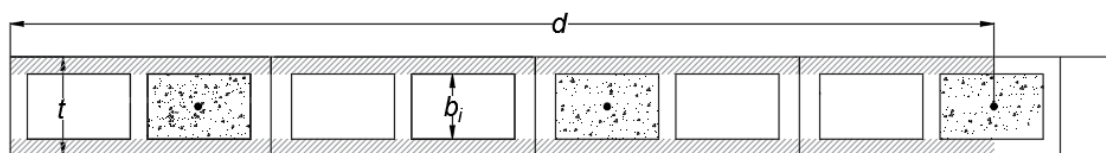


Figura 5. Área utilizada para calcular la capacidad a cortante en muros parcialmente rellenos para el CSCR 10/14.

La fórmula homóloga a la Ecuación [1-4] de  $V_m$  para el TMS 402/602-16 se muestra en la ecuación [1-5].

$$V_{nm} = \left[ 1 - 0,44 \left( \frac{M_u}{V_u d_v} \right) \right] A_{nv} \sqrt{f'_m} + 0,25 P_u \quad [1-5]$$

Donde:

$d_v$ : Distancia comprendida entre la fibra extrema en compresión y el centroide del acero en tracción, mm.

$A_{nv}$ : Área de cortante del muro, mm<sup>2</sup>.

El área considerada para soportar el cortante  $A_{nv}$ , corresponde al área bruta de la sección transversal del muro cuando todas las celdas están rellenas. Si la mampostería se encuentra parcialmente rellena, se considera el área de la Figura 5, adicionando además las secciones de las celdas rellenas y sus bordes de mampostería extremos perpendiculares a la fuerza cortante, en la Figura 6 se observa la representación del área  $A_{nv}$  en un muro que se encuentra parcialmente relleno.

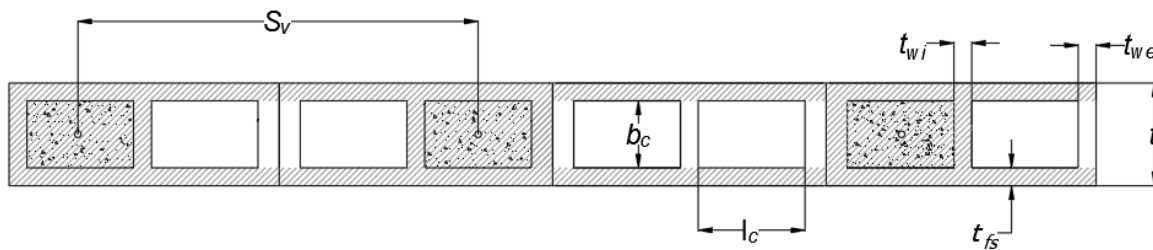


Figura 6. Área de cortante  $A_{nv}$  para mampostería parcialmente rellena a considerar en el cálculo de la capacidad  $V_m$  en el TMS 402/602-16 y Borrador CSCR.

La fórmula para calcular la capacidad  $V_m$  propuesta en el Borrador CSCR es muy similar a la ecuación [1-4], sin embargo se implementa el uso del área  $A_{nv}$  mencionada anteriormente.

$$V_m = \left\{ \left[ 1 - 0,44 \left( \frac{M_u}{V_u d_v} \right) \right] \sqrt{f'_m} + 0,25 (P_u / A_{nv}) \right\} (A_{nv}) \quad [1-6]$$

El Borrador CSCR proporciona una fórmula basada en la Figura 6 para el cálculo del área de cortante  $A_{nv}$ , esta se muestra en la ecuación [1-7].

$$A_{nv} = \left[ b_c(l_c + t_{wi} + t_{we}) \left( \frac{1}{S_v} \right) + 2t_{fs} \right] * 100, cm^2 / \quad [1-7]$$

Donde:

$b_c$ : Ancho de una celda de la unidad, cm.

$l_c$ : Longitud de una celda de la unidad, cm.

$S_v$ : Espaciamiento entre celdas rellenas, cm.

$t_{fs}$ : Espesor de la cara externa de la unidad, cm.

$t_{we}$ : Espesor del alma externa de la unidad, cm.

$t_{wi}$ : Espesor del alma interna de la unidad, cm.

En las tres fórmulas mencionadas anteriormente,  $M_u/V_u d$  no podrá tomarse mayor a uno, además, la fuerza axial se considera positiva en compresión y negativa en tracción.

Al analizar las ecuaciones de capacidad de la mampostería, se observa cómo influyen diferentes propiedades del muro. En primer lugar la relación de aspecto  $M_u/V_u d$ , que determina la proporción a utilizar de la resistencia a la compresión de la mampostería ( $f'm$ ) y el área de cortante del muro. Por otro lado, la carga axial proporciona un aporte cuando se considera en compresión debido a que asiste al cerrar grietas provocadas por la fuerza aplicada.

En consecuencia, se puede deducir que al incrementar la relación de aspecto de la pared disminuye la resistencia nominal a cortante de la mampostería, además, al no permitirse usar un valor de  $M_u/V_u d$  mayor a 1,0, este será el más conservador.

Por otro lado, al comparar las áreas utilizadas entre los códigos se puede predecir que el TMS 402/602-16 y el Borrador CSCR producirán valores mayores de capacidad con respecto al CSCR 10/14.

En la mampostería reforzada, se asume, según Klingner (2010), que el cortante es soportado por el refuerzo horizontal que cruza la falla hipotética orientada a los 45 ° como se muestra en la Figura 7.



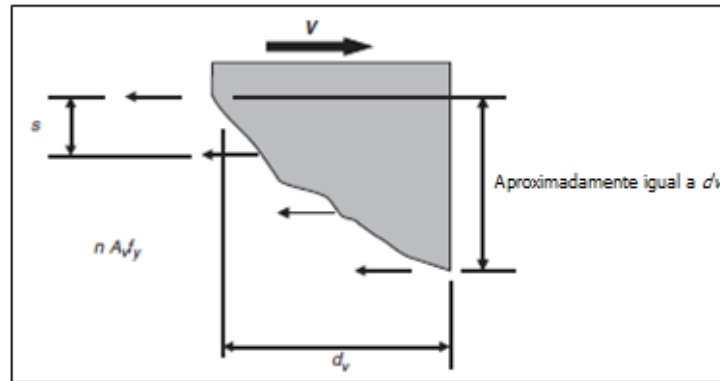


Figura 7. Modelaje de resistencia a cortante debido al refuerzo (Klingner, 2010).

La resistencia que aporta el acero de refuerzo es el área del acero multiplicada por la cantidad de varillas que cortan la falla hipotética, lo cual puede aproximarse a la distancia  $d_v$  entre la separación de refuerzo horizontal ( $d_v/S_h$ ), todo multiplicado por el esfuerzo de fluencia del refuerzo. Sin embargo, Klingner (2010) explica como la superficie de falla real puede inclinarse en un ángulo mayor con respecto al eje de la pared y, además, no se puede garantizar que todo el refuerzo que cruza la superficie de falla llegue al esfuerzo de fluencia.

Por estos dos motivos, el supuesto de resistencia se reduce por un factor de eficiencia de 0,5 (Klingner, 2010). La ecuación [1-8] estipula la capacidad que aporta el acero de refuerzo horizontal para los tres códigos estudiados.

$$V_s = \frac{0,5 A_{sh} f_y d}{S_h} \quad [1-8]$$

Donde:

$V_s$ : Capacidad de cortante del acero, kg.

$A_{sh}$ : Área del acero horizontal,  $\text{cm}^2$ .

$f_y$ : Esfuerzo de fluencia del acero,  $\text{kg}/\text{cm}^2$ .

$S_h$ : Separación del refuerzo horizontal, cm.

Existe una diferenciación entre la capacidad del acero horizontal del CSCR 10/14 con respecto al TMS 402/602-16 y al Borrador CSCR, esta corresponde al porcentaje que se considera cuando el acero horizontal no se encuentra embebido en concreto en toda su longitud. Para el CSCR 10/14 se estipula una reducción del 50% de la capacidad total del refuerzo horizontal, mientras que para el Borrador CSCR se propone un 20%, el TMS 402/602-16 no reduce la

capacidad del acero para esta condición debido a que no se practica la colocación del acero de refuerzo en las juntas de la mampostería en los Estados Unidos.

La disminución del porcentaje de reducción del 50% al 20% en el Borrador CSCR, se debe que se han realizado pruebas desde la publicación del CSCR 10/14 que demuestran que con la mano de obra local disminuir un 50% la capacidad del acero puede llegar a ser muy conservador (Acuña, 2014). En el Cuadro 3 se resumen las ecuaciones de determinación de capacidad a cortante para los códigos.

Cuadro 3. Ecuaciones para determinar la capacidad a cortante de mampostería reforzada según el CSCR 10/14, Borrador CSCR y el TMS 402/602-16.

Código	Capacidad total del muro (Vn)	Capacidad de la mampostería (Vm)	Capacidad del refuerzo (Vs)
<b>CSCR 10/14</b>	$V_n = V_m + V_s$	$V_m = \left\{ \left[ 1 - 0,44 \left( \frac{M_u}{V_u d} \right) \right] \sqrt{f'_m} + 0,25 \left( \frac{P_u}{A_g} \right) \right\} db_w$	$V_s^{(**)} = \frac{0,5 A_{sh} f_y d}{S_h}$
<b>Borrador CSCR</b>	$V_n = (V_m + V_s) \gamma_g$ $\gamma_g = 0,75^{(*)}$	$V_m = \left\{ \left[ 1 - 0,44 \left( \frac{M_u}{V_u d_v} \right) \right] \sqrt{f'_m} + 0,25 \left( \frac{P_u}{A_{nv}} \right) \right\} (A_{nv})$	$V_s^{(***)} = \frac{0,5 A_{sh} f_y d_v}{S_h}$
<b>TMS 402/602-16</b>	$V_n = (V_{nm} + V_s) \gamma_g$ $\gamma_g = 0,75^{(*)}$	$V_{nm} = \left[ 1 - 0,44 \left( \frac{M_u}{V_u d_v} \right) \right] A_{nv} \sqrt{f'_m} + 0,25 P_u$	$V_s = \frac{0,5 A_{sh} f_y d_v}{S_h}$

(\*) Para mampostería parcialmente rellena, de lo contrario se utiliza 1.

(\*\*)  $(0,5)V_s$  cuando el acero horizontal no está embebido en concreto en toda su longitud.

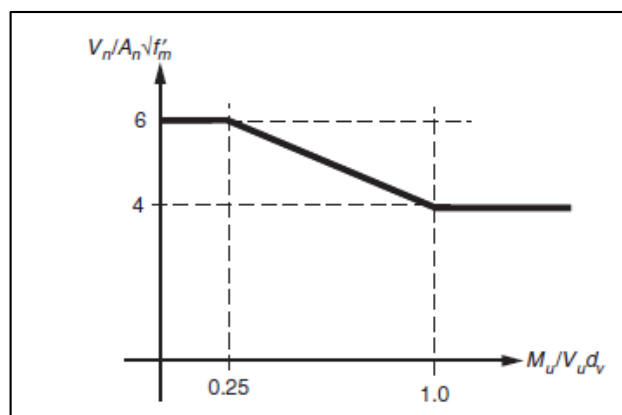
(\*\*\*)  $(0,8)V_s$  cuando el acero horizontal no está embebido en concreto en toda su longitud.

La resistencia a cortante del muro proviene en realidad de un mecanismo estilo cercha, en el cual, el refuerzo horizontal está en tracción, y los puntales diagonales de la mampostería en compresión. El aplastamiento de los puntales se controla limitando la resistencia de corte total  $V_n$ , independientemente de la cantidad de refuerzo horizontal que se utilice (Klingner, 2010). Este límite se estipula para los tres códigos en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Límites de capacidad nominal a cortante de mampostería reforzada.

CSCR 10/14	TMS 402/602-16 y Borrador CSCR	Condición
$V_n \leq (1,6\sqrt{f'_m})db_w$ [1-9]	$V_n \leq (1,6A_{nv}\sqrt{f'_m})\gamma_g$ [1-10]	Cuando $M_u/V_u d \leq 0,25$
$V_n \leq (1,06\sqrt{f'_m})db_w$ [1-11]	$V_n \leq (1,06A_{nv}\sqrt{f'_m})\gamma_g$ [1-12]	Cuando $M_u/V_u d \geq 1$

Las restricciones mostradas anteriormente se pueden apreciar gráficamente en la Figura 8. Si se quisiera interpretar para el CSCR 10/14 se debe reemplazar el valor máximo por 1.6 y el mínimo por 1.06.

Figura 8. Máxima capacidad  $V_n$  permitida según  $M_u/V_u d$ 

(Klingner ,2010)

El código TMS 402/602-16 y el Borrador CSCR establecen la revisión del cortante en la base del muro cuando existe una carga axial baja, ya que la resistencia puede llegar a ser insuficiente y podría haber deslizamiento. El límite se estipula en la ecuación [1-13] y la ecuación [1-14].

$$V_{nf} = \mu(A_{sp}f_y + P_u) \quad \text{Cuando } \frac{M_u}{V_u d_v} \leq 0,5 \quad [1-13]$$

$$V_{nf} = 0,42 f'_m A_{nc} \quad \text{Cuando } \frac{M_u}{V_u d_v} \geq 1 \quad [1-14]$$

Donde:

$A_{sp}$ : Área de acero dentro del área neta en cortante,  $A_{nv}$  perpendicular al plano horizontal de cortante,  $\text{cm}^2$ .

$A_{nc}$ : Área neta de la sección entre el eje neutro y la fibra extrema en compresión calculado para la resistencia nominal de la sección  $M_n$ ,  $\text{cm}^2$ .

$\mu$ : Coeficiente de fricción, debe ser 1 para mampostería soportada en concreto con superficie acabada intencionalmente rugosa ( $\pm 6$  mm), para otras condiciones el valor será de 0,7.

Cuando  $\frac{M_u}{V_u d_v}$  se encuentra entre 0,5 y 1 se debe interpolar linealmente entre los valores obtenidos en la ecuación [1-13] y la ecuación [1-14]. La fuerza axial  $P_u$  se considera positivo en compresión y negativo en tracción.

La ecuación [1-14] posee un factor menor de fricción, debido a que datos experimentales comprobaron que los muros que poseen una falla dominada por flexión normalmente alcanzan su capacidad a flexión antes de que exista un deslizamiento en la base considerable, además, ocurre una reducción en el coeficiente de fricción a medida que la mampostería en compresión es dañada cuando la capacidad a flexión es alcanzada (TMS, 2016).

#### **1.4.4 Mampostería confinada**

Con respecto al análisis teórico del comportamiento de la mampostería con elementos de confinamiento, Paulay & Priestley (1992) mencionan como al exponer una pared de mampostería confinada a bajos niveles de fuerza lateral en el plano, el marco confinante y el panel de relleno actuarán como un solo elemento, es decir, como una pared estructural con elementos de borde.

Sin embargo, a medida que las deformaciones laterales aumentan, el comportamiento se vuelve más complejo debido a que el marco intenta deformarse en flexión mientras que el paño de mampostería intenta deformarse en un modo en cortante, como se muestra en la Figura 9. Esto provoca la separación entre el marco y el panel en las esquinas donde ocurre una tensión diagonal y se forma un puntal de compresión diagonal (Paulay & Priestley, 1992).

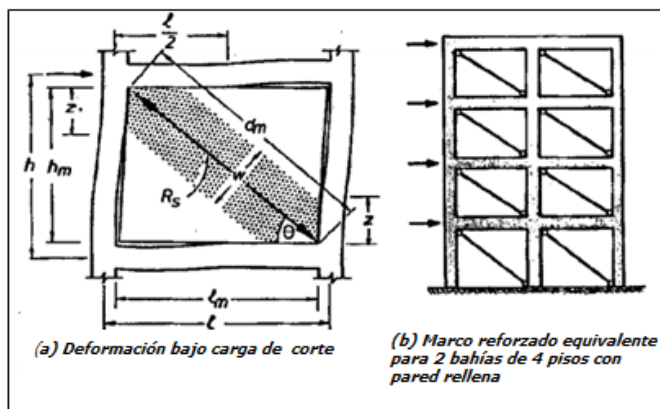


Figura 9. Modelo teórico del comportamiento de mampostería confinada (Paulay & Priestley, 1992)

Según este modelo teórico, Paulay & Priestley (1992) proponen cinco tipos de falla típicos de la mampostería confinada:

1. Falla por tracción diagonal de la columna a tracción resultado de momentos flectores inducidos por la carga lateral.
2. Falla por cortante deslizante de la mampostería a lo largo de las hiladas de mampostería horizontales y generalmente cerca de la altura media de la pared.
3. Agrietamiento de la diagonal de tracción del panel de mampostería.
4. Falla a compresión del puntal diagonal.
5. Falla por flexión o cortante en las columnas.

La propuesta sobre el comportamiento de la mampostería confinada de Paulay & Priestley es el modelo más conocido y estudiado, sin embargo, esta basado en la premisa de que el marco confinante esta desligado del paño de mampostería, lo cual no ocurre en el sistema utilizado en Costa Rica.

En la investigación realizada por Salazar (2013), se utilizaron datos experimentales y el modelo puntal tensor de Priestley para obtener una distribución de cortante relativa entre el paño de mampostería y las columnas de concreto. Salazar (2013) concluyó que la distribución relativa de la fuerza horizontal se distribuye como se muestra en la Figura 10. El porcentaje de fuerza tomado por las columnas varía desde menos del 10% para la relación de aspecto de 0,5 hasta casi un 70% para un muro de relación de aspecto de 2.

Para obtener valores en muros de relación de aspecto diferente a 0,92 utilizado en su proyecto, Salazar (2013) adquirió datos de la investigación de Sandoval (1997), donde se determinó el

ancho del puntal utilizado en el modelo de Priestley para relaciones de aspecto de 0,54, 0,92 y 1,89.

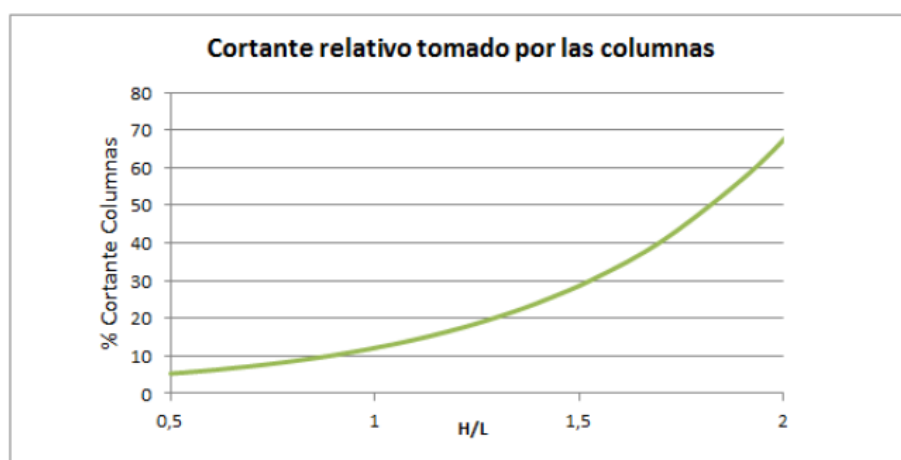


Figura 10. Cortante relativo tomado por las columnas en un muro de mampostería confinada (Salazar, 2013)

Sobre la estimación de la capacidad de la mampostería confinada, no se especifica alguna consideración en el CSCR 10/14, por otro lado, el TMS 402/602-16 solo considera la mampostería confinada como marcos rellenos de mampostería donde el paño no se encuentra ligado al marco de concreto, situación que no concuerda con lo utilizado en Costa Rica.

Al considerar los códigos de diseño de otros países, en la norma neozelandesa NZS 4230:2004 (New Zealand Standard, 2004), se encuentra un abordaje similar al norteamericano con respecto a la mampostería confinada, donde se interpreta como un marco relleno y se estipula que se debe de diseñar con la suficiente separación entre el marco y el paño de mampostería para que el sistema confinante logre desarrollar su capacidad, ya que se ha comprobado que un marco estructural no posee un comportamiento adecuado al ser relleno, debido al cambio en la rigidez y en consecuencia en el periodo de los elementos confinantes. Si se desea diseñar el elemento como un solo sistema, se debe de realizar el análisis correspondiente según el modelo de Priestley para determinar la rigidez y una distribución de fuerzas apropiada.

La fórmula estipulada en la norma NZS 4230:2004, para determinar la capacidad a cortante de un muro, considera el aporte de la carga axial, el acero de refuerzo horizontal y la mampostería. El área de cortante considerada es la misma que se describe en el CSCR 10/14.

Por otro lado, se realiza una diferenciación según la relación de aspecto del muro y la cantidad de acero vertical que posea la pared, ya que se ha demostrado que el efecto dovela del acero

longitudinal contribuye a la capacidad a cortante de la mampostería (New Zealand Standard, 2004).

En México, existe el documento "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería" (Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2017), donde se define específicamente una sección para la mampostería confinada. Entre los aspectos a mencionar sobre la capacidad de muros ante cargas laterales, se encuentra la prohibición de utilizar algún incremento de la fuerza cortante del muro por parte de la viga o las columnas.

En la fórmula de capacidad a cortante, se utiliza la resistencia a la tensión diagonal de la mampostería, además del área transversal del muro incluyendo las columnas pero sin transformar la sección. La relación de aspecto también es considerada, así como la capacidad aportada por la carga axial y el refuerzo horizontal o malla de alambre soldado recubierto de mortero.

En Chile, a diferencia de todas las normas mencionadas anteriormente, se utiliza una metodología de diseño por esfuerzos admisibles. En la norma NCh 2123 Of.97 "Albañilería confinada- Requisitos de diseño y calculo" (INN, 1997), la ecuación estipulada para determinar el esfuerzo de corte admisible de un muro de mampostería confinado, considera una resistencia básica al corte de la mampostería suministrada en la misma norma, además del esfuerzo medio en compresión producido por la fuerza axial en la sección.

Con respecto al área utilizada, se establece como la sección bruta transversal del muro incluyendo el área de las columnas sin transformar. En este caso no se considera de ninguna manera la relación de aspecto ni el aporte de algún tipo de acero de refuerzo.

Así mismo, se establece que el diseño de mampostería confinada no debe considerar ningún aporte a la capacidad de corte del muro por parte de la viga o las columnas. Menciona que la función de estos elementos es evitar una falla frágil luego de producido el agrietamiento diagonal en la mampostería. (INN, 1997).

## 1.5 Alcances y limitaciones

Mediante esta investigación se pretende verificar la capacidad nominal de muros de mampostería confinada reforzada según lo estipulado en el CSCR 10/14, el TMS 402/602-16 y el Borrador del CSCR.

El proyecto abarcará la construcción de cinco muros de mampostería confinada reforzada, a escala natural con espesor de pared de 15 cm y relaciones de aspecto ( $h/l$ ) de aproximadamente: 0,5, 0,75, 1,0, 1,5 y 2. Los muros de 0,75 y 1,5 pertenecen a este proyecto, mientras que las paredes 0,5 y 2 son parte de la investigación de Picado (2019), la pared con relación de aspecto de 1,0 se realizó de forma conjunta. Los especímenes fueron fallados aplicando una carga lateral cíclica por medio de un actuador hidráulico de acuerdo con la norma ASTM E2126-11 (ASTM, 2011).

Los valores teóricos de resistencia nominal calculados con el CSCR 10/14 (CFIA, 2016), el reglamento TMS 402/602-16 (TMS, 2016) y el Borrador CSCR (CFIA) fueron comparados con los resultados experimentales y se determinó si la relación de aspecto influye en la estimación de la capacidad del muro.

El comportamiento de los muros, entendiéndose por ductilidades, rigideces, disipación de energía y un análisis más profundo del modo de falla no se analizaron en este proyecto debido a que fueron estudiados en el Trabajo Final de Graduación de Picado (2019).

Los especímenes fueron contruidos con materiales nacionales y mano de obra que ejemplifica los métodos constructivos utilizados en el país.

La cantidad de especímenes con los que se trabajó fue reducida debido a que solo se produjo un muro para cada relación de aspecto estudiada. No se consideró la carga axial en el montaje experimental, de manera que no fue tomada en cuenta en el aporte a la resistencia de cortante nominal de los muros.

Solo se evaluó la verificación de la capacidad al cambiar la relación de aspecto y la consideración de los elementos confinantes en el cálculo de la capacidad teórica nominal, no se modificó ninguna otra variable entre los muros.



## 1.6 Metodología

La metodología que se utilizó consistió de tres fases, una teórica, una experimental y una de análisis. En la Figura 11 se puede observar las actividades que conformaron cada una de ellas.

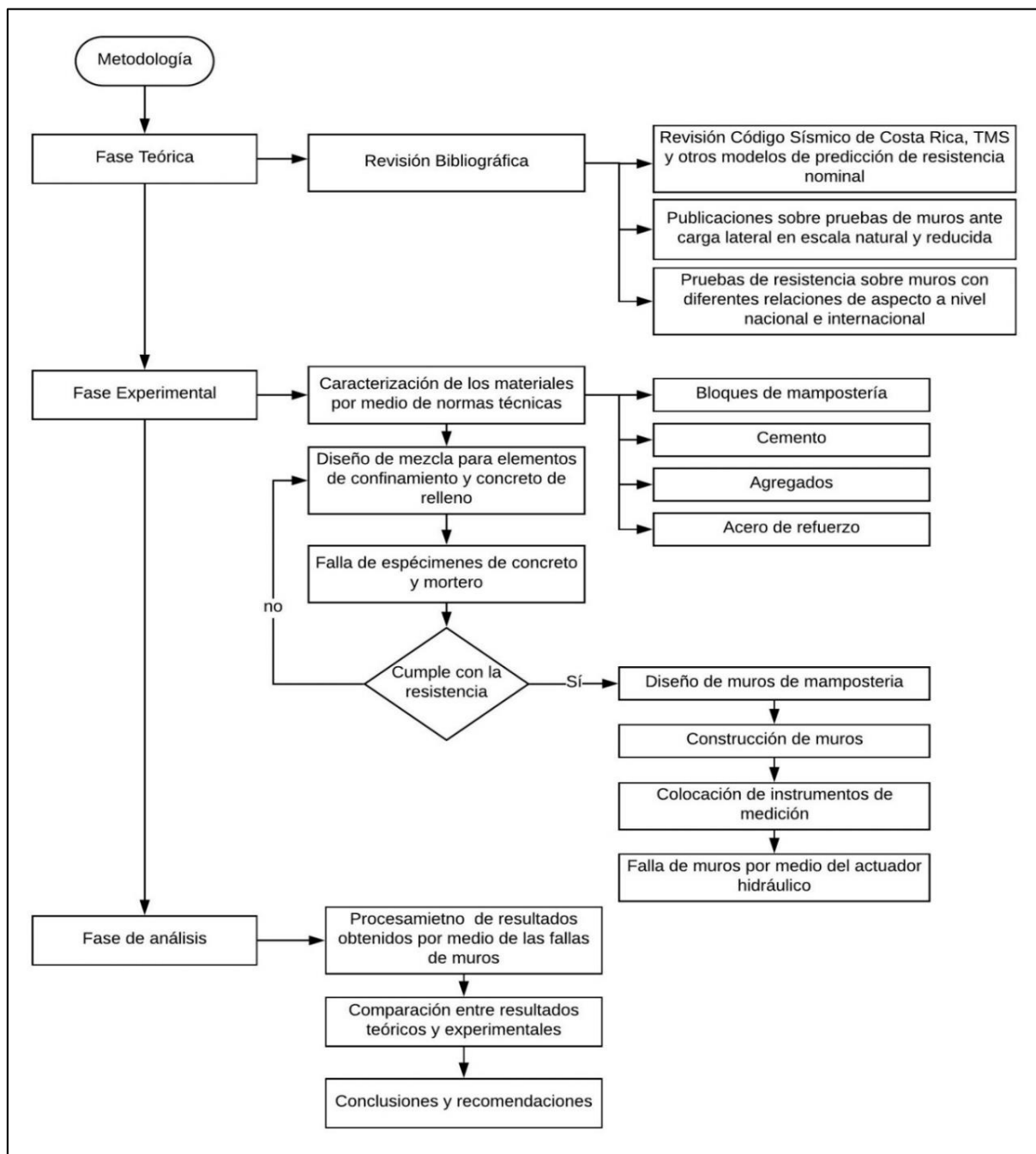


Figura 11. Diagrama de flujo de la metodología a utilizar en el proyecto

### 1.6.1 Fase teórica

En esta fase se realizó una revisión bibliográfica para determinar los factores involucrados en la verificación de resistencia de la mampostería confinada ante carga lateral. En primer lugar, se revisaron modelos de predicción de resistencia nominal como el Código Sísmico de Costa Rica 2010 (CFIA, 2016), el Borrador al Código Sísmico de Costa Rica (CFIA), así como la norma estadounidense TMS 402/602-16 (TMS, 2016), que permitieron determinar si la relación de aspecto de los muros influye en la predicción de la resistencia nominal. Por otro lado, se revisaron trabajos de investigación sobre fallas de mampostería confinada ante carga lateral, para así determinar los posibles modos de falla y el análisis aplicado a los muros.

Además, se buscaron publicaciones científicas dentro y fuera del país sobre la verificación de resistencia al cambiar la relación de aspecto de paredes de mampostería confinada.

### 1.6.2 Fase Experimental

Esta fase consistió en la construcción y falla de los muros de mampostería confinada, en primer lugar, se requirió la caracterización de los materiales que fueron utilizados como: unidades de mampostería, cemento, agregados y acero de refuerzo. Para cada uno de estos materiales se aplicaron diferentes pruebas normadas, estas se resumen a continuación en el Cuadro 5:

Cuadro 5. Ensayos necesarios para caracterizar los materiales

<b>Material</b>	<b>Norma</b>	<b>Ensayo</b>
<b>Agregado fino</b>	ASTM C136	Método de Ensayo Normalizado para la Determinación Granulométrica de Agregados Finos y Gruesos
	ASTM C128	Método de Ensayo Normalizado para Determinar la Densidad, la Densidad Relativa (Gravedad Específica), y la Absorción de Agregados Finos
	ASTM C29	Método de ensayo estándar para determinar la densidad en masa (peso unitario) e índice de vacíos en los agregados
	ASTM C566	Método de Ensayo Normalizado para Medir el Contenido Total de Humedad Evaporable en Agregados Mediante Secado
<b>Agregado Grueso</b>	ASTM C136	Método de Ensayo Normalizado para la Determinación Granulométrica de Agregados Finos y Gruesos
	ASTM C127	Método de Ensayo Normalizado para Determinar la Densidad, la Densidad Relativa (Gravedad Específica), y la Absorción de Agregados Gruesos

<b>Material</b>	<b>Norma</b>	<b>Ensayo</b>
	ASTM C566	Método de Ensayo Normalizado para Medir el Contenido Total de Humedad Evaporable en Agregados Mediante Secado
	ASTM C29	Método de ensayo estándar para determinar la densidad en masa (peso unitario) e índice de vacíos en los agregados
	ASTM C187	Método de prueba estándar para la cantidad de agua requerida para la consistencia normal de la pasta de cemento hidráulico
	ASTM C188	Método de prueba estándar para la densidad del cemento hidráulico
<b>Cemento</b>	ASTM C191	Métodos de prueba estándar para el tiempo de fraguado de cementantes hidráulicos método de Vicat
	ASTM C109	Método de Prueba Estándar para la Resistencia a la Compresión de Morteros de Cemento Hidráulico (Utilizando Muestras Cúbicas de 2 Pulgadas [50 mm])
<b>Acero de refuerzo</b>	ASTM A370	Pruebas estándar de métodos y definiciones para Ensayos mecánicos de productos de acero
<b>Unidades de mampostería</b>	INTE C55:2015	Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de prismas de mampostería

Luego de determinar las características de los materiales y las mezclas de concreto a utilizar, se procedió con el diseño de los muros de mampostería confinada según la metodología estipulada en el CSCR 10/14. Seguidamente, se desarrolló la construcción de los cinco muros, los cuales se componen de vigas de fundación, paños de mampostería, columnas y vigas corona.

Para determinar la resistencia pico de los especímenes, se utilizó una prueba ASTM E2126-11 Métodos de prueba estándar para carga cíclica (Invertida) para la resistencia al corte de elementos verticales del sistema de resistencia de fuerzas laterales para edificios (ASTM, 2011), sobre los muros. Por medio de un actuador hidráulico se aplicó una carga cíclica hasta lograr la falla del espécimen.

### **1.6.3 Fase de análisis**

En esta última fase se procesaron los resultados obtenidos durante las fallas de los muros para así determinar la resistencia experimental máxima de cada uno de ellos. Seguidamente, se comparó estos resultados experimentales a los calculados teóricamente. Se determinó la

precisión de cada modelo utilizado para el cálculo de la capacidad nominal a cortante de la mampostería. Además, de la influencia de la relación de aspecto en la determinación de esta resistencia nominal.

Por último, se presentaron conclusiones y recomendaciones según lo analizado y visto en las pruebas de los muros de mampostería confinada reforzada.

## **Capítulo 2. Materiales**

### **2.1 Cemento**

El cemento utilizado en el concreto para la construcción de las vigas y columnas fue el Cemento Hidráulico de Uso General de la marca Cemex. El cemento se considera tipo RTCR 479:2015, MM/B (P-C)-28 y es producido en las plantas de CEMEX ubicadas en Colorado de Abangares y Guatuso de Patarrá.

### **2.2 Agregados**

El agregado grueso utilizado para el concreto de las columnas y las vigas fue proporcionado por el Lanamme-UCR proveniente del Tajo de Guapiles, posee un tamaño máximo nominal de 12,5 mm. Se siguió el procedimiento de la norma ASTM C136 para determinar la granulometría del agregado la cual cumple con la norma ASTM C33. Además, se realizaron las pruebas ASTM C127, ASTM C29 y ASTM C566, para determinar los valores necesarios para el diseño de mezcla.

El agregado fino consiste en una arena de río también proveniente del Tajo de Guapiles, de la misma manera que al agregado grueso se le realizaron las pruebas ASTM C136, ASTM C128, ASTM C29 y ASTM C566. La granulometría obtenida cumple con el estándar de la norma ASTM C33.

### **2.3 Unidades de mampostería**

Las unidades de mampostería utilizadas son bloques clase A con un espesor de 15 cm (15x20x40 cm) de la empresa Pedegral. Se procedió a medir un grupo de especímenes elegidos al azar según el procedimiento de la norma ASTM C140. En la Figura 12 se observa la nomenclatura que corresponde a los resultados del Cuadro 6.

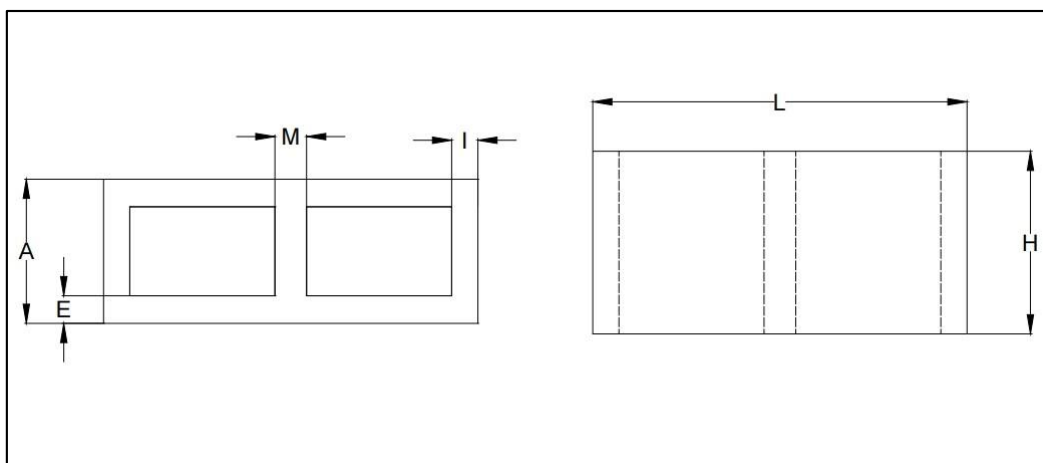


Figura 12. Nomenclatura de dimensiones utilizadas para las unidades de mampostería

Cuadro 6. Dimensiones de las unidades de mampostería

Bloque	L (cm)	A (cm)	H (cm)	I (cm)	E (cm)	M (cm)
1	39,04	15,08	18,65	2,84	2,90	3,29
2	38,98	15,06	18,84	2,74	2,86	3,36
3	39,00	15,02	18,81	2,63	2,89	3,19
4	38,92	15,02	18,99	2,72	2,84	3,36
<b>Promedio</b>	<b>38,99</b>	<b>15,04</b>	<b>18,82</b>	<b>2,73</b>	<b>2,87</b>	<b>3,30</b>

El CSCR 10/14 en el Anexo A establece que existen tres tipos de unidades huecas de mampostería, en este caso se utilizó bloques Clase A, los cuales deben de poseer una resistencia promedio sobre su área neta mínima de  $133 \text{ kg/cm}^2$  y para cada muestra, de  $120 \text{ kg/cm}^2$ . Los resultados de la prueba de resistencia a la compresión aplicada a los bloques se observan en el Cuadro 7, la resistencia promedio de las unidades fue de  $298 \text{ kg/cm}^2$ .

Cuadro 7. Resistencia a la compresión de las unidades de mampostería.

Bloque	Área neta ( $\text{cm}^2$ )	Carga (kg)	Resistencia ( $\text{kg/cm}^2$ )
1	305	89832	294
2	305	93313	305
3	305	89964	295
<b>Promedio</b>			<b>298</b>

## 2.4 Mortero

El mortero utilizado para la pega de bloques fue un mortero pre empacado INTACO tipo N especial para pegar bloques de compresión moderada. Según la ficha técnica, posee una resistencia mayor o igual a  $53 \text{ kg/cm}^2$ , lo cual lo califica como clase C según el CSCR 10/14.

Se utilizó este mortero en vez del que solicita el CSCR 10/14 para mampostería clase A, debido a que se consultó el Trabajo Final de Graduación de Barahona (2019) sobre módulos de ruptura en la mampostería, donde se concluyó que los primas con mortero tipo N poseen una capacidad a la compresión  $f'm$  de  $153 \text{ kg/cm}^2$  lo cual supera los  $100 \text{ kg/cm}^2$  que establece como requisito mínimo el CSCR 10/14 para mampostería clase A, además, se menciona que este mortero posee mejor trabajabilidad lo cual hace más eficiente su colocación.

En el Cuadro 8 se observa que la resistencia de los cubos de mortero fue de  $61 \text{ kg/cm}^2$ , lo que efectivamente califica el mortero utilizado como clase C.

Cuadro 8. Resistencia a la compresión del mortero de pega.

Cubo de mortero	Resistencia a los 28 días ( $\text{kg/cm}^2$ )
1	61
2	62
3	61
4	61
<b>Promedio</b>	<b>61</b>

## 2.5 Concreto

### 2.5.1 Cimentaciones

En el caso de las cimentaciones se utilizó concreto premezclado de la empresa AMCO, a la cual se le solicitó una resistencia en compresión a los 28 días  $f'c$  de  $350 \text{ kg/cm}^2$  y un asentamiento de 200 mm.

En el Cuadro 9 se observa que la resistencia  $f'c$  a los 28 días de los cilindros tomados de muestra fue de  $452 \text{ kg/cm}^2$ , por otro lado, el asentamiento el día de la colación del concreto fue de 200 mm.

Cuadro 9. Resistencia a la compresión del concreto de las cimentaciones.

Cilindro	Resistencia a 7 días (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a 14 días (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia f'c 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
<b>1</b>	370	430	461
<b>2</b>	381	434	426
<b>3</b>	380	440	469
<b>Promedio</b>	<b>377</b>	<b>435</b>	<b>452</b>

### 2.5.2 Elementos de confinamiento

Para los elementos de confinamiento, es decir vigas y columnas, el concreto fue producido en sitio. La proporción que se utilizó fue 1:2:2 con una relación agua cemento de 0,56 y un asentamiento de 225 mm. La resistencia teórica a 28 días f'c fue de 210 kg/cm<sup>2</sup>. En el Cuadro 10 se observa los resultados de la capacidad a 7, 14 y 28 días de los cilindros tomados como muestra.

Cuadro 10. Resistencia a la compresión del concreto de los elementos de confinamiento.

Cilindro	Resistencia a 7 días (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a 14 días (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia f'c 28 d (kg/cm <sup>2</sup> )
<b>1</b>	191	189	292
<b>2</b>	179	188	285
<b>3</b>	189	233	249
<b>Promedio</b>	<b>186</b>	<b>203</b>	<b>275</b>

### 2.5.3 Relleno de unidades de mampostería

Para el concreto de relleno de la mampostería se utilizó concreto preempacado CRC Autocompactable de la marca Intaco. Según el CSCR 10/14 para mampostería Clase A el concreto de relleno debe poseer una resistencia mínima de 175 kg/cm<sup>2</sup>, en el Cuadro 11 se observa que la resistencia obtenida fue de 197 kg/cm<sup>2</sup>.



Cuadro 11. Resistencia a la compresión del concreto de relleno.

Prisma	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
1	99	20017	202
2	106	21903	207
3	114	19950	175
4	104	21200	203
<b>Promedio</b>	<b>106</b>	<b>20767</b>	<b>197</b>

## 2.6 Mampostería

El CSCR 10/14 establece una resistencia mínima a la compresión de la mampostería ( $f'_m$ ) a los 28 días de 100 kg/cm<sup>2</sup> para mampostería clase A. Para determinar esta capacidad se construyeron seis prismas de dos bloques de alto, tres de estos rellenos y tres vacíos, sin embargo, uno de los valores dio fuera de rango así que solo se determinó el promedio con dos prismas sin relleno, en el Cuadro 12 se muestra que la resistencia de la mampostería fue de 166 kg/cm<sup>2</sup>.

Cuadro 12. Resistencia a la compresión de la mampostería a los 28 días.

Prismas	Área neta (cm <sup>2</sup> )	Carga (kg)	Resistencia $f'_m$ a 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
<b>Rellenos</b>	1	588	77792
	2	587	87545
	3	587	70308
<b>Sin relleno</b>	4	307	50690
	5	304	61916
<b>Promedio aplicando factor de corrección por <math>h_p/t_p</math></b>			<b>166</b>

## 2.7 Acero de refuerzo

El refuerzo en el paño de mampostería consistió en varilla No. 3 Grado 40 para el acero vertical y horizontal. En las columnas y vigas se utilizó varilla No. 4 Grado 60, y para las cimentaciones se colocó acero No. 5 y 6 grado 60. Se comprobó la resistencia real de todo el refuerzo y se obtuvieron los resultados que se muestran en el Cuadro 13, por otro lado en la Figura 13 se muestra un ejemplo de la curva de esfuerzo vs deformación unitaria para una varilla No. 3.

Cuadro 13. Esfuerzos de cedencia y ultimo para el acero de refuerzo.

Varilla	Esfuerzo de cedencia $f_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo último $f_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )
<b>No.3 Grado 40</b>	3412	5289
<b>No.4 Grado 60</b>	4585	6272
<b>No.5 Grado 60</b>	4529	6246
<b>No.6 Grado 60</b>	4901	7749

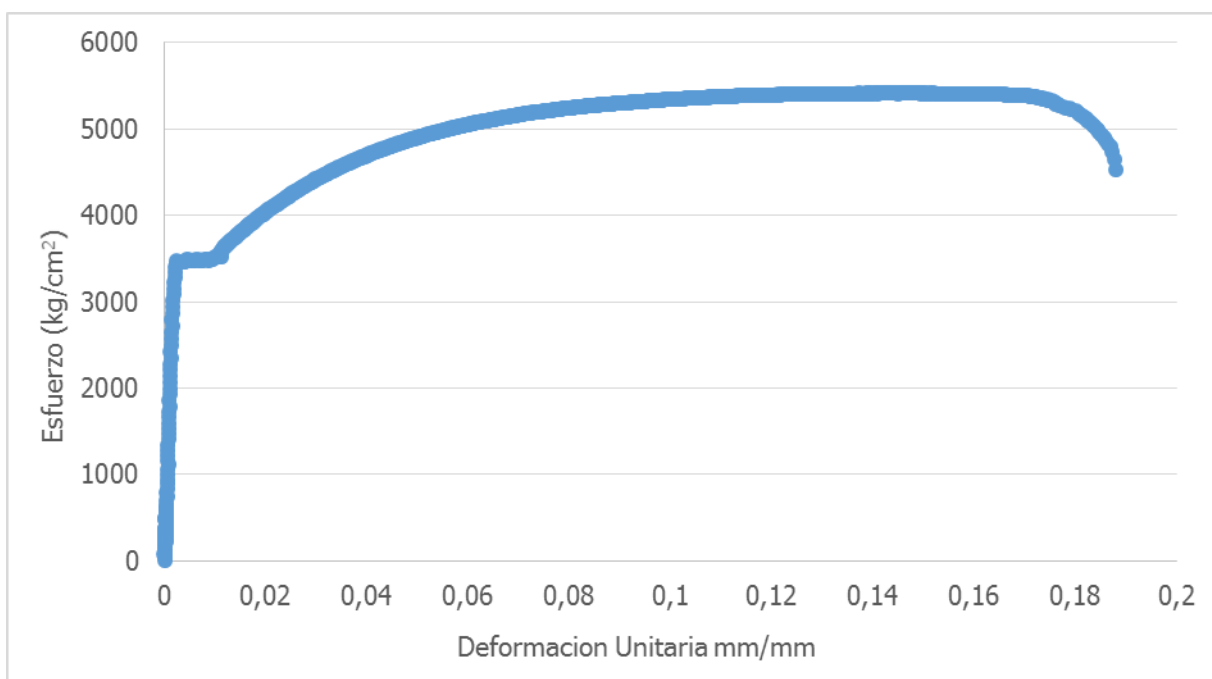


Figura 13. Curva esfuerzo vs deformación unitaria para una varilla No. 3.

## Capítulo 3. Características de los especímenes de prueba

### 3.1 Geometría de las paredes de mampostería confinada

Para facilidad de identificación de los cinco muros se utilizó los códigos mostrados en el Cuadro 14 para referirse a cada pared según su relación de aspecto.

Cuadro 14. Códigos de identificación de los muros.

Relación de aspecto h/l	Código
0,51	RA.5
0,75	RA.75
1,02	RA1
1,58	RA1.5
2,03	RA2

El refuerzo del paño de mampostería fue el mismo para los cinco muros, este corresponde a varilla No. 3 grado 40 @ 60 cm tanto para el acero vertical como el horizontal. El acero horizontal fue colocado en la sisa de un centímetro de espesor y solo se rellenaron las celdas que contenían acero vertical. Todos los muros poseen la misma altura, por lo que la variación de aspecto se da únicamente en el largo de los especímenes, de la Figura 14 a la Figura 18 se muestran las vistas laterales para las paredes. Todas las cotas se encuentran en centímetros.

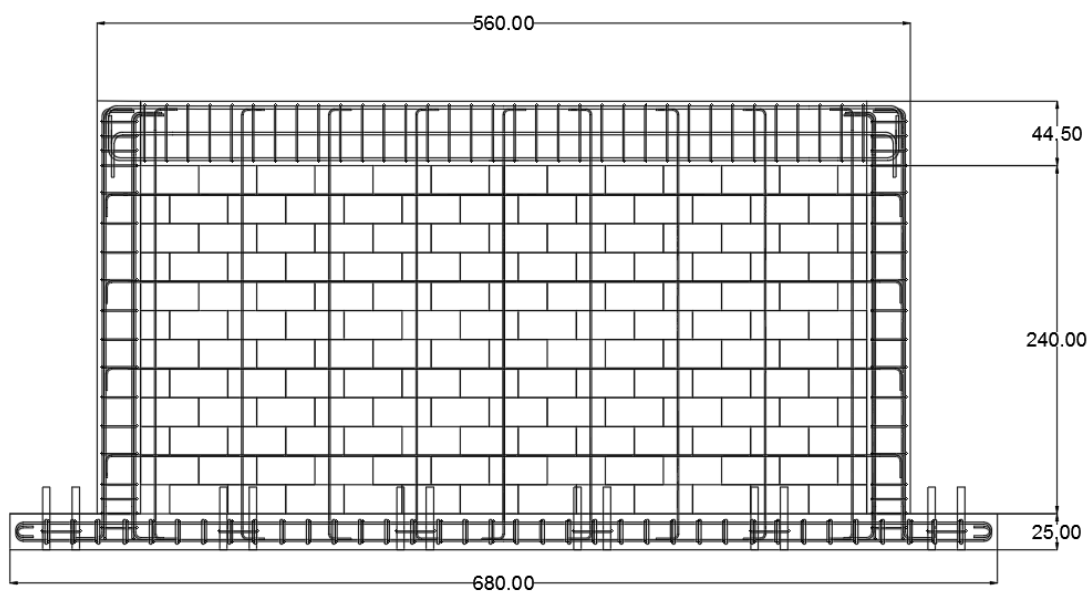


Figura 14. Vista lateral de muro RA.5.

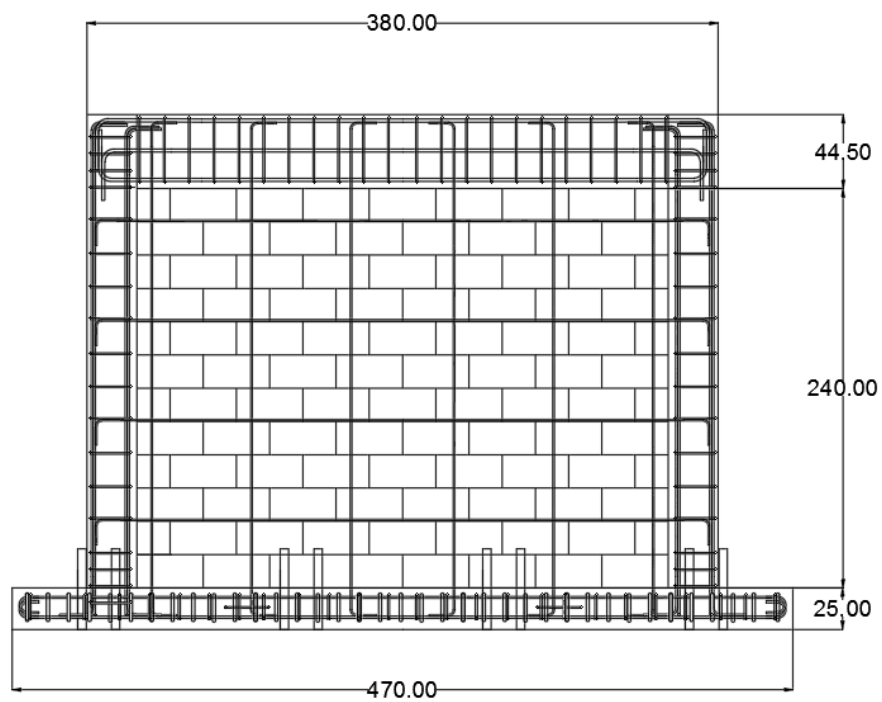


Figura 15. Vista lateral de muro RA.75.

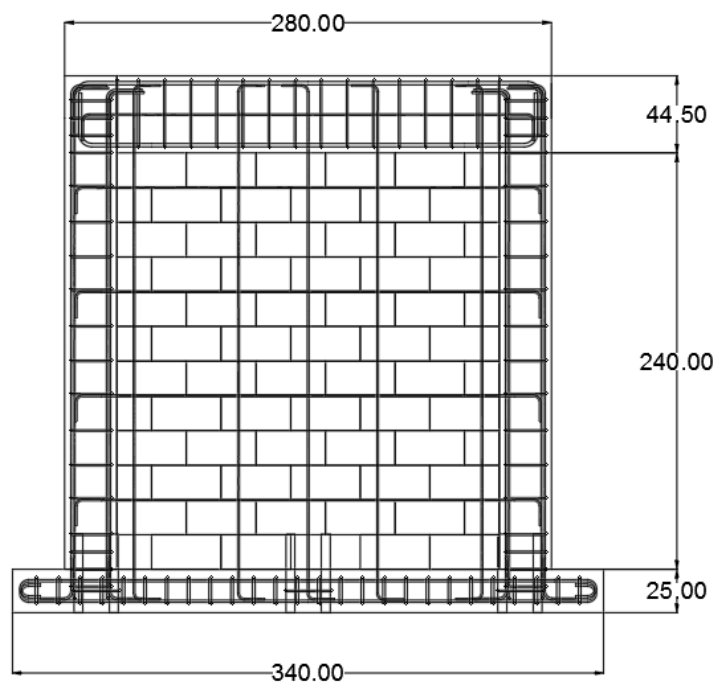


Figura 16. Vista lateral de muro RA.1.

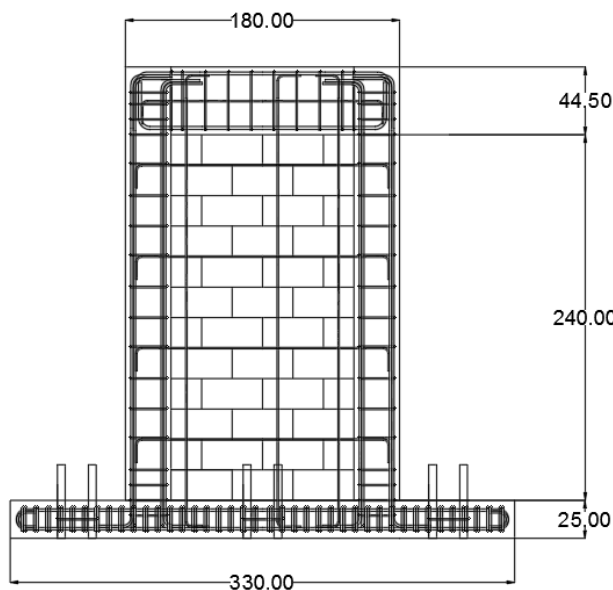


Figura 17. Vista lateral de muro RA1.5.

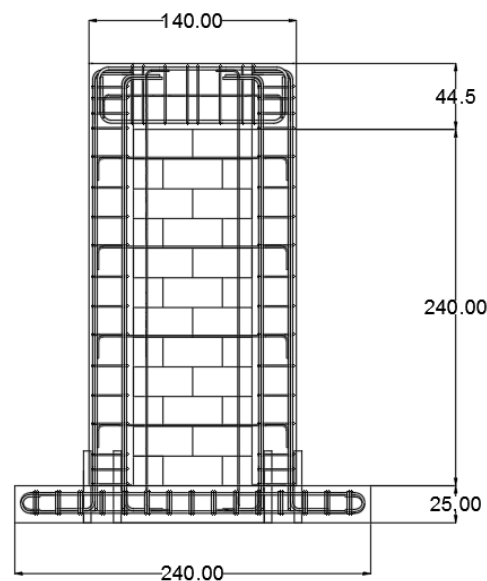


Figura 18. Vista lateral de muro RA2.

La proporción de acero en los muros ( $\rho$ ) fue calculada tanto para la dirección vertical como la horizontal, en el Cuadro 15 se muestra la cantidad de acero que existe solamente en el paño de mampostería. Se puede observar que el porcentaje de refuerzo vertical es muy similar para todos los muros, aumentando un poco para las paredes más esbeltas debido a que se sigue la regla de colocar una varilla en la primera celda de cada extremo y al disminuir el área de mampostería esto provoca más cantidad de acero al cumplir la separación de 60 cm. El acero horizontal es el mismo en todos los muros debido a que poseen la misma altura.

Cuadro 15. Proporción de refuerzo vertical y horizontal en el paño de mampostería.

Muro	h (cm)	$L_p$ (cm)	$h/L_p$	Acero vertical	$A_{sv}$ (cm <sup>2</sup> )	$\rho_v$ (%)	Acero horizontal	$A_{sh}$ (cm <sup>2</sup> )	$\rho_h$ (%)
RA.5	240,0	500	0,48	9 $\emptyset$ 0,95	6,41	0,09	4 $\emptyset$ 0,95	2,85	0,08
RA.75	240,0	320	0,75	6 $\emptyset$ 0,95	4,28	0,09	4 $\emptyset$ 0,95	2,85	0,08
RA1	240,0	220	1,09	5 $\emptyset$ 0,95	3,56	0,11	4 $\emptyset$ 0,95	2,85	0,08
RA1.5	240,0	120	2,00	3 $\emptyset$ 0,95	2,14	0,12	4 $\emptyset$ 0,95	2,85	0,08
RA2	240,0	80	3,00	2 $\emptyset$ 0,95	1,43	0,12	4 $\emptyset$ 0,95	2,85	0,08

## 3.2 Elementos de confinamiento

### 3.2.1 Columnas

Las columnas poseen las mismas dimensiones en todos los muros, no obstante, su refuerzo longitudinal varía, en la Figura 19 se muestra el detalle para las paredes RA.5, RA.75 y RA1, mientras que en la Figura 20 se observa la columna para los muros RA1.5 y RA2.

Las columnas son del mismo espesor del muro de 15 cm por 30 cm de ancho. El CSCR 10/14 en la sección de 9.9 *Muros de mampostería confinada*, condiciona un ancho mínimo para el elemento confinante de 20 cm (CFIA, 2016), se decidió utilizar 30 cm para que existiera una mejor modulación con las relaciones de aspecto que se necesitaban.

El CSCR 10/14 establece en la sección 9.9.3 que el refuerzo mínimo del elemento confinante debe de ser 4 varillas longitudinales deformadas No. 3 y aros de alambre corrugado de 5,6 mm de diámetro cada 20 cm o de 5 mm de diámetro cada 15 cm (CFIA, 2016). En el caso de las columnas utilizadas para los especímenes, se decidió por 8 varillas longitudinales No. 4 grado 60 para los muros RA.5, RA.75 y RA1, mientras que para los muros más esbeltos se aumentó el área de refuerzo a 6 varillas No. 5 grado 60.

El alto porcentaje de acero longitudinal en las columnas se debe a que se buscó que la falla en el paño de mampostería se diera principalmente a esfuerzos de cortante, las columnas soportan la mayoría de los esfuerzos de flexión lo que incentiva una falla por cortante en el paño.

Los aros corresponden a varilla No. 3 grado 40 cada 20 cm lo cual cumple con el mínimo establecido por el CSCR 10/14. El concreto de este elemento fue diseñado para una capacidad a la compresión  $f'_c$  de 210 kg/cm<sup>2</sup>. Todas las varillas longitudinales fueron ancladas en sus extremos con ganchos estándar apropiados.

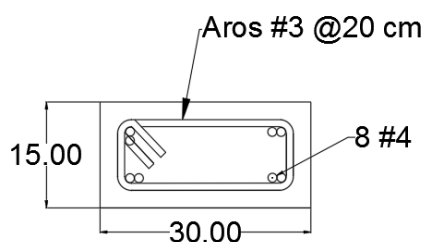


Figura 19. Detalle de columna en muros RA.5, RA.75 y RA1.

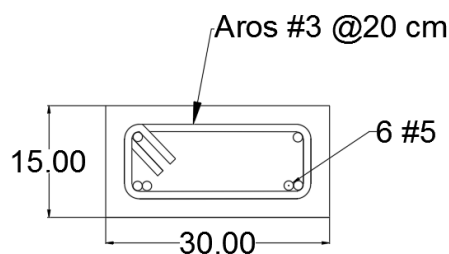


Figura 20. Detalle de columna en muros RA1.5 y RA2.

En el Cuadro 16 se observa la proporción de acero de refuerzo ( $\rho$ ) en las columnas. Los muros más esbeltos (RA1.5, RA2) poseen proporciones de acero longitudinal mayores debido a lo mencionado anteriormente. El refuerzo horizontal fue el mismo en todas las columnas.

Cuadro 16. Proporción de acero de refuerzo en una columna.

Muro	h (cm)	l <sub>col</sub> (cm)	Acero Longitudinal (cm <sup>2</sup> )	As (cm <sup>2</sup> )	pv col (%)	Acero de aros (cm <sup>2</sup> )	Asv (cm <sup>2</sup> )	ph col (%)
RA.5	284,5	30	8ø1,27	10,13	2,25	ø0,95 @ 20 cm	9,26	0,22
RA.75	284,5	30	8ø1,27	10,13	2,25	ø0,95 @ 20 cm	9,26	0,22
RA1	284,5	30	8ø1,27	10,13	2,25	ø0,95 @ 20 cm	9,26	0,22
RA1.5	284,5	30	6ø1,59	11,88	2,64	ø0,95 @ 20 cm	9,26	0,22
RA2	284,5	30	6ø1,59	11,88	2,64	ø0,95 @ 20 cm	9,26	0,22

Por último, en el Cuadro 17 se muestra la proporción de acero total en los muros, como era de esperarse debido al aumento del refuerzo longitudinal en las columnas y el paño de mampostería, los muros con mayor relación de aspecto poseen razones de acero vertical mayores.

Cuadro 17. Proporción de acero en los muros.

Muro	h total (cm)	L (cm)	h/l	pv total (%)	ph total (%)
RA.5	284,50	560	0,51	0,32	0,50
RA.75	284,50	380	0,75	0,43	0,50
RA1	284,50	280	1,02	0,57	0,50
RA1.5	284,50	180	1,58	0,96	0,50
RA2	284,50	140	2,03	1,20	0,50

### 3.2.2 Viga corona

Las vigas corona poseen un alto de 44,5 cm y un espesor igual al muro de 15 cm. El refuerzo longitudinal corresponde a 6 varillas No. 6 grado 60 para el muro RA.5 y cuatro No. 6 grado 60 con dos No.3 grado 40 en el medio de la viga para los muros restantes, todas poseen aros de varilla No. 3 cada 20 cm. El concreto de este elemento fue diseñado para una capacidad a la compresión  $f'_c$  de 210 kg/cm<sup>2</sup>. En la Figura 21 se observa el detalle de la viga del muro RA.5 y en la Figura 22 el detalle para las otras cuatro paredes. Todas las varillas longitudinales

fueron ancladas en sus extremos con ganchos estándar apropiados. El recubrimiento de todos los elementos de confinamiento fue de 2,5 cm.

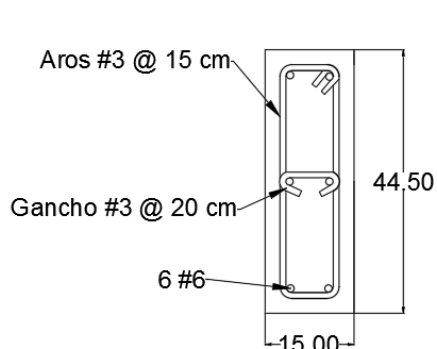


Figura 21. Detalle de viga corona muro RA.5.

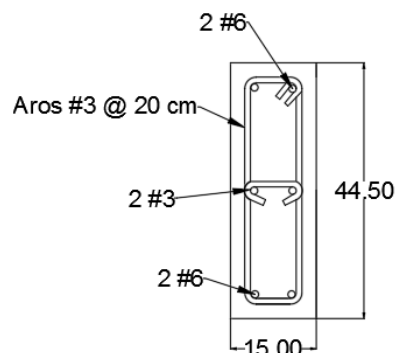


Figura 22. Detalle de viga corona muros RA.75, RA1, RA1.5 y RA2.

### 3.3 Cimentaciones

Los detalles de las cimentaciones para los cinco muros se muestran de la Figura 23 a la Figura 27. En el detalle del muro RA.5 se muestran los pasantes de PVC de 3,8 cm de diámetro que se colocaron en todas las paredes, su función fue crear los huecos para los pernos que anclan las cimentaciones al piso fuerte, se les colocó tres aros No. 3 dentro de la cimentación para el confinamiento y que mantuvieran su posición durante el colado del concreto.

El concreto fue diseñado para una resistencia a la compresión  $f'_c$  de 350 kg/cm<sup>2</sup>. Para estos elementos se utilizó un recubrimiento de 4 cm. Todas las varillas longitudinales fueron ancladas en sus extremos con ganchos estándar apropiados.

Para el muro RA.5 la cimentación fue de 25 cm x 175 cm x 680 cm, se le colocaron 20 varillas longitudinales No. 4, con aros No. 6 a cada 18 cm y aros más angostos No.4 a cada 18 cm. El detalle de la cimentación se observa en la Figura 23.



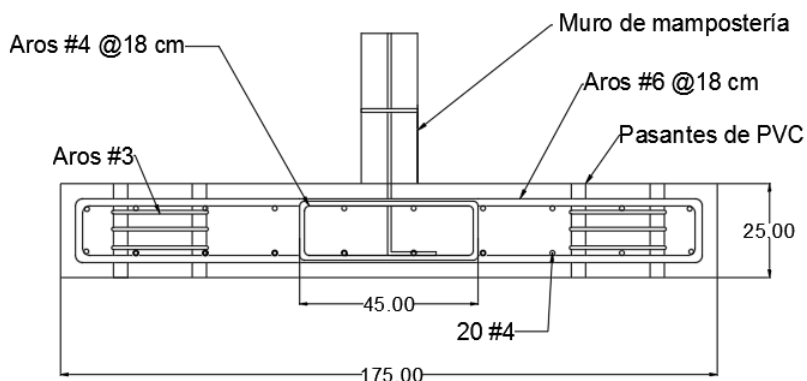


Figura 23. Sección transversal de la cimentación del muro RA.5.

En el muro RA.75 la cimentación fue de 25 cm x 175 cm x 470 cm, se le colocaron 16 varillas longitudinales No. 5 grado 60 con aros No. 6 a cada 12,5 cm y aros más angostos No. 4 a cada 18 cm. El detalle de la cimentación se observa en la Figura 24.

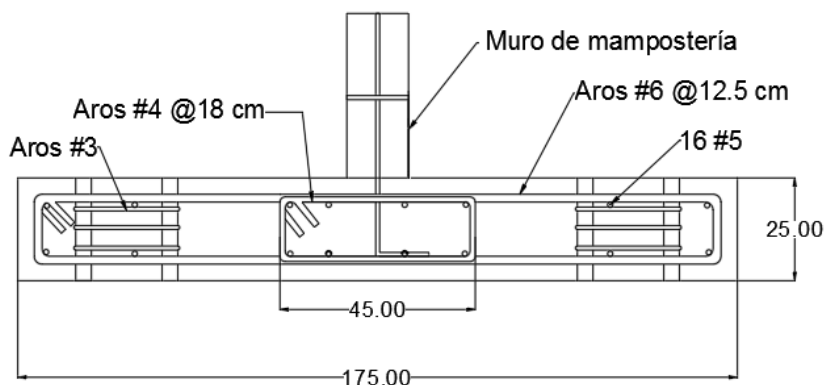


Figura 24. Sección transversal de la cimentación del muro RA.75.

En el muro RA.1 la cimentación fue de 25 cm x 70 cm x 340 cm, se le colocaron 20 varillas longitudinales No. 4 grado 60 con aros No. 6 a cada 20 cm. El detalle de la cimentación se observa en la Figura 25.

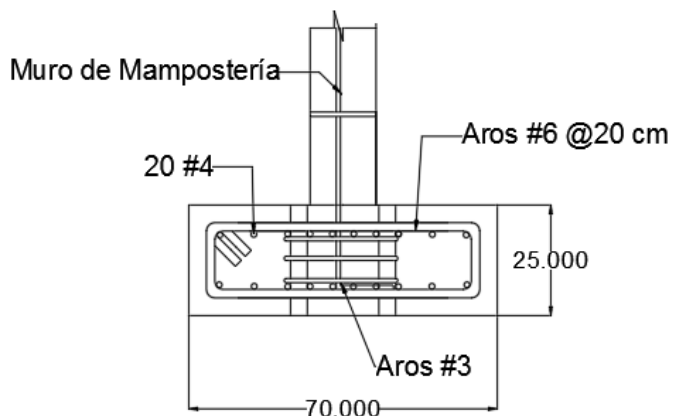


Figura 25. Sección transversal de la cimentación del muro RA.1.

En el muro RA1.5 la cimentación fue de 25 cm x 125 cm x 330 cm, se le colocaron 24 varillas longitudinales No. 5 grado 60 con aros No. 5 a cada 8 cm. El detalle de la cimentación se observa en la Figura 26.

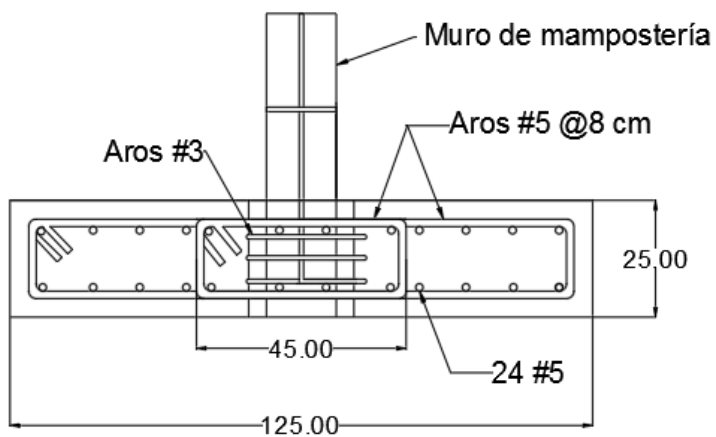


Figura 26. Sección transversal de la cimentación del muro RA.1.5.

En el muro RA.2 la cimentación fue de 25 cm x 125 cm x 240 cm, se le colocaron 18 varillas longitudinales No. 5 grado 60 con aros No. 5 a cada 15 cm El detalle de la cimentación se observa en la Figura 27.

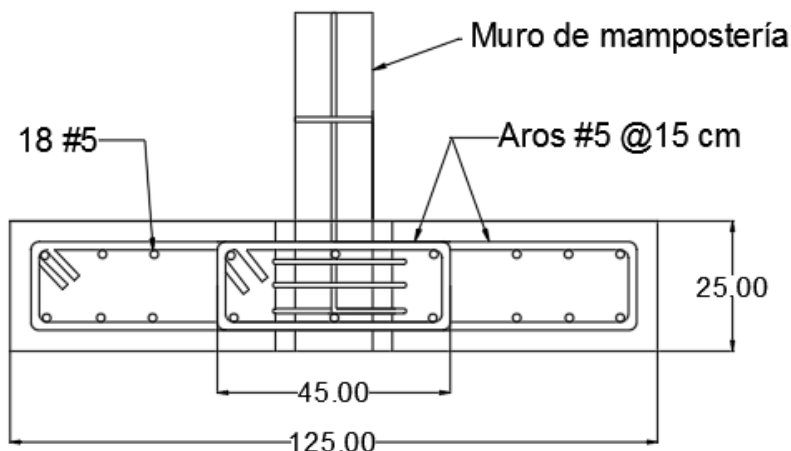


Figura 27. Sección transversal de la cimentación del muro RA.2.

### 3.4 Proceso constructivo

La construcción de los especímenes se dio en su totalidad en el Lanamme-UCR. La mano de obra fue contratada por el director de este proyecto y se realizó inspección del proceso constructivo de manera casi diaria. Los muros se construyeron de manera simultánea iniciando con las armaduras de las cimentaciones como se muestra en la Figura 28.



Figura 28. Armadura de cimentación en proceso de construcción.

Al finalizar estos elementos se trasladaron al piso fuerte como se observa en la Figura 29 para asegurarse que los pasantes de PVC coincidieran perfectamente con el piso fuerte, también se utilizaron aros para evitar que se desplazaran durante el colado.

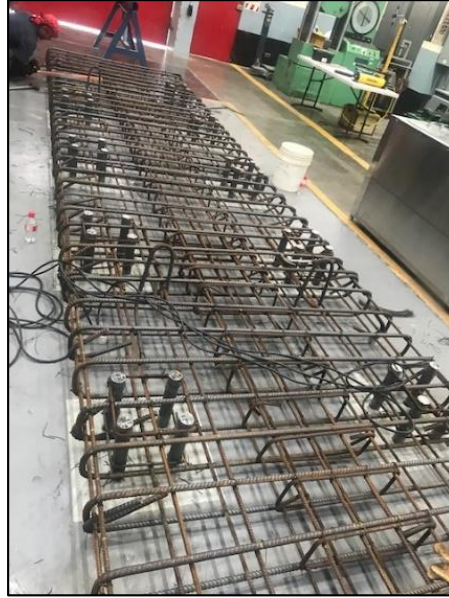


Figura 29. Colocación de pasantes de PVC en armadura de cimentación.

Antes de colocar las varillas verticales en la armadura de las cimentaciones se procedió a instalar las galgas extensiométricas correspondientes, primero fueron soldadas a las varillas para luego ser cubiertas con parafina y cinta como se muestra en la Figura 30.

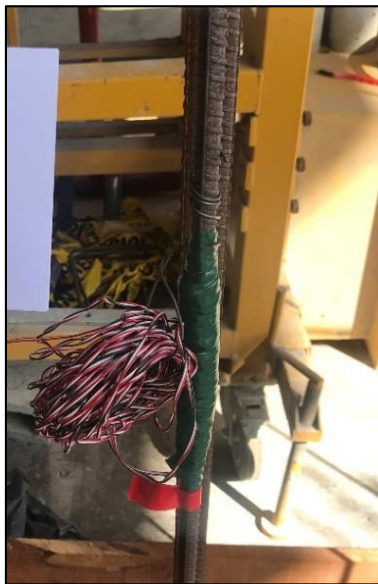


Figura 30. Galgas en refuerzo vertical.



Figura 31. Encofrado de armadura de cimentación.

Seguidamente se procedió al colado de las cimentaciones, como se mencionó en el Capítulo 2 el concreto fue entregado por la empresa AMCO, todas las cimentaciones fueron coladas el mismo día.

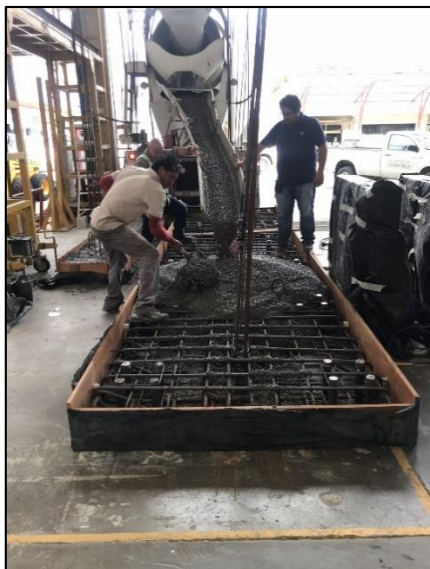


Figura 32. Colocado de concreto de las cimentaciones.



Figura 33. Cimentaciones coladas.

Las cimentaciones fueron desmoldadas el día siguiente al colado. Seguidamente se esperó cinco días para que el concreto endureciera y luego se comenzó con el levantamiento de los paños de mampostería como se observa en la Figura 34. Durante este proceso no se llenó las celdas verticales debido a que más adelante se utilizó un concreto autocompactable colado desde lo alto de los muros.



Figura 34. Primeras hiladas de bloques colocadas.

Las paredes se levantaron hasta la altura de la viga corona como se muestra en la Figura 35 y luego se hicieron ventanas de inspección en las celdas donde se colocó el refuerzo vertical como se observa en la Figura 36.



Figura 35. Paño de mampostería completado sin relleno.

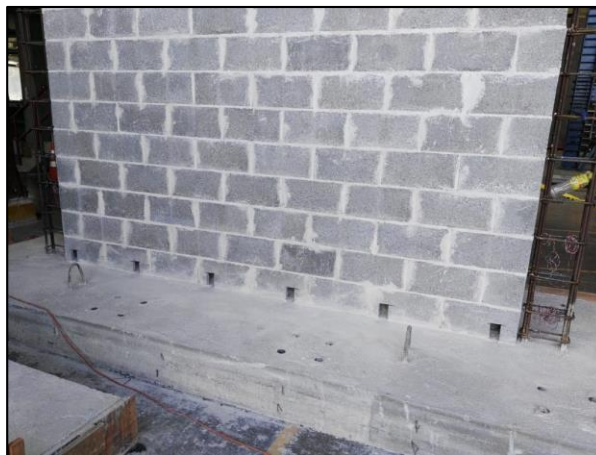


Figura 36. Ventanas de inspección para el colado de altura.

Para realizar el relleno de los muros se utilizó el equipo Monomix con concreto de relleno CRC Autocompactable de Intaco como se muestra en la Figura 37. Se ejecutó una prueba de flujo que se observa en la Figura 38 para calibrar la fluidez del concreto. Luego se procedió al colado de las celdas con acero vertical como se muestra en la Figura 39.



Figura 37. Equipo Monomix para el colado del concreto de relleno.



Figura 38. Prueba de flujo del concreto CRC autocompactable.



Figura 39. Llenado de celdas con acero vertical.

La siguiente etapa del proceso consistió en construir las vigas y columnas en todos los muros, primero se realizó el encofrado como se muestra en la Figura 40, para luego proceder al colado de todos los marcos con concreto hecho en obra.

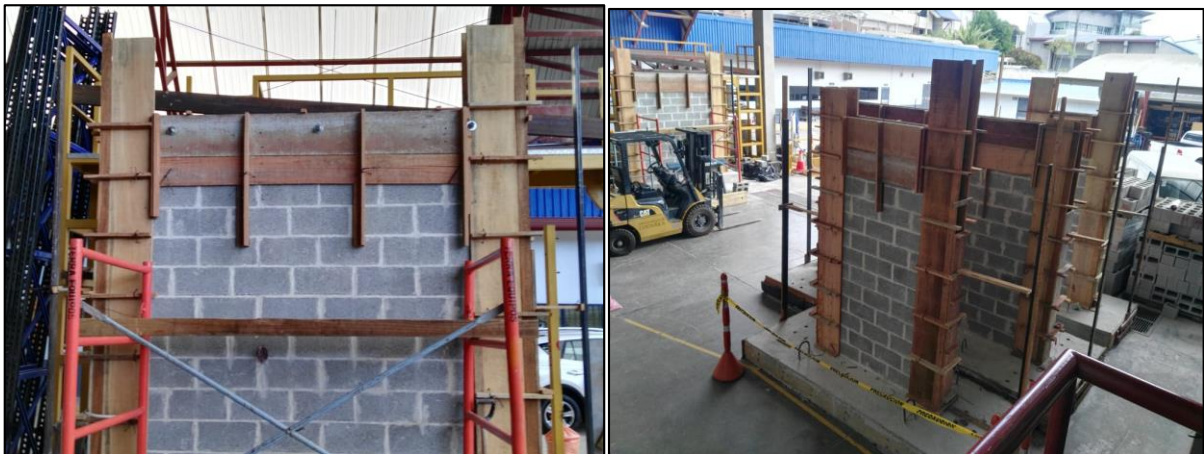


Figura 40. Encofrado de columnas y vigas.

En la Figura 41 se observa cómo se colocaron pernos de acero en las vigas, los cuales se utilizaron para anclar la viga de carga en el proceso de falla. Los marcos de concreto fueron desmoldados el día siguiente al colado y se curaron junto con los muros por 28 días.



Figura 41. Vigas y columnas coladas.



Figura 42. Muros finalizados.

### 3.5 Instrumentación y montaje de los muros

La instrumentación durante la falla en todos los muros correspondió a cinco transformadores diferenciales de variación lineal (LVDT), los cuales midieron los desplazamientos en distintas zonas del muro durante la prueba. Las zonas donde se colocaron se observan en la Figura 43, el LVDT uno corresponde a la cimentación y se utilizó para obtener el desplazamiento neto del muro, ya que permite desprestigiar el posible movimiento de la base rígida. El LVDT 5 permitió determinar la deflexión máxima al tope del muro.



También se colocaron galgas extensiométricas en el acero vertical y horizontal en todos los muros, el objetivo fue determinar si se llegó a la fluencia en el refuerzo en diferentes puntos de la pared, en la Figura 43 se muestra las zonas donde fueron colocadas las galgas.

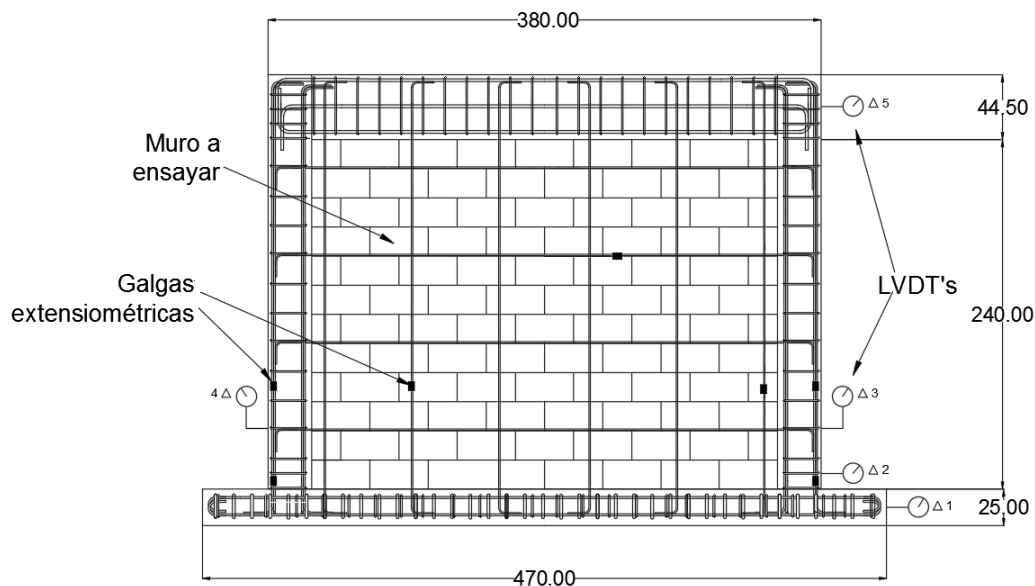


Figura 43. Instrumentación utilizada en todos los muros.

Debido a que el objetivo del proyecto es determinar la resistencia a cortante resultado de la aplicación de cargas laterales, se realizó sobre los muros una prueba ASTM E2126-11 "Métodos de prueba estándar para carga cíclica (Invertida) para la resistencia al corte de elementos verticales del sistema de resistencia de fuerzas laterales para edificios" (ASTM, 2011), en la cual por medio de un actuador hidráulico se generó una carga cíclica lateral sobre la pared, se utilizaron tres ciclos de diferentes magnitudes de desplazamiento sobre el muro obteniendo así una curva histerética de carga desplazamiento de la cual se obtiene el valor de resistencia pico de la pared.

En la Figura 44 se observa el montaje de los muros para la prueba, en el muro fuerte se colocó el actuador hidráulico que posee una celda de carga, este se conectó a una viga de acero colocada sobre el muro a ensayar.

El montaje consistió en anclar los muros al piso fuerte por medio de pernos como se observa en la Figura 45, luego se colocó sobre el muro una viga de carga de acero la cual fue conectada por medio de angulares a los pernos de la viga corona de la pared. Se utilizaron tres vigas de

carga diferentes durante las fallas debido al cambio en tamaño de los muros, en la Figura 45 se muestra el montaje del muro RA.5 donde se utilizó la viga de mayor tamaño.

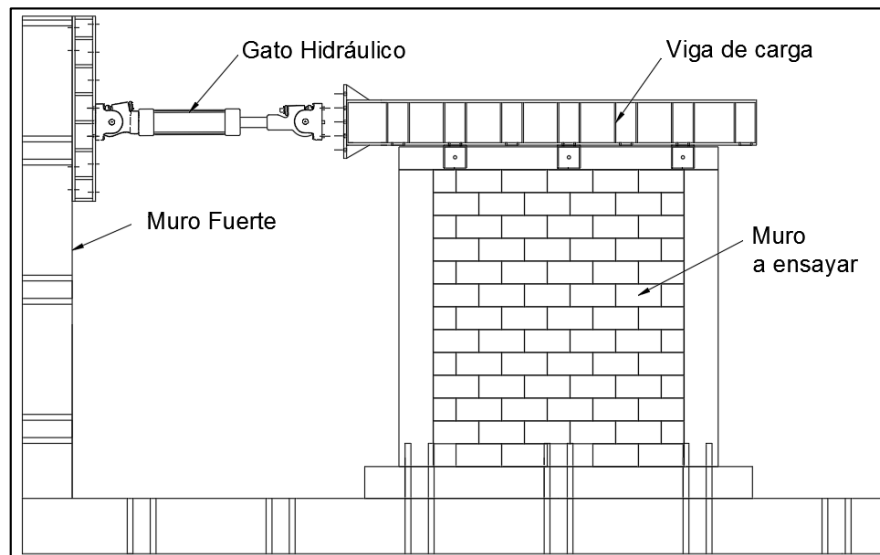


Figura 44. Montaje utilizado para la falla de los especímenes.

Para evitar el pandeo o un desplazamiento fuera del plano en los muros, se colocaron dos arriostres como se observa en la Figura 46, para asegurarlos a la pared fueron soldados a la viga de carga.



Figura 45. Montaje muro RA.5.

Por último se ancló el gato hidráulico a la viga de carga por medio de pernos como se muestra en la Figura 46.



Figura 46. Anclaje de gato hidráulico a viga de carga.

## Capítulo 4. Capacidad nominal teórica de los especímenes según códigos CSCR-10/14, TMS 402/602-16 y Borrador CSCR

### 4.1 Capacidad nominal a cortante

La capacidad nominal a cortante se estimó por medio de los tres códigos estudiados, además, se consideraron los elementos de borde de concreto en la resistencia total del muro de tres maneras diferentes:

- Capacidad del paño de mampostería como elemento individual (solo se considera el largo del paño y se ignora cualquier aporte de las columnas de concreto) ( $V_{n_{PM}}$ ).
- Capacidad al considerar toda la longitud del muro como mampostería ( $V_{n_{TM}}$ ).
- Capacidad del paño de mampostería y los elementos de borde sumados individualmente ( $V_{n_{EB}}$ ).

#### 4.1.1 Datos iniciales

A continuación se muestran las propiedades teóricas que se consideraron para los cálculos de capacidad:

- Altura del muro de mampostería ( $h$ ): 240 cm
- Altura de viga corona ( $h_v$ ): 44,5 cm
- Distancia  $d$  en la columna ( $d_{col}$ ): 25,92 cm
- Ancho de muro y columnas ( $b$ ): 15 cm
- Ancho efectivo ( $b_w$ ): 5 cm
- Área de acero en los aros de las columnas ( $A_v$ ): 1,42 cm<sup>2</sup>
- Resistencia a la compresión de la mampostería a los 28 días Clase A ( $f'_m$ ): 100 kg/cm<sup>2</sup>
- Resistencia a la compresión del concreto a los 28 días ( $f'_c$ ): 210 kg/cm<sup>2</sup>
- Esfuerzo de fluencia del acero G40 ( $f_y$ ): 2800 kg/cm<sup>2</sup>
- Esfuerzo de fluencia del acero G60 ( $f_y$ ): 4200 kg/cm<sup>2</sup>
- Área acero horizontal en la mampostería ( $A_{sh}$ ): 0,71 cm<sup>2</sup>
- Área acero vertical en la mampostería ( $A_{sv}$ ): 0,71 cm<sup>2</sup>
- Espaciamiento de varillas horizontal ( $S_h$ ): 60 cm
- Espaciamiento de aros en columna ( $s$ ): 20 cm

#### 4.1.2 Factores de reducción cortante

Según el Cuadro 2, cuando se considera la capacidad a cortante para la mampostería los factores de reducción corresponden a:

- Factor de reducción para el CSCR 10/14  $\phi$ : 0,6
- Factor de reducción para el TMS 402/602-16  $\phi$ : 0,8
- Factor de reducción para el Borrador CSCR  $\phi$ : 0,7

#### 4.1.3 Relación de aspecto

Las ecuaciones para determinar la capacidad a cortante de la mampostería fueron estipuladas en 1.4.3, se mencionó como  $\frac{M_u}{V_u d}$  afecta esta estimación y existe un límite al valor de uno.

Al considerar los diferentes escenarios para el cálculo de la capacidad total de los muros, se determinan dos valores de  $\frac{M_u}{V_u d}$ , en primer lugar cuando se tomó en cuenta solo el largo del paño de mampostería y por otro lado cuando se utilizó la mampostería junto con las columnas. En el Cuadro 18 se muestran los valores a utilizar en cada caso. Cabe destacar que los muros RA1, RA1.5 y RA2 superan la restricción y por lo tanto utilizan el valor más conservador (uno).

Cuadro 18.  $M_u/V_u d$  a utilizar en el cálculo de capacidad.

Muro	Solo considerando el largo del paño de mampostería		Considerando la longitud total del muro	
	$M_u/V_u d$	$M_u/V_u d$ a utilizar	$M_u/V_u d$	$M_u/V_u d$ a utilizar
<b>RA.5</b>	0,58	0,58	0,52	0,52
<b>RA.75</b>	0,92	0,92	0,77	0,77
<b>RA1</b>	1,35	1,00	1,05	1,00
<b>RA1.5</b>	2,59	1,00	1,67	1,00
<b>RA2</b>	4,06	1,00	2,19	1,00

#### 4.1.4 Capacidad al considerar el paño de mampostería como elemento individual ( $V_{n_{PM}}$ )

En este caso solo se toma en cuenta el paño de mampostería de los muros, ignorando cualquier aporte de las columnas de concreto a la capacidad nominal total, se utilizaron las ecuaciones de capacidad de la mampostería y el acero de refuerzo horizontal que se estipularon en 1.4.3 para el código correspondiente.

Aplicando las ecuaciones para el muro RA.5 se utilizaron los siguientes valores:

- Largo del paño de mampostería ( $L_p$ ): 500 cm
- Distancia desde la fibra extrema en compresión hasta la última varilla ( $d$ ): 490 cm

#### 4.1.4.1 Capacidad $V_{n_{PM}}$ según el CSCR 10/14

Según el CSCR 10/14 en la sección 1.4.3, se debe utilizar la suma de las ecuaciones [1-4] y [1-8] para determinar la capacidad de la mampostería en cortante con cargas paralelas a su plano.

La capacidad del acero se reduce en un 50 % debido a que el acero horizontal no se encuentra embebido en concreto en toda su longitud.

$$V_{n_{PM}} = \left\{ (1 - 0,44(0,58)) \sqrt{100 \frac{kg}{cm^2} + 0,25(0)} \right\} (490 \text{ cm})(5 \text{ cm}) + \frac{0,5 (0,71 \text{ cm}^2)(2800 \text{ kg/cm}^2)(490 \text{ cm})}{2(60 \text{ cm})}$$

$$V_{n_{PM}} = 22,30 \text{ t}$$

#### 4.1.4.2 Capacidad $V_{n_{PM}}$ según TMS 402/602-16

La capacidad de la mampostería según el TMS 402/602-16 se calcula por medio de la suma de las ecuaciones [1-5] y [1-8], se aplicó el factor  $\gamma_g$  de 0,75 por tratarse de mampostería parcialmente rellena.

El código TMS 402/602-16 contempla un área de cortante  $A_{nv}$  para mampostería parcialmente rellena, se utilizó la ecuación [1-7] junto con los datos que se muestran en Cuadro 19 para calcularla.

Cuadro 19. Dimensiones para el cálculo  $A_{nv}$  con propiedades teóricas de los materiales.

Dimensiones	Valor (cm)
Paredes externas ( $t_{fs}$ )	2,50
Alma Internas ( $t_{wi}$ )	2,50
Alma Externa ( $t_{we}$ )	2,50
Ancho celda ( $b_c$ )	10,00
Largo de celda ( $l_c$ )	15,75

$$A_{nv} = \left[ (10 \text{ cm})(15,75 \text{ cm} + 2,5 \text{ cm} + 2,5 \text{ cm}) \left( \frac{1}{60 \text{ cm}} \right) + 2(2,5 \text{ cm}) \right] * 100 * 5 \text{ m} = 4229,17 \text{ cm}^2$$

$$Vn_{PM} = 0,75 \left[ \left\{ (1 - 0,44(0,58)) \left( \sqrt{100 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} \right) (4229,17 \text{ cm}^2) + (0) \right\} + \frac{(0,71 \text{ cm}^2) \left( 2800 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) (490 \text{ cm})}{60 \text{ cm}} \right]$$

$$Vn_{PM} = 31,17 \text{ t}$$

#### 4.1.4.3 Capacidad $Vn_{PM}$ según Borrador CSCR

La capacidad de la mampostería según el Borrador CSCR se calcula por medio de la suma de las ecuaciones [1-6] y [1-8], se aplicó el factor  $\gamma_g$  de 0,75 por tratarse de mampostería parcialmente rellena.

El Borrador contempla un área de cortante  $A_{nv}$  para mampostería parcialmente rellena, se utilizó la ecuación [1-7] junto con los datos que se muestran en Cuadro 19 para calcularla.

$$Vn_{PM} = 0,75 \left[ \left\{ (1 - 0,44(0,58)) \left( \sqrt{100 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} \right) + (0) \right\} (4229,17 \text{ cm}^2) + \frac{(0,4) (0,71 \text{ cm}^2) \left( 2800 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) (490 \text{ cm})}{60 \text{ cm}} \right]$$

$$Vn_{PM} = 28,49 \text{ t}$$

#### 4.1.5 Capacidad al considerar toda la longitud del muro como mampostería ( $Vn_{TM}$ )

En este caso se considera todo el largo del muro incluyendo las columnas como mampostería, se utilizaron las ecuaciones de capacidad de la mampostería y el acero de refuerzo horizontal que se estipularon en 1.4.3 para el código correspondiente.

Aplicando las ecuaciones para el muro RA.5 se utilizaron los siguientes valores:

- Largo del paño de mampostería ( $L_p$ ): 560 cm
- Distancia desde la fibra extrema en compresión hasta la última varilla ( $d$ ): 550 cm

##### 4.1.5.1 Capacidad $Vn_{TM}$ según el CSCR 10/14

Según el CSCR 10/14 se debe utilizar la suma de las ecuaciones [1-4] y [1-8] para determinar la capacidad de la mampostería en cortante con cargas paralelas a su plano.

La capacidad del acero se reduce en un 50% debido a que el acero horizontal no se encuentra embebido en concreto en toda su longitud.

$$Vn_{TM} = \left\{ (1 - 0,44(0,52)) \sqrt{100 \frac{kg}{cm^2}} + 0,25(0) \right\} (550 \text{ cm})(5 \text{ cm}) + \frac{0,5 (0,71 \text{ cm}^2)(2800 \frac{kg}{cm^2})(550 \text{ cm})}{2(60 \text{ cm})}$$

$$Vn_{TM} = 25,80 \text{ t}$$

#### 4.1.5.2 Capacidad $Vn_{TM}$ según TMS 402/602-16

La capacidad de la mampostería según el TMS 402/602-16 se calcula por medio de la suma de las ecuaciones [1-5] y [1-8], se aplicó el factor  $\gamma_g$  de 0,75 por tratarse de mampostería parcialmente rellena.

El código TMS 402/602-16 contempla un área de cortante  $A_{nv}$  para mampostería parcialmente rellena, se utilizó la ecuación [1-7] junto con los datos que se muestran en Cuadro 19 para calcularla.

$$A_{nv} = \left[ (10 \text{ cm})(15,75 \text{ cm} + 2,5 \text{ cm} + 2,5 \text{ cm}) \left( \frac{1}{60 \text{ cm}} \right) + 2(2,5 \text{ cm}) \right] * 100 * 5,6 \text{ m} = 4736,7 \text{ cm}^2$$

$$Vn_{TM,0,75} = \left[ \left\{ (1 - 0,44(0,52))(4736,7 \text{ cm}^2) \left( \sqrt{100 \frac{kg}{cm^2}} \right) + (0) \right\} + \frac{(0,71 \text{ cm}^2) (2800 \frac{kg}{cm^2}) (550 \text{ cm})}{60 \text{ cm}} \right]$$

$$Vn_{TM} = 35,96 \text{ t}$$

#### 4.1.5.3 Capacidad $Vn_{TM}$ según Borrador CSCR

La capacidad de la mampostería según el Borrador CSCR se calcula por medio de la suma de las ecuaciones [1-6] y [1-8], se aplicó el factor  $\gamma_g$  de 0,75 por tratarse de mampostería parcialmente rellena.

El Borrador contempla un área de cortante  $A_{nv}$  para mampostería parcialmente rellena, se utilizó la ecuación [1-7] junto con los datos que se muestran en Cuadro 19 para calcularla.

$$Vn_{TM} = 0,75 \left[ \left\{ (1 - 0,44(0,52)) \left( \sqrt{100 \frac{kg}{cm^2}} \right) + (0) \right\} (4736,7 \text{ cm}^2) + \frac{(0,4) (0,71 \text{ cm}^2) (2800 \frac{kg}{cm^2}) (550 \text{ cm})}{60 \text{ cm}} \right]$$

$$Vn_{TM} = 32,91 \text{ t}$$



#### 4.1.6 Capacidad del paño de mampostería y los elementos de borde sumados individualmente ( $V_{n_{EB}}$ ).

En este caso se tomó en cuenta la capacidad del paño de mampostería de los muros y la capacidad a cortante de las columnas de concreto. Fueron utilizadas las ecuaciones de capacidad de la mampostería y el acero de refuerzo horizontal que se estipularon en 1.4.3 para el código correspondiente.

Aplicando las ecuaciones para el muro RA.5 se utilizaron los siguientes valores para determinar la capacidad del paño de mampostería:

- Largo del paño de mampostería ( $L_p$ ): 500 cm
- Distancia desde la fibra extrema en compresión hasta la última varilla ( $d$ ): 490 cm

Para determinar el aporte en cortante de las columnas de concreto se determinó la capacidad según el ACI 318S-14 sección 22.5.5.1. Todos los muros poseen columnas iguales con respecto a su dimensión y refuerzo transversal, así que se calculó la capacidad del elemento de borde y se sumó con la determinada según  $V_{n_{PM}}$  para el código correspondiente.

La capacidad del concreto a cortante se determinó según la ecuación [4-1] como se muestra a continuación:

$$V_c = 0,53\sqrt{f'_c} d_{col}b \quad [4-1]$$

$$V_c = 0,53\sqrt{210 \text{ kg/cm}^2} (25,92 \text{ cm})(15 \text{ cm}) = 2985,58 \text{ kg}$$

En el caso de la capacidad en cortante de los aros de la columna se utilizó la sección 11.5.4.8 del ACI318S-14 la cual estipula la ecuación [4-2].

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d_{col}}{s} \quad [4-2]$$

$$A_v = 2(0,71 \text{ cm}^2) = 1,42 \text{ cm}^2$$

$$V_s = \frac{(1,42 \text{ cm}^2)(2800 \text{ kg/cm}^2)(25,92 \text{ cm})}{20 \text{ cm}} = 5151,90 \text{ kg}$$

Finalmente el cortante en las columnas se determinó sumando la capacidad del concreto con la del acero transversal.

$$V_{columna} = V_c + V_s \quad [4-3]$$

$$V_{columna} = 2985,58 \text{ kg} + 5151,90 \text{ kg} = 8137,5 \text{ kg}$$

$$V_{columnas} = (8137,48 \text{ kg})(2 \text{ columnas}) = 16274,9 \text{ kg}$$

$$V_{columnas} = 16,27 \text{ t}$$

#### 4.1.6.1 Capacidad $Vn_{EB}$ según el CSCR 10/14

Para determinar la capacidad total se utiliza el resultado de  $Vn_{PM}$  de la sección 4.1.4 y se adiciona la capacidad de las columnas calculada anteriormente.

$$Vn_{EB} = Vn_{PM} + V_{columnas} \quad [4-4]$$

$$Vn_{EB} = 22,30 + 16,27 = 38,57 \text{ t}$$

$$Vn_{EB} = 38,57 \text{ t}$$

#### 4.1.6.2 Capacidad $Vn_{EB}$ según TMS 402/602-16

Para determinar la capacidad total se utiliza el resultado de  $Vn_{PM}$  para el TMS 402/602-16 de la sección 4.1.4 y se adiciona la capacidad de las columnas.

$$Vn_{EB} = 31,17 + 16,27 = 47,44 \text{ t}$$

#### 4.1.6.3 Capacidad $Vn_{EB}$ según Borrador CSCR

Para determinar la capacidad total se utiliza el resultado de  $Vn_{PM}$  para el Borrador CSCR de la sección 4.1.4 y se adiciona la capacidad de las columnas.

$$Vn_{EB} = 28,49 + 16,27 = 44,76 \text{ t}$$

## 4.2 Resumen de capacidades calculadas con propiedades teóricas de los materiales

En el Cuadro 20 se muestran las capacidades calculadas para los tres códigos estudiados según los métodos mencionados anteriormente, por otro lado, en el Cuadro 21 se observan los valores de capacidad al aplicar el factor de reducción correspondiente a cada código. El método  $Vn_{EB}$  y el código TMS 402/602-16 mostraron los valores de capacidad total mayores, mientras que  $Vn_{PM}$  y el CSCR 10/14 presentaron los menores.

Cuadro 20. Resultados de capacidades nominales teóricas.

Muro	Código	$Vn_{PM}$ (t)	$Vn_{TM}$ (t)	$Vn_{EB}$ (t)
RA.5	CSCR 10/14	22,3	25,8	38,6
	TMS 402/602-16	28,5	32,9	44,8
	Borrador CSCR	31,2	36,0	47,4
	<b>Promedio</b>	<b>27,3</b>	<b>31,6</b>	<b>43,6</b>
RA.75	CSCR 10/14	12,3	15,3	28,6
	TMS 402/602-16	15,8	19,6	32,1
	Borrador CSCR	17,5	21,6	33,7
	<b>Promedio</b>	<b>15,2</b>	<b>18,8</b>	<b>31,5</b>
RA1	CSCR 10/14	8,1	9,8	24,4
	TMS 402/602-16	10,5	12,6	26,8
	Borrador CSCR	11,7	13,9	27,9
	<b>Promedio</b>	<b>10,1</b>	<b>12,1</b>	<b>26,4</b>
RA1.5	CSCR 10/14	4,5	6,2	20,8
	TMS 402/602-16	6,0	8,1	22,2
	Borrador CSCR	6,7	8,9	22,9
	<b>Promedio</b>	<b>5,7</b>	<b>7,7</b>	<b>22,0</b>
RA2	CSCR 10/14	3,0	4,7	19,3
	TMS 402/602-16	4,1	6,3	20,4
	Borrador CSCR	4,6	6,9	20,9
	<b>Promedio</b>	<b>3,9</b>	<b>6,0</b>	<b>20,2</b>

Cuadro 21. Resultados de capacidades nominales teóricas al aplicar el factor de reducción.

<b>Muro</b>	<b>Código</b>	$\phi Vn_{PM}$ <b>(t)</b>	$\phi Vn_{TM}$ <b>(t)</b>	$\phi Vn_{EB}$ <b>(t)</b>
<b>RA.5</b>	CSCR 10/14	13,4	15,5	23,1
	Borrador CSCR	21,8	25,2	31,3
	TMS 402/602-16	22,8	26,3	37,9
	<b>Promedio</b>	<b>19,3</b>	<b>22,3</b>	<b>30,8</b>
<b>RA.75</b>	CSCR 10/14	7,4	9,2	17,1
	Borrador CSCR	12,2	15,1	22,4
	TMS 402/602-16	12,6	15,7	27,0
	<b>Promedio</b>	<b>10,7</b>	<b>13,3</b>	<b>22,2</b>
<b>RA1</b>	CSCR 10/14	4,9	5,9	14,6
	Borrador CSCR	8,2	9,8	18,7
	TMS 402/602-16	8,4	10,1	22,4
	<b>Promedio</b>	<b>7,1</b>	<b>8,6</b>	<b>18,6</b>
<b>RA1.5</b>	CSCR 10/14	2,7	3,7	12,5
	Borrador CSCR	4,7	6,2	15,6
	TMS 402/602-16	4,8	6,5	18,3
	<b>Promedio</b>	<b>4,0</b>	<b>5,5</b>	<b>15,4</b>
<b>RA2</b>	CSCR 10/14	1,8	2,8	11,6
	Borrador CSCR	3,2	4,8	14,3
	TMS 402/602-16	3,3	5,0	16,7
	<b>Promedio</b>	<b>2,8</b>	<b>4,2</b>	<b>14,2</b>

Al realizar una comparación de las capacidades calculadas entre los códigos utilizados, se muestra en el Cuadro 22, Cuadro 23 y Cuadro 24, los porcentajes de diferencia entre las tres normas. El mayor contraste se observó entre los códigos CSCR 10/14 y TMS 402/602-16, esto debido a la reducción en la capacidad del acero que implementa el CSCR 10/14 y la menor consideración del área transversal de la mampostería en la capacidad a cortante.

Cuadro 22. Porcentaje de diferencia de la capacidad calculada según el Borrador CSCR con respecto al CSCR 10/14.

<b>Muro</b>	<b><math>Vn_{PM}</math> (%)</b>	<b><math>Vn_{TM}</math> (%)</b>	<b><math>Vn_{EB}</math> (%)</b>
RA.5	27,7	27,6	16,0
RA.75	28,2	28,2	12,2
RA1	29,4	28,9	9,8
RA1.5	32,6	31,1	7,1
RA2	36,1	32,8	5,7
<b>Promedio</b>	<b>30,8</b>	<b>29,7</b>	<b>10,1</b>

Cuadro 23. Porcentaje de diferencia de la capacidad calculada según el TMS 402/602-16 con respecto al CSCR 10/14.

<b>Muro</b>	<b><math>Vn_{PM}</math> (%)</b>	<b><math>Vn_{TM}</math> (%)</b>	<b><math>Vn_{EB}</math> (%)</b>
RA.5	39,8	39,4	23,0
RA.75	42,0	40,8	18,1
RA1	43,8	42,3	14,6
RA1.5	48,2	44,6	10,4
RA2	52,8	46,5	8,3
<b>Promedio</b>	<b>45,3</b>	<b>42,7</b>	<b>14,9</b>

Cuadro 24. Porcentaje de diferencia de la capacidad calculada según el TMS 402/602-16 con respecto al Borrador CSCR.

<b>Muro</b>	<b><math>Vn_{PM}</math> (%)</b>	<b><math>Vn_{TM}</math> (%)</b>	<b><math>Vn_{EB}</math> (%)</b>
RA.5	9,4	9,3	6,0
RA.75	10,7	9,8	5,3
RA1	11,2	10,4	4,4
RA1.5	11,7	10,3	3,1
RA2	12,3	10,3	2,5
<b>Promedio</b>	<b>11,1</b>	<b>10,0</b>	<b>4,3</b>

## 4.3 Capacidad en flexión

### 4.3.1 Factores de reducción para flexión

El factor de reducción para flexión y carga axial es un valor constante en los códigos TMS 402/602-16 y Borrador CSCR, sin embargo, en el caso del CSCR 10/14 debe ser calculado por medio de la ecuación [4-5]:

$$\phi = 0,80 - \frac{1,5 P_u}{A_e f'_m} \quad [4-5]$$

Al no considerarse carga axial el factor de reducción es igual a 0,8.

- Factor de reducción para el CSCR 2010/2014  $\phi$ : 0,80
- Factor de reducción para el TMS 402/602-16  $\phi$ : 0,90
- Factor de reducción para el Borrador CSCR  $\phi$ : 0,85

El CSCR 10/14 propone en la sección 9.7.6, dos métodos para el diseño a flexocompresión de muros de mampostería, no obstante, en este caso se está utilizando mampostería confinada, la cual posee dos materiales diferentes. Debido a esto, se transformó las columnas de concreto a una sección transformada equivalente de mampostería y se determinó su diagrama de interacción.

En la Figura 47 se muestra el diagrama de interacción para el muro RA.5, para los muros RA.75, RA1, RA1.5 y RA2 se muestran en el Apéndice 2.

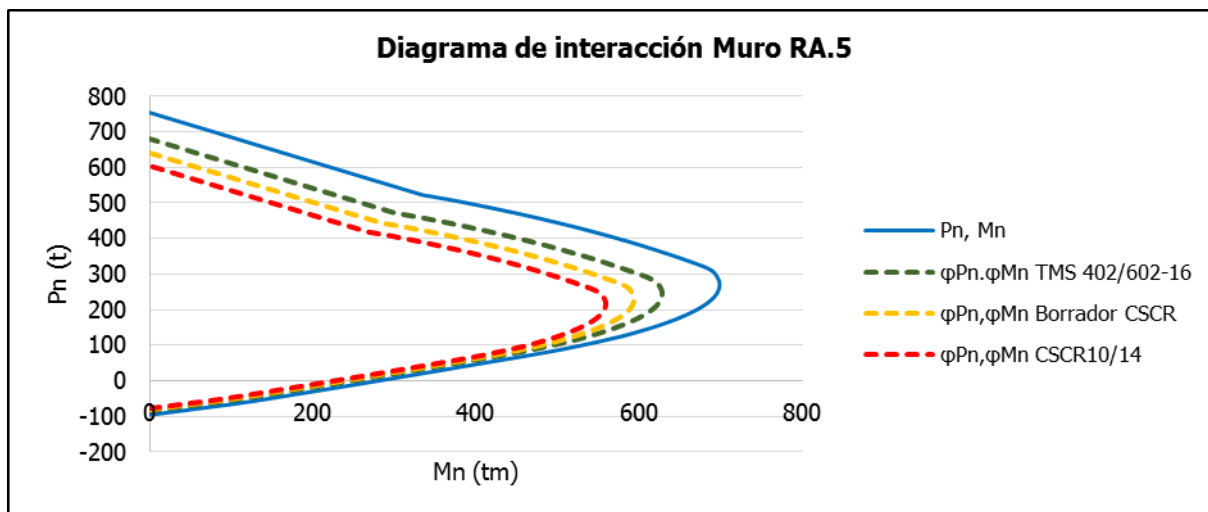


Figura 47. Diagrama de interacción del Muro RA.5.

Para poder garantizar una falla a cortante es necesario revisar que el cortante asociado a la capacidad a flexión del muro sea mayor al nominal calculado. Al despreciar la carga axial, se determinó la capacidad Mn en los diagramas de interacción, el cortante asociado a esta resistencia se considera como  $V_{flexión}$ .

$$V_{flexión} = \frac{Mn}{H_a} \quad [4-6]$$

Donde:

- $V_{flexión}$ : Cortante que se produce en la capacidad Mn del muro.
- $H_a$ : altura de aplicación de la carga (284,5 cm).

Se verificó en todos los muros que:

$$V_n = V_u$$

$$V_u < V_{flexión}$$

En el Cuadro 25 se observan los resultados de la capacidad Mn para cada muro y el cálculo para  $V_{flexión}$ . Se muestran además los valores mínimos y máximos de capacidad nominal calculados, todas las capacidades se encuentran por debajo del valor de  $V_{flexión}$ , por lo que se espera una falla a cortante en todos los muros.

Cuadro 25. Capacidad Mn y Vn flexión de los muros.

<b>Muro</b>	<b>Mn (t-m)</b>	<b>V<sub>flexión</sub> (t)</b>	<b>V<sub>n</sub><sup>min</sup> Calculado (t)</b>	<b>V<sub>n</sub><sup>max</sup> Calculado (t)</b>
RA.5	280,9	98,7	22,3	47,4
RA.75	177,8	62,5	12,3	33,7
RA1	126,8	44,6	8,1	27,9
RA1.2	88,7	31,2	4,5	22,9
RA2	65,2	22,9	3,0	20,9

## Capítulo 5. Resultados experimentales

### 5.1 Capacidades nominales de los muros calculadas con propiedades experimentales de los materiales

Es importante mencionar que cuando se realizan pruebas experimentales los cálculos teóricos de diseño pueden no apegarse de forma absoluta a los resultados, esto debido a las diferencias que existen entre las propiedades de los materiales al ser consideradas de manera idealizada y las reales obtenidas por medio de pruebas de laboratorio.

Las capacidades determinadas en el Capítulo 4 fueron recalculadas utilizando las propiedades obtenidas experimentalmente para los diferentes materiales a lo largo del proceso constructivo.

#### 5.1.1 Datos iniciales

A continuación se muestran las propiedades experimentales de los materiales que se consideraron para los cálculos de capacidad:

- Altura del paño de mampostería y la viga corona del muro ( $h$ ): 284,5 cm
- Distancia  $d$  en la columna ( $d_{col}$ ): 25,92 cm
- Ancho de muro y columnas ( $b$ ): 15 cm
- Ancho efectivo ( $b_w$ ): 5,74 cm
- Área de acero de los aros en las columnas ( $A_v$ ): 1,42 cm<sup>2</sup>
- Resistencia a la compresión de la mampostería a los 28 días ( $f'_m$ ): 166 kg/cm<sup>2</sup>
- Resistencia a la compresión del concreto a los 28 días ( $f'_c$ ): 275 kg/cm<sup>2</sup>
- Esfuerzo de fluencia del acero G40 ( $f_y$ ): 3412 kg/cm<sup>2</sup>
- Esfuerzo de fluencia del acero G60 ( $f_y$ ): 4671 kg/cm<sup>2</sup>
- Área acero horizontal en la mampostería ( $A_{sh}$ ): 0,71 cm<sup>2</sup>
- Área acero vertical en la mampostería ( $A_{sv}$ ): 0,71 cm<sup>2</sup>
- Espaciamiento de varillas horizontal ( $S_h$ ): 60 cm
- Espaciamiento de varillas verticales ( $S_v$ ): 60 cm
- Espaciamiento de aros en columna ( $s$ ): 20 cm



Cuadro 26. Dimensiones para el cálculo  $A_{nv}$  con mediciones reales de los bloques de mampostería.

<b>Dimensiones</b>	<b>Valor (cm)</b>
Paredes externas ( $t_{fs}$ )	2,87
Alma Internas ( $t_{wi}$ )	3,29
Alma Externa ( $t_{we}$ )	2,73
Ancho celda ( $b_c$ )	9,26
Largo de celda ( $l_c$ )	15,12

### 5.1.2 Capacidad a cortante

Las capacidades a cortante fueron calculadas para los tres códigos estudiados de la misma manera que en el Capítulo 4. Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 27. Se aplicaron los factores de reducción, para así obtener los resultados que se observan en el Cuadro 28.

Cuadro 27. Capacidad nominal a cortante obtenida con las propiedades reales de los materiales.

<b>Muro</b>	<b>Código</b>	$Vn_{PM}$ <b>(t)</b>	$Vn_{TM}$ <b>(t)</b>	$Vn_{EB}$ <b>(t)</b>
<b>RA.5</b>	CSCR 10/14	31,9	37,0	51,3
	Borrador CSCR	38,3	44,3	57,7
	TMS 402/602-16	41,8	48,3	61,2
	<b>Promedio</b>	<b>37,4</b>	<b>43,2</b>	<b>56,8</b>
<b>RA.75</b>	CSCR 10/14	16,8	21,9	36,2
	Borrador CSCR	20,4	26,4	39,8
	TMS 402/602-16	22,4	28,9	41,8
	<b>Promedio</b>	<b>19,8</b>	<b>25,7</b>	<b>39,2</b>
<b>RA1</b>	CSCR 10/14	10,8	13,9	30,2
	Borrador CSCR	13,3	16,9	32,7
	TMS 402/602-16	14,6	18,6	34,0
	<b>Promedio</b>	<b>12,9</b>	<b>16,5</b>	<b>32,3</b>
<b>RA1.5</b>	CSCR 10/14	5,7	8,8	25,1
	Borrador CSCR	7,2	10,8	26,6
	TMS 402/602-16	7,9	11,9	27,3
	<b>Promedio</b>	<b>6,9</b>	<b>10,5</b>	<b>26,3</b>
<b>RA2</b>	CSCR 10/14	3,6	6,7	23,0
	Borrador CSCR	4,7	8,4	24,1
	TMS 402/602-16	5,2	9,2	24,6
	<b>Promedio</b>	<b>4,5</b>	<b>8,1</b>	<b>23,9</b>

Cuadro 28. Capacidad nominal a cortante obtenida con las propiedades reales de los materiales al aplicar los factores de reducción.

Muro	Código	$\phi V n_{PM}$ (t)	$\phi V n_{TM}$ (t)	$\phi V n_{EB}$ (t)
RA.5	CSCR 10/14	19,2	22,2	30,8
	Borrador CSCR	26,8	31,0	40,4
	TMS 402/602-16	33,5	38,6	49,0
	<b>Promedio</b>	<b>26,5</b>	<b>30,6</b>	<b>40,1</b>
RA.75	CSCR 10/14	10,1	13,1	21,7
	Borrador CSCR	14,3	18,5	27,8
	TMS 402/602-16	17,9	23,1	33,4
	<b>Promedio</b>	<b>14,1</b>	<b>18,2</b>	<b>27,7</b>
RA1	CSCR 10/14	6,5	8,3	18,1
	Borrador CSCR	9,3	11,8	22,9
	TMS 402/602-16	11,7	14,9	27,2
	<b>Promedio</b>	<b>9,2</b>	<b>11,7</b>	<b>22,7</b>
RA1.5	CSCR 10/14	3,4	5,3	15,0
	Borrador CSCR	5,0	7,6	18,6
	TMS 402/602-16	6,3	9,5	21,8
	<b>Promedio</b>	<b>4,9</b>	<b>7,5</b>	<b>18,5</b>
RA2	CSCR 10/14	2,2	4,0	13,8
	Borrador CSCR	3,3	5,9	16,9
	TMS 402/602-16	4,2	7,4	19,7
	<b>Promedio</b>	<b>3,2</b>	<b>5,8</b>	<b>16,8</b>

Al realizar una comparación de las capacidades calculadas entre los códigos utilizados, se muestra en el Cuadro 29, Cuadro 30 y Cuadro 31, los porcentajes de diferencia los porcentajes de diferencia entre las tres normas. El mayor contraste se observó entre los códigos CSCR 10/14 y TMS 402/602-16, esto debido a la reducción en la capacidad del acero que implementa el CSCR 10/14 y la menor consideración de área en la capacidad a cortante de la mampostería.

Por otro lado, se observa una disminución en los porcentajes de diferencia entre los códigos, con respecto a los obtenidos en la sección 4.2, donde se utilizaron las propiedades teóricas de los materiales, la razón parece derivarse de la diferencia al considerar  $A_{nv}$  como el área a cortante del muro, ya que entre el Borrador CSCR y el TMS 402/602-16 el aumento en la resistencia es muy similar al obtenido en 4.2.

Cuadro 29. Porcentaje de diferencia de la capacidad calculada según el Borrador CSCR con respecto al CSCR 10/14.

<b>Muro</b>	<b><math>Vn_{PM}</math> (%)</b>	<b><math>Vn_{TM}</math> (%)</b>	<b><math>Vn_{EB}</math> (%)</b>
RA.5	20,0	19,8	12,4
RA.75	21,1	20,6	9,8
RA1	22,6	21,6	8,1
RA1.5	26,7	23,6	6,0
RA2	31,6	25,3	5,0
<b>Promedio</b>	<b>24,4</b>	<b>22,2</b>	<b>8,3</b>

Cuadro 30. Porcentaje de diferencia de la capacidad calculada según el TMS 402/602-16 con respecto al CSCR 10/14.

<b>Muro</b>	<b><math>Vn_{PM}</math> (%)</b>	<b><math>Vn_{TM}</math> (%)</b>	<b><math>Vn_{EB}</math> (%)</b>
RA.5	30,9	30,5	19,2
RA.75	33,0	32,1	15,3
RA1	34,8	33,8	12,5
RA1.5	39,2	36,0	8,9
RA2	44,4	37,8	7,0
<b>Promedio</b>	<b>36,5</b>	<b>34,0</b>	<b>12,6</b>

Cuadro 31. Porcentaje de diferencia de la capacidad calculada según el TMS 402/602-16 con respecto al Borrador CSCR.

<b>Muro</b>	<b><math>Vn_{PM}</math> (%)</b>	<b><math>Vn_{TM}</math> (%)</b>	<b><math>Vn_{EB}</math> (%)</b>
RA.5	9,1	9,0	6,0
RA.75	9,8	9,5	5,0
RA1	10,0	10,0	4,1
RA1.5	9,9	10,0	2,7
RA2	9,8	9,9	1,9
<b>Promedio</b>	<b>9,7</b>	<b>9,7</b>	<b>3,9</b>

Las capacidad obtenidas con las propiedades experimentales de los materiales fueron mayores a las obtenidas según las propiedades teóricas, en el Cuadro 32 se muestran los porcentajes de aumento para cada capacidad calculada. Para  $Vn_{PM}$  y  $Vn_{EB}$ , el aumento no es constante al variar la relación de aspecto, ya que disminuye al aumentar la esbeltez del muro.

Cuadro 32. Variación de resistencia al cortante al considerar la resistencia teórica y la experimental de los materiales.

Muro	Código	Porcentaje de aumento en las capacidades calculadas con las propiedades experimentales de los materiales con respecto a las calculadas con las teóricas		
		$Vn_{PM}$ (%)	$Vn_{TM}$ (%)	$Vn_{EB}$ (%)
RA.5	CSCR 10/14	43,3	43,4	33,1
	Borrador CSCR	34,6	34,7	29,0
	TMS 402/602-16	34,2	34,3	29,1
	<b>Promedio</b>	<b>37,3</b>	<b>37,4</b>	<b>30,4</b>
RA.75	CSCR 10/14	36,6	42,8	26,7
	Borrador CSCR	29,0	34,3	24,0
	TMS 402/602-16	28,0	33,9	23,7
	<b>Promedio</b>	<b>31,2</b>	<b>37,0</b>	<b>24,8</b>
RA1	CSCR 10/14	33,4	42,1	23,9
	Borrador CSCR	26,4	33,9	22,0
	TMS 402/602-16	25,0	33,5	21,6
	<b>Promedio</b>	<b>28,2</b>	<b>36,5</b>	<b>22,5</b>
RA1.5	CSCR 10/14	26,3	42,1	20,7
	Borrador CSCR	20,6	34,0	19,6
	TMS 402/602-16	18,7	33,6	19,0
	<b>Promedio</b>	<b>21,9</b>	<b>36,5</b>	<b>19,8</b>
RA2	CSCR 10/14	18,8	42,1	19,1
	Borrador CSCR	14,8	34,0	18,3
	TMS 402/602-16	12,3	33,6	17,7
	<b>Promedio</b>	<b>15,3</b>	<b>36,6</b>	<b>18,4</b>

### 5.1.3 Capacidad a flexión

La capacidad a flexión fue recalculada según la sección 4.3, de igual manera se verificó que los valores de  $V_{flexión}$  fueran mayores a las capacidades nominales a cortante que se muestran en el Cuadro 27. Al comparar los cortantes  $V_{flexión}$  con los calculados en el Cuadro 27 se concluyó que se espera una falla a cortante en todos los casos. Los diagramas de interacción al utilizar las propiedades experimentales de los materiales se encuentran en el Apéndice 2.

Cuadro 33. Capacidad Mn y Vn flexión de los muros calculadas con propiedades experimentales.

<b>Muro</b>	<b>Mn (t-m)</b>	<b>V<sub>flexión</sub> (t)</b>	<b>Vn<sub>min</sub> Calculado (t)</b>	<b>Vn<sub>max</sub> Calculado (t)</b>
RA.5	317,2	111,5	31,9	61,2
RA.75	199,8	70,2	16,8	41,8
RA1	142,1	50	10,8	34,0
RA1.2	97,6	34,3	5,7	27,3
RA2	72,4	25,4	3,6	24,6

Para el análisis de resultados de las fallas realizadas en este trabajo, se utilizaron como base los valores calculados con propiedades experimentales de los materiales.

## **5.2 Fallas de los especímenes**

### **5.2.1 Muro RA.5**

En el proceso de falla del muro RA.5 se utilizaron 2 gatos hidráulicos, esto debido a que se pronosticó una carga máxima mayor a 50 toneladas, lo cual es el límite de cada actuador. Al anclar los gatos hidráulicos a la viga de carga se notó que existía una desalineación en la componente horizontal, al medir la desviación se determinó que afectaba los datos obtenidos en 0,3% lo cual se consideró despreciable.

En la Figura 48 se muestra el muro durante el desplazamiento  $\pm 52$  mm, se observaron grietas en los nudos viga columna, además de pequeñas grietas diagonales en el paño de mampostería, en este punto la capacidad máxima ( $\pm 26$  mm) ya había sido alcanzada, antes de esta no se observó agrietamiento en el muro.



Figura 48. Muro RA.5 agrietado desplazamiento  $\pm 52$  mm.

En la Figura 49 se muestra el estado final de la pared, se produjeron grietas principalmente en la zona superior del paño de mampostería, así como grietas en escalerilla por el mortero de pega.



Figura 49. Condición final Muro RA.5.

Durante la prueba los nudos viga columna presentaron un colapso considerable como se muestra en la Figura 50, se dio desprendimiento del concreto provocado por las grietas diagonales profundas.



Figura 50. Condición final del nudo Muro RA.5

La curva de histéresis muestra los ciclos de carga (positivo) y descarga (negativo) que se produjeron durante la falla, en la Figura 51 se observa la correspondiente al muro RA.5. Los máximos de cada serie son señalados por medio de una envolvente que permitió determinar la capacidad máxima del muro, la cual ocurrió en  $\pm 26$  mm. Su registro fue de 50265,70 kg para el sentido positivo y de 45120,82 para el negativo.

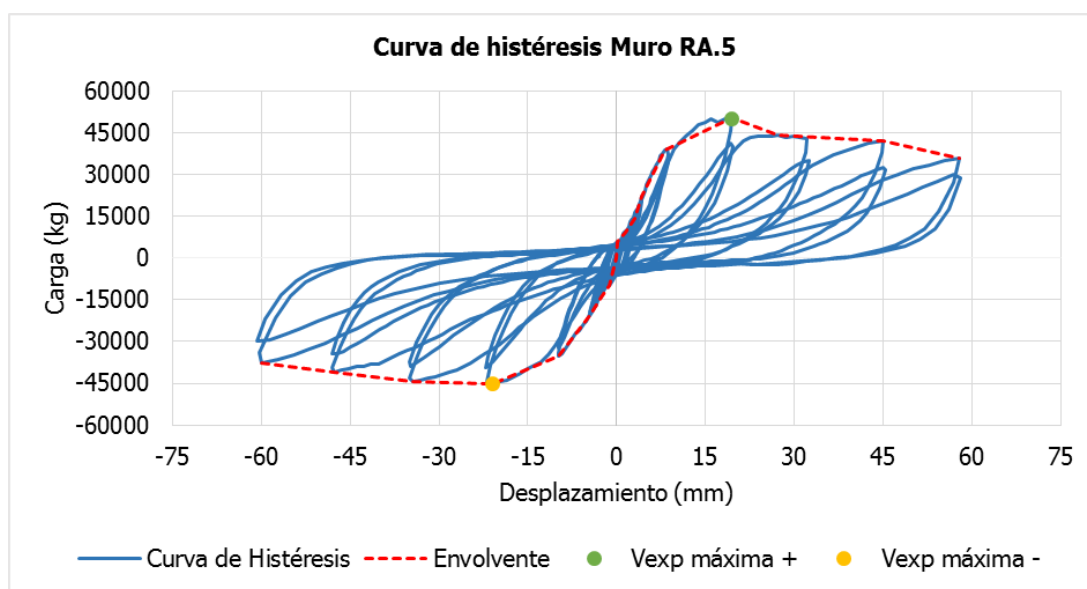


Figura 51. Curva de histéresis del muro RA.5.

### 5.2.2 Muro RA.75

Las primeras grietas del muro RA.75 se dieron antes de alcanzar la capacidad máxima ( $\pm 48$  mm), aproximadamente a una carga de 38407 kg en el desplazamiento máximo de  $\pm 32$  mm. La grieta inició en el nudo de la esquina superior donde se aplicó la carga y se extendió hasta el bloque de mampostería como se observa en la Figura 52.



Figura 52. Muro RA.75 agrietado al alcanzar la capacidad máxima  $\pm 48$  mm.

El estado final del muro se muestra en la Figura 53, al igual que el muro RA.5 se observaron pequeñas grietas diagonales principalmente en la sección superior del paño de mampostería.



Figura 53. Estado final del Muro RA.75.



Durante la prueba los nudos viga columna presentaron un colapso considerable como se muestra en la Figura 54, se dio desprendimiento del concreto provocado por las grietas diagonales profundas.

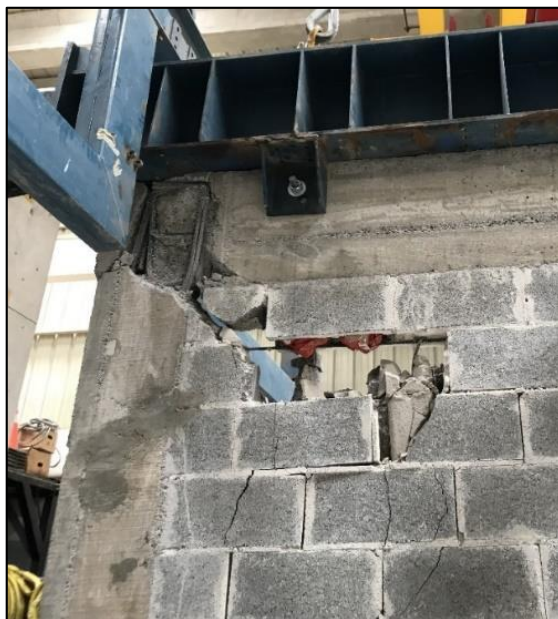


Figura 54. Estado final del nudo Muro RA.75.

En la Figura 55 se observa la curva de histéresis correspondiente al muro RA.75. Los máximos de cada serie son señalados por medio de una envolvente que permitió determinar la capacidad máxima del muro, la cual ocurrió en el desplazamiento máximo de  $\pm 48$  mm. Su registro fue de 39342,66 kg para el sentido positivo y de 36222,08 kg para el negativo.

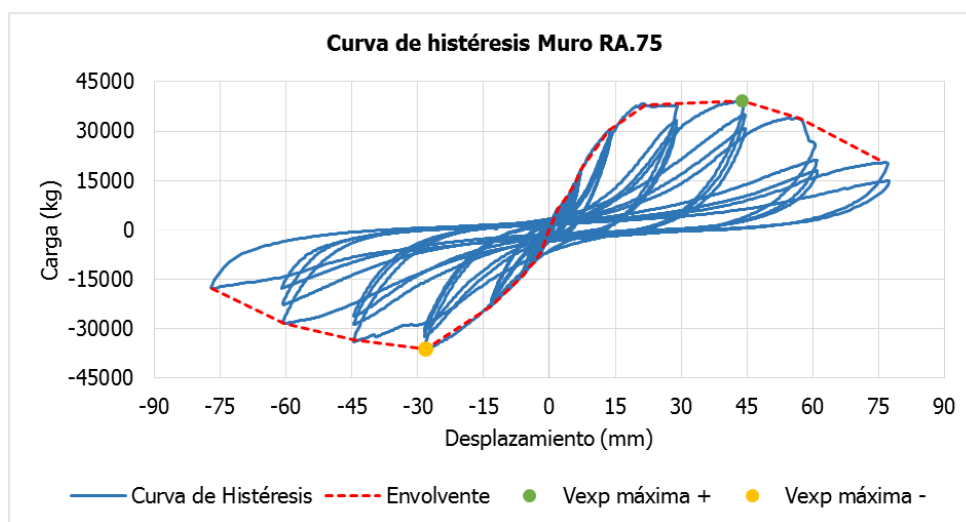


Figura 55. Curva de histéresis del muro RA.75.

### 5.2.3 Muro RA1

Las primeras grietas del muro RA.1 se dieron en el desplazamiento máximo de  $\pm 38$  mm, inició en la esquina superior donde se aplica la carga y se extendió hasta el bloque de mampostería como se observa en la Figura 56, en este punto se alcanzó la capacidad máxima de la pared. El estado final del muro se muestra en la Figura 57, se observaron grietas diagonales en el paño de mampostería y en la base del muro cerca de las columnas como se muestra en la Figura 58.

Los nudos viga columna presentaron una grieta profunda diagonal como se observa en la Figura 59, sin embargo, en este caso no existió un desprendimiento del concreto en esta zona como sucedió en los muros RA.5 y RA.75.

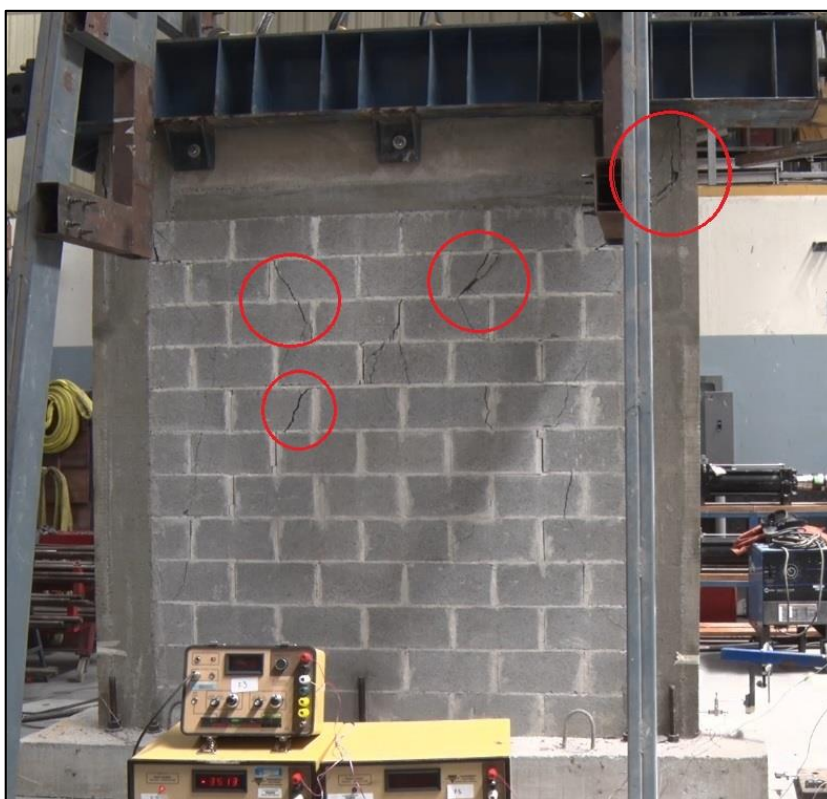


Figura 56. Muro RA1 agrietado desplazamiento  $\pm 38$  mm.



Figura 57. Estado final muro RA1.



Figura 58. Grietas en la base del muro RA1



Figura 59. Estado final del nudo RA1.

En la Figura 60 se observa la curva de histéresis correspondiente al muro RA1. Los máximos de cada serie son señalados por medio de una envolvente que permitió determinar la capacidad máxima del muro, la cual ocurrió en el desplazamiento máximo de  $\pm 38$  mm. Su registro fue de 34336,97 kg para el sentido positivo y de 31632,20 kg para el negativo.

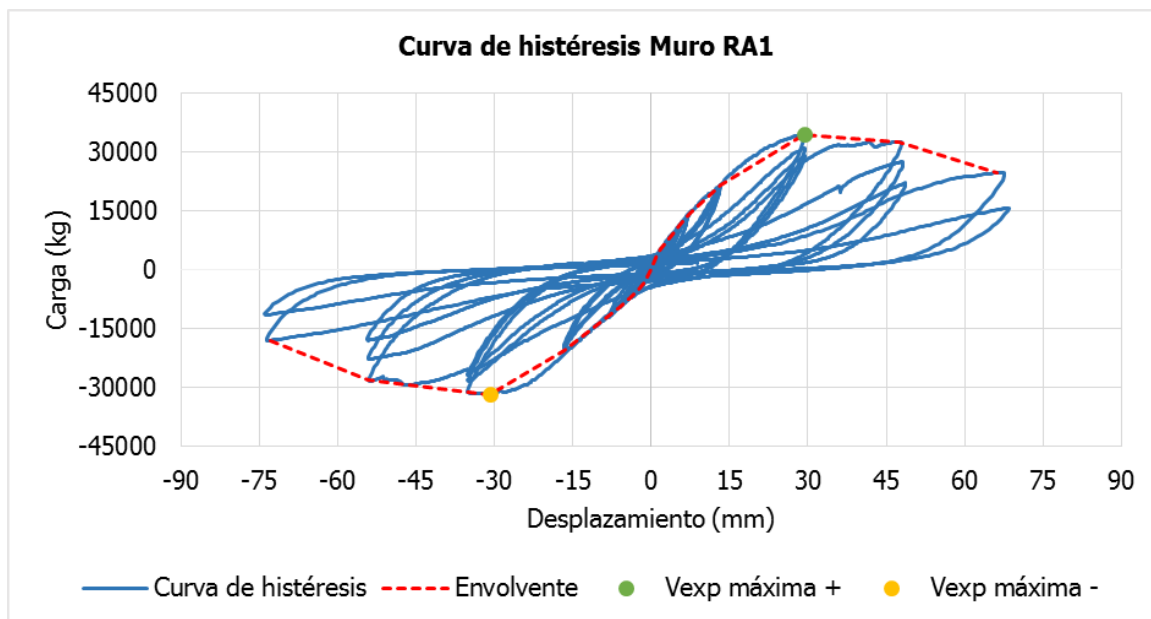


Figura 60. Curva de histéresis del muro RA1.

#### 5.2.4 Muro RA1.5

En este caso al iniciar el proceso de falla se notó que los arriostres no estaban sujetos adecuadamente a la viga de carga, por esta razón se presentó torsión en el muro en el sentido positivo (carga).

Las primeras grietas del muro se dieron en el desplazamiento máximo de  $\pm 51$  mm, sin embargo la carga máxima se alcanzó hasta  $\pm 85$  mm. Las primeras grietas diagonales iniciaron en el paño de mampostería y se fueron extendiendo a lo largo del muro. Se observó aplastamiento en la columna derecha como se muestra en la Figura 61. El estado final de las columnas muestra pandeo en el acero (Figura 63). El estado final del muro se muestra en la Figura 62.



Figura 61. Agrietamiento Muro RA1.5 para el desplazamiento  $\pm 51$  mm.



Figura 62. Estado final del Muro RA1.5.



Figura 63. Estado final de la base de la columna Muro RA1.5.

En la Figura 64 se observa la curva de histéresis correspondiente al muro RA1.5. Los máximos de cada serie son señalados por medio de una envolvente que permitió determinar la capacidad

máxima del muro, la cual ocurrió en el desplazamiento de  $\pm 85$  mm. Como se mencionó anteriormente en este muro se produjo torsión durante la falla, por lo que los valores positivos o de carga no son correctos. El registro de capacidad máxima fue de 17301,22 kg para el sentido positivo y de 22775,55 kg para el negativo.

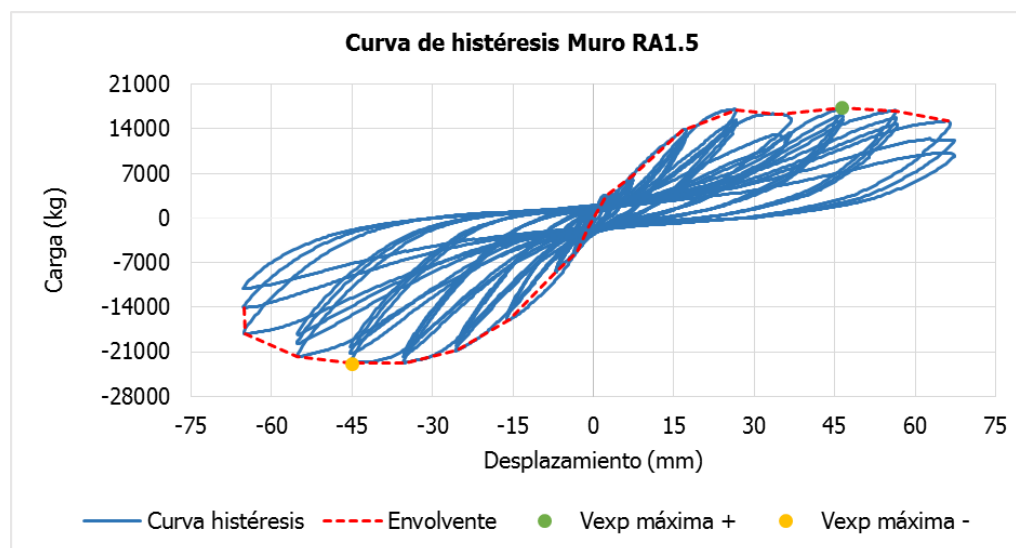


Figura 64. Curva de histéresis muro RA1.5.

### 5.2.5 Muro RA2

Durante el proceso de falla se notó que la cimentación se desplazaba lateralmente durante los ciclos iniciales, así que se procedió a ajustar los pernos de anclaje al piso fuerte en varias ocasiones, se dio también un leve desplazamiento vertical en los extremos de la cimentación al avanzar la prueba.

Las primeras grietas del muro RA.2 se dieron en el desplazamiento máximo de  $\pm 36$  mm, iniciaron como grietas diagonales en el paño de mampostería y grietas horizontales en las columnas como se muestra en la Figura 65. El estado final del muro se muestra en la Figura 66, el acero longitudinal de la columna falló completamente en tracción como se observa en la Figura 67.



Figura 65. Muro RA2 agrietado al alcanzar a la capacidad máxima.



Figura 66. Estado final Muro RA2.



Figura 67. Estado final de base de la columna en Muro RA2.

En la Figura 68 se observa la curva de histéresis correspondiente al muro RA2. Los máximos de cada serie son señalados por medio de una envolvente que permitió determinar la capacidad máxima del muro, la cual ocurrió en el desplazamiento de  $\pm 72$  mm. El registro de capacidad máxima fue de 17067,29 kg para el sentido positivo y de 16335,08 kg para el negativo.

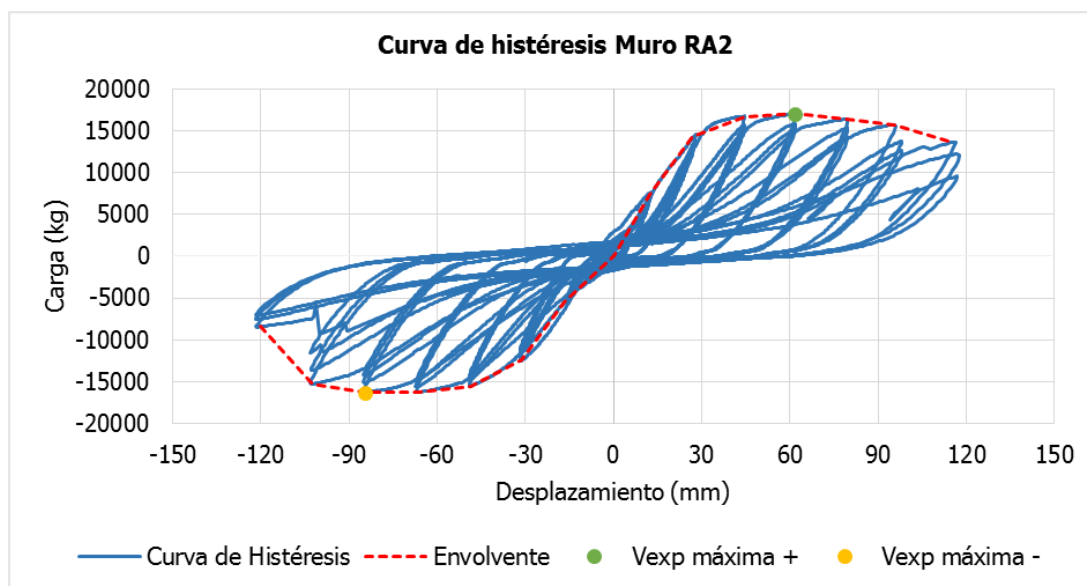


Figura 68. Curva de histéresis muro RA2

En el Cuadro 34 se resumen las capacidades máximas experimentales de todos los muros, se determinó como el valor absoluto de la capacidad máxima que alcanzó el muro sin importar el signo de la carga. Estas resistencias serán comparadas más adelante con las capacidades nominales calculadas anteriormente. Por otro lado, también se determinó la capacidad experimental máxima por metro lineal para las paredes.

Cuadro 34. Carga experimental máxima de los muros.

Muro	h/l	Resistencia experimental máxima(t)	Resistencia por metro lineal (t/m)
RA.5	0,51	50,25	0,090
RA.75	0,75	39,34	0,104
RA1	1,02	34,34	0,123
RA1.5	1,58	22,78	0,127
RA2	2,03	17,06	0,122



## Capítulo 6. Análisis de resultados

### 6.1 Descripción de la falla

#### 6.1.1 Muro RA.5

El muro RA.5 se agrietó justo después de alcanzar la capacidad máxima de 50,25 t, el agrietamiento se dio en la esquina superior del lado donde se aplicó la carga y correspondió a una grieta en diagonal que cruzó todo el nudo de concreto y llegó hasta el bloque de mampostería como se observa en la Figura 48, al revertirse la carga el nudo del otro extremo también se agrietó. Al continuar la prueba se observaron grietas diagonales pequeñas a lo largo del muro que atravesaron bloques y en otros casos continuaron por las sisas del mortero de pega.

Al continuar la falla hubo un desplazamiento de la última fila de mampostería superior con respecto a la hilada inferior, esto sumado a las grietas profundas de los nudos provocó que se formara un área trapezoidal como se observa en la Figura 49. Al existir este desligue entre el área trapezoidal y la parte inferior del muro, dejó de existir un comportamiento en conjunto entre estos dos elementos, lo que explicaría el por qué las grietas diagonales no se observan en las zonas inferiores de la pared. El modo de falla de este muro concuerda con deslizamiento horizontal con agrietamiento diagonal.

En la curva de histéresis que se observa en la Figura 51, se muestra que para cada serie la trayectoria de carga en las curvas no sigue el mismo trayecto que para las descargas, lo que evidencia una pérdida de resistencia de un ciclo al otro que está ligado con la variación de la rigidez, por esta razón, la carga máxima experimentada para un desplazamiento ocurre en el primer ciclo de cada serie.

Por otro lado, se observa como las curvas del sentido negativo llegan a una capacidad menor que las del positivo, esto se debe a que la falla se empieza con el proceso de carga positivo lo cual agrieta el muro provocando que los ciclos negativos se produzcan sobre un muro ya agrietado que ha perdido resistencia.

#### 6.1.2 Muro RA.75

El muro RA.75 se agrietó antes de alcanzar su capacidad máxima de 39,3 t, el agrietamiento se dio en la esquina superior del lado donde se aplicó la carga, correspondió a una grieta en

diagonal que cruzó todo el nudo de concreto y llegó hasta el bloque de mampostería como se observa en la Figura 52. Al continuar la prueba se observaron grietas diagonales pequeñas a lo largo del muro que atravesaron bloques y en otros casos continuaron por las sisas del mortero de pega.

En la Figura 54 se observa como el nudo fallo por cortante de una manera similar al muro RA.5, esto ocurrió para una carga de 33,36 t. Por otro lado, al igual que el muro RA.5 existió un desplazamiento de la última fila de mampostería superior con respecto a la hilada inferior, esto sumado a las grietas profundas de los nudos provocó que se formara un área trapezoidal como se observa en la Figura 53.

A diferencia de la pared RA.5, se observaron grietas diagonales en sectores inferiores del muro, lo que evidencia un comportamiento más en conjunto entre el área trapezoidal y el resto del paño de mampostería. El modo de falla de este muro concuerda con deslizamiento horizontal con agrietamiento diagonal.

En la curva de histéresis que se observa en la Figura 55, se muestra que para cada serie la trayectoria de carga en las curvas no sigue el mismo trayecto que para las descargas, lo que evidencia una pérdida de resistencia de un ciclo al otro que está ligado con la variación de la rigidez.

Por otro lado se observa como las curvas del sentido negativo llegan a una capacidad menor que las del positivo, esto se debe a que la falla se empieza con el proceso de carga (positivo) lo cual agrieta el muro provocando que los ciclos negativos se produzcan sobre un muro ya agrietado que ha perdido resistencia.

### **6.1.3 Muro RA1**

El muro RA.1 se agrietó justo después de alcanzar la capacidad máxima de 34,34 t, el agrietamiento se dio en el nudo opuesto a la zona de aplicación de la carga y al revertirse la esquina opuesta también se agrietó (Figura 56). Con el desarrollo de la falla se presentaron grietas diagonales que se expandieron por los bloques y en algunos casos por las sisas de mortero de pega hasta llegar a las columnas.

Al igual que en los muros anteriores se presentó un deslizamiento de la última fila de mampostería superior con respecto a la hilada inferior, se formó un área trapezoidal que provocó un falla concentrada en esta zona como se observa en la Figura 57, sin embargo, el

daño que se evidenció en el nudo al finalizar la prueba fue menor que lo observado en los muros anteriores como se muestra en la Figura 59, además, las grietas diagonales que se presentaron en el paño de mampostería fueron más profundas y amplias que las observadas en los muros RA.5 y RA.75. El modo de falla de este muro concuerda con un agrietamiento diagonal debido a cortante y deslizamiento horizontal.

En la curva de histéresis que se observa en la Figura 60, se muestra que para cada serie la trayectoria de carga en las curvas no sigue el mismo trayecto que para las descargas, lo que evidencia una pérdida de resistencia de un ciclo al otro que está ligado con la variación de la rigidez.

Por otro lado se observa como las curvas del sentido negativo llegan a una capacidad menor que las del positivo, esto se debe a que la falla se empieza con el proceso de carga positivo lo cual agrieta el muro provocando que los ciclos negativos se produzcan sobre un muro ya agrietado que ha perdido resistencia.

#### **6.1.4 Muro RA1.5**

En este muro existió un inconveniente a la hora de realizar la prueba, los arriostres no fueron anclados correctamente a la viga de carga lo que provocó torsión en el muro cuando se aplicaba la fuerza del lado positivo (carga).

El agrietamiento en el muro inició cuando se alcanzó una carga de 17,10 t, empezó en la esquina superior opuesta a la aplicación de la carga y se desarrolló como una grieta en escalerilla en el paño de mampostería, en este caso no se observó un agrietamiento del lado opuesto al revertir la carga debido al problema de torsión ya mencionado. Las grietas diagonales se desarrollaron a lo largo del paño y penetraron las columnas. Luego de esto se produjo aplastamiento en la base de la columna como se observa en la Figura 61.

El pandeo del acero de refuerzo longitudinal en las columnas que se observa en la Figura 63 evidencia los altos esfuerzos de compresión que se dieron en esta zona, los aros de confinamiento parecen estar muy distanciados para ayudar a evitar este comportamiento. El modo de falla concuerda con agrietamiento diagonal en el paño de mampostería y elementos de borde así como aplastamiento en la base de las columnas.

En la curva de histéresis que se observa en la Figura 64, se muestra que para cada serie la trayectoria de carga en las curvas no sigue el mismo trayecto que para las descargas, lo que

evidencia una pérdida de resistencia de un ciclo al otro que está ligado con la variación de la rigidez.

Por otro lado a diferencia de los otros muros se observa como las curvas del sentido positivo llegan a una capacidad menor que las del negativo, esto se debe a la torsión que existió en el sentido de carga, es importante mencionar que para los otros muros la capacidad máxima se obtuvo del signo positivo de la curva de histéresis ya que la falla se empieza con el proceso de carga positivo lo cual agrieta el muro provocando que los ciclos negativos se produzcan sobre un muro ya agrietado que ha perdido resistencia.

### **6.1.5 Muro RA2**

Debido a un deslizamiento de la cimentación durante la prueba se debió detener el experimento en dos ocasiones para realizar un ajuste de los pernos que anclan el muro al piso fuerte.

El muro RA2 se agrietó cuando se alcanzó una carga de 14,55 t, inició como una grieta diagonal en escalerilla desde el punto de aplicación de la carga hasta la base del muro, también se observó agrietamiento horizontal en las columnas como se muestra en la Figura 65. Al alcanzar la capacidad máxima de 17,10 t el muro ya presentaba grietas.

Durante el desarrollo de la falla se observó aplastamiento en las columnas, además de grietas diagonales que atravesaron el muro como se observa en la Figura 66, por otro lado, en la Figura 67 se observa como el acero longitudinal de la base de la columna falló por tracción debido a los esfuerzos de flexión, los cuales son máximos en la base del muro. El modo de falla concuerda con agrietamiento diagonal en el paño de mampostería y elementos de borde así como aplastamiento en la base de las columnas y desarrollo de grietas horizontales.

En la curva de histéresis que se observa en la Figura 68, se muestra que para cada serie la trayectoria de carga en la curvas no sigue el mismo trayecto que para las descargas, lo que evidencia una pérdida de resistencia de un ciclo al otro que está ligado con la variación de la rigidez.

Por otro lado se observa como las curvas del sentido negativo llegan a una capacidad menor que las del positivo, esto se debe a que la falla se empieza con el proceso de carga positivo lo cual agrieta el muro provocando que los ciclos negativos se produzcan sobre un muro ya agrietado que ha perdido resistencia.

## 6.2 Capacidad a cortante

### 6.2.1 Capacidad experimental de los muros

En la Figura 69 se observa las capacidades experimentales máximas obtenidas para los muros. El comportamiento descendente era de esperarse considerando la reducción de área que ocurre al aumentar la relación de aspecto.

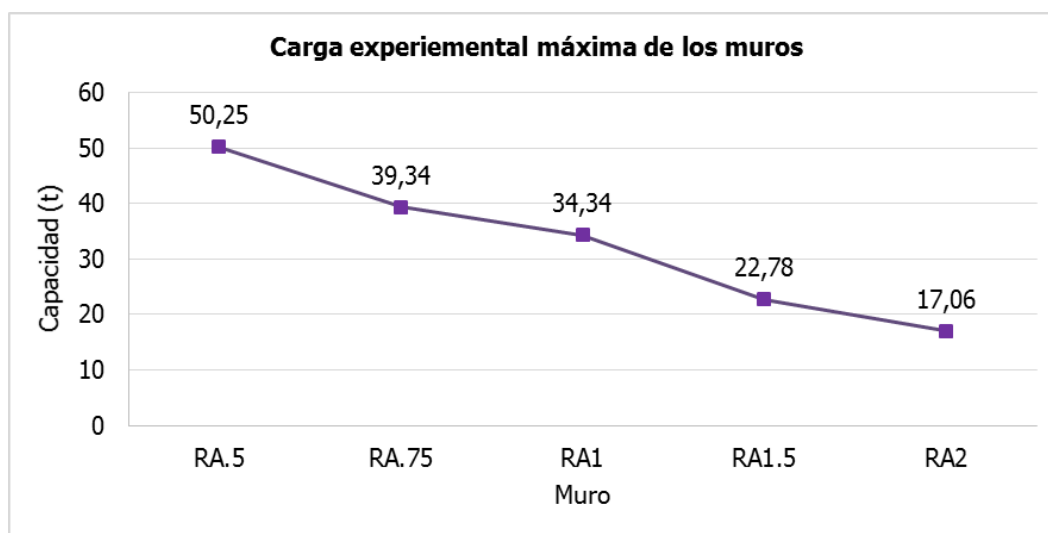


Figura 69. Capacidad experimental máxima de los muros

Al determinar la capacidad por metro lineal, se observa en el Cuadro 34 como los valores difieren entre sí para cada muro, la diferencia entre la capacidad máxima la cual corresponde al muro RA1.5 y la mínima que corresponde al muro RA.5, fue de un 41%.

Según lo investigado por Voon & Ingham (2006), en mampostería integral la capacidad a cortante tiende a disminuir cuando se aumenta la relación de aspecto, sin embargo, en la Figura 70 se aprecia que a nivel de capacidad por metro lineal la resistencia experimental tendió a aumentar con la relación de aspecto para luego poseer un comportamiento más constante entre los muros RA1, RA1.5 y RA2.

En la Figura 10 se observa la propuesta que desarrolló Salazar (2013) para representar la distribución porcentual del cortante relativo que toman las columnas en un muro de mampostería confinado al variar la relación de aspecto, donde este valor aumenta a medida que el muro posee mayor esbeltez, al ser el concreto un material más resistente que la mampostería y poseer un aporte mayor en los muros de alta relación de aspecto, se puede concluir que esta es una razón para el comportamiento que se observa en la Figura 70.

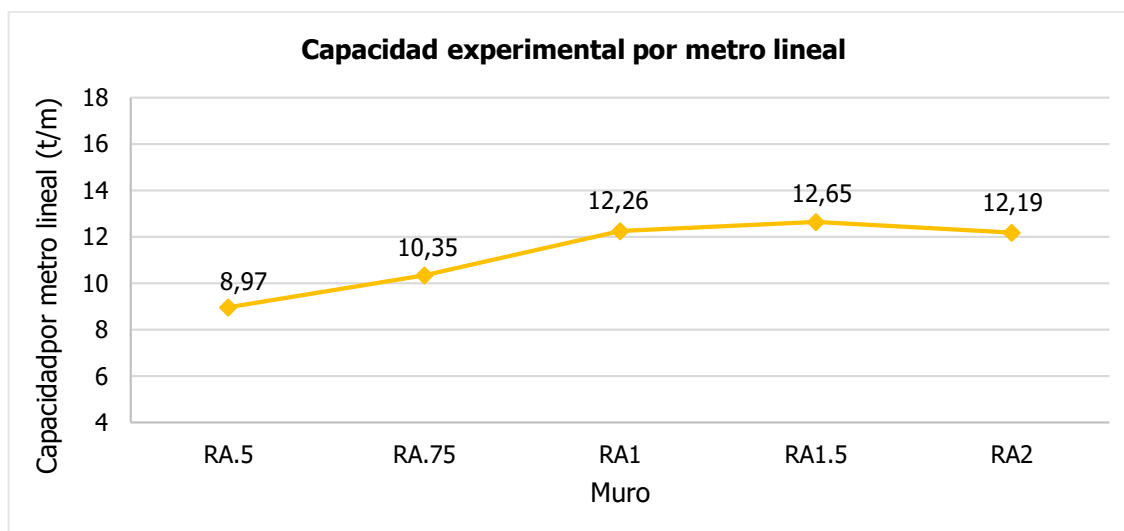


Figura 70. Capacidad experimental máxima por metro lineal de los muros

En la sección 6.1 se mencionó como los modos de falla no fueron idénticos en todos los muros, a medida que la relación de aspecto aumentó el paño de mampostería sufrió más daño al igual que las zonas inferiores del marco de concreto. Esta interacción más en conjunto de los elementos estructurales puede contribuir al aumento de capacidad por metro lineal para los muros con mayor esbeltez. Por otro lado, es importante mencionar que en los muros RA.5 y RA.75, se produjo una falla profunda en los nudos por falta de confinamiento en esta zona, esta situación pudo influir en la capacidad experimental máxima obtenida, sin embargo, el comportamiento durante la falla si fue el esperado para muros de esta relación de aspecto.

### 6.2.2 Comparación de capacidades nominales entre códigos y métodos

Según lo estipulado en 1.4.3 se concluyó como al determinar la capacidad nominal a cortante del mismo muro, el CSCR 10/14 produce los valores más conservadores, seguido del Borrador CSCR y por último el TMS 402/602-16.

En el Cuadro 27 se puede observar como al determinar las capacidades con los diferentes códigos, se cumplió con lo esperado, sin embargo, como se muestra en la Figura 71, Figura 72 y Figura 73, los porcentajes de diferencia de capacidad entre los códigos dependieron del método de suposición del marco confinante utilizado.

El método con el mayor porcentaje de diferencia entre los códigos corresponde a la capacidad cuando solo se toma en cuenta el paño de mampostería ( $Vn_{PM}$ ). En la Figura 71 y la Figura 72, se compara el CSCR 10/14 con el Borrador CSCR y el TMS 402/602-16, respectivamente.

Se observa como al disminuir el área del muro (aumentar la relación de aspecto) la diferencia entre los códigos se hace mayor para  $Vn_{PM}$  y  $Vn_{TM}$ .

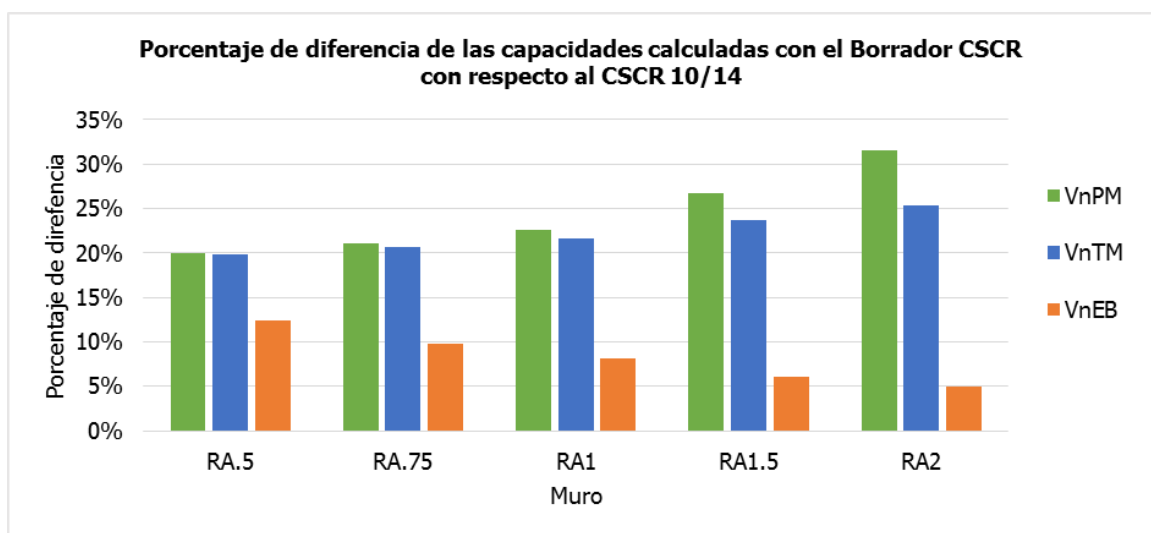


Figura 71. Porcentaje de diferencia de las capacidades calculadas según el Borrador CSCR con respecto al CSCR 10/14.

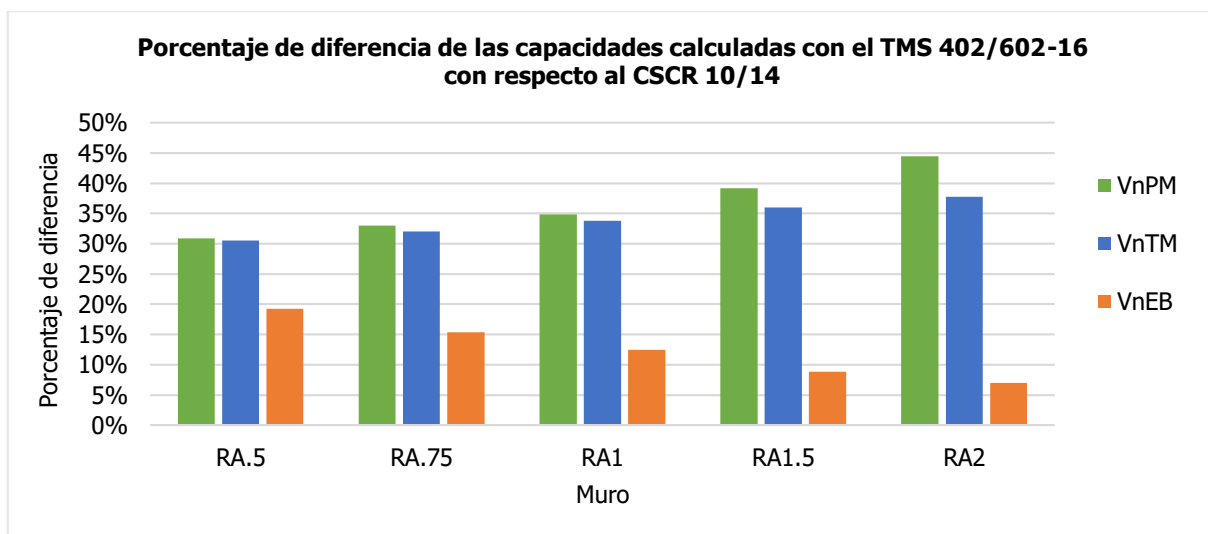


Figura 72. Porcentaje de diferencia de las capacidades calculadas según el TMS 402/602-16 con respecto al CSCR 10/14.

Este comportamiento se debe al uso del área  $A_{nv}$  en el Borrador CSCR y el TMS 402/602-16, donde el aumento con respecto al área utilizada en el CSCR 10/14, resulta en capacidades más similares entre los códigos para los muros de sección transversal mayor.

Al analizar la capacidad calculada sumando individualmente la resistencia del paño de mampostería con los elementos de borde ( $V_{nEB}$ ), se observa en la Figura 71, en la Figura 72 y en la Figura 73, como la diferencia entre los códigos se hace menor al aumentar la relación de aspecto, esto se debe a que existe un aporte constante de capacidad de las columnas en todos los muros que va incrementando su contribución a la capacidad total a medida que existe menos área de mampostería, lo que provoca que los valores de capacidad sean más constantes o parecidos entre los códigos al aumentar la esbeltez del muro.

Debido a que el Borrador CSCR y el TMS 602/402-16 poseen variaciones muy leves en sus ecuaciones de capacidad, se observa en la Figura 73, como los porcentajes de diferencia son similares entre los muros, a excepción del caso  $V_{nEB}$ , que principalmente disminuye con el aumento de la relación de aspecto debido a lo mencionado anteriormente. En general todas las diferencias entre estos dos códigos fueron menores al 10%.

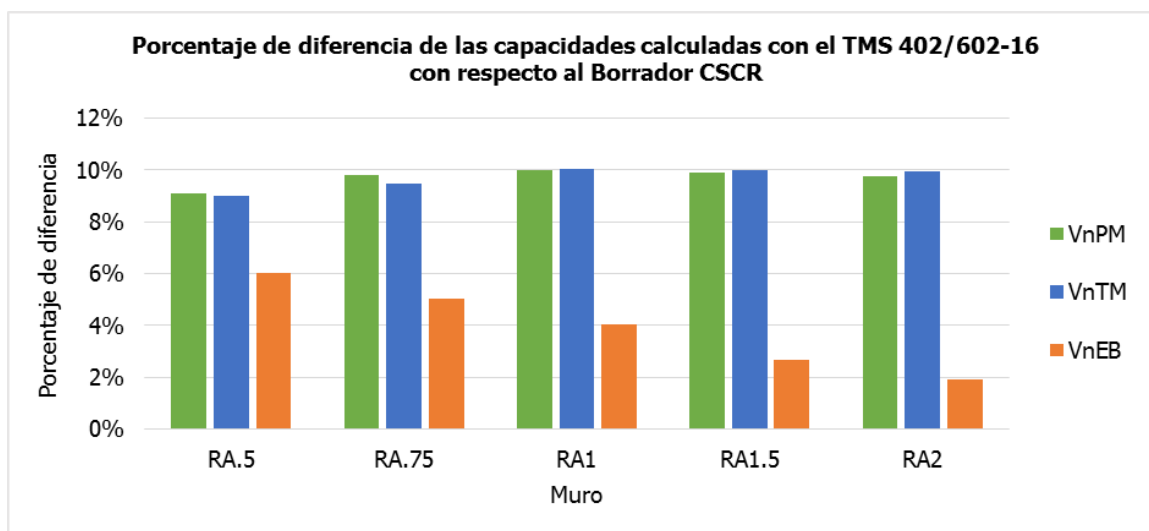


Figura 73. Porcentaje de diferencia de las capacidades calculadas el TMS 402/602-16 con respecto al Borrador CSCR.

Las diferencias más pronunciadas ocurren al comparar el CSCR 10/14 con el TMS 402/602-16, esto es de esperarse debido a que poseen variaciones considerable en sus ecuaciones de capacidad, principalmente en el área de cortante y la contribución de la capacidad del acero, donde el CSCR 10/14 estipula la mitad de lo utilizado por el TMS 402/602-16.



Los porcentajes de diferencia entre en CSCR 10/14 y el Borrador CSCR se encontraron entre un 5 % y un 32 %, entre el CSCR 10/14 y el TMS 402/602-16 se obtuvieron entre un 7 % y un 44 %, y por último entre el Borrador CSCR y el TMS 402/602-16 se observaron entre un 2 % y 10 %.

### **6.2.3 Comparación entre capacidades nominales y experimentales**

Las capacidades a cortante nominales calculadas en la sección 5.1, fueron comparadas con las máximas experimentales por medio de la relación entre la resistencia predicha y la obtenida, denotada como  $V_{exp}/V_n$ , donde si este valor es superior a uno se considera que el cálculo teórico fue conservador. La comparación se realizó tanto con las capacidades determinadas con las propiedades teóricas de los materiales así como las calculadas con las propiedades experimentales, el análisis se realizó a mayor profundidad con las características reales de los materiales para así comparar los valores teóricos más exactos posibles.

En primer lugar se muestra en la Figura 74 la comparación entre capacidades teóricas y experimentales cuando se consideró solo el paño de mampostería  $V_{n_{PM}}$ . Las líneas punteadas se refieren a las capacidades nominales calculadas con las propiedades teóricas de los materiales, mientras que las líneas constantes representan la comparación utilizando las propiedades experimentales de estos.

Los valores fueron conservadores para los cinco muros, sin embargo, existió un comportamiento ascendente de  $V_{exp}/V_n$  a medida que la relación de aspecto aumentó, lo cual es congruente con lo concluido por Ramírez et al. (2016), Minaie et al. (2010) y Voon & Ingham (2006) que de igual manera obtuvieron valores más conservadores para muros esbeltos en mampostería integral.

Al analizar los valores de  $V_{exp}/V_n$  de las propiedades experimentales de los materiales, la capacidad nominal más conservadora correspondió al muro RA2 y fue calculada con el CSCR 10/14, fue 4,73 veces menor que la resistencia máxima experimental, al considerar que no fue aplicado el factor de reducción, las capacidades nominales llegan ser muy conservadoras para los muros más esbeltos ( $h/l > 1$ ). Si se observan los valores de capacidad calculados con las propiedades teóricas de los materiales, se llega hasta 5,62 veces el valor de la capacidad nominal para el muro RA2.

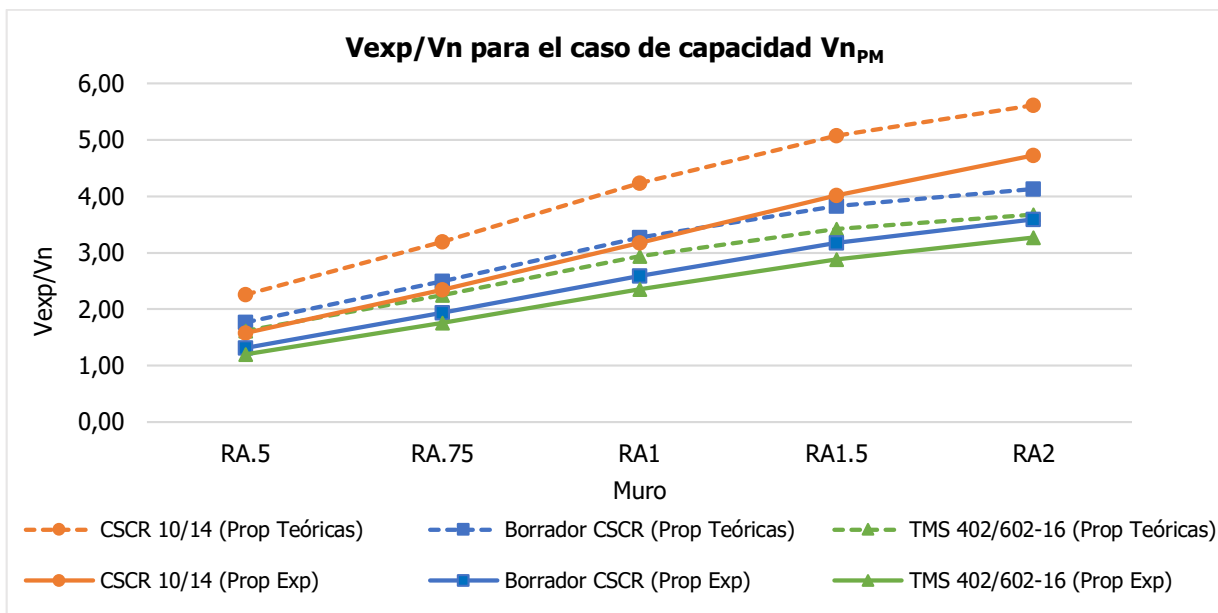


Figura 74.  $V_{exp}/V_n$  para el caso de  $Vn_{PM}$ , las líneas continuas representan  $V_n$  calculadas con las propiedades experimentales de los materiales, mientras que las discontinuas representan las capacidades con las propiedades teóricas de los materiales.

Al considerar todo el largo del muro como mampostería  $Vn_{TM}$ , el comportamiento de  $V_{exp}/V_n$  varió con respecto al caso anterior. En la Figura 75 se observa como los valores son menos conservadores que  $Vn_{PM}$ . El mayor correspondió al muro RA.75 calculado con el CSCR 10/14, para el cual la capacidad nominal al utilizar las propiedades reales de los materiales fue 2,73 veces menor que la resistencia experimental, si se observa el valor determinado con las características teóricas, este llegó a ser 3,69 veces menor que la resistencia experimental alcanzada, lo cual vuelve a evidenciar como las propiedades teóricas de los materiales producen valores más conservadores de capacidad nominal.

Al igual que en la Figura 74 se observó un aumento de  $V_{exp}/V_n$  con la relación de aspecto, no obstante, luego del muro RA1 los valores se estabilizaron y se produjo una disminución promedio del muro RA1.5 al RA2 de 2,6%, esto se puede deber a que la capacidad experimental por metro lineal disminuyó de la misma manera un 4%. Al observar la Figura 70, se puede notar que posee un comportamiento similar al de la Figura 75, además, el aumento de las capacidades nominales con respecto a  $Vn_{PM}$ , influye en el cambio del comportamiento de  $V_{exp}/V_n$  en  $Vn_{TM}$ .

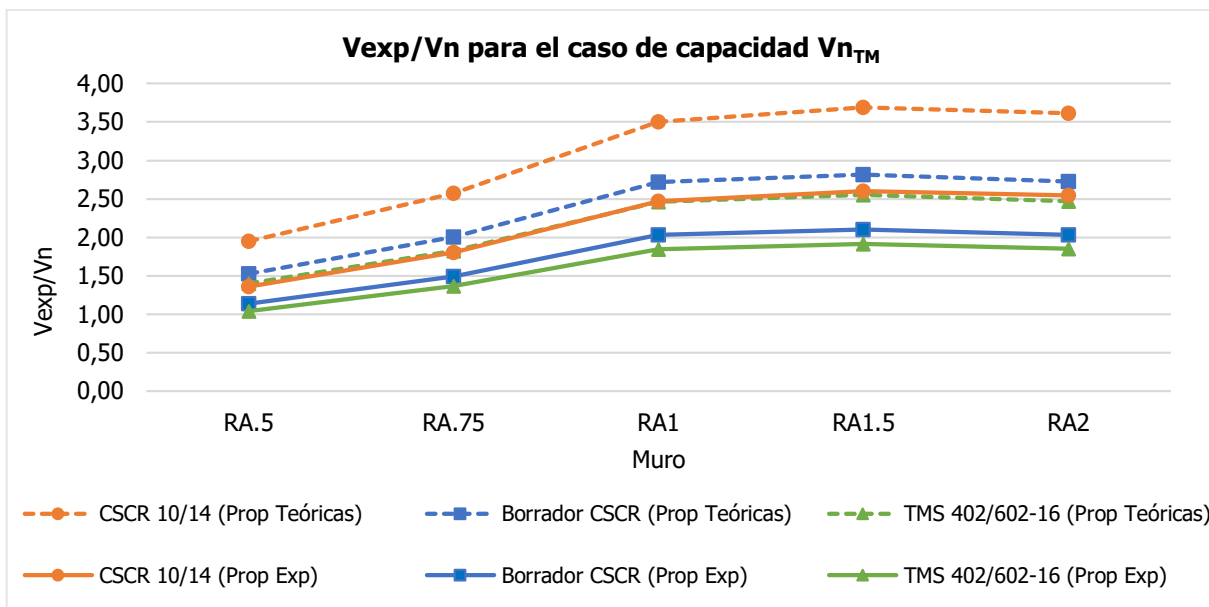


Figura 75.  $V_{exp}/V_n$  para el caso de  $Vn_{TM}$ .

Como se mencionó en 6.2.2 el CSCR 10/14 produjo los valores más conservadores, seguido por el Borrador CSCR y por último el TMS 402/602-16. Considerar solo el paño de mampostería produce valores más conservadores a los obtenidos al suponer toda la pared de mampostería, lo cual concuerda con los resultados obtenidos por Salazar (2013).

Todos los valores de capacidad nominal subestimaron la resistencia real del espécimen, las ecuaciones produjeron valores más conservadores cuando se aumentó la relación de aspecto, esto evidencia una falta de calibración en la fórmula utilizada, si se toma en cuenta que la ecuación de capacidad a cortante de la mampostería fue obtenida experimentalmente, se puede concluir que el factor donde influye la relación de aspecto  $\frac{M_u}{V_u d}$  debe ser revisado para obtener exactitudes similares con respecto a la resistencia experimental sin importar la esbeltez del muro.

Por otro lado, en los muros RA1, RA1.5 y RA2 se utilizó el límite para el valor  $\frac{M_u}{V_u d}$  de uno, esto pudo contribuir a obtener valores más conservadores debido a que solo influyó el cambio en el área y no el factor que depende de la relación de aspecto en la ecuación de capacidad de la mampostería.

En la Figura 76 se observan los valores  $V_{exp}/V_n$  obtenidos para la resistencia al sumar individualmente las capacidades de paño de mampostería y los elementos de borde ( $Vn_{EB}$ ). El

método no presenta un comportamiento similar a los anteriores y sobreestimó la capacidad en la mayoría de los muros cuando se utilizaron las propiedades reales de los materiales.

El muro RA1 fue el menos sobrestimado, donde los tres códigos produjeron capacidades muy similares a la obtenida experimentalmente. Esto demuestra como el método no es para nada conservador, lo cual coincide con lo concluido por Salazar (2013) donde también al sumar las capacidades de los elementos estructurales se sobrestimó en un 31 % la capacidad real. Para las diferentes relaciones de aspecto la menos conservadora fue el muro RA2 donde la resistencia experimental solo llegó cerca del 70% de la capacidad nominal calculada.

Sumar las capacidades de cada elemento individualmente no es exacto debido a que la resistencia a cortante de las columnas está determinada por la fórmula del ACI 318S-14, donde se asume que la columna se comporta como un elemento en flexocompresión y actuando en un marco o de manera individual. En el caso de la mampostería confinada las columnas están restringidas por el muro y no se desarrolla el mismo modo de falla, por esta razón la capacidad a cortante de las columnas no se desarrolla y se produce una sobreestimación de la resistencia total del muro.

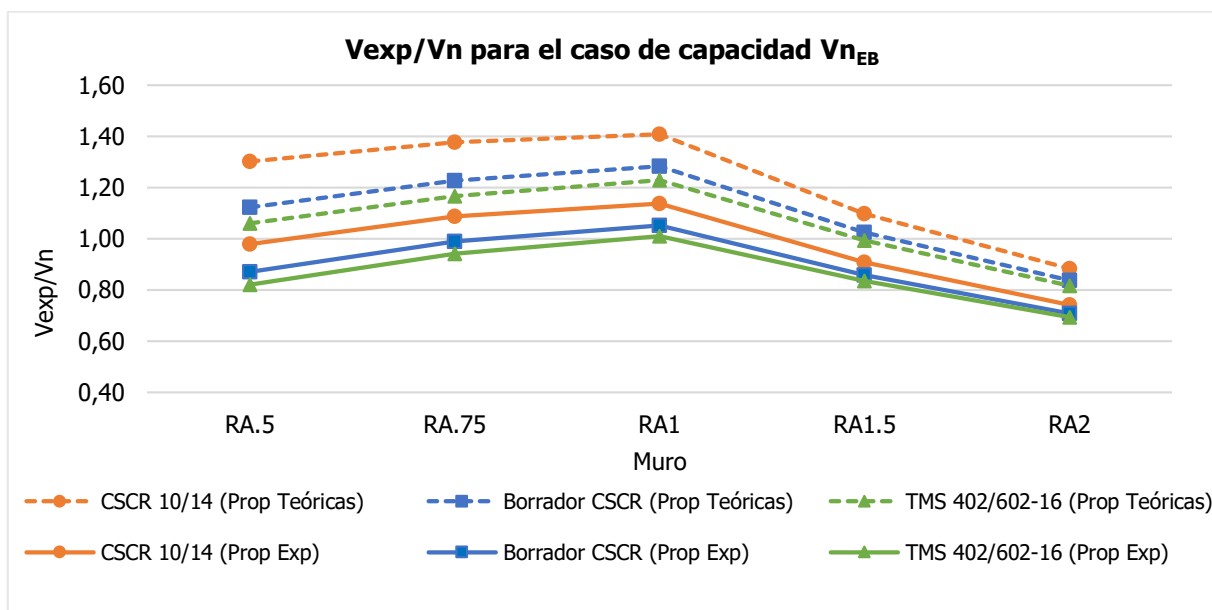


Figura 76. V<sub>exp</sub>/V<sub>n</sub> para el caso de V<sub>n<sub>EB</sub></sub>.

### 6.2.3.1 Casos al aplicar el factor de reducción.

De los tres métodos propuestos para determinar la capacidad de la mampostería confinada,  $Vn_{TM}$  resultó ser el más apropiado para el diseño de elementos, debido a que las capacidades nominales siempre fueron alcanzadas y en la mayoría de los casos sobrepasadas por la experimental.

En la Figura 77 se observa los valores de  $V_{exp}/\phi V_n$  para la capacidad  $Vn_{PM}$ , como era de esperarse son sumamente conservadores. La capacidad nominal del muro RA2 fue 9,36 veces menor que la resistencia máxima experimental para el CSCR 10/14. Debido a poseer el factor de reducción mayor, el TMS 402/602-16 produjo los valores menos conservadores.

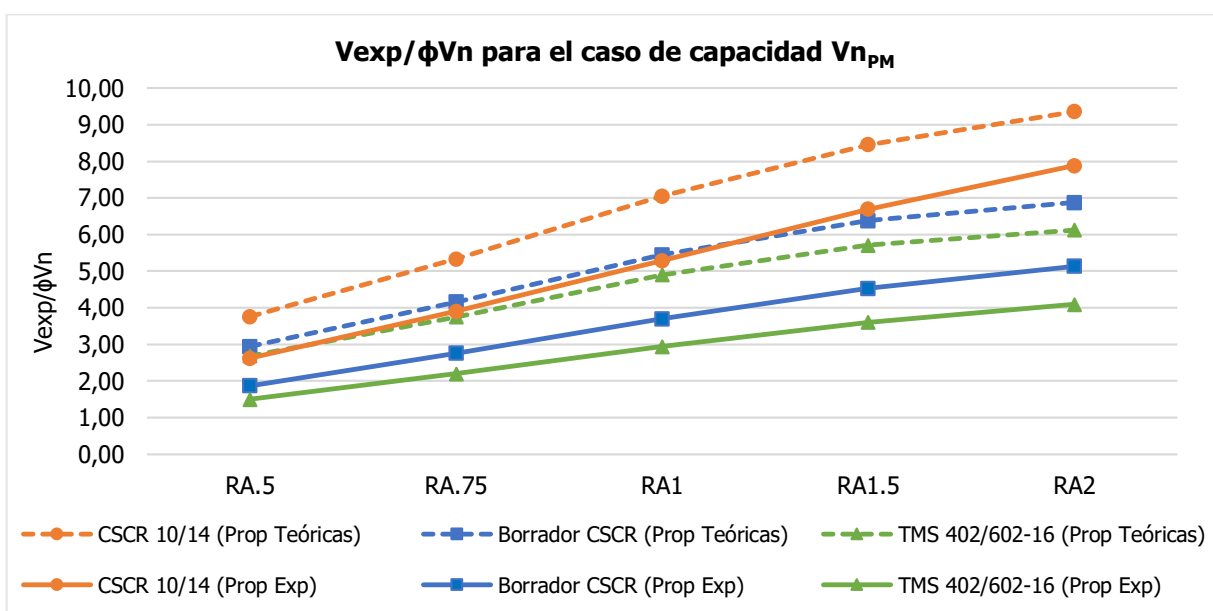


Figura 77.  $V_{exp}/\phi V_n$  para el caso de  $Vn_{PM}$ .

Para el caso de  $Vn_{TM}$ , se observa en la Figura 78 que también se obtienen valores muy conservadores para los muros esbeltos al aplicar el factor de reducción. Para ambos casos ( $Vn_{PM}$  y  $Vn_{TM}$ ) el muro con la capacidad menos conservadora fue RA.5, como ya se mencionó las paredes más chatas producen los valores nominales teóricos más cercanos a los experimentales, mientras que al aumentar la relación de aspecto se obtienen capacidades nominales cada vez menores con respecto a la experimental, en especial al utilizar las propiedades teóricas de los materiales.

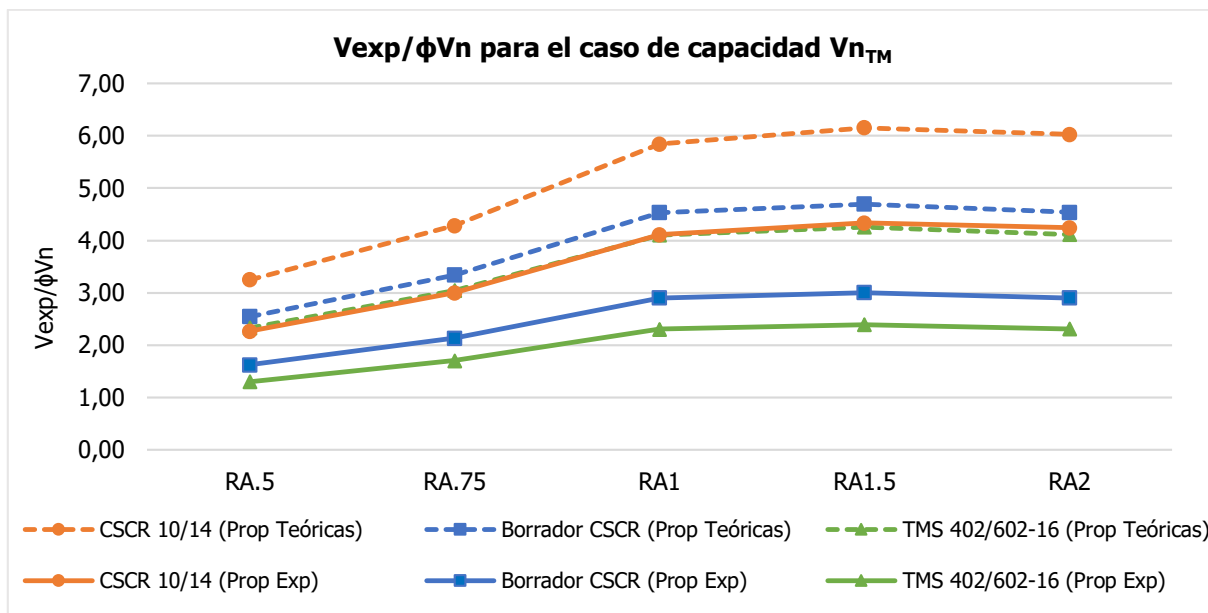


Figura 78.  $V_{exp}/\phi V_n$  para el caso de  $V_{n_{TM}}$ .

Por último, debido a que fue el método que sobreestimó los valores de resistencia teórica en la mayoría de los muros, se muestra en la Figura 79 la comparación entre la capacidad calculada aplicando el factor de reducción y la obtenida experimentalmente para el caso  $V_{n_{EB}}$ , se puede observar como al emplear el factor de reducción la mayoría de las capacidades nominales es alcanzada por la experimental.

Esto demuestra la importancia de este factor, ya que al reducir la resistencia calculada se logra un diseño que posee capacidades conservadoras en situaciones donde se da una mala interpretación del cálculo de capacidad nominal, como lo es este método, por otro lado, utilizar las propiedades teóricas de los materiales también contribuyó a obtener valores más conservadores.

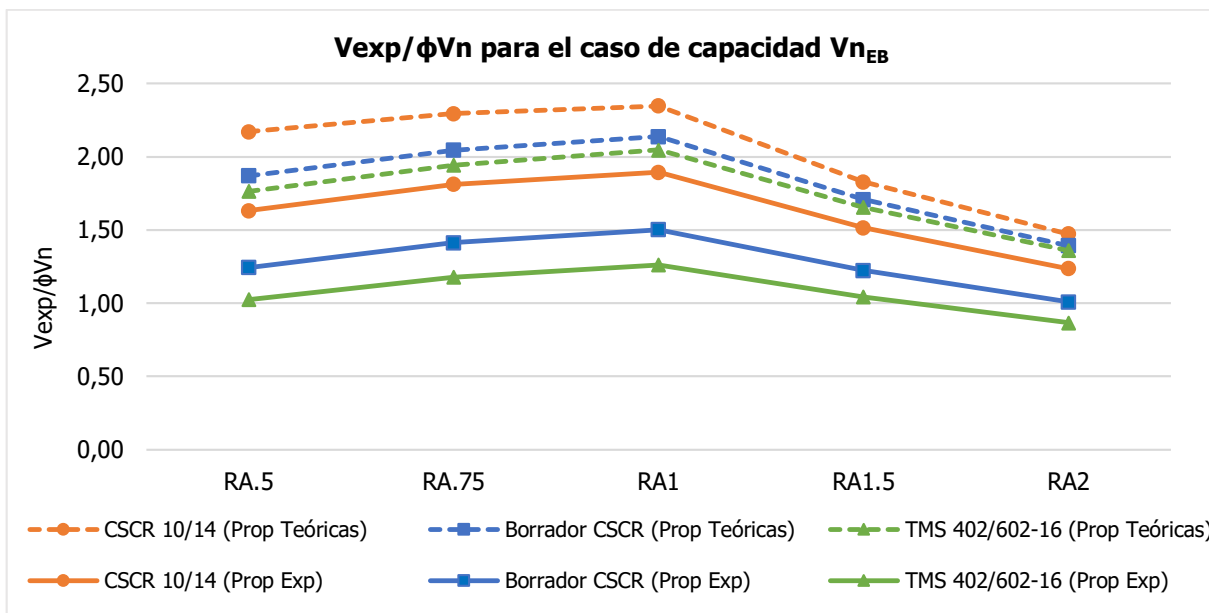


Figura 79.  $V_{exp}/\phi V_n$  para el caso de  $V_{n_{EB}}$ .

La falta de calibración que existe en la ecuación de capacidad para diferentes relaciones de aspecto hace imposible determinar por medio de la comparación de los valores teóricos con los experimentales la contribución del marco de concreto a la resistencia total al cambiar  $h/l$ .

Por esta razón sería importante repetir el experimento utilizando muros construidos únicamente con mampostería, para así poder determinar en qué punto interviene la fórmula utilizada y concluir sobre el aporte a la capacidad total de las columnas de concreto.

## Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones

### 7.1 Conclusiones

- Los muros RA.5, RA.75 y RA1 presentaron una falla por deslizamiento horizontal enfocada en la zona superior de los muros debido a una degradación profunda de los nudos viga columna.
- Los muros RA1.5 y RA2 presentaron agrietamiento diagonal en el paño de mampostería y aplastamiento en las columnas debido a los esfuerzos de flexión, además, se observó un comportamiento más integral entre el marco de concreto y la mampostería.
- La capacidad de los muros ante carga lateral fue menor al aumentar la relación de aspecto debido a la disminución del área de mampostería.
- La capacidad experimental por metro lineal tuvo una tendencia ascendente al aumentar la relación de aspecto, con valores muy similares para los muros RA1, RA1.5 y RA2, donde la mayor variación fue de un 3,7% entre estos muros. Entre el muro RA.5 y el muro RA1.5, el cual presentó la capacidad mayor por metro lineal, existió una variación del 41%.

Este comportamiento se atribuye a la mayor proporción de concreto que existe en el área transversal del muro al aumentar la esbeltez, además del comportamiento más en conjunto entre el marco de concreto y el paño de mampostería.

- El código TMS 402/602-16 produjo los valores de capacidad nominal teóricos más altos, seguido por el Borrador CSCR y el CSCR 10/14. Al utilizar las propiedades experimentales de los materiales se obtuvieron capacidades hasta un 35% mayores que las calculadas con las propiedades teóricas, las cuales son las utilizadas en el diseño.
- El porcentaje de diferencia de capacidad nominal entre los códigos depende de la consideración del marco confinante en la resistencia total del muro.

En el caso de  $Vn_{PM}$  y  $Vn_{TM}$ , el porcentaje de diferencia entre el CSCR 10/14 y el Borrador CSCR es mayor al incrementar la relación de aspecto, mientras que para  $Vn_{EB}$  el porcentaje de diferencia disminuye.

- Las capacidades  $Vn_{PM}$  y  $Vn_{TM}$  calculadas con los tres códigos fueron conservadoras al compararlas con las obtenidas experimentalmente, sin embargo, los valores teóricos de resistencia se aproximan más a los experimentales para los muros de relación de aspecto menor a uno (Muros RA.5 y RA.75) y son más conservadores al aumentar la



esbeltez de la pared (Paredes RA1, RA1.5 y RA2). Esto concuerda con lo concluido en las investigaciones de Ramírez et al. (2016), Minaie et al. (2010) y Voon & Ingham (2006).

- Al sumar de manera individual la capacidad del paño de mampostería y las columnas de concreto ( $Vn_{EB}$ ), se sobrestimó la resistencia experimental en los muros RA.5, RA.75, RA1.5 y RA2, por lo que no es un método adecuado para determinar la capacidad nominal de muros de mampostería confinada.
- Las propuestas de cambio planteadas en el Borrador CSCR con respecto al código actual producen capacidades conservadoras para todas las relaciones de aspecto estudiadas, por lo cual se consideran adecuadas, además, al producir valores de capacidad menos conservadores que el CSCR 10/14, aplicar estos cambios puede resultar en diseños más económicos.
- La ecuación de capacidad de la mampostería debe ser revisada, ya que según las investigaciones consultadas y los resultados obtenidos se puede concluir que no produce predicciones de igual exactitud para diferentes relaciones de aspecto.
- Utilizar todo el largo del muro como mampostería ( $Vn_{TM}$ ) es el método más adecuado para calcular la capacidad de la mampostería confinada, ya que no fue tan conservador ni sobreestimó la resistencia para ninguna de las relaciones de aspecto estudiadas.

## 7.2 Recomendaciones

- Llevar a cabo una inspección meticulosa durante el proceso constructivo para verificar que se cumpla con lo estipulado en los diseños de los diferentes muros.
- Revisar el montaje experimental antes de cada prueba para garantizar que no sea necesario detener el ensayo durante su ejecución. Se debe inspeccionar que los arriostres se encuentren bien colocados a la viga de carga y que todos los pernos de anclaje al piso fuerte estén lo suficientemente ajustados para evitar un deslizamiento excesivo del cuerpo rígido.
- Se recomienda continuar con la investigación sobre la capacidad de la mampostería confinada reforzada. Sería importante repetir el experimento con muros de mampostería integral y las mismas relaciones de aspecto, para así determinar el posible aporte a la capacidad cuando se utiliza elementos de borde de concreto en los muros. Además, se deben de considerar otras variables como la carga axial y la cuantía de acero.
- Realizar más investigación sobre la fórmula de cálculo de capacidad a cortante de la mampostería, dada las diferencias en exactitud entre los valores teóricos y experimentales al cambiar la relación de aspecto.
- En la propuesta del Borrador CSCR se recomienda señalar que al calcular la resistencia a cortante de muros de mampostería confinada, no es adecuado sumar de manera individual las capacidades del paño de mampostería y las columnas.
- El espaciamiento máximo de los aros en los elementos de borde de concreto debe ser menor que los 20 cm que estipula el CSCR 10/14, en particular para muros esbeltos ( $h/l > 1$ ) donde los momentos flectores poseen más influencia, se recomienda para zonas críticas como lo son la base y los nudos de unión viga-columna.

## Bibliografía

- Acón, F. (1999). *Capacidad soportante de paredes de mampostería confinada antes cargas laterales*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Acuña, D. (2014). *Efectos del Detallado Horizontal Sobre el Comportamiento de Muros de Cortantes de Mampostería de Concreto*. Universidad de Costa Rica .
- American Concrete Institute . (2014). *ACI 318S-14 Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural*. Miami USA: ACI.
- Barahona, S. (2019). *Determinación del módulo de ruptura en mampostería traslapada con esfuerzos de tracción por flexión paralelos a las juntas horizontales*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. (1986). *Código Sísmico de Costa Rica 1986*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. (2003). *Código Sísmico de Costa Rica 2002*. Cartago, Costa Rica : Editorial Tecnológica de Costa Rica .
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. (2011). *Código Sísmico de Costa Rica 2010*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. (2016). *Código Sísmico de Costa Rica 2010. Revisión 2014*. Cartago, Costa Rica : Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico de Costa Rica. (s.f.). *Propuesta al borrador del nuevo Código Sísmico de Costa Rica*.
- Hernández, L. F. (1998). *Paredes de mampostería confinada sometidas a carga estática y cíclica*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- INN. Instituto Nacional de Normalización. (1997). *Norma Chilena Oficial NCh 2123-Ofc.97.Modificada 2003. Albañería Confinada*. Santiago, Chile.
- Klingner, R. E. (2010). *Masonry Structural Desing*. McGrawHill.

- Lara, F. K. (1996). *Modelado a escala reducida de paredes de mampostería confinada*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Masonry Standars Joint Comitee. (2008). *Building Code Requirementes and Specification for Masonry Structures* . Longmont CO : Masonry Standars Joint Comitee.
- Minaie, E., Mota, M., Moon, F., & Hamid, A. (2010). *In-Plane Behavior of Partially Grouted Reinforced Concrete Masonry Shear Walls*. Journal of Structural Engineering.
- Navas Carro, A., & Cordero Segura , M. (2013). Comportamiento en cortante de muros de mampostería con el refuerzo embebido en concreto colocado en las sisas de los bloques. *Ingeniería* , 23 (1).
- New Zealand Standard . (2004). *Desing of Reinforced Concrete Masonry Structures Superseding NZS 4230:Parts 1 and 2:1990*. Wellington, New Zealand : Standards New Zealand .
- NTCM. (2017). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería*. México: Gaceta Oficial del Distrito Federal.
- Paulay, T., & Priestley, M. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. John Wiley and Sons, INC.
- Picado, A. (2019). *Análisis del comportamiento ante carga cíclica de muros de mampostería confinada reforzada con diferentes relaciones de aspecto*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Poveda, A. (2018). *Notas de Clase: Curso Diseño de Estructuras de Mampostería, Escuela de Ingeniería Civil*,. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Ramírez, P., Sandoval, C., & Almazán, J. L. (2016). *Experimental study on in-plane cyclic response of partially grouted reinforced concrete mansory walls* . Santiago, Chile : Pontificia Universidad Católica de Chile .

- Salazar, E. (2013). *Consideraciones sobre el comportamiento a cortante de los elementos de borde en los muros de mampostería confinados por marcos de concreto*. Universidad de Costa Rica.
- Shing, P. B., Schuller, M. P., & Hoskere, V. S. (1990b). *In-Plane Resistance of Reinforced Masonry Shear Walls*. *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, 116(3),619-640.
- Shing, P. B., Schuller, M. P., Hoskere, V. S., & Carter, E. (1990a). *Flexural and Shear Response of Reinforced Masonry Walls*. *Structural Journal*, American Concrete Institute, 87(6),646-656.
- The Masonry Society . (2016). *Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures containing: TMS 402-16 Building Code Requirements for Masonry Structures (Formerly Designated as ACI 530 and ASCE 5, TMS 602-16 Specification for Masonry Structures Formerly Designated as A*. Longmont CO: The Masonry Society.
- Voon, K. C., & Ingham, J. M. (2006). Experimental In-Plane Shear Strength Investigation of Reinforced Concrete Masonry Walls. *Journal of Structural Engineering*, 132:400-408.

### **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 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  $\mu$ m (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.

## Apéndice 1. Valores de $V_{exp}/V_n$

Cuadro 35. Valores de  $V_{exp}/V_n$  para las capacidades calculadas con las propiedades teóricas de los materiales.

Muro	Código	$V_{exp}/V_n$		
		$V_{n_{PM}}$	$V_{n_{TM}}$	$V_{n_{EB}}$
RA.5	CSCR 10/14	2,25	1,95	1,30
	Borrador CSCR	1,76	1,53	1,12
	TMS 402/602-16	1,61	1,40	1,06
	<b>Promedio</b>	<b>1,88</b>	<b>1,62</b>	<b>1,16</b>
RA.75	CSCR 10/14	3,20	2,57	1,38
	Borrador CSCR	2,49	2,00	1,23
	TMS 402/602-16	2,25	1,83	1,17
	<b>Promedio</b>	<b>2,65</b>	<b>2,13</b>	<b>1,26</b>
RA1	CSCR 10/14	4,23	3,51	1,41
	Borrador CSCR	3,27	2,72	1,28
	TMS 402/602-16	2,94	2,46	1,23
	<b>Promedio</b>	<b>3,48</b>	<b>2,90</b>	<b>1,31</b>
RA1.5	CSCR 10/14	5,07	3,69	1,10
	Borrador CSCR	3,83	2,82	1,02
	TMS 402/602-16	3,42	2,55	0,99
	<b>Promedio</b>	<b>4,11</b>	<b>3,02</b>	<b>1,04</b>
RA2	CSCR 10/14	5,62	3,62	0,88
	Borrador CSCR	4,13	2,72	0,84
	TMS 402/602-16	3,68	2,47	0,82
	<b>Promedio</b>	<b>4,47</b>	<b>2,94</b>	<b>0,85</b>



Cuadro 36. Valores de  $V_{exp}/\phi V_n$  para las capacidades calculadas con las propiedades teóricas de los materiales.

Muro	Código	$V_{exp}/\phi V_n$		
		$Vn_{PM}$	$Vn_{TM}$	$Vn_{EB}$
RA.5	CSCR 10/14	3,76	3,25	2,17
	Borrador CSCR	2,94	2,55	1,87
	TMS 402/602-16	2,69	2,33	1,77
	<b>Promedio</b>	<b>3,13</b>	<b>2,71</b>	<b>1,94</b>
RA.75	CSCR 10/14	5,33	4,28	2,29
	Borrador CSCR	4,16	3,34	2,05
	TMS 402/602-16	3,75	3,04	1,94
	<b>Promedio</b>	<b>4,41</b>	<b>3,56</b>	<b>2,09</b>
RA1	CSCR 10/14	7,05	5,84	2,35
	Borrador CSCR	5,45	4,53	2,14
	TMS 402/602-16	4,90	4,10	2,05
	<b>Promedio</b>	<b>5,80</b>	<b>4,83</b>	<b>2,18</b>
RA1.5	CSCR 10/14	8,46	6,15	1,83
	Borrador CSCR	6,38	4,70	1,71
	TMS 402/602-16	5,71	4,26	1,66
	<b>Promedio</b>	<b>6,85</b>	<b>5,04</b>	<b>1,73</b>
RA2	CSCR 10/14	9,36	6,03	1,47
	Borrador CSCR	6,88	4,54	1,39
	TMS 402/602-16	6,13	4,12	1,36
	<b>Promedio</b>	<b>7,46</b>	<b>4,89</b>	<b>1,41</b>

Cuadro 37. Valores de  $V_{exp}/V_n$  para las capacidades calculadas con las propiedades experimentales de los materiales.

Muro	Código	Vexp/Vn		
		$Vn_{PM}$	$Vn_{TM}$	$Vn_{EB}$
RA.5	CSCR 10/14	1,57	1,36	0,98
	Borrador CSCR	1,31	1,13	0,87
	TMS 402/602-16	1,20	1,04	0,82
	<b>Promedio</b>	<b>1,36</b>	<b>1,18</b>	<b>0,89</b>
RA.75	CSCR 10/14	2,34	1,80	1,09
	Borrador CSCR	1,93	1,49	0,99
	TMS 402/602-16	1,76	1,36	0,94
	<b>Promedio</b>	<b>2,01</b>	<b>1,55</b>	<b>1,01</b>
RA1	CSCR 10/14	3,17	2,47	1,14
	Borrador CSCR	2,59	2,03	1,05
	TMS 402/602-16	2,35	1,84	1,01
	<b>Promedio</b>	<b>2,70</b>	<b>2,11</b>	<b>1,07</b>
RA1.5	CSCR 10/14	4,02	2,60	0,91
	Borrador CSCR	3,17	2,10	0,86
	TMS 402/602-16	2,89	1,91	0,83
	<b>Promedio</b>	<b>3,36</b>	<b>2,20</b>	<b>0,87</b>
RA2	CSCR 10/14	4,73	2,55	0,74
	Borrador CSCR	3,59	2,03	0,71
	TMS 402/602-16	3,27	1,85	0,69
	<b>Promedio</b>	<b>3,87</b>	<b>2,14</b>	<b>0,71</b>

Cuadro 38. Valores de  $V_{exp}/\phi V_n$  para las capacidades calculadas con las propiedades experimentales de los materiales.

Muro	Código	$V_{exp}/\phi V_n$		
		$V_{n_{PM}}$	$V_{n_{TM}}$	$V_{n_{EB}}$
RA.5	CSCR 10/14	2,62	2,26	1,63
	Borrador CSCR	1,87	1,62	1,24
	TMS 402/602-16	1,50	1,30	1,03
	<b>Promedio</b>	<b>2,00</b>	<b>1,73</b>	<b>1,30</b>
RA.75	CSCR 10/14	3,90	3,00	1,81
	Borrador CSCR	2,76	2,13	1,41
	TMS 402/602-16	2,20	1,70	1,18
	<b>Promedio</b>	<b>2,95</b>	<b>2,28</b>	<b>1,47</b>
RA1	CSCR 10/14	5,29	4,11	1,89
	Borrador CSCR	3,70	2,90	1,50
	TMS 402/602-16	2,94	2,31	1,26
	<b>Promedio</b>	<b>3,98</b>	<b>3,11</b>	<b>1,55</b>
RA1.5	CSCR 10/14	6,70	4,33	1,51
	Borrador CSCR	4,53	3,00	1,22
	TMS 402/602-16	3,61	2,39	1,04
	<b>Promedio</b>	<b>4,94</b>	<b>3,24</b>	<b>1,26</b>
RA2	CSCR 10/14	7,88	4,24	1,24
	Borrador CSCR	5,13	2,90	1,01
	TMS 402/602-16	4,09	2,31	0,87
	<b>Promedio</b>	<b>5,70</b>	<b>3,15</b>	<b>1,04</b>

## Apéndice 2. Cálculos adicionales

### Acero mínimo en la mampostería

En el CSCR 10/14 sección 9.3.3.c se especifica que la suma de las áreas del refuerzo vertical y horizontal debe ser al menos:

$$A_{smin} = 0,002 (l)(b) \quad [0-1]$$

$$\text{Para el muro RA.5} = A_{smin} = 0,002 (500 \text{ cm})(15 \text{ cm}) = 15 \text{ cm}^2$$

De la misma manera se establece un límite mínimo para una dirección:

$$A_{smin} = 0,0007 (l)(b) \quad [0-2]$$

$$A_{smin} = 0,0007 (500 \text{ cm})(15 \text{ cm}) = 5,25 \text{ cm}^2$$

En el caso del muro RA.5 la cantidad de acero vertical corresponde a:

$$A_v = \frac{(500 \text{ cm})A_{sv}}{S_v}$$

$$A_v = \frac{(500 \text{ cm})(0,71 \text{ cm}^2)}{60 \text{ cm}} = 5,91 \text{ cm}^2 > 5,25 \text{ cm}^2 \text{ Cumple}$$

Del mismo modo para la cantidad de acero horizontal:

$$A_h = \frac{(500 \text{ cm})A_{sh}}{S_h}$$

$$A_h = \frac{(500 \text{ cm})(0,71 \text{ cm}^2)}{60 \text{ cm}} = 5,91 \text{ cm}^2 > 5,25 \text{ cm}^2 \text{ Cumple}$$

Por lo que el acero total es igual a:

$$A_{Total} = 5,25 \text{ cm}^2 + 5,25 \text{ cm}^2 = 10,5 \text{ cm}^2 < 15 \text{ cm}^2 \text{ No cumple}$$

El acero total de la mampostería no cumple con el área mínima estipulada por el CSCR 10/14, sin embargo debido a que se trata de mampostería confinada se tomó en cuenta el acero que se ubica en las columnas:

A continuación se calculó la cantidad de acero vertical que aportan las columnas.

$$A_{totalv} = (10,5 \text{ cm}^2) + (\text{Cant de varillas en columnas} * A_{\#4})$$

$$A_{totalv} = (10,5 \text{ cm}^2) + (16 \text{ varillas})(1,27 \text{ cm}^2) = 30,82 \text{ cm}^2 > 15 \text{ cm}^2$$

Solo con una dirección el acero cumple con el acero mínimo total estipulado por el código, de la misma manera cumple para todos los muros.

### **Revisión de capacidad**

Las capacidades totales calculadas para la mampostería deben cumplir con el límite estipulado en las ecuaciones [1-9] y [1-11] para el CSCR 10/14.

Para valores de  $Mu/V_u d$  entre 0,25 y 1,0, como lo es en el caso del muro RA.5 se debe interpolar linealmente entre los valores. El resultado de esta interpolación es de 1,42.

$$V_n \leq \left( 1,42 \sqrt{100 \frac{kg}{cm^2}} \right) (550 \text{ cm})(5 \text{ cm}) = 39,05 \text{ t}$$

El TMS 402/602 -16 especifica los límites para la capacidad total nominal en las ecuaciones [1-10] y [1-12].

Para valores de  $Mu/V_u d$  entre 0,25 y 1 se debe interpolar linealmente, además, las unidades de  $f'_m$  deben de estar en MPa y  $A_{nv}$  en  $mm^2$ . Debido a que en este caso  $Mu/V_u d$  es 0,49 se interpola linealmente y se obtiene un valor de 0,44.

$$\gamma_g = 0,75 \text{ para mamposteria parcialmente rellena}$$

$$V_n \leq (0,44(\sqrt{9,81 \text{ MPa}})(473670 \text{ mm}^2)(0,75) = 50217 \text{ N} = 50,22 \text{ t}$$

Para el Borrador CSCR se utiliza el mismo límite de capacidad calculado para el TMS 402/602-16. En el Cuadro 39 y el Cuadro 40 se observan las capacidades límite calculadas para todos los muros.

Cuadro 39. Capacidades nominales límite calculadas con las capacidades teóricas de los materiales.

	<b>Muro</b>	<b>RA.5</b>	<b>RA.75</b>	<b>RA1</b>	<b>RA1.5</b>	<b>RA2</b>
<b>Límite Vn (t)</b>	TMS 402/602-16					
	y Borrador CSCR	50,2	29,8	18,8	12,1	9,4
	CSCR 10/14	39,1	22,9	21,6	13,6	10,4

Cuadro 40. Capacidades nominales límite calculadas con las capacidades experimentales de los materiales.

	<b>Muro</b>	<b>RA.5</b>	<b>RA.75</b>	<b>RA1</b>	<b>RA1.5</b>	<b>RA2</b>
<b>Límite Vn (t)</b>	TMS 402/602-16					
	y Borrador CSCR	64,7	38,4	24,2	15,6	12,1
	CSCR 10/14	57,8	33,9	32,0	20,1	15,4

### **Cortante por fricción**

Por otro lado el código TMS 402/602 -16 y el Borrador CSCR establecen la revisión del cortante en la base del muro cuando existe una carga axial baja, ya que la resistencia puede llegar a ser insuficiente y podría haber deslizamiento. El límite se estipula en las ecuaciones [1-13] y [1-14].

Para el muro RA.5 que posee una  $\frac{Mu}{Vudv}$  de 0,49 se utiliza la ecuación [1-13].

$$V_{nf} = 0,7 \left( (26,6 \text{ cm}^2) \left( 2800 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) + 0 \text{ kg} \right) = 52,3 T$$

$\mu = 0,7$  ya que no se trata de una superficie acabada intencionalmente rugosa

Al realizar este cálculo para los otros cuatro muros se obtuvieron los resultados que se muestran en el Cuadro 41, para las propiedades teóricas de los materiales y en el Cuadro 42 al calcular utilizando las propiedades experimentales. De esta manera se concluye que para ninguno de los cinco muros rigió la resistencia en cortante por fricción.

Cuadro 41. Capacidad en cortante en la base con propiedades teóricas.

<b>Muro</b>	<b>RA.5</b>	<b>RA.75</b>	<b>RA1</b>	<b>RA1.5</b>	<b>RA2</b>
<b>Vnr (t)</b>	52,3	58,3	47,1	32,7	25,5

Cuadro 42. Capacidad en cortante en la base con propiedades experimentales de los materiales.

<b>Muro</b>	<b>RA.5</b>	<b>RA.75</b>	<b>RA1</b>	<b>RA1.5</b>	<b>RA2</b>
Vnf (t)	63,7	93,2	91,9	61,0	46,4

### Capacidad a flexión

Para transformar la sección se utiliza el factor:

$$n = \frac{E_c}{E_m} \quad [0-3]$$

Donde:

Módulo de elasticidad del concreto  $E_c$  según ACI 318S/14 sección 19.2.2.1B:

$$E_c = 15100\sqrt{f'_c} \quad [0-4]$$

$$E_c = 15100\sqrt{210 \text{ kg/cm}^2} = 218819,79 \text{ kg/cm}^2$$

Módulo de elasticidad de la mampostería  $E_m$  determinado según el CSCR2010/2014 sección 9.3.4 para mampostería de bloques de concreto:

$$E_m = 750f'_m \quad [0-5]$$

$$E_m = 750 \left( 100 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 75\,000 \text{ kg/cm}^2$$

De esta manera:

$$n = \frac{E_c}{E_m} = \left( 218819,79 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) / (75\,000 \text{ kg/cm}^2) = 2,92$$

Al aplicar este factor al ancho de la columna se obtiene el ancho equivalente de la sección transformada a mampostería:

$$b_{equivalente} = (15 \text{ cm})(2,92) = 43,8 \text{ cm}$$

Para determinar la capacidad en flexocompresión de los muros se utilizó un diagrama de interacción, se fue variando la posición del eje neutro para así ir modificando el área en compresión y luego realizar equilibrio con las fuerzas en tensión del acero de refuerzo. De esta manera se obtuvo el momento y fuerza axial del muro.

Antes de iniciar con los cálculos se tomaron algunas consideraciones:

- Debido a que el acero vertical de la mampostería no está confinado, fue ignorado cuando se ubicó en el área de compresión, el acero de las columnas si fue tomado en cuenta ya que posee confinamiento por parte de los aros.

- Las celdas vacías que se ubicaron en el área de compresión tampoco fueron tomadas en cuenta.
- El acero de refuerzo longitudinal de las columnas fue tomado solamente como un área como se muestra en la Figura 80, las distancias  $d$  se determinaron desde la fibra extrema en compresión hasta la ubicación de cada varilla de refuerzo.
- El recubrimiento utilizado fue de 2,5 cm.
- El ancho de las columnas fue transformado para obtener una sección de mampostería como se observa en la Figura 80.

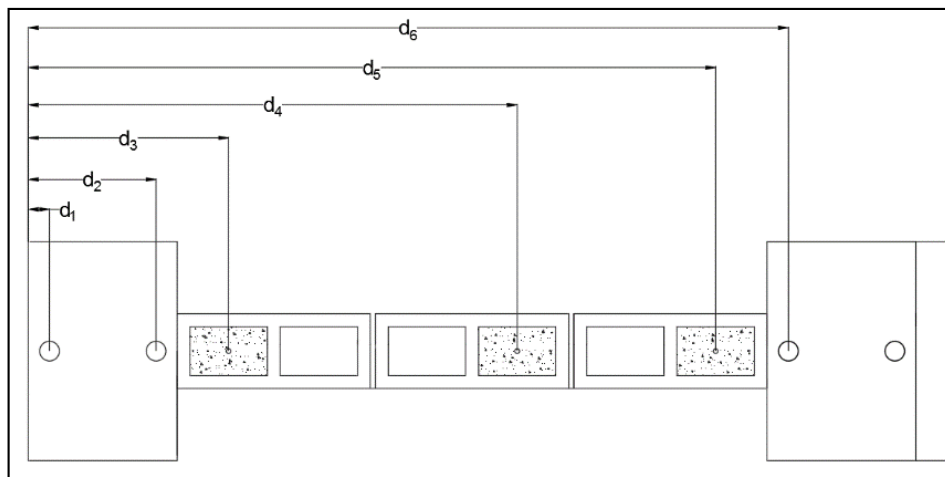


Figura 80. Sección transformada para el cálculo del diagrama de interacción.

En primer lugar como se mencionó anteriormente se varió el eje neutro a lo largo del muro y se calculó la altura del bloque de compresión.

$$a = 0,85 c \quad [0-6]$$

Donde:

- $c$ : eje neutro utilizado en la iteración
- $a$ : altura del bloque en compresión

El siguiente paso fue determinar los esfuerzos de las varillas que quedaron fuera del área de compresión. Las diferentes capas de varillas pueden estar o no fluyendo, para determinar cuál es el caso se calcula la deformación de cada capa de refuerzo.

$$\varepsilon_i = \left( \frac{c - d_i}{c} \right) \varepsilon_c \quad [0-7]$$

Donde:



- $\varepsilon_i$ : deformación de la capa de acero
- $c$ : eje neutro utilizado en la iteración
- $d_i$ : distancia desde la fibra en compresión al centroide de la capa de acero que se está calculando.
- $\varepsilon_c$ : deformación ultima del concreto=0,003

Con el resultado de las deformaciones se puede determinar si cada capa de acero fluye, si este es el caso su esfuerzo será el de fluencia  $f_y$ , de lo contrario se calculó su esfuerzo de la siguiente manera:

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

$$f_{s_i} = f_y \quad [0-8]$$

$$\text{Si } \varepsilon_i < \varepsilon_y$$

$$f_{s_i} = (\varepsilon_i)(E_s) \quad [0-9]$$

Donde:

- $\varepsilon_i$ : Deformación de la capa de acero
- $f_{s_i}$ : Esfuerzo de la capa de acero
- $f_y$ : Esfuerzo de fluencia del acero
- $E_s$ : Módulo de elasticidad del acero 2070000 kg/cm<sup>2</sup>
- $\varepsilon_y$ : Deformación de fluencia del acero ( $f_y/E_s$ )

Con los esfuerzos calculados se determinó las fuerzas de tensión en cada capa de acero correspondiente:

$$F_{s_i} = (f_{s_i})(A_{s_i}) \quad [0-10]$$

Donde:

- $F_{s_i}$ : Fuerza de la capa de acero
- $f_{s_i}$ : Esfuerzo de la capa de acero
- $A_{s_i}$ : Área de la capa de acero;  $A_{\#3}$  para las varillas en la mampostería y 4 varillas por  $A_{\#4}$  para los paquetes de varillas en las columnas.

Así, con las fuerzas de tensión calculadas se procedió a determinar la fuerza del bloque de compresión por medio de la ecuación [0-11].

$$F_c = 0,85 (f'_m)(A_c) \quad [0-11]$$

Donde:

- $F_c$ : Fuerza del bloque en compresión para el eje neutro seleccionado
- $f'_m$ : Resistencia a la compresión de la mampostería 100 kg/cm<sup>2</sup>
- $A_c$ : Área de la sección del muro en compresión considerada con las suposiciones que se hicieron anteriormente.

Seguidamente se procedió a determinar los valores nominales de fuerza axial  $P_n$ . Para cada iteración del eje neutro se calculó una sumatoria en equilibrio de fuerzas.

$$P_{n_i} = F_c - \sum_{i=1}^{n \text{ capas}} F_{s_i} \quad [0-12]$$

De esta forma para determinar el momento nominal  $M_n$  del muro para cada iteración del eje neutro se procedió a realizar una suma de momentos en la distancia  $d$  del muro:

$$M_n = F_c \left( d - \frac{a}{2} \right) - P_n \left( \frac{l}{2} - rec \right) + \sum_{i=1}^{n \text{ capas}} (f_{s_i})(D_i) \quad [0-13]$$

Donde:

- $M_n$ : momento nominal del muro para el eje neutro seleccionado
- $F_c$ : Fuerza del bloque en compresión para el eje neutro seleccionado
- $rec$ : distancia de recubrimiento 2,5 cm
- $d$ : Distancia desde la fibra extrema en compresión hasta la última varilla en tensión del muro.
- $P_n$ : Fuerza axial nominal del eje neutro seleccionado
- $f_{s_i}$ : Esfuerzo de la capa de acero

Finalmente para obtener todo el diagrama de interacción se iteró el eje neutro realizando todos los cálculos mencionados anteriormente. Por otro lado se calcularon los extremos del diagrama, estos consisten en axial pura donde el momento nominal es el cero, existe un punto para axial en compresión y otro para tensión.

$$P_c = 0,85 (f'c)(Ac) + (fy)(As_{col}) \quad [0-14]$$

Donde:

- $P_c$ : Valor de axial pura en compresión
- $As_{col}$ : área de acero en las columnas

$$P_T = \sum_{i=1}^{n \text{ capas}} (fy)(As) \quad [0-15]$$

Donde:

- $P_T$ : Valor de axial pura en tensión
- $As$ : área de acero en todo el muro

A continuación se presentan los diagramas de interacción utilizando las propiedades teóricas de los materiales:

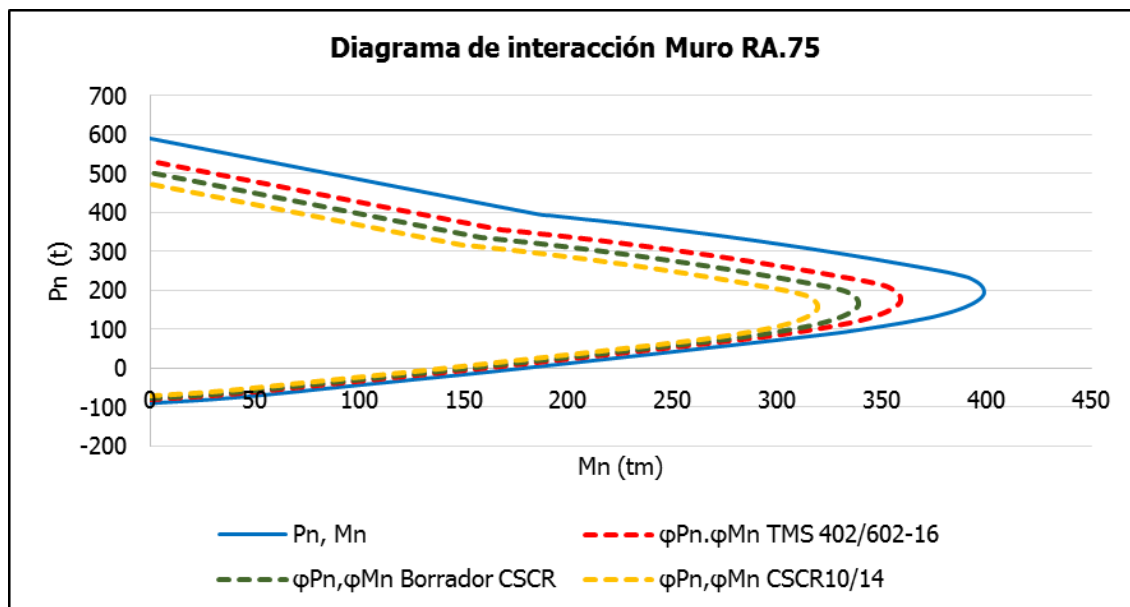


Figura 81. Diagrama de interacción del muro RA.75 calculado con propiedades teóricas de los materiales.

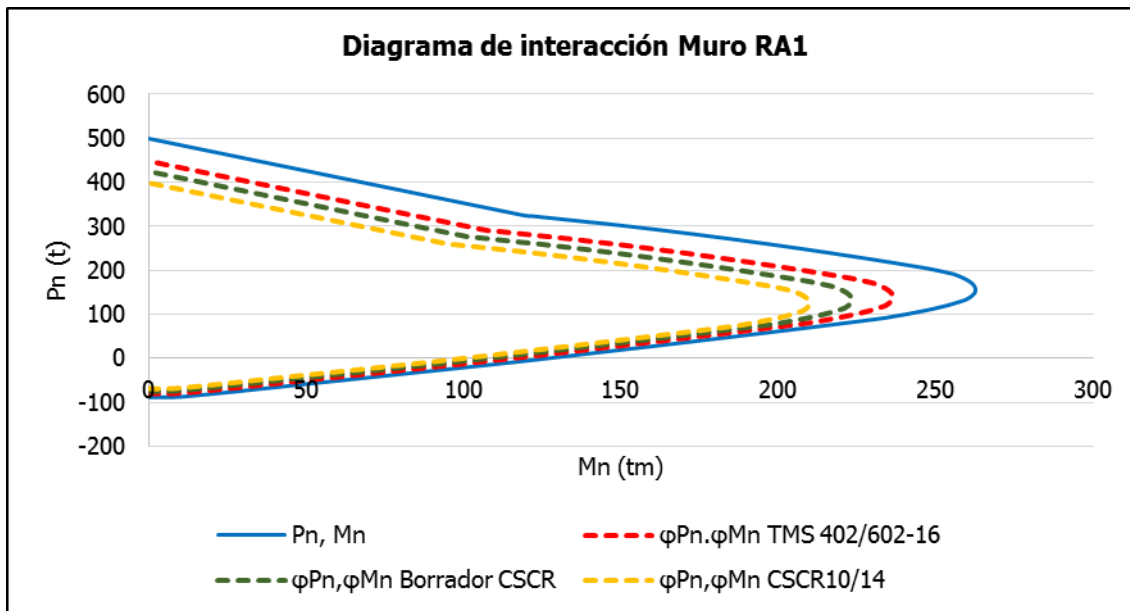


Figura 82. Diagrama de interacción del muro RA1 calculado con propiedades teóricas de los materiales.

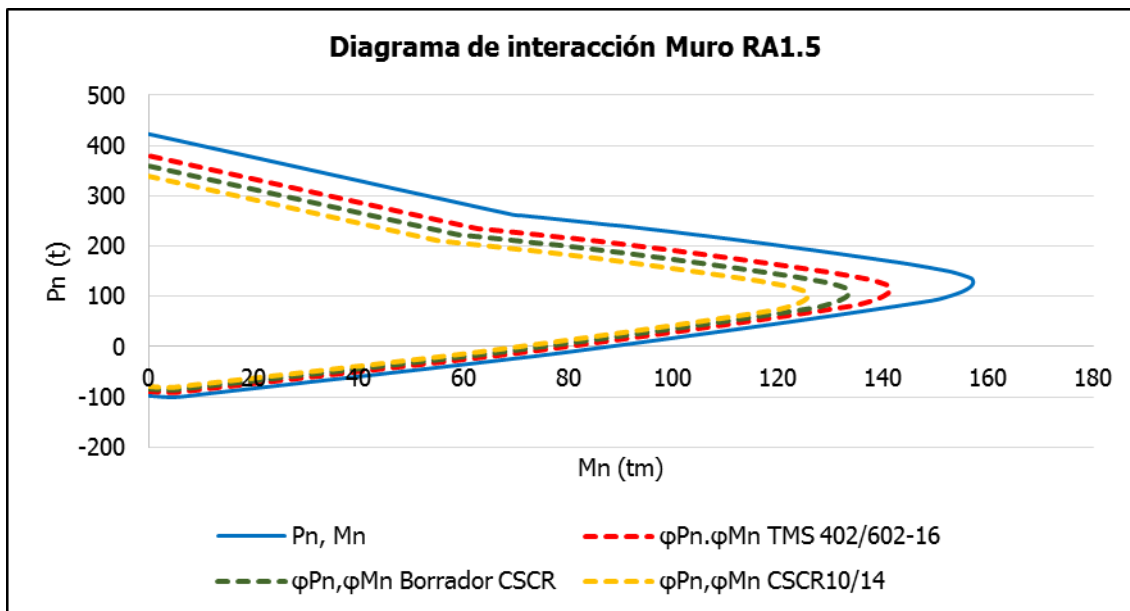


Figura 83. Diagrama de interacción del muro RA.1.5 calculado con propiedades teóricas de los materiales.

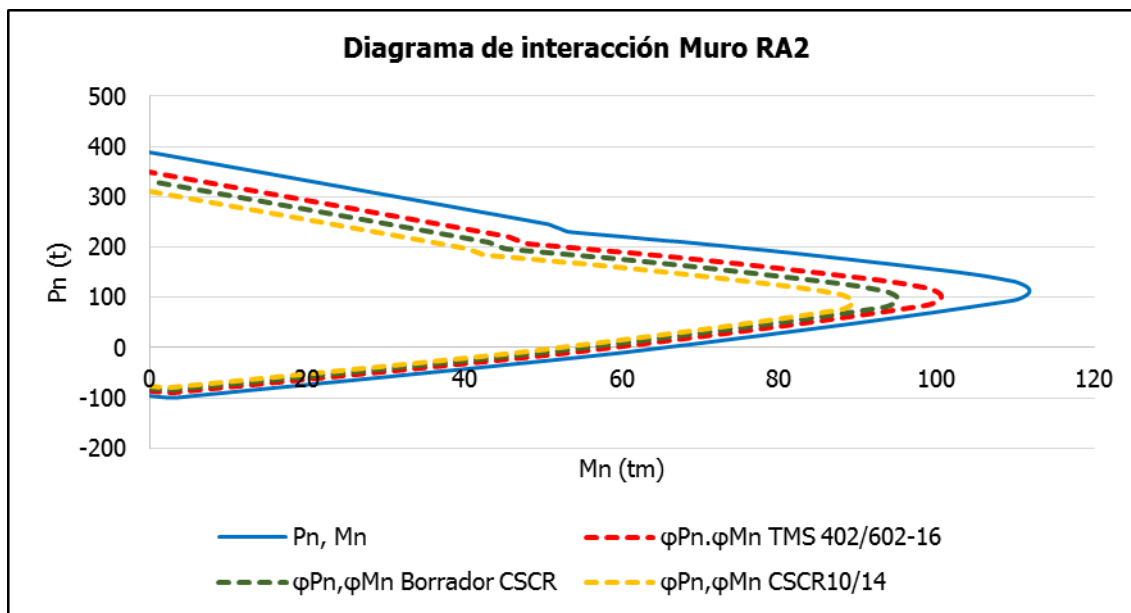


Figura 84. Diagrama de interacción del muro RA2 calculado con propiedades teóricas de los materiales.

En el Cuadro 43 se muestran las capacidades Mn de los diagramas de interacción calculados con las propiedades teóricas de los materiales. También se muestra el cortante  $V_{flexión}$ .

Cuadro 43. Capacidad a flexión calculada con propiedades teóricas.

Capacidad	Mn (t-m)	$V_{flexión}$ (t)
<b>Muro RA.5</b>		
Mn	280,86	98,72
$\phi$ Mn CSCR 10/14	224,69	78,98
$\phi$ Mn TMS 402/602-16	252,77	88,85
$\phi$ Mn Borrador CSCR	238,73	83,91
<b>Muro RA1.5</b>		
Mn	177,83	62,51
$\phi$ Mn CSCR 10/14	142,27	50,01
$\phi$ Mn TMS 402/602-16	160,05	56,26
$\phi$ Mn Borrador CSCR	151,16	53,13
<b>Muro RA1</b>		
Mn	126,79	44,57
$\phi$ Mn CSCR 10/14	101,43	35,65
$\phi$ Mn TMS 402/602-16	114,11	40,11
$\phi$ Mn Borrador CSCR	107,77	37,88

Capacidad	Mn (t-m)	V <sub>flexión</sub> (t)
<b>Muro RA1.5</b>		
Mn	88,73	31,19
$\phi$ Mn CSCR 10/14	71,20	25,03
$\phi$ Mn TMS 402/602-16	79,96	28,11
$\phi$ Mn Borrador CSCR	75,58	26,57
<b>Muro RA2</b>		
Mn	65,20	22,92
$\phi$ Mn CSCR 10/14	52,16	18,33
$\phi$ Mn TMS 402/602-16	58,68	20,62
$\phi$ Mn Borrador CSCR	55,42	19,48

Por otro lado a continuación de muestran los diagramas de interacción calculados con las propiedades experimentales de los materiales.

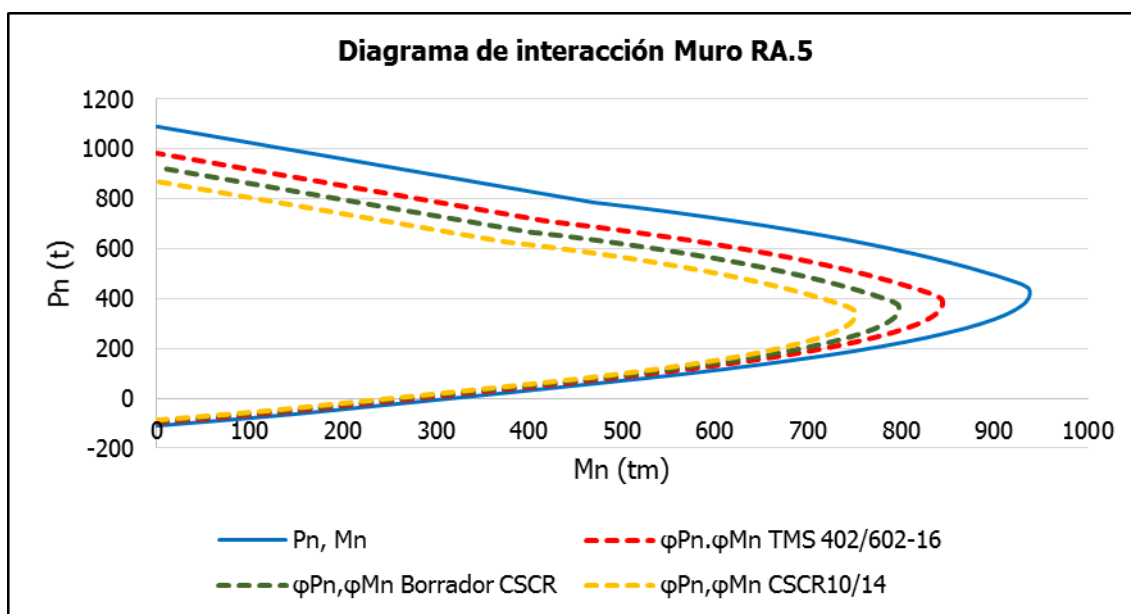


Figura 85. Diagrama de interacción calculado con propiedades experimentales RA.5.

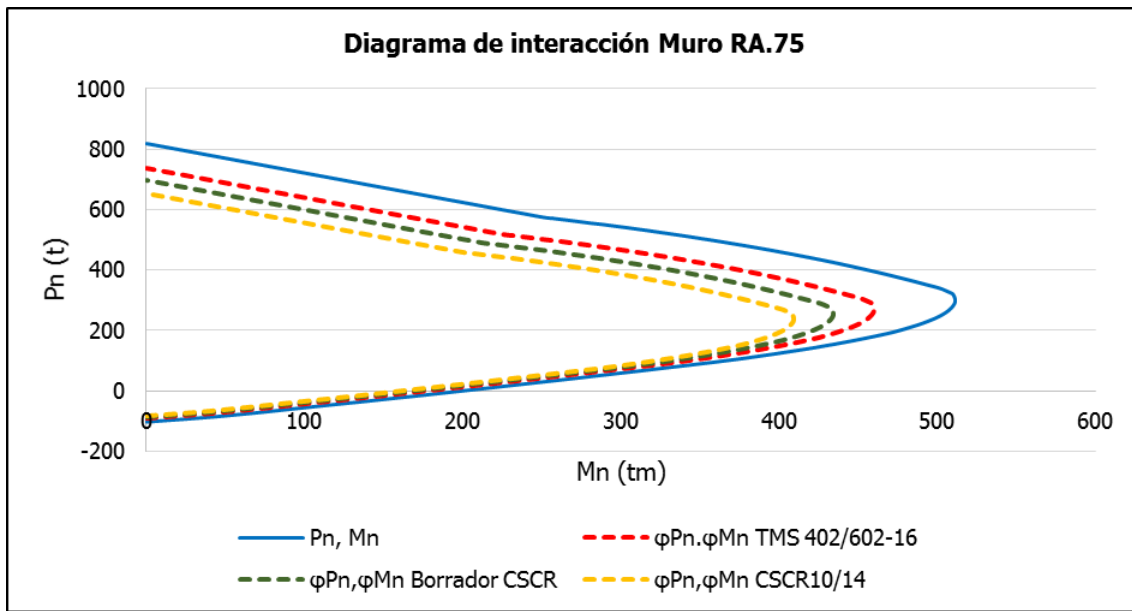


Figura 86. Diagrama de interacción calculado con propiedades experimentales RA.75.

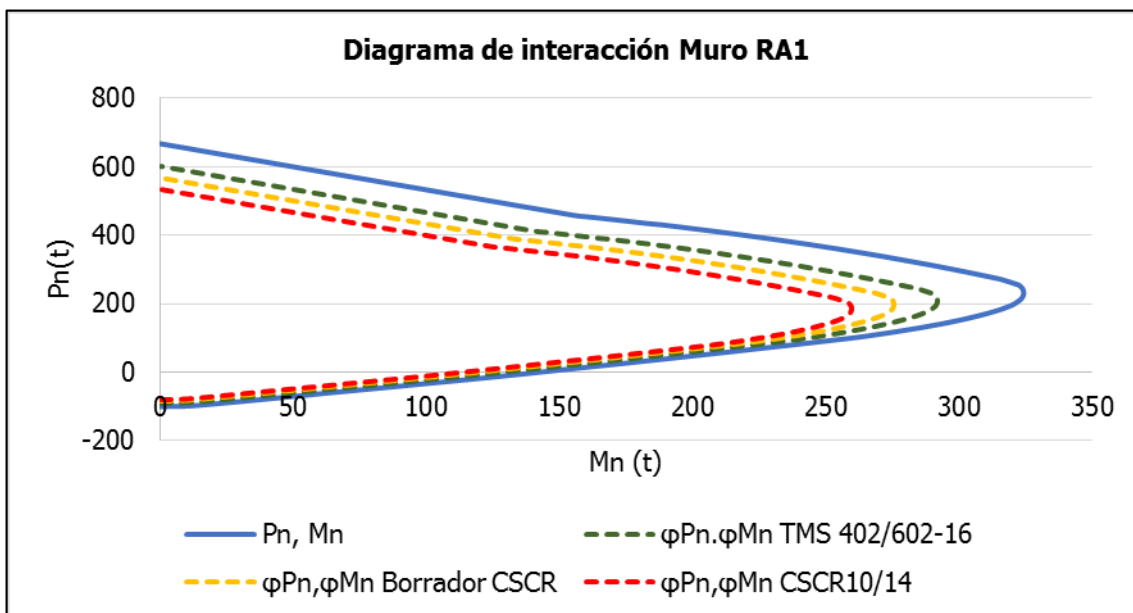


Figura 87. Diagrama de interacción con capacidades obtenidas en laboratorio muro RA1.

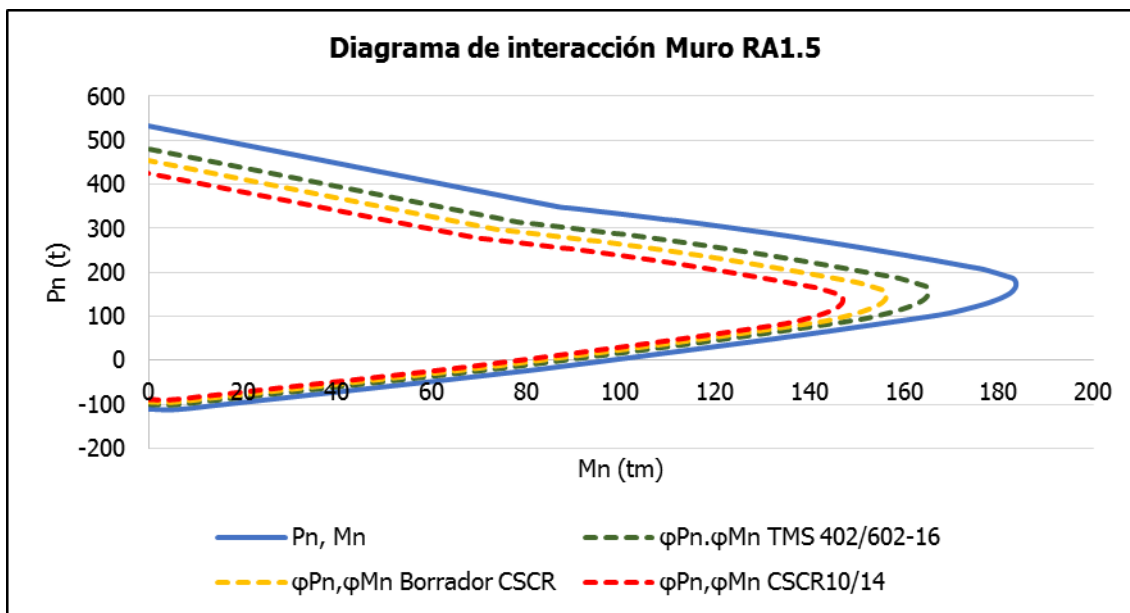


Figura 88. Diagrama de interacción con capacidades obtenidas en laboratorio muro RA1.5.

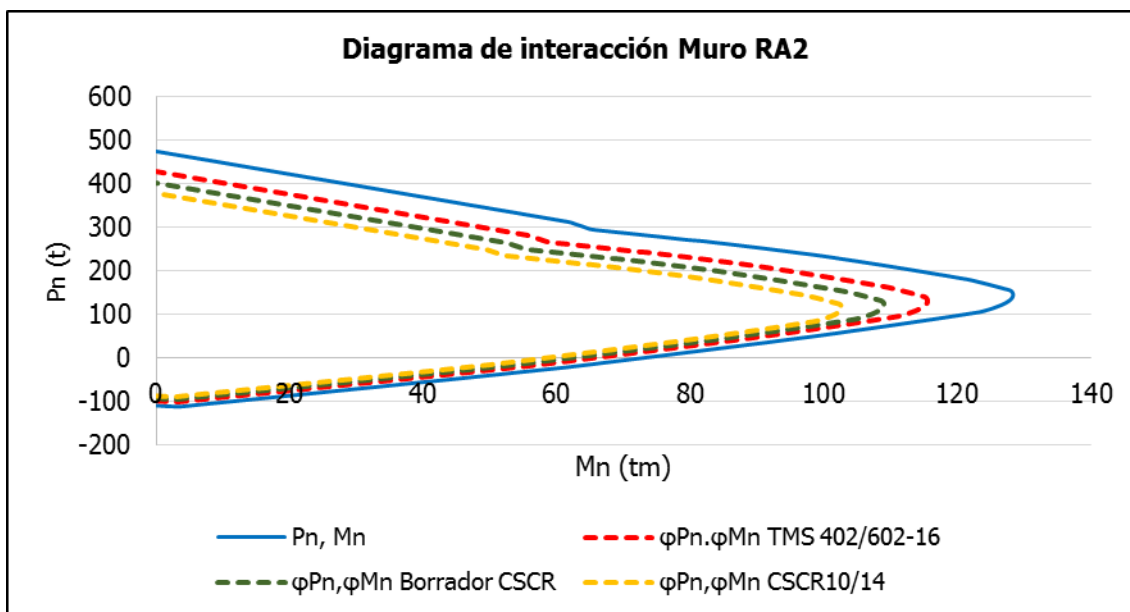


Figura 89. Diagrama de interacción con capacidades obtenidas en laboratorio muro RA2.



En el Cuadro 44 se muestran las capacidades Mn de los diagramas de interacción calculados con las propiedades experimentales de los materiales. También se muestra el cortante  $V_{flexión}$ .

Cuadro 44. Capacidad a flexión calculada con propiedades experimentales de los materiales.

<b>Capacidad</b>	<b>Mn (t-m)</b>	<b><math>V_{flexión}</math> (t)</b>
<b>Muro RA.5</b>		
Mn	317,21	111,50
$\phi$ Mn CSCR 10/14	253,77	89,20
$\phi$ Mn TMS 402/602-16	285,49	100,35
$\phi$ Mn Borrador CSCR	269,63	94,77
<b>Muro RA1.5</b>		
Mn	199,76	70,21
$\phi$ Mn CSCR 10/14	159,81	56,17
$\phi$ Mn TMS 402/602-16	179,78	63,19
$\phi$ Mn Borrador CSCR	169,79	59,68
<b>Muro RA1</b>		
Mn	142,13	49,96
$\phi$ Mn CSCR 10/14	113,70	39,97
$\phi$ Mn TMS 402/602-16	127,91	44,96
$\phi$ Mn Borrador CSCR	120,81	42,46
<b>Muro RA1.5</b>		
Mn	97,59	34,30
$\phi$ Mn CSCR 10/14	78,07	27,44
$\phi$ Mn TMS 402/602-16	87,83	30,87
$\phi$ Mn Borrador CSCR	82,95	29,16
<b>Muro RA2</b>		
Mn	72,41	25,45
$\phi$ Mn CSCR 10/14	57,93	20,36
$\phi$ Mn TMS 402/602-16	65,17	22,91
$\phi$ Mn Borrador CSCR	61,55	21,64

### Apéndice 3. Valores de las envolventes

Cuadro 45. Puntos de la envolvente para el muro RA.5.

Serie	Desplazamiento (mm)	Carga (kg)
1	0,699	5918
2	1,530	9192
3	2,629	14217
4	3,408	17694
5	4,199	22006
6	8,150	38677
7	19,332	50266
8	27,323	44068
9	43,687	41711
10	57,764	35673
1	-0,737	-7508
2	-1,309	-9926
3	-2,658	-13869
4	-3,626	-17152
5	-4,522	-20858
6	-9,754	-35097
7	-20,998	-45121
8	-34,414	-44462
9	-47,677	-41034
10	-59,967	-37710

Cuadro 46. Puntos de la envolvente del muro RA.75.

Serie	Desplazamiento (mm)	Carga (kg)
1	0,956	4255
2	1,989	6506
3	3,832	9829
4	5,664	14086
5	7,117	18319
6	13,366	30026
7	21,284	38407
8	43,835	39343
9	54,481	33891
10	76,057	20362
1	-0,956	4255
2	-1,981	-6835
3	-3,718	-10044
4	-4,606	-11308
5	-6,313	-14175
6	-13,336	-23154
7	-28,298	-36222
8	-44,550	-33452
9	-60,506	-28320
10	-76,794	-17862

Cuadro 47. Puntos de la envolvente para el muro RA1.

<b>Serie</b>	<b>Desplazamiento (mm)</b>	<b>Carga (kg)</b>
1	1,167	3838
2	2,242	5789
3	3,790	8756
4	5,510	11591
5	7,338	14259
6	13,165	21392
7	29,226	34337
8	47,401	32473
9	66,194	24666
1	-1,119	-2983
2	-2,204	-4758
3	-4,121	-7253
4	-6,066	-9675
5	-8,136	-12053
6	-16,734	-20681
7	-30,871	-31632
8	-46,753	-29332
9	-72,935	-17994

Cuadro 48. Puntos de la envolvente para el muro RA1.5.

<b>Serie</b>	<b>Desplazamiento (mm)</b>	<b>Carga (kg)</b>
1	0,581	1297
2	1,211	2789
3	2,044	3524
4	3,610	3722
5	4,429	4225
6	7,411	6942
7	17,260	13247
8	26,472	17095
9	33,381	16361
10	46,254	17301
11	56,219	16880
12	66,156	15210
1	-0,586	-1091
2	-1,231	-2598
3	-2,320	-4471
4	-3,094	-5121
5	-3,639	-5433
6	-7,086	-8508
7	-15,742	-16001
8	-25,645	-20897
9	-35,257	-22729
10	-45,148	-22776
11	55,159	-21817
12	-64,918	-12457

Cuadro 49. Puntos de la envolvente del muro RA2.

<b>Serie</b>	<b>Desplazamiento (mm)</b>	<b>Carga (kg)</b>
1	1,055	277
2	2,150	432
3	4,144	1226
4	5,317	1459
5	11,973	1729
6	79,555	7522
7	27,876	14546
8	44,450	16778
9	61,792	17062
10	79,062	16446
11	95,777	15766
12	116,256	13709
1	-0,941	-205
2	-2,179	-359
3	-4,519	-716
4	-8,172	-1475
5	-11,947	-2819
6	-15,535	-5555
7	-31,669	-12548
8	-49,075	-15555
9	-67,080	-16342
10	-84,627	-16330
11	-102,944	-15313
12	-100,103	-9249

## Apéndice 4. Protocolos de carga

Cuadro 50. Protocolo de carga muro RA.5.

<b>Serie</b>	<b>Ciclo</b>	<b><math>\Delta</math></b>	<b>Amplitud (mm)</b>
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

Cuadro 51. Protocolo de carga muro RA.75.

<b>Serie</b>	<b>Ciclo</b>	<b><math>\Delta</math></b>	<b>Amplitud (mm)</b>
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

Cuadro 52. Protocolo de carga muro RA.1.

<b>Serie</b>	<b>Ciclo</b>	<b><math>\Delta</math></b>	<b>Amplitud (mm)</b>
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

<b>Serie</b>	<b>Ciclo</b>	<b><math>\Delta</math></b>	<b>Amplitud (mm)</b>
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

Cuadro 53. Protocolo de carga muro RA.1.5.

<b>Serie</b>	<b>Ciclo</b>	<b><math>\Delta</math></b>	<b>Amplitud (mm)</b>
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

Cuadro 54. Protocolo de carga muro RA.2.

<b>Serie</b>	<b>Ciclo</b>	<b><math>\Delta</math></b>	<b>Amplitud (mm)</b>
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

