



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL  
FACULTAD REGIONAL MENDOZA**

**CEREDETEC**

Tesis para otorgar el Título de Doctor en Ingeniería  
Mención Civil-Ambiental

**RESPUESTA EXPERIMENTAL Y ANALITICA  
DE MAMPOSTERÍA DE GRAN ESPESOR  
UTILIZADA EN EDIFICIOS PATRIMONIALES**

**Autor: Ing. NELSON DARÍO AGÜERA**

**Director de Tesis: Dr. Ing. MIGUEL EDUARDO TORNELLO**

**Codirector de Tesis: Dr. Ing. CARLOS DANIEL FRAU**

Mendoza, Argentina  
2023

*A Ivana, mi amor y mi sostén.*

*A mis hijos Martín y Valentín,  
mis objetivos de superación.*

*A mis papás y hermanas,  
por el apoyo incondicional*

## RESUMEN

Los últimos terremotos que han afectado a Latinoamérica en Perú y Chile (8.0 Mw-2007, 8.8 Mw-2010, 8.4 Mw-2015) ponen en evidencia que el desempeño sísmico de los edificios vulnerables es un tema pendiente en la Provincia de Mendoza. El tema cuenta con escaso desarrollo de investigaciones afines. La estimación de la vulnerabilidad y la posterior intervención sísmica antes de un evento es la mejor estrategia para mitigar un desastre, en especial en zona donde los periodos de recurrencias de sismos significativos son largos, como es el caso del Gran Mendoza. El comportamiento de los edificios antiguos suele ser complejo para ser interpretado por simples modelos mecánicos. Los ensayos realizados en muros de mampostería evidencian un comportamiento sumamente frágil, con una rotura de tipo explosiva que numéricamente puede entenderse como una limitación en la capacidad de disipación de energía. El objeto de la tesis es caracterizar algunas de la mampostería histórica que se emplazan en Mendoza y definir el comportamiento mecánico frente a cargas verticales y horizontales. Se presentan los resultados de los ensayos experimentales, a partir de la fabricación de muretes de mampostería de diferentes espesores y de las respuestas de dichos muretes cuando son sometidos a cargas verticales y horizontales cíclicas. Los resultados obtenidos indican una importante variabilidad de la respuesta estructural de los muretes ensayos en el ámbito de la presente tesis, en función del espesor de los mismos. Diferentes parámetros de respuesta mecánica no muestran una relación directa con la variación del espesor de los muretes, aunque el mecanismo de falla es similar y repentino para todos los casos estudiados. La representación de la nueva expresión de resistencia al corte, que propone la tesis para los muros de mampostería de espesores importantes, no contradice las teorías actuales conocidas, sino que realiza una corrección y un aporte simple para evaluar la respuesta de muretes de mampostería con espesores mayores a 290 mm.

Palabras claves: mampostería, respuesta estructural, ensayos experimentales, muros de gran espesor.

## **ABSTRACT**

The last earthquakes that have affected Latin America in Peru and Chile (8.0 Mw-2007, 8.8 Mw-2010, 8.4 Mw-2015) indicate that the improvement of the seismic performance of vulnerable buildings is a pending issue for the Government of the Province of Mendoza, Argentina. It has little development of related research. Vulnerability estimation and subsequent seismic intervention before an event is the best strategy to mitigate a disaster, especially in an area where recurrence periods of significant earthquakes are long, as is the case in Greater Mendoza. The behavior of old buildings is usually complex to be interpreted by simple mechanical models. The tests carried out on masonry walls show an extremely fragile behavior, with a rupture of explosive type that numerically can be understood as a limitation in the capacity of dissipation of energy. The purpose of the thesis is to characterize some historical masonry and find the different characteristics of mechanical behavior in the face of extreme situations, such as the actions of earthquakes on heritage historical buildings. The results of the experimental tests are presented, based on the manufacture in the laboratory of masonry walls of different thicknesses, which were subjected to constant vertical loads and cyclic horizontal loads. The results obtained indicate a variability of the structural response depending on the thickness of the masonry walls. Different parameters of mechanical response do not show a direct relationship with the variation of the thickness of the walls, although the mechanism of failure is similar and sudden for all the cases studied. The representation of the new expression of resistance to the shear does not contradict the current known theories, but it makes a correction and a simple contribution to evaluate the response of masonry walls with thicknesses greater than 290 mm.

Key words: masonry, structural response, experimental tests, large thick walls.

## AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer especialmente a todas las personas que de alguna u otra manera colaboraron en este trabajo, ya que en forma desinteresada me brindaron su tiempo, quitándose a sus obligaciones y a su familia.

A mi esposa, Ivana, por su amor completo y su paciencia eterna durante esta etapa de mi vida. A mis hijos, Martín y Valentín, que a pesar de quitarle tiempo de compartir con ellos siempre me transmitieron fuerzas y cariños para continuar día a día.

A mis papás por el amor recibido, la dedicación y la paciencia con la que cada día se preocupaban por mi avance y desarrollo de esta tesis, es simplemente único y se refleja en la vida de un hijo. También a mis hermanas, que me apoyaron en todo momento.

A mis amigos de la vida y los que me regalo la ingeniería, todos fueron muy importantes en esta etapa, pero no quiero dejar de agradecer especialmente a Gustavo Gioacchini, Nery Pizarro y Sebastián Panella que con ellos emprendí este duro, pero maravilloso camino llamado *doctorado*, sin su apuntalamiento y ayuda no hubiera podido llegar hasta acá.

A mi Director de Tesis, Miguel Tornello, sin su acompañamiento, enseñanzas y valiosos aportes nada de esto hubiera sido posible, destaco entre otras cosas el tiempo invaluable dedicado y la gran paciencia que tuvo conmigo en todo el proceso. A mi Codirector de Tesis, Carlos Frau, siempre dispuesto a brindarme su apoyo y consejos, sus aportes enriquecieron la investigación que llevamos adelante.

A las autoridades, docentes y personal del IMERIS y del INPRES, por permitirnos utilizar los laboratorios donde fueron realizados los ensayos y brindarnos su cooperación desinteresada.

A las autoridades y compañeros del CeReDeTeC Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica. A las autoridades del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza, por su apoyo desinteresado y a las autoridades de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza.

Finalmente destaco el irremplazable soporte económico del Programa de Becas Doctorales para Docentes de la Universidad Tecnológica Nacional, Subsecretaría de Posgrado, Secretaría de Ciencia y Tecnología del Rectorado de la Universidad Tecnológica Nacional, por ello se agradece a las autoridades de la Universidad Tecnológica Nacional por la confianza y apoyo institucional brindado para el desarrollo de la presente tesis.

## INDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>3</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>4</b>
<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>8</b>
<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	<b>15</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>16</b>
<b>INTRODUCCION</b> .....	<b>21</b>
1. PROBLEMÁTICA QUE ABORDA LA TESIS.....	21
2. MOTIVACIÓN .....	23
3. HIPÓTESIS.....	26
4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE LA TESIS .....	27
5. METODOLOGÍA.....	27
6. ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	28
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>30</b>
<b>ESTADO DEL ARTE</b> .....	<b>30</b>
1. INTRODUCCIÓN .....	30
2. COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LA MAMPOSTERÍA .....	37
2.1. <i>Propiedades de la mampostería</i> .....	37
2.2. <i>Modos de falla de la mampostería</i> .....	49
2.3. <i>Base teórica del modelo numérico</i> .....	51
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>61</b>
<b>ENSAYOS EXPERIMENTALES</b> .....	<b>61</b>
1. INTRODUCCIÓN .....	61
2. FABRICACIÓN Y ENSAYOS DE ESPECÍMENES A CARGAS VERTICALES.....	62
3. FABRICACIÓN Y ENSAYOS DE LOS MURETES PARA CARGAS VERTICALES CONSTANTES Y CARGAS HORIZONTALES CÍCLICAS.....	68
<b>CAPÍTULO III</b> .....	<b>77</b>
<b>RESULTADOS EXPERIMENTALES</b> .....	<b>77</b>

1. INTRODUCCIÓN .....	77
2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ESPECÍMENES A CARGAS VERTICALES. PILAS DE MAMPOSTERÍA.....	77
3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ESPECÍMENES A CARGA VERTICAL CONSTANTE Y CARGA HORIZONTAL CÍCLICA. MURETES DE MAMPOSTERÍA .....	88
3.1. <i>Otros parámetros de las respuestas experimentales</i> .....	98
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>115</b>
<b>MODELOS NUMÉRICOS. VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN.....</b>	<b>115</b>
1. INTRODUCCIÓN .....	115
1.1 <i>Modelo de Plasticidad</i> .....	115
2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS UTILIZADO .....	118
2.1 <i>Modelo Concrete Damaged Plasticity CDP en ABAQUS</i> .....	119
2.2. <i>Hipótesis de las condiciones de borde del modelo</i> .....	126
3. RESULTADOS DEL MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.....	128
3.1 <i>. Respuestas obtenidas del modelo de elementos finitos</i> .....	128
3.2. <i>Comparación de las respuestas numéricas con las respuestas experimentales</i> .....	132
4. COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE RESPUESTA .....	139
5. PROPUESTA PARA LA RESPUESTA ESTRUCTURAL EN MAMPOSTERÍA DE GRAN ESPESOR .....	145
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>152</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>152</b>
1. CONCLUSIONES RELACIONADAS CON LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES .....	152
2. CONCLUSIONES RELACIONADAS CON EL MODELO NUMÉRICO UTILIZADO .....	154
3. CONCLUSIONES FINALES .....	155
4. PROPUESTA PARA FUTURAS INVESTIGACIONES .....	156
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>158</b>

## **INDICE DE FIGURAS**

Figura 1. Estado actual de edificios construidos en Mendoza en la década del 1900. ....	31
Figura 2. Muro de mampostería no reforzada de gran espesor. ....	32
Figura 3. Daños causados a edificios de mampostería no reforzada en el terremoto de magnitud 6.3 en la ciudad de L'Aquila en Italia el 6 de abril de 2009.....	33
Figura 4. Daños en el edificio de la Basílica de San Francisco posterior al terremoto de 1861 en la ciudad de Mendoza.....	34
Figura 5. Curva experimental tensión – desplazamiento de fisura, obtenida por Van der Pluijm R. (1991). ....	38
Figura 6. Superficies de unión traccionadas, obtenidas por Van der Pluijm R. (1991).....	39
Figura 7. Comportamiento al corte de la unión, Van der Pluijm R. (1993).....	40
Figura 8. (a) Tensiones en un prisma de mampostería bajo cargas de compresión. (b) Curvas experimentales tensión (vertical) – desplazamiento para prismas de 600 x 250 x 600 [mm <sup>3</sup> ] obtenidos por Binda L. et al. (1988).....	42
Figura 9. Montaje del ensayo para la resistencia a la tracción de la mampostería paralelo a las juntas horizontales, Backes H. P. (1985).....	43
Figura 10. Diagramas experimentales típicos tensión-desplazamiento, para tracción en la dirección paralela a las juntas horizontales, Backes H. P. (1985).....	44



Figura 11. Envoltentes de resistencia obtenidas por Page A. W. (1981, 1983) para mampostería de ladrillos macizos y estados de tensión biaxial.....45

Figura 12. Esquemas de fallas típicas en términos de tensiones principales, Dhanasekar M. et al. (1985).....47

Figura 13. Comportamiento típico de materiales cuasi-frágiles bajo carga uniaxial y definición de energía de fractura.....50

Figura 14. Comportamiento de la mampostería bajo tensión cortante y definición de la energía de fractura  $G_f^II$  ( $c$  denota la cohesión).....50

Figura 15. Envoltente de falla para caso de carga combinada (corte – compresión), obtenida por Mann W. y Müller H. (1982).....50

Figura 16. Mecanismos típicos de falla en estructura de mampostería.....51

Figura 17. Macro-elemento propuesto por Chen S. et al. (2008).....54

Figura 18. Principales modos de falla de paneles de mampostería sometidos a cargas en el plano (en gris: porción del panel principalmente no comprimida).....54

Figura 19. Macro-elemento básico de Calìo I. et al. (2012). (a) configuración no deformada, (b) configuración deformada.....55

Figura 20. Estrategias de modelación para mampostería (Bayraktar A. et al., 2010).....56

Figura 21. Proceso de fractura para distintas cargas de pre-compresión obtenidos por Xu C. et al. (2012).....58

Figura 22. Molde de aluminio para fabricación de ladrillos cerámicos macizos.....	62
Figura 23. Probetas de mortero.....	64
Figura 24. Ensayo a compresión de morteros.....	64
Figura 25. Ensayo a compresión de ladrillos cerámicos macizos.....	65
Figura 26. Pilas de mampostería con espesores diferentes.....	65
Figura 27. Máquina universal de ensayos Shimadzu. Sistema de adquisición de datos.....	66
Figura 28. Ensayos a compresión axial de las pilas de mampostería.....	67
Figura 29. Muretes de mampostería. a) Vista, b) Planta y secuencia de construcción de las diferentes hiladas de ladrillo. Todas las medidas en (mm).....	69
Figura 30. Cronología de construcción de muretes de mampostería.....	70
Figura 31. Esquema de ensayo de muretes de mampostería en laboratorio.....	72
Figura 32. Vista superior del laboratorio IMERIS. Disposición del murete de mampostería en el laboratorio.....	74
Figura 33. Muretes de mampostería en el laboratorio previo al ensayo experimental.....	75
Figura 34. Ensayo a compresión en probeta de mortero.....	79
Figura 35. Ensayo a compresión sobre probetas de ladrillos cerámicos macizos.....	80
Figura 36. Pilas de mampostería con espesores diferentes.....	81

Figura 37. Ensayo a compresión axial de pilas de mampostería.....	82
Figura 38. Ensayos a compresión axial. Curvas de tensión-deformación de las pilas de mampostería con distintos espesores.....	83
Figura 39. Variación del factor de corrección de resistencia en función de la esbeltez.....	85
Figura 40. Variación de la carga máxima y la tensión máxima de pilas de mampostería.....	86
Figura 41. Murete de mampostería construido en laboratorio.....	89
Figura 42. Murete de mampostería en laboratorio previo al ensayo experimental.....	90
Figura 43. Relación fuerza-desplazamiento para los muretes de 290 mm de espesor.....	92
Figura 44. Relación fuerza-desplazamiento para los muretes de 450 mm de espesor.....	92
Figura 45. Relación fuerza-desplazamiento para los muretes de 610 mm de espesor.....	93
Figura 46. Ensayo murete de espesor 290 mm.....	94
Figura 47. Ensayo murete de espesor 450 mm.....	95
Figura 48. Ensayo murete de espesor 610 mm.....	96
Figura 49. Curvas fuerza-desplazamiento para los tres espesores de muretes estudiados, superpuestas.....	97
Figura 50. Variación de la Degradación de Rigidez en función de la distorsión medida, para los tres espesores diferentes de los muretes de mampostería.....	99
Figura 51. Curva envolvente para el murete de espesor 290 mm.....	100

Figura 52. Curva envolvente para el murete de espesor 450 mm.....	101
Figura 53. Curva envolvente para el murete de espesor 610 mm.....	102
Figura 54. Resistencia al Corte para los tres espesores diferentes de los muretes ensayados.....	103
Figura 55. Metodología para construir la curva envolvente bilineal, (Lüders e Hidalgo, 1987).....	104
Figura 56. Ductilidad Experimental. Envolvente bilineal para los diferentes muretes de mampostería ensayados.....	107
Figura 57. Capacidad al Corte de los muros de mampostería, para los tres espesores diferentes y para los reglamentos analizados.....	111
Figura 58. Capacidad al Corte de los muros de mampostería, comparando los resultados de los reglamentos con los ensayos experimentales.....	112
Figura 59. Tendencia de incremento del espesor, área de junta vertical y fuerza de corte en función del espesor del murete de mampostería.....	114
Figura 60. Modelo de plasticidad CDP. Relación tensión-deformación para una carga de compresión. ABAQUS, 2003.....	117
Figura 61. Modelo de elementos finitos utilizados en la plataforma ABAQUS para uno de los muretes de mampostería.....	119
Figura 62. Condiciones de borde y esquema de cargas aplicadas al murete.....	127

Figura 63. Respuesta numérica de los muretes con diferentes espesores. Model290, Model450 y Model610.....	128
Figura 64. Estado de tensiones según Von Mises.....	129
Figura 65. Estado de tensiones según Tresca.....	130
Figura 66. Curva fuerza-desplazamiento para el murete M290.....	133
Figura 67. Curva fuerza-desplazamiento para el murete M450.....	133
Figura 68. Curva fuerza-desplazamiento para el murete M610.....	134
Figura 69. Comparación de los esquemas de daño para el murete de 290 mm de espesor.....	136
Figura 70. Comparación de los esquemas de daño para el murete de 450 mm de espesor.....	137
Figura 71. Comparación de los esquemas de daño para el murete de 610 mm de espesor.....	138
Figura 72. Curvas envolventes para la respuesta experimental ( <i>EE</i> ).....	141
Figura 73. Curvas envolventes para la respuesta numérica ( <i>EN</i> ).....	142
Figura 74. Curvas envolventes para la respuesta experimental y numérica. M290.....	143
Figura 75. Curvas envolventes para la respuesta experimental y numérica. M450.....	143
Figura 76. Curvas envolventes para la respuesta experimental y numérica. M610.....	144

Figura 77. Curva de respuesta envolvente. Módulo de deformación de rotura (*MDR*).....146

Figura 78. Tendencia de crecimiento de *AJV* y *MDR* para los diferentes espesores de muretes de mampostería.....148

Figura 79. Capacidad de carga al corte para diferentes espesores de muretes de mampostería.  
.....150

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Edificios históricos construidos en la provincia de Mendoza.....	30
Tabla 2. Características geométricas de las pilas de mampostería.....	64
Tabla 3. Características geométricas de las pilas de mampostería.....	73
Tabla 4. Resultados ensayo a compresión de probetas de morteros.....	79
Tabla 5. Resultados Ensayo a Compresión Ladrillos Cerámicos Macizos.....	80
Tabla 6. Resultados del Ensayo a Compresión en pilas de mampostería.....	83
Tabla 7. Factores de corrección de la resistencia en función de la esbeltez de las pilas de mampostería. IC103-III-2018.....	85
Tabla 8. Esbeltez de las pilas de mampostería.....	85
Tabla 9. Corrección de Carga Máxima y Tensión Máxima.....	86
Tabla 10. Resistencia especificada a compresión en muretes de mampostería según el reglamento IC103-III-2018.....	88
Tabla 11 Resumen de datos para los ensayos de los muretes de mampostería.....	92
Tabla 12. Resumen de resultados obtenidos para la idealización de la curva bilineal.....	107
Tabla 13. Energía disipada para cada murete de mampostería.....	109
Tabla 14. Capacidad de carga al corte de los muretes de mampostería (IC103-III-2018).....	110
Tabla 15. Capacidad de carga al corte de los muretes de mampostería. (CCSR, 1987).....	111

Tabla 16. Resistencia al corte. (TMS402-ACI530-ASCE5, 2011).....	112
Tabla 17. Fuerza de corte, espesor y área de junta vertical de los muretes de mampostería..	115
Tabla 18. Características elásticas del ladrillo.....	122
Tabla 19. Características <i>CDP</i> del ladrillo.....	122
Tabla 20. Características no lineales del ladrillo.....	122
Tabla 21. Características elásticas del mortero.....	124
Tabla 22. Características <i>CDP</i> del mortero.....	125
Tabla 23. Características no lineales del mortero.....	125
Tabla 24. Resumen de datos de los modelos numéricos procesados.....	129
Tabla 25. Resultados comparativos entre el modelo numérico y el ensayo experimental...	138
Tabla 26. Resultados comparativos entre los ensayos experimentales y los modelos numéricos.....	142
Tabla 27. Resultados obtenidos de MDR.....	150
Tabla 28. Resultados obtenidos para la propuesta de capacidad al corte de muretes de mampostería.....	153

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_g$  : Área bruta de la sección horizontal del muro, en mm<sup>2</sup>.



$A_g$ :	Área bruta de la sección horizontal del muro, en $\text{mm}^2$ .
$A_{JV}$ :	Área de junta vertical, en $\text{mm}^2$ .
$A_{mv}$ :	Área de corte murete de mampostería, en $\text{mm}^2$ .
$b$ :	Alto del mampuesto, en mm.
$b$ :	Espesor o ancho de muro de mampostería, en mm. (TMS402-ACI530-ASCE5, 2011).
$CMP$ :	Carga máxima obtenida dividido el peso de la pila de mampostería.
$CMV$ :	Carga máxima obtenida dividido el volumen de la pila de mampostería.
$C_n$ :	Coefficiente de variación de tensiones normales.
$C_s$ :	Relación de tensión de corte máxima y tensión nominal del mampuesto.
$d$ :	Largo del mampuesto, en mm.
$d_c$ :	Variable de degradación de rigidez.
$d_E$ :	Desplazamiento elástico idealizado, en mm.
$d_{MR}$ :	Desplazamiento máximo, asociado al punto de máxima fuerza lateral de corte, en mm.
$d_{SL}$ :	Desplazamiento correspondiente a la primera fisura en la superficie del muro, en mm.
$e$ :	Espesor del muro, en mm.
$E$ :	Módulo de elasticidad longitudinal, en MPa.
$E_0$ :	Módulo elasticidad inicial, en MPa.
$E_b$ :	Módulo de elasticidad del mampuesto, en MPa.
$E_j$ :	Módulo de elasticidad de la junta horizontal de mortero, en MPa.
$E_m$ :	Módulo de elasticidad longitudinal, en MPa.
$E_T$ :	Energía disipada, en Nmm.
$E_v$ :	Módulo de elasticidad de la junta vertical de mortero, en MPa.
$exp$ :	Exponente.

$f_{bo} / f_{co}$ :	Coefficiente de tensión de fluencia a compresión biaxial respecto a la tensión de fluencia a compresión axial. Abaqus
$f'_m$ :	Resistencia específica a la compresión de la mampostería, en MPa.
$f'_v$ :	Resistencia especificada al corte de la mampostería, en MPa.
$F_{cm}$ :	Carga de rotura a compresión mortero (IRAM 1622).
$F_{cb}$ :	Carga de rotura a compresión ladrillos (IRAM 12586).
$f_{mm}$ :	Promedio de los valores de las resistencias a la compresión de los muretes de mampostería ensayados, en MPa.
$f_n$ :	Tensión de compresión, en MPa.
$f_o$ :	Tensión media de compresión que actúa sobre el muro, en MPa.
$f_{ib}$ :	Tensión de tracción límite del mampuesto, en MPa .
$f_v$ :	Tensión de corte del muro de mampostería, en MPa.
$G_m$ :	Módulo de elasticidad transversal, en MPa.
$h_{ef}$ :	Longitud del murete, en mm.
$I_n$ :	Momento de inercia del área de corte, en mm <sup>4</sup> .
$j$ :	Espesor junta de mortero, en mm.
$k$ :	Coefficiente que determina la forma de la sección transversal desviatoria. Abaqus.
$K_E$ :	Rigidez secante experimental, en N/mm.
$K_{E,exp}$ :	Rigidez elástica experimental, en N/mm.
$K_{E,teo}$ :	Rigidez elástica teórica, en N/mm.
$K_o$ :	Rigidez inicial o rigidez en rango elástico.
$K_{R,exp}$ :	Rigidez inelástica experimental, en N/mm.
$K_s$ :	Rigidez efectiva, en N/mm.
$K_{s,i}$ :	Rigidez efectiva, rigidez secante.
$l$ :	Longitud del muro, en mm.

$MDR$ :	Módulo de Deformación de Rotura, en N/mm.
$n$ :	Número de especímenes ensayados.
$N_u$ :	Esfuerzo normal sobre el muro, en N.
$Q$ :	Momento estático o momento de primer orden del área de corte, en mm <sup>3</sup> .
$R_{cm}$ :	Resistencia a compresión mortero, en MPa. (IRAM 1622).
$T_u$ :	Capacidad a corte de muros de mampostería, en N.
$V$ :	Resistencia al corte en el plano del muro de mampostería, en N.
$V_E$ :	Fuerza de equilibrio de corte en el límite elástico, en N.
$V_{MR}$ :	Fuerza de corte máxima, en N.
$V_n$ :	Resistencia nominal de corte del muro, en N.
$v_n$ :	Tensión tangencial de corte, en MPa.
$V_{np}$ :	Propuesta de resistencia nominal de corte, en N.
$V_{SL}$ :	Fuerza de corte corresponde al nivel de desplazamiento de la primera fisura en la superficie del muro, en N.
$\Delta$ :	Distorsión o deriva.
$\Delta D$ :	Diferencia entre la deformación máxima y mínima del ciclo de carga.
$\Delta F$ :	Diferencia entre la fuerza máxima y mínima del ciclo de carga.
$\alpha$ :	Coefficiente que tiene en cuenta la colaboración de la junta vertical de mortero.
$\delta$ :	Dispersión relativa (IRAM 12586).
$\delta_m$ :	Coefficiente de variación.
$\delta_{max}$ :	Desplazamiento máximo, en mm.
$\varphi$ :	Relación de tensiones laterales y de corte.
$\mu$ :	Coefficiente de fricción.
$\mu_{MR}$ :	Ductilidad de desplazamiento.
$\sigma_i$ :	Resistencia a compresión de la probeta (IRAM 12586).
$\sigma_{pk}'$ :	Resistencia característica a compresión (IRAM 12586).
$\sigma_{pkm}'$ :	Resistencia a compresión promedio (IRAM 12586).

$\sigma_c$ :	Tensión de compresión, en MPa.
$\tau$ :	Tensión de corte, en MPa.
$\tau_o$ :	Tensión de corte de referencia, en MPa.
$\zeta_{eq}$ :	Amortiguamiento viscoso equivalente, en %.
$\varepsilon$ :	Deformación total.
$\varepsilon_0^{el}$ :	Deformación elástica.
$\varepsilon^{in}$ :	Deformación inelástica.
$\varepsilon^{pl}$ :	Deformación plástica.

## INTRODUCCION

### 1. Problemática que aborda la tesis

Los edificios históricos existentes poseen diferentes sistemas constructivos y distintos materiales resistentes. Esto sucede por varios motivos, entre los cuales se pueden mencionar: momento de su construcción, disponibilidad y tipo de materiales, mano de obra entre otros aspectos. En la presente tesis se trabaja en aquellos edificios históricos, cuya estructura resistente principal la componen muros de mampostería no reforzada de espesores importantes. Los mampuestos utilizados en las mismas tienen similares características a los que actualmente reciben la denominación de “ladrillo cerámico macizo” no industrializado. Por otro lado, existen algunos trabajos de investigación que desestiman el aporte ante la demanda sísmica que puede realizar la mampostería, generalmente no reforzada, de acuerdo a su espesor, el cual es de dimensiones mayores a los que se realizan en la actualidad. A los muros con dichas características, en la presente tesis se los ha denominado “muros de mampostería no reforzada de gran espesor”.

Los muros de mampostería no reforzada de gran espesor, son parte de las construcciones históricas emplazadas en la provincia de Mendoza, ubicadas en el centro oeste de Argentina. La amenaza sísmica de la provincia de Mendoza representa uno de los fenómenos naturales que pueden impactar negativamente sobre dichas construcciones. Por otro lado, es conocido que la ocurrencia de un terremoto destructivo no solamente afecta a las construcciones históricas o patrimoniales sino que también ocasiona importantes pérdidas de vidas humanas y destrucción de infraestructuras, situación que pone de manifiesto el potencial destructivo de este fenómeno. Por lo tanto, la investigación del comportamiento de las estructuras frente a terremotos representa un objetivo permanente de la ingeniería sísmica, y especialmente, en las construcciones históricas, sobre las cuales la acción sísmica es mucho más sensible que sobre una construcción tradicional.

Los edificios históricos y patrimoniales de Argentina y también de Sudamérica se diferencian de los ubicados en Europa o América del Norte. Las construcciones patrimoniales se componen de muros de mampostería de barro cocido asentadas con morteros de cal. Esta tipología estructural carece de información precisa sobre su comportamiento a cargas cíclicas, como puede ser la acción sísmica y, en general, la bibliografía internacional utiliza parámetros

de construcciones históricas de Europa, donde la conformación de sus muros, como principal tipología estructural, es muy diferente a las emplazadas en nuestra región.

Edificios que fueron construidos desde la década del 1900 en adelante, con tecnologías y prácticas propias de construcción de su época, no contaron con el nivel actual del conocimiento sobre el diseño y análisis sismorresistente, situación que las hace vulnerables a la ocurrencia de terremotos.

El examen estructural de los edificios patrimoniales requiere de análisis teóricos con dos objetivos fundamentales: i) predecir la respuesta sísmica de los mismos y ii) evaluar el grado de vulnerabilidad de los edificios. Los análisis se realizan sobre modelos matemáticos que representen al propio edificio de tal manera que provean información sobre su comportamiento frente a las distintas acciones a las que estarán sometidos, principalmente, la acción sísmica. Para que esos modelos sean confiables en sus resultados es necesario contar con parámetros mecánicos y constitutivos de los componentes estructurales de los edificios patrimoniales, que reflejan las características de los materiales y de las técnicas constructivas que se utilizaron en la región del emplazamiento del edificio.

Trabajos realizados por diferentes investigadores (Luccioni, 1997; Bustamante, 2004; Mondragón, 2010) en la línea que propone la tesis, permitieron conocer la respuesta estructural de la mampostería no reforzada estudiando el comportamiento estructural de la mampostería a través del análisis numérico.

Si bien las metodologías que proponen los mencionados trabajos pueden ser adecuadas a los objetivos de la presente tesis, los resultados no pueden extrapolarse porque, para el caso de los edificios patrimoniales emplazados en la región y en particular en la provincia de Mendoza, varían la calidad de los materiales, los tipos de aparejos utilizados en la construcción de los muros de mampostería, los espesores y la calidad de los morteros de asiento de los mampuestos y, principalmente, los espesores finales de los muros, que en muchos casos alcanzan dimensiones importantes. Este último parámetro, así como el tipo de aparejo y el espesor de la junta de mortero de asiento de los mampuestos no ha sido considerado suficientemente por otros autores para caracterizar los muros de mampostería, situación que resulta relevante para la confiabilidad de los resultados, dado que dichos muros representan la estructura principal de los edificios y, por lo tanto, deben garantizar su seguridad.

Trabajos de investigación realizados por Page et al. (1981) indicaron que las relaciones de carga y deformación presentan una gran variabilidad en función del tipo de mampuesto y mortero utilizado; sin embargo, los autores no profundizan sobre la variación de rigidez de los muros en función de los espesores de los mismos.

Los trabajos de Martín (1997) proponen una metodología sencilla y eficiente para la determinación de los parámetros mecánicos a ser introducidos en un modelo con no linealidad de material y anisotropía tendientes a simular el comportamiento de paneles de mampostería, de manera independiente al espesor y trabajando en general con especímenes de muros de mampostería de espesores reducidos o pequeños.

Investigaciones desarrolladas por Dhanasekar (2007) concluyen que la utilización de macros modelos numéricos tiene buena predicción de la respuesta de estructuras de muros de mampostería comparando los resultados con los ensayos experimentales, aunque los trabajos fueron elaborados con muros de mampostería de un solo espesor y de dimensiones reducidas.

## **2. Motivación**

Los últimos terremotos que han afectado a Latinoamérica, especialmente el de Perú y Chile - sucedidos en 2007 y 2010 respectivamente-, señalan que la mejora del desempeño sísmico de los edificios vulnerables es un tema pendiente para la Provincia de Mendoza. El mismo cuenta con escaso desarrollo de investigaciones afines. La estimación de la vulnerabilidad y la posterior intervención sísmica antes de un evento es la mejor estrategia para mitigar un desastre, en especial en zonas donde los periodos de recurrencia de sismos significativos son largos, como es el caso del Gran Mendoza (INPRES, 1989).

La estructura de mampostería es un material ortótropo y presenta grandes diferencias de resistencias según las direcciones principales, y estas diferencias varían si se trata de comportamiento del tipo tracción o del tipo de compresión o de la combinación de ambas (Luccioni et al., 1997). La acción sísmica demanda comportamientos a tracción y compresión en la mampostería, por lo tanto, resulta relevante la caracterización mecánica de la misma.

La mampostería es un material compuesto por diferentes unidades como son los ladrillos o mampuestos y los morteros o aglomerantes. El principal problema que presenta su modelación matemática son los errores introducidos en el proceso de homogeneización cuando se quiere obtener la rigidez de los dos componentes. Este problema es evidente en el caso de análisis no lineal, donde la rigidez tangente de uno de los componentes o la rigidez

tangente de los dos componentes tiende a cero con el comportamiento inelástico creciente (Lourenço et al., 2002). Estos antecedentes ponen en evidencia la importancia sobre la metodología a utilizar al momento de proponer modelos matemáticos para la predicción de la respuesta.

La representación numérica de la respuesta sísmica de construcciones históricas de mampostería pueden ser analizadas por: i) Análisis Límite con Bloques Rígidos, ii) Método de los Elementos Rígidos, iii) Método del Elemento Finito no lineal. Estos tres métodos fueron aplicados al análisis de una estructura de un edificio histórico sujeto a cargas laterales (Bustamante et al., 2007). Otro análisis utilizado para estructuras de mampostería es el método de los elementos discretos (DEM, *Discrete Element Method*), según se indica en el trabajo de investigación de Pulatsu et al. (2016), quienes señalan al método como una adecuada herramienta para describir el comportamiento no lineal de las estructuras de mampostería

Con frecuencia se utiliza el análisis límite de estructuras para mampostería antigua en un contexto de varias simplificaciones, por lo que las hipótesis adoptadas sobre los mecanismos de colapso son muy deficientes a la hora de obtener las respuestas estructurales (Lourenço et al., 2007).

El comportamiento de los edificios antiguos suele ser complejo para ser interpretado por simples modelos mecánicos. Extrapolar los procedimientos analíticos desarrollados específicamente para edificios modernos en general resulta insuficiente y, en muchos casos, inadecuado (Betti et al., 2008).

Para estudiar muros de mampostería sujetos a cargas en su plano, Page (1978) creó un modelo en el que se puede representar el comportamiento no lineal de la mampostería. La misma se considera como un material formado por dos fases consistente en un bloque elástico dentro de una matriz de mortero inelástica. El modelo de Page se basa en el estudio mediante el método de elementos finitos no lineal que tiene en cuenta la progresiva fisuración de las juntas de la matriz que forma el mortero. Para la validación de su método se trabajó con parámetros mecánicos basados en resultados experimentales, pero tomando como hipótesis que el espesor del muro es un valor que no genera variación desconocida del comportamiento del conjunto; para una predicción afinada de la carga última, el criterio de colapso del ladrillo debería ser incluido en el modelo, situación que Page no consideró en su estudio.



El modelo propuesto por Lourenço (1992) se basa en la consideración de la mampostería como un material compuesto por una sucesión de capas que posteriormente pasan a ser homogeneizadas. El modelo fue construido a partir de la consideración de la mampostería como un sistema paralelo de capas, las cuales en este caso se consideran con propiedades elásticas e isotropas. En el modelo de Lourenço (1992), aunque es un modelo homogeneizado, sus elementos se acercan más a lo que es la teoría de mezclas que a un modelo homogeneizado propiamente dicho. Además, es un modelo desarrollado tridimensionalmente, lo que lo convierte en una herramienta con alto costo computacional tanto a nivel de cálculo como a nivel de generación de malla.

En la tesis de Magister de Martín (1997), el autor propone un método para el análisis de paneles de mampostería que consiste en obtener los parámetros de los materiales del conjunto mediante un pre-proceso numérico y luego introducirlos en un modelo anisótropo elastoplástico con daño, para simular el comportamiento de la mampostería como un único material homogéneo anisótropo, utilizando la teoría de mezclas y espacios ficticios de tensiones. En el trabajo se realizaron ensayos experimentales con muretes de espesor reducido y constante, por lo cual puede plantearse la incertidumbre de si el modelo propuesto es compatible con espesores de muros diferentes y mayores a los estudiados, teniendo en cuenta que las juntas verticales dispuestas en el ancho del muro pueden aportar una distribución de tensiones y deformaciones diferentes.

Crisafulli (1997) propone, para analizar el comportamiento de paneles de mampostería solicitados a tensiones de compresión y de corte, el método desarrollado por Mann and Müller's modificando las distribuciones de tensiones de forma más realista. La teoría no tiene en cuenta la colaboración de las juntas verticales de mortero, considerando que para muros de espesores mayores a 290 mm, dichas juntas ocupan un volumen importante. En la misma línea de investigación Torrisi et al. (2011) propuso una nueva teoría de falla de la mampostería, teniendo en cuenta la contribución de las juntas verticales de mortero en la resistencia a corte de la mampostería. Las teorías propuestas por Crisafulli (1997) y Torrisi (2011) resultan interesantes, aunque sería oportuno verificarse el comportamiento de muros de mampostería cuando aumentamos el espesor de manera considerable. Además, dichas teorías fueron desarrolladas para muros de mampostería enmarcada con elementos de hormigón armado las cuales conforman una tipología estructural muy frecuente en zonas sísmicas y especialmente en el oeste argentino.

Los ensayos realizados sobre pilas de mampostería de ladrillos cerámicos huecos a compresión normal a la junta y compresión diagonal evidencian un comportamiento sumamente frágil, con una rotura de tipo explosiva que numéricamente puede entenderse como una limitación en la capacidad de disipación de energía. Esto hace que se trate de materiales poco apropiados para construir elementos estructurales que deban soportar acciones sísmicas. Aún para elementos de cerramiento este tipo de falla resulta altamente peligrosa (Martín, 1997).

Los ensayos a compresión y corte realizados sobre diferentes muros de mampostería muestran una clásica biela central donde se origina la falla, con un ángulo de inclinación que es función del espesor del muro ensayado experimentalmente. De esta manera, los muros de espesor 460 mm presentan en algunos casos una doble biela que se puede representar con inclinaciones mayores a los 45° (cercanos a los 60°) y que representan el modelo de falla global del muro de mampostería. Sin embargo, en el muro de espesor 260 mm el modo de falla global es estándar con una biela en compresión con una inclinación de 45°. Debido a esto es de fundamental importancia cuantificar las características técnicas de cada una de las juntas de mortero para materializar de manera realista el comportamiento global de los muros de mampostería (Sánchez, 2014).

En consecuencia, estos trabajos previos indican que este tipo de estructura posee una capacidad de disipación de energía limitada y con posibles roturas frágiles, a su vez que la capacidad de resistir acciones sísmicas provenientes de terremotos importantes puede ser determinada con diferentes estrategias de análisis, sin embargo es un factor común en las diferentes investigaciones es el escaso análisis experimental sobre muros de mampostería de diferentes espesores.

### **3. Hipótesis**

- a) Los espesores de los muros, espesores de juntas de morteros y tipos de aparejos influyen en los parámetros mecánicos (valores característicos de resistencia) y relaciones constitutivas (curva carga-deformación) de la mampostería. Particularmente, se postula la no linealidad de parámetros mecánicos con respecto al espesor del muro de mampostería.
- b) Mediante ensayos físicos y mecánicos es posible caracterizar la mampostería de los edificios patrimoniales, teniendo en cuenta sus parámetros distintivos y característicos.

c) A través de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio y la modelación numérica del fenómeno físico es posible calibrar un la capacidad del muro bajo demandas de corte y cargas axiales.

#### **4. Objetivos específicos de la tesis**

- i) Ensayar muretes de mampostería de diferentes espesores a cargas de compresión y corte en su plano. Se medirán los parámetros cuantificables en el plano del murete.
- ii) Contrastar los modelos propuestos por los diferentes autores con los ensayos realizados, visualizando la variable definida como el espesor total de los muros de mampostería.
- iii) Proponer una ecuación empírica que represente el comportamiento experimental al corte de los muros de mampostería estudiados.

#### **5. Metodología**

En una etapa incipiente se realiza una recopilación y análisis de los trabajos relacionados con la temática. Se realiza una revisión de trabajos publicados en revistas indexadas, presentación a congresos nacionales e internacionales, consulta de textos de la especialidad y otros trabajos de interés que puedan aportar al tema abordado por la tesis.

En una segunda etapa, primero se diseñan los muretes que se utilizarán en la etapa experimental, variando dimensiones geométricas como los espesores de muretes, luego se realizarán los ensayos experimentales de los especímenes confeccionados a tal fin que representen las características de los muros de mampostería de los edificios patrimoniales. Se procede a confeccionar una serie de especímenes llamados “muretes de mampostería”, utilizando la técnica constructiva que representa la época de construcción del edificio. Estos muretes se construyen en el laboratorio de ensayos estructurales respetando los espesores de muros, espesores de junta de mortero y tipos de aparejos utilizados en las construcciones originales existentes. Los especímenes se ensayan ante cargas estáticas, combinando las acciones gravitacionales verticales con las acciones horizontales en su plano para representar la acción sísmica predominante en la zona de emplazamiento de los edificios. En esta etapa se

incluye además la fabricación de los mampuestos y la calibración de los dosajes de los morteros de cal utilizados en los muretes.

En una etapa siguiente, se realiza una propuesta de ecuación empírica que represente el comportamiento estructural de la mampostería al corte con la influencia del espesor del muro de mampostería. Se presenta una evaluación de respuesta estructural de diferentes autores y se muestran las variaciones obtenidas para los diferentes muros de mampostería. Para simular la respuesta estructural de la mampostería se ha utilizado un programa computacional de elementos finitos (Abaqus, 2003) con el objeto de modelar los diferentes especímenes de mampostería que fueron ensayados experimentalmente en laboratorio. En tal sentido, se busca una concordancia de la respuesta estructural de los mismos con la formulación matemática propuesta para el modelo.

## **6. Estructura de la tesis**

La tesis se compone de seis apartados. El primero presenta la introducción de la temática de estudio, donde se resalta la importancia de la investigación de estructuras que forman parte de edificios históricos patrimoniales de la Provincia de Mendoza.

En el Capítulo I se exhibe una recopilación de antecedentes, en la que se muestra un relevamiento de los diferentes edificios históricos patrimoniales y su año de construcción. Se introduce en la caracterización de los muros de mampostería utilizados en los edificios históricos patrimoniales. Se resumen diferentes metodologías de modelación numérica para el análisis de las estructuras de mampostería no reforzada.

El Capítulo II presenta el programa experimental a realizarse en el laboratorio de ensayos estructurales. Se describen las características geométricas y mecánicas de los especímenes de muros de mampostería, se muestran las etapas de construcción de los diferentes especímenes. Se desarrolla el plan de ensayos que tiene en cuenta las diferentes instancias de pruebas experimentales y una descripción de los resultados esperados.

En el Capítulo III se exponen los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio de ensayos estructurales. Se analizan los resultados obtenidos caracterizando la respuesta experimental en términos de la variación del espesor de los muros de mampostería. Se estudia

la tendencia de la respuesta en función de la capacidad de carga y de los niveles de deformaciones.

El Capítulo IV desarrolla el análisis numérico de la respuesta estructural de los muros de mampostería simulando el comportamiento que los mismos tuvieron en el laboratorio de ensayos estructurales. Se estudia la calibración del modelo numérico con las respuestas experimentales obtenidas. Se presentan las diferentes simulaciones numéricas que representan los comportamientos estructurales de los especímenes en el laboratorio. Para los diferentes análisis se detallan las características elásticas e inelásticas de los materiales que componen los muros de mampostería. Se realiza un modelo de elementos finitos del muro de mampostería utilizando una herramienta computacional (Abaqus, 2003), donde, a través de modelos de plasticidad de los materiales, se obtienen las diferentes relaciones tensiones-deformaciones como respuesta numérica. Se propone una ecuación empírica para obtener la capacidad de corte de muros de mampostería que contemple la variación del espesor total de los mismos.

Finalmente, se presentan los resultados y conclusiones finales de la investigación. Allí se muestra la vinculación entre los objetivos y las hipótesis trazadas en la tesis. Se expone una propuesta validada de la respuesta de muros de mampostería de espesores importantes solicitados por una combinación de cargas en el plano de los mismos. Esta propuesta es de aplicación rápida y sencilla para evaluar el comportamiento de muros de mampostería no reforzada de espesores mayores a los utilizados actualmente en la práctica de la profesión y que habitualmente fueron utilizados en las construcciones históricas a que hace mención el Capítulo I de la presente tesis.

# CAPÍTULO I

## ESTADO DEL ARTE

### 1. Introducción

En Argentina y Sudamérica existe una generación de edificios de carácter histórico y patrimonial construidos a partir del 1900. La subsistencia del patrimonio histórico asigna una gran complejidad, fundamentalmente en zonas o regiones sísmicas. La técnica constructiva utilizada en estas construcciones fue la de mampostería no reforzada de gran espesor, conformada por ladrillos de arcilla cocida y morteros a la cal como aglomerante. Sin duda, estas construcciones no contaron con el actual nivel de conocimiento sobre el diseño y análisis sismorresistente, situación que las hace vulnerables a la ocurrencia de terremotos destructivos.

En la Tabla 1 se muestra una serie de edificios patrimoniales construidos alrededor de la década de 1900 situados en la provincia de Mendoza, Argentina. Estos edificios no son representativos de la totalidad de edificios históricos que en la actualidad la provincia de Mendoza conserva, pero constituyen un icono para el patrimonio histórico de la Provincia.

**Tabla 1**

*Edificios históricos construidos en la provincia de Mendoza*

Nombre del Edificio	Año de Construcción
Escuela N° 1-047 "Bartolomé Mitre". Ciudad de Mendoza	1875-1906
Escuela N° 51 "Tte. Gral. Rufino Ortega". Malargüe	1918
Escuela N° 1-079 "Argentinos Uruguayos" de Villa Atuel. San Rafael	1907

Escuela N° 1-004 "Guillermo Rawson". Godoy Cruz	1930
Museo Provincial de Bellas Artes "Emiliano Guiñazú". Luján de Cuyo	1890
Colegio Nacional Agustín Álvarez. Ciudad de Mendoza	1905
Escuela N° 1-212 Antonio Zinny. Luján de Cuyo	1910

*Nota.* Fuente: elaboración propia.

### Figura 1

*Estado actual de algunos edificios construidos en la provincia de Mendoza entre 1900 y 1940.*



*Nota.* La fotografía a) muestra el edificio Escuela G. Rawson de 1930. La fotografía b) muestra el edificio Escuela B. Mitre de 1875-1906. Fuente: elaboración propia.

La estructura resistente principal de estos edificios se compone de muros de mampostería no reforzada de gran espesor. Estos muros de mampostería están conformados por mampuestos de ladrillo de arcilla cocida y, como aglomerante entre los mampuestos, se utilizaron morteros de cal. Tal cual se mencionó precedentemente, las dimensiones geométricas de los mampuestos utilizados entre los años 1900 y 1940 son sensiblemente mayores a los mampuestos utilizados en la actualidad.

En la Figura 2 se observa una vista clásica de mampostería no reforzada de gran espesor, en donde se muestran cualitativamente las dimensiones de los mampuestos y su relación proporcional con los espesores de los morteros utilizados.

**Figura 2**

*Muro de mampostería no reforzada de gran espesor. Museo del bicentenario de la ciudad de Buenos Aires*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

A lo largo de la historia, el empleo de la mampostería como material estructural ha sido una tipología muy utilizada, inclusive antes de que aparecieran nuevos materiales tales como el hormigón armado y el acero. Por lo tanto, un porcentaje significativo de las construcciones con valor patrimonial están construidas exclusivamente con muros de mampostería. Esos elementos, los que también cumplen funciones estructurales, tienen un rol importante en la respuesta sísmica de la construcción frente a las acciones que las solicitan, cargas permanentes, sobrecargas de uso y acciones sísmicas cuando se emplazan en regiones con riesgos sísmicos. Por esta última causa, adquiere especial importancia el estudio del comportamiento estructural de las construcciones de mampostería sujetas a acciones sísmicas.

Por otro lado, el análisis estructural de edificios históricos de mampostería con fines de evaluación sísmica continúa siendo un desafío debido a una serie de factores entre los cuales



se destacan: i) la baja resistencia en tracción con falla cuasi-frágil de la mampostería, que implica comportamiento no lineal desde intensidades de cargas pequeñas; ii) la gran heterogeneidad generalmente presente en estas construcciones dificulta asignar propiedades mecánicas globales al modelo del material; iii) el carácter compuesto del material; iv) la falla por corte es no asociada, debido a la diferencia entre el ángulo de dilatación y el ángulo de fricción interna de la mampostería y v) las juntas comúnmente representan planos de debilidad que pueden tener orientaciones bien definidas o no, de acuerdo con su arreglo geométrico.

Durante los terremotos, las razones estructurales del mal comportamiento de las construcciones de mampostería se deben principalmente a su heterogeneidad, comportamiento anisotrópico, a una resistencia a la tracción despreciable, un comportamiento al corte deficiente, que se agrava adicionalmente con la calidad decreciente del material de mampostería. El principal problema se debe a la respuesta no monolítica (Costa, 2012).

En la Figura 3 se observan los daños a edificios de mampostería no reforzada, causados por el terremoto de magnitud 6.3 que se registró en el centro de la ciudad L'Aquila en Italia el 6 de abril de 2009.

### Figura 3

*Daños causados a edificios de mampostería no reforzada en el terremoto de magnitud 6.3 en la ciudad de L'Aquila en Italia el 6 de abril de 2009*



*Nota.* Fuente: <https://www.bbc.com>

En la provincia de Mendoza, Argentina, en el año 1861, ocurrió el sismo de magnitud estimada de 7.0, donde el edificio de la Basílica de San Francisco fue prácticamente colapsado. Este contaba con estructura principal de mampostería no reforzada de gran espesor. En la Figura 4 se observan los daños en el edificio causados por el terremoto y el estado actual de conservación del mismo.

**Figura 4**

*Daños en el edificio de la Basílica de San Francisco posterior al terremoto de 1861 en la ciudad de Mendoza*



*Nota.* La fotografía a) muestra el estado del edificio en 1920. La fotografía b) muestra el estado actual de conservación del edificio. Fuente: <https://mendozantigua.blogspot.com.ar/>

Para tener información de la la respuesta estructural de la mampostería no reforzada, se recomiendan realizar ensayos destructivos y no destructivos. En el ámbito de la investigación experimental sísmica, distintos enfoques de ensayos se han utilizado para las estructuras de mampostería no reforzada, es decir, ensayos monotónicos o cíclicos cuasi estáticos, ensayos dinámicos en mesa vibratoria y ensayos pseudo-dinámicos. Los ensayos dinámicos pueden simular con más precisión la acción sísmica, aunque los ensayos cuasiestáticos cíclicos permiten mediciones más precisas de fuerzas y desplazamientos y el registro de la evolución del daño se hace más sencillo (Calvi et al., 1996).

Los muros de mampostería normalmente se ensayan en laboratorio a carga vertical constante, haciendo variar la carga horizontal, con la finalidad de representar un comportamiento global en el laboratorio de ensayos estructurales (Vermeltoort et al., 1993).

La configuración típica para ensayos estructurales cuasi estáticos fue sugerida de manera tal que el panel de mampostería se fija en la parte inferior y se deja libre la parte superior (Atkinson et al., 1989).

Un análisis exhaustivo del comportamiento cíclico en el plano de los muros de mampostería a corte fue logrado a través de ensayos cuasi-estáticos en los muros de mampostería históricos. Se obtuvieron diferentes modos de falla en función de las características individuales de ladrillos y morteros (Magenes, 1992).

La capacidad de corte de la mampostería sometida a carga monotónica y cíclica se estudió experimentalmente para evaluar su potencial rendimiento sísmico, los resultados muestran que, al considerar los resultados de los ensayos de la interfaz ladrillo-mortero y de los ensayos de compresión de mampostería, la capacidad de los muros de mampostería cargados lateralmente en el plano bajo carga cíclica se puede predecir con aceptable aproximación. El ensayo con carga cíclica proporciona información vital, como son los modos de falla y evolución de daños, forma del ciclo de histéresis y la disipación de energía, para la evaluación de la respuesta sísmica de los muros de mampostería (Bosiljkov et al., 2003).

El análisis de la mampostería a través de modelos de elementos finitos, puede predecir con cierta aproximación la respuesta de la estructura ante acciones sísmicas. La mayoría de las investigaciones de muros de mampostería no reforzada, evaluadas desde su comportamiento sísmico, se centran a partir de los análisis experimentales o numéricos (Lourenço et al., 1995).

La mampostería exhibe propiedades direccionales distintas porque las juntas de mortero actúan como planos de debilidad. De estos modos distintos de falla se deduce que, para la mayoría de las relaciones de tensiones principales, las variaciones en la resistencia de la junta de mortero no deberían influir en gran medida en la resistencia a la compresión biaxial. Sin embargo, cuando predomina una tensión principal, las propiedades de las juntas de mortero desempeñarán un papel importante (Page, 1981).

Según López et al. (1998) la mampostería es un material que presenta direccionalidad en sus propiedades debido a que las juntas del mortero actúan como planos de debilidad del material. En general, la aproximación hacia una modelización numérica puede ser enfocada con micromodelos, los cuales discretizan de forma detallada y separada ladrillos y juntas. Por otra parte, existe la posibilidad de hacer un análisis con macromodelos, donde se trata a la mampostería como un material compuesto.

Los análisis de la mampostería utilizando la herramienta de micromodelado son convenientes para pequeños elementos estructurales, con especial interés en los estados de tensiones y deformaciones en el panel, y para representar ese comportamiento se necesita un conocimiento de cada elemento que compone la mampostería y la interacción que se generan entre ellos (Roca et al., 2010).

El comportamiento de la mampostería no reforzada utilizada en edificios para soportar acciones sísmicas puede entenderse a través de un análisis tridimensional de paneles de mampostería, utilizando herramientas computacionales de modelación, describiendo características elásticas e inelásticas de los materiales utilizados en el modelo constitutivo. Los resultados numéricos presentaron una aproximación relativa comparada con diferentes resultados experimentales documentados por distintos autores (Aref et al., 2013).

Para estudiar el comportamiento sísmico de estructuras de mampostería no reforzadas, las capacidades de modelado no lineal son un requisito obligatorio. Entre otras estrategias de modelado para edificios de mampostería, la técnica del pórtico equivalente es un trabajo óptimo entre la precisión y la eficiencia computacional que requiere la definición de elementos no lineales apropiados de dos nodos representativos de miembros estructurales. La simulación de ensayos experimentales ha mostrado una concordancia entre los resultados del análisis numérico y los resultados experimentales, incluso en términos de disipación de energía histórica asociada con el daño por corte. El logro es particularmente importante para la aplicación del modelo de macroelementos en los análisis de la historia del tiempo orientados a la simulación del comportamiento sísmico de las estructuras de mampostería (Penna et al., 2013).

A través de una micromodelación de elementos finitos se ha estudiado el comportamiento global y local de muros de mampostería de espesores de 0.26 m y 0.46 m respectivamente, utilizando el modelo de Drucker-Prager tanto para los mampuestos como para los morteros de las juntas horizontales y verticales. El autor cita la importancia definir la interacción que se manifiesta en estas juntas de mortero, con respecto a su relación con los mampuestos, debido a que ello domina básicamente el comportamiento de los muros de mampostería. Es por eso que se ha evaluado el uso de superficies de interacción entre los materiales, que permiten un estudio particular de cada plano de manera diferenciada (Sánchez, 2014).

Uno de los procedimientos para conocer el comportamiento estructural de la mampostería es el desarrollo de los modos de falla de la misma, donde se definen tres tipos principales: la falla por deslizamiento de las juntas de mortero, la falla por la tensión diagonal en los mampuestos y la falla por la compresión de la mampostería. Mann y Müller (1982) desarrollaron esta teoría de falla de la mampostería sin tener en cuenta la colaboración de las juntas verticales de mortero. En esta línea de investigación, se avanzó con la incidencia que se encontraba al variar el ángulo de inclinación de las juntas de mortero horizontal respecto a las

cargas exteriores (Dhanasekar et al., 1985). Posteriormente, se propone una modificación de la teoría de falla de la mampostería considerando la real distribución de tensiones sobre el mampuesto, según demuestra Crisafulli (1997). A su vez, Torrisi et al., (2011) presentan una nueva teoría de falla de la mampostería teniendo en cuenta la colaboración parcial o total de las juntas verticales de mortero.

La presente tesis procura obtener resultados experimentales de muros de mampostería de diferentes espesores, evaluar la respuesta estructural a través de modelos numéricos conocidos y teorías de fallas actuales, realizar un análisis comparativo entre lo empírico y lo teórico de manera tal de formular una propuesta más realista para conocer la resistencia al corte de dichos edificios que son la estructura principal de las construcciones históricas.

## **2. Comportamiento mecánico de la mampostería**

La mampostería se entiende como el conjunto de dos fases materiales constituidas por unidades, como los ladrillos, y una sucesión de juntas de mortero dispuestas en forma irregular o regular. En el último caso, las juntas siguen la disposición del contorno de los ladrillos, formando dos grupos principales de juntas: horizontales y verticales.

La mampostería es un material que presenta diferentes propiedades en función de la dirección en la que estén orientadas las juntas de mortero. Éstas constituyen planos de debilidad. La falla de la estructura de mampostería va precedida generalmente por un desarrollo masivo de fisuración en dichas juntas, por lo que éstas son las limitantes en la capacidad resistente final.

Las propiedades de los materiales se determinan a partir de ensayos experimentales individualizados de cada una de las partes que conforman la mampostería.

### **2.1. Propiedades de la mampostería**

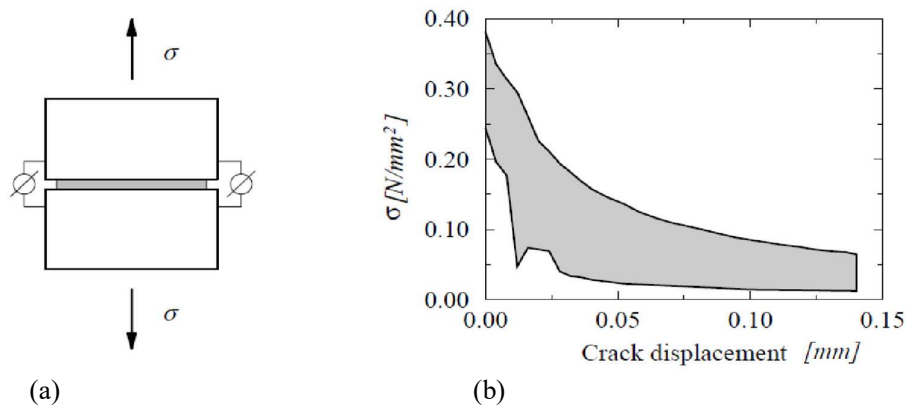
Una revisión completa y detallada para los aspectos mecánicos se puede encontrar en la tesis doctoral de Lourenço (1996). Es posible identificar dos tipos de falla diferentes a nivel de la interfaz: Modo I (falla por tracción) y Modo II (falla de corte). Van der Pluijm (1991) realizó una serie de ensayos en especímenes de mampostería de pequeña escala que contienen sólo una junta de mortero con el fin de caracterizar estas juntas teniendo en cuenta la interacción con los ladrillos y los modos de falla mencionados anteriormente.

### 2.1.1 Modo I – Falla por Tracción

En el modo de falla I, la curva de tensión-desplazamiento exhibe una disminución de la tensión con el aumento de la deformación tal como se muestra en la Figura 5. Esta disminución de la resistencia está vinculada a la coalescencia de micro-fisuras hasta grietas macroscópicas, la cual se puede aproximar muy bien mediante una curva con decrecimiento exponencial. La resistencia a la tracción obtenida en este tipo de prueba se rige por la falla de la interfaz entre ladrillo y mortero o por la falla del mortero. El modo de falla depende de la calidad del mortero, que resulta principalmente de su composición, y de la calidad de la unión entre ambos materiales, que está influenciada por las condiciones de curado, la naturaleza porosa del ladrillo y el área de unión real entre ladrillo y mortero. El área bajo la curva de tensión - desplazamiento está relacionado con la energía de fractura del modo I. Como se ilustra a través del área sombreada en la Figura 5, los resultados experimentales presentan una gran dispersión tanto en la resistencia máxima como en la energía de fractura. Van der Pluijm (1991) estableció una correlación, más bien débil, entre la resistencia de la unión a la tracción y la energía de fractura, en función del tipo de componente.

**Figura 5**

*Curva experimental tensión – desplazamiento de fisura, obtenida por Van der Pluijm (1991)*



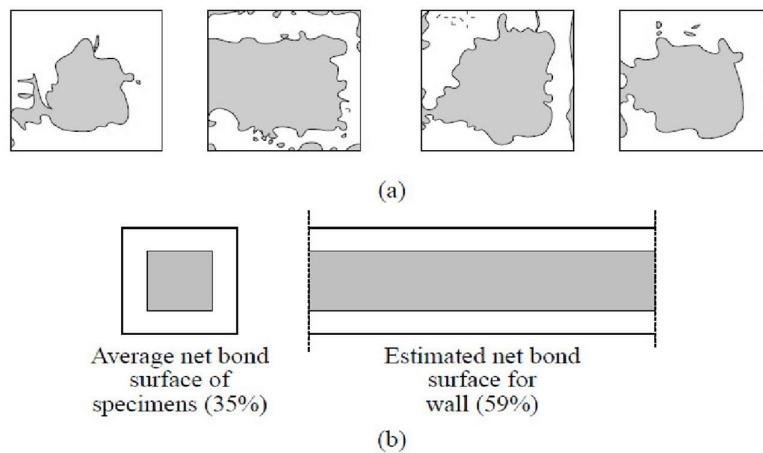
*Nota.* La figura muestra a) esquema del ensayo y b) curva tensión – desplazamiento de fisura para ladrillo macizo. El área bajo la curva de tensión - desplazamiento está relacionado con la energía de fractura del modo I. (Van der Pluijm,1991).

Como se muestra en la Figura 6 las observaciones mediante microscopía revelaron que el área efectiva de unión es menor que el área seccional de las juntas de mortero. La red de superficies de unión (así llamada por Van der Pluijm a la interfaz) parece estar concentrada en

la parte interior de la junta, lo cual puede ser el resultado de la reducción de volumen de mortero y de un proceso de colocación de los ladrillos en el lecho del mortero. En el caso de un muro de mampostería, la red de superficie de unión puede ser corregida y aumentada debido a que las juntas de mortero, en especial las horizontales presentan pocas discontinuidades.

**Figura 6**

*Superficies de unión traccionadas, obtenidas por Van der Pluijm (1991)*



*Nota.* La figura muestra (a) Superficies de unión típicas y (b) Estimación de las superficies de unión en función de los resultados obtenidos en (a)

Los esquemas presentados en la Figura 6.b hacen referencia a la sección transversal real de un muro y es el resultado de una extrapolación de la superficie de unión neta, medida en la muestra de ensayo, con respecto a la superficie de unión neta supuesta para la pared, dejando de lado cualquier influencia de las juntas verticales. Esta simulación daría a entender que para este modo de falla la mampostería sería una sucesión de capas horizontales formadas por ladrillos y juntas de mortero sucesivas.

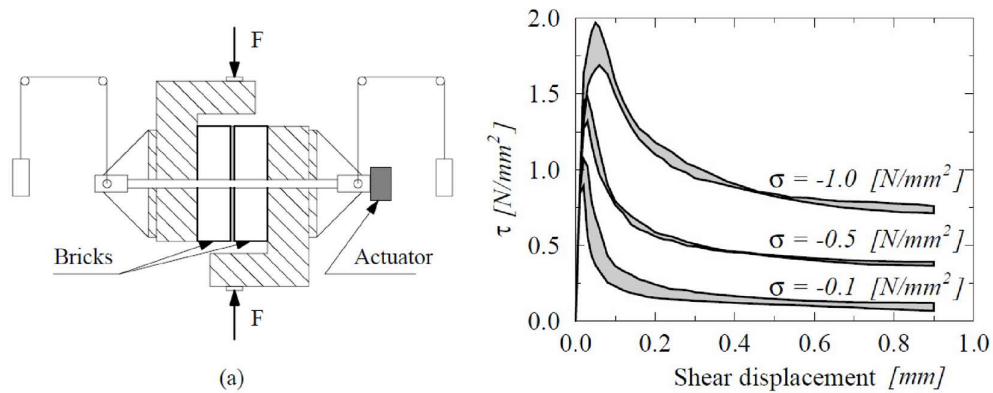
### 2.1.2. Modo II – Falla por Cortante

Van der Pluijm (1993) también presenta una caracterización del comportamiento a corte de pequeños especímenes de mampostería. Como se observa en la Figura 7, a partir de un ensayo de corte directo con probetas confinadas -y ensayándolas a diferentes niveles de carga- pudo establecer el comportamiento de la interfaz junta – mortero para el caso de sollicitaciones tangenciales. Las tensiones de confinamiento (compresión) se aplicaron en tres niveles diferentes: 0.1, 0.5 y 1.0 [N/mm<sup>2</sup>]. Cabe destacar que en muchos de los ensayos con altos

niveles de confinamiento, el mecanismo de falla en la interfaz ladrillo – mortero está acompañado por agrietamiento diagonal en la unidad.

### Figura 7

Comportamiento al corte de la unión, Van der Pluijm (1993)



*Nota.* La figura muestra (a) Dispositivo de ensayo y (b) Curva tensión tangencial-desplazamiento para distintas presiones de confinamiento (el área sombreada representa la envolvente de tres ensayos).

En el modo de falla II el comportamiento de las juntas de mortero también muestra una disminución gradual de la resistencia con el aumento de la deformación. Por otra parte, la resistencia al corte último aumenta con la presión de confinamiento. A diferencia del caso correspondiente al modo I, la resistencia al corte presenta un valor residual asociada a la fricción y muestra deformaciones irreversibles a niveles de tensión constante. El modo II de falla de las juntas está también acompañado por un fenómeno de dilatancia que está vinculado a la microestructura granular del mortero.

Se debe tener en cuenta que las propiedades de las uniones, que se resumen en Van der Pluijm (1991), están fuertemente afectadas por la presencia de los ladrillos debido a la absorción de agua. Como consecuencia de ello, los valores reportados son característicos del comportamiento de las juntas de mortero en el interior de la mampostería y difieren fuertemente de aquellas que resultan de ensayos realizados sobre primas o cilindros de mortero. Es por ello que se estima que los datos derivados de ensayos sobre especímenes de mampostería son más representativos del comportamiento en estructuras reales debido a que las interacciones con los ladrillos se consideran implícitamente.



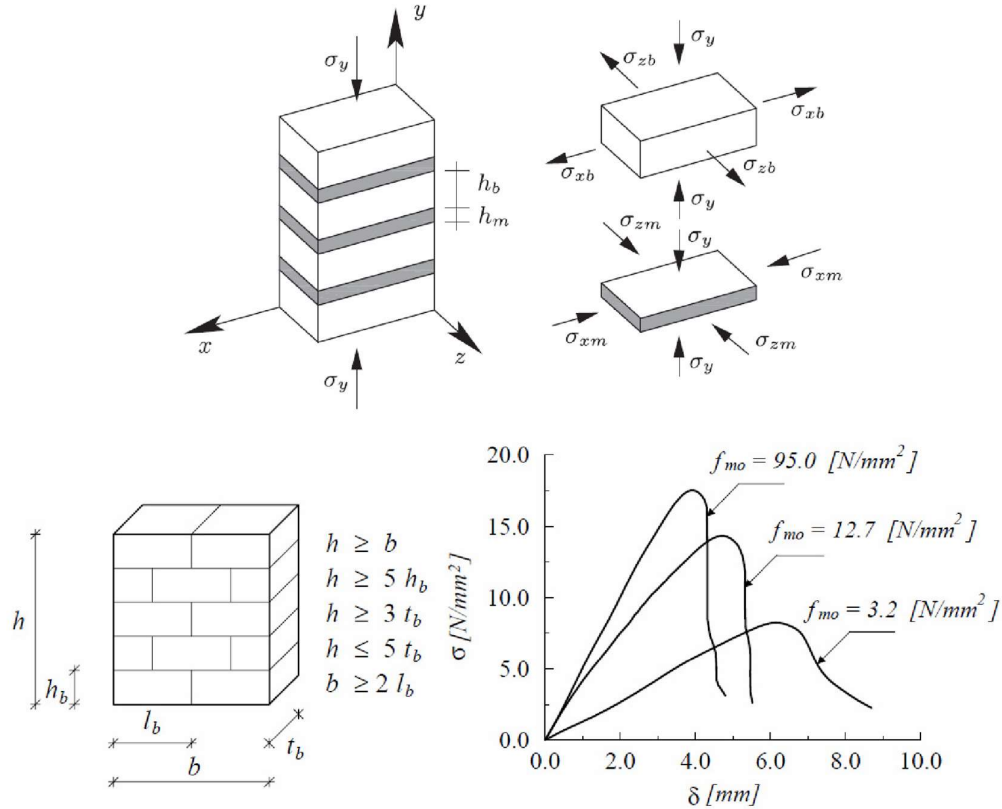
2.1.3. Comportamiento de la mampostería a compresión uniaxial

La resistencia a compresión de la mampostería en la dirección normal a la junta horizontal es considerada, tradicionalmente, como una propiedad relevante del material, al menos hasta la introducción de los métodos numéricos para analizar las estructuras de mampostería. El ensayo más comúnmente aceptado para la determinación de la resistencia a compresión uniaxial de la mampostería es en dirección normal a las juntas de mortero y se representa en la Figura 8. La compresión uniaxial de la mampostería conduce a un estado triaxial de compresión en el mortero y a una compresión-tracción en el ladrillo. A través de este ensayo se observa que inicialmente aparecen fisuras verticales en los ladrillos a lo largo de la línea media de las piezas, y que generalmente coincide con la continuación de las juntas verticales de mortero. A medida que crece la deformación van apareciendo fisuras adicionales, normalmente verticales en pequeñas zonas de la pieza, que llevan a la falla por deslizamiento de las fisuras en la pieza.

El comportamiento de la mampostería bajo compresión uniaxial en dirección paralela a las juntas de mortero ha recibido menos atención. Sin embargo, la mampostería es un material (estructura) anisótropo y la resistencia a compresión bajo cargas paralelas a las juntas de mortero puede tener un efecto decisivo a la hora de la determinación de la carga de pandeo en los muros. La relación entre la resistencia a compresión uniaxial paralela a las juntas y normal a éstas tienen valores que oscilan entre 0.2 y 0.8. Estas relaciones han sido obtenidas para bloques perforados, bloques de mortero y bloques de hormigón ligero. En el caso de ladrillos macizos, la relación antes mencionada puede tomarse como 1.0 (Oller, 2003).

**Figura 8**

*Comportamiento de la mampostería a compresión uniaxial*



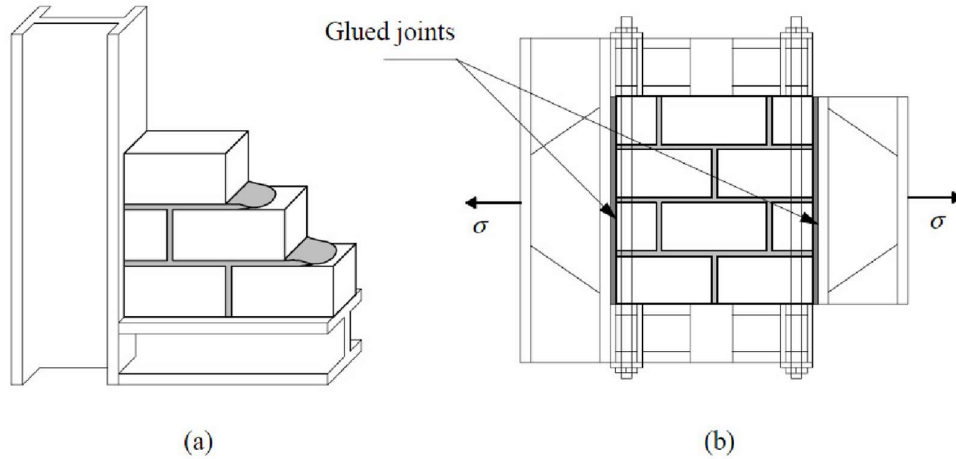
*Nota.* La figura muestra (a) tensiones en un prisma de mampostería bajo cargas de compresión y (b) curvas experimentales tensión (vertical) – desplazamiento para prismas de 600 x 250 x 600 [mm<sup>3</sup>]. Fuente: Binda et al. (1988).

#### 2.1.4. Comportamiento de la mampostería a tracción uniaxial

Para cargas a tracción en sentido perpendicular a las juntas de mortero, el colapso es causado por una pérdida de resistencia a tracción en la interfaz mortero ladrillo (Lourenço et al., 1999). Por lo general, la resistencia a la tracción de la mampostería está gobernada por la interfaz, y sólo en casos muy raros la resistencia del ladrillo es menor que la del mortero. Una prueba experimental típica es descrita por Backes (1985): la muestra de ensayo se compone de cuatro capas de ladrillos y los extremos superior e inferior de la muestra se encuentran firmemente vinculados a vigas de acero, como se observa en la Figura 9.

**Figura 9**

*Montaje del ensayo para la resistencia a la tracción de la mampostería paralelo a las juntas horizontales, Backes (1985).*

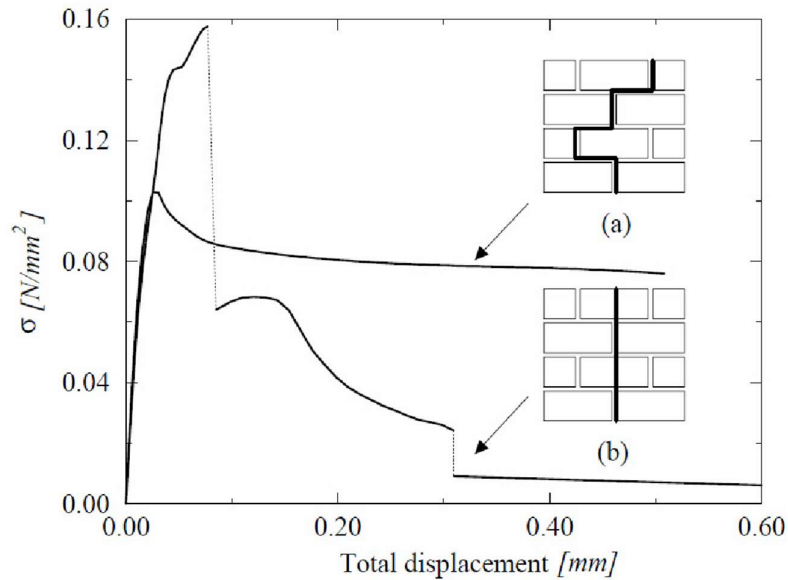


*Nota.* La figura muestra (a) construcción de la muestra de ensayo y (b) muestra de ensayo.

En la Figura 10 se muestran dos respuestas posibles asociadas con distintos esquemas de fallas, obtenidas a partir de ensayos realizados en paneles sometidos a tracción paralela a la junta. El primero de éstos falla por desarrollo de fisuración en las juntas verticales y horizontales y en forma de zigzag. El segundo se presenta como una fisura perpendicular a la fuerza de tracción y aparece siguiendo las juntas verticales de mortero y atravesando los ladrillos.

**Figura 10**

Diagramas experimentales típicos tensión-desplazamiento, para tracción en la dirección paralela a las juntas horizontales, Backes H. P. (1985).



*Nota.* La figura muestra que (a) el fallo se produce por fisuración escalonada paralela a las juntas y (b) el fallo se produce verticalmente a través de las juntas verticales y ladrillos.

En el primero de los mecanismos de rotura, la respuesta de la mampostería viene gobernada por la energía de fractura de las juntas verticales, mientras que en las juntas horizontales es el mecanismo de cortante el que gobierna la fisuración. En el segundo de los mecanismos, dado que toda la fisuración es vertical e involucra tanto a las juntas como al ladrillo, es la energía de fractura  $G_f$  de cada material la que participa en la fisuración total de la estructura.

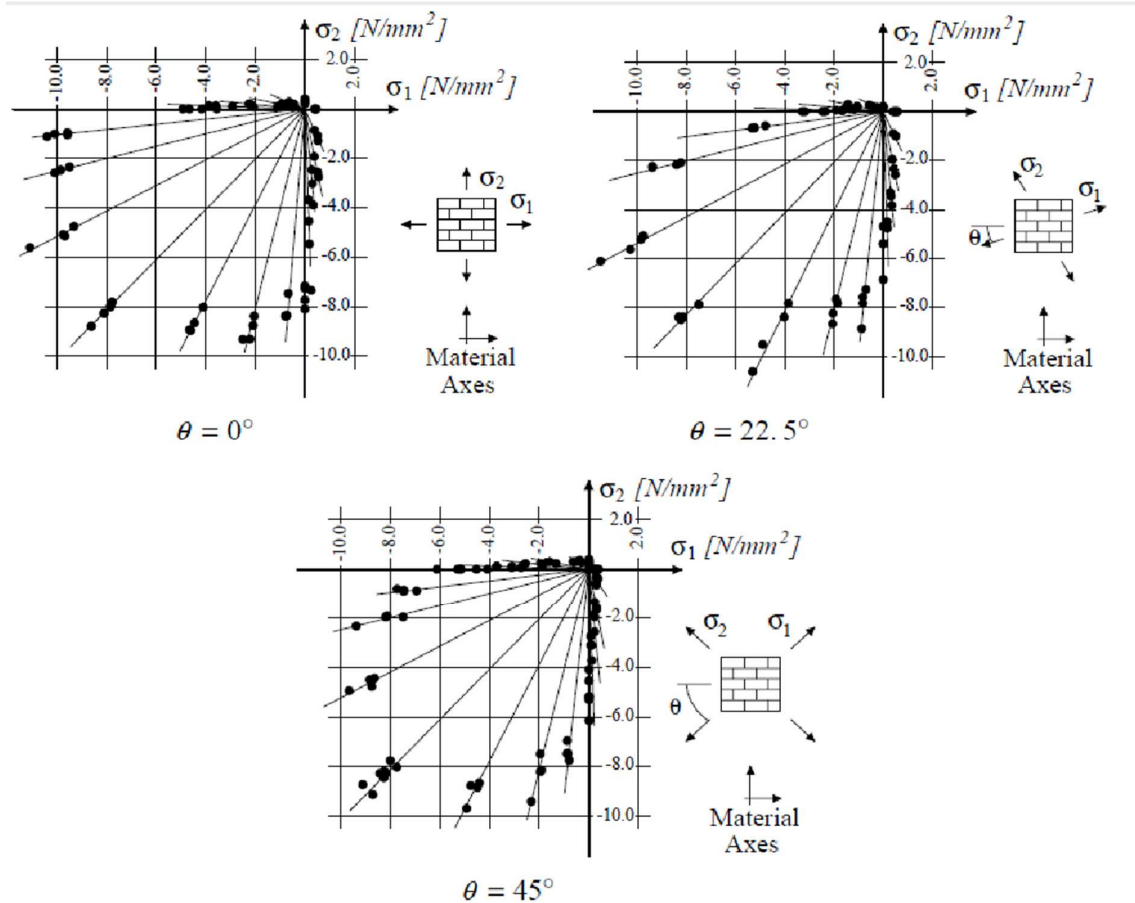
#### 2.1.5. Comportamiento biaxial

El comportamiento biaxial de la mampostería no puede ser descrito por una ley constitutiva uniaxial. La influencia de estados biaxiales de tensiones es importante con el fin de conocer el comportamiento resistente, el cual no puede ser descrito solamente en términos de tensiones principales, ya que la mampostería es un material anisótropo. Por lo tanto, la envolvente de tensiones biaxiales de mampostería puede ser descrita en términos de la orientación de los ejes respecto al material y de las tensiones principales, siendo  $\theta$  el ángulo que forman las tensiones principales y los ejes del material. Un trabajo completo sobre el comportamiento de

la mampostería bajo cargas biaxiales fue obtenido por Page (1981, 1983), en base a ensayos realizados sobre muros, como se observa en la Figura 11.

**Figura 11**

*Envoltentes de resistencia obtenidas por Page (1981, 1983) para mampostería de ladrillos macizos y estados de tensión biaxial*



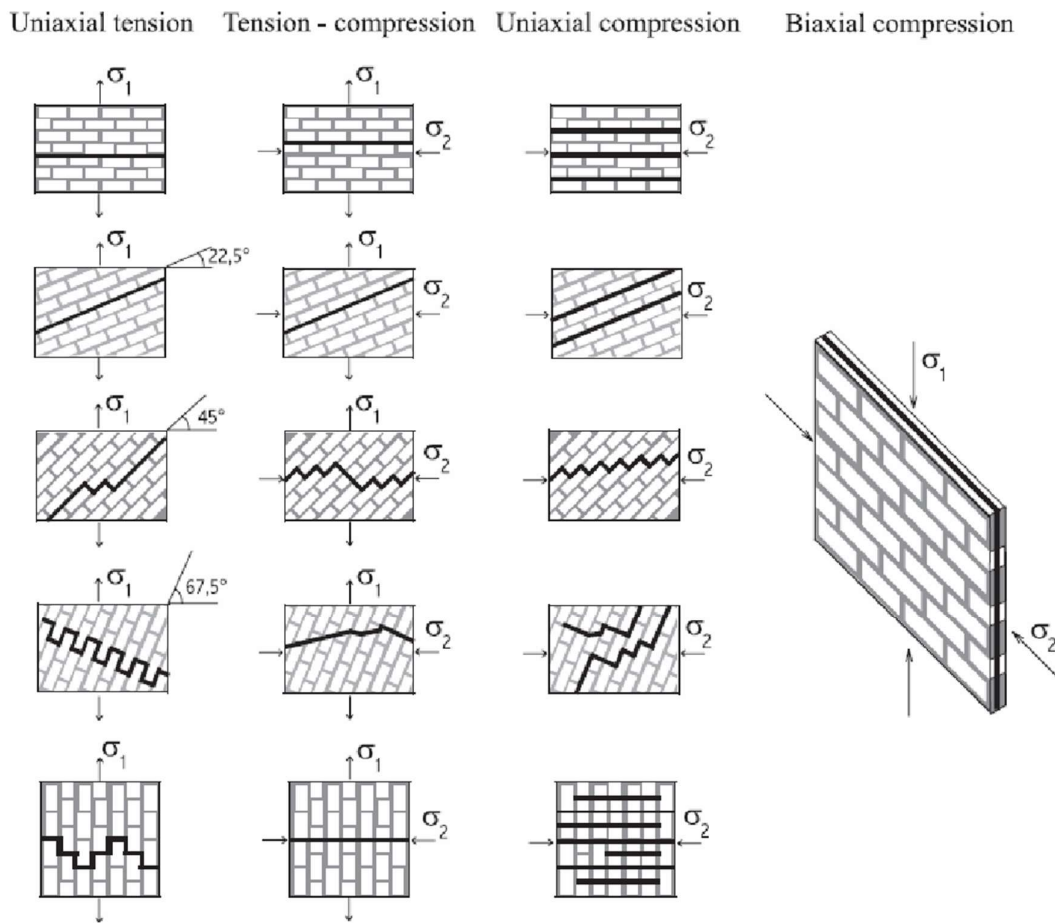
*Nota.* Fuente: Page (1981, 1983).

Una caracterización experimental exhaustiva fue realizada por Dhanasekar et al. (1985) con el fin de identificar las superficies de falla macroscópicas para estructuras de mampostería en relación al estado de tensión aplicado. La Figura 12 muestra que los esquemas de falla obtenidos en este estudio difieren sustancialmente dependiendo del caso de carga. Para tracción uniaxial el fallo ocurre por fisuración y deslizamiento de unos bloques sobre otros en la línea formada por el acoplamiento de dichas fisuras. La influencia de la tracción lateral en la resistencia a tracción global no es conocida debido a que no hay ensayos experimentales. La compresión lateral hace decrecer la resistencia a tracción, lo cual puede explicarse debido al daño inducido en el material compuesto por formación de microfisuras en las juntas y en

los ladrillos. En el caso de cargas combinadas tracción y compresión la falla ocurre tanto por fisuración y deslizamiento en las juntas, como por un mecanismo combinado que involucra tanto a ladrillos como a juntas de mortero. En el caso de compresión uniaxial aparecen tipos similares de falla, pero en el caso de compresión biaxial se observan tránsitos suaves hacia otros mecanismos de ruptura. El mecanismo de falla típico en compresión biaxial ocurre por fisuración de los paneles en la zona media de la estructura y siguiendo una dirección paralela al plano de carga. El incremento de la resistencia a compresión bajo estados de compresión biaxial puede explicarse por el desarrollo de una fricción en las juntas, así como una fricción interna en el mortero.

**Figura 12**

*Esquemas de fallas típicas en términos de tensiones principales, Dhanasekar et al. (1985)*



2.1.6. Comportamiento *post-peak* de la mampostería. Ablandamiento o “softening”.

El ablandamiento es un decremento gradual de las propiedades resistentes del material en un punto del sólido sometido a un crecimiento monótono de las deformaciones impuestas (Oller, 2001). Éste es un rasgo característico de los materiales cuasi frágiles tales como ladrillos de arcilla cocida, morteros, materiales cerámicos, rocas u hormigón, los cuales fallan debido a un proceso de deterioro progresivo interno por desarrollo de microfisuras en las interfases de los materiales componentes. El mortero contiene microfisuras debidas a retracción durante el curado y a la presencia de aditivos. En el caso de los ladrillos fabricados de arcilla, éstos contienen defectos y microfisuras debido a retracciones en el proceso de cocción de las

piezas. Las tensiones iniciales y las fisuras, así también como las variaciones en las rigideces internas y resistencias, provocan el progresivo crecimiento de fisuras cuando el material está sometido a deformaciones progresivas. Inicialmente las microfisuras son estables, lo que significa que sólo crecerán cuando la carga se incremente. La interconexión entre fisuras y el excesivo desarrollo de alguna de ellas, conduce a la formación de “macrofisuras”. Éstas son inestables, situación que indica que la carga debe decrecer con el fin de evitar su crecimiento incontrolado. En los ensayos de deformación controlada, el crecimiento de la macrofisura degenera en un ablandamiento y localización de deformaciones (fisuras) en pequeñas zonas, mientras que en el resto de la estructura se desarrolla un proceso de descarga (Oller, 1991, 2001).

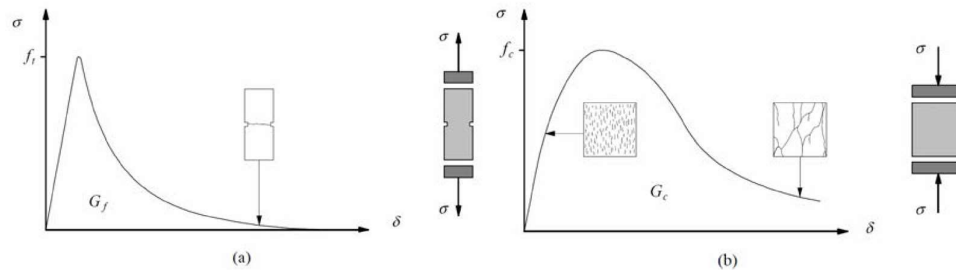
En función del fenómeno descrito, se puede establecer para la simulación numérica del comportamiento constitutivo de un punto de la mampostería, las siguientes reglas básicas: i) en el mecanismo de tracción y cortante, el proceso de ablandamiento puede tratarse como una pérdida de cohesión utilizando un modelo elasto-plástico limitado por la superficie de discontinuidad de Mohr-Coulomb, ii) en los casos de compresión, el fenómeno de ablandamiento es altamente dependiente de las condiciones de contorno en la estructura de mampostería, así como de las medidas de sus materiales componentes.

A través del análisis de las gráficas tensión deformación, puede obtenerse la energía de fractura  $G_f$  y de aplastamiento  $G_c$ , como se observa en la Figura 13, cuya adecuada combinación da la correspondiente disipación por cortante  $G_f''$  (Oller, 1991) y de ellas resulta el comportamiento *post-peak* del material. En la Figura 14 puede observarse el diagrama característico tensión-desplazamiento para materiales cuasi frágiles en el caso de corte puro.



**Figura 13**

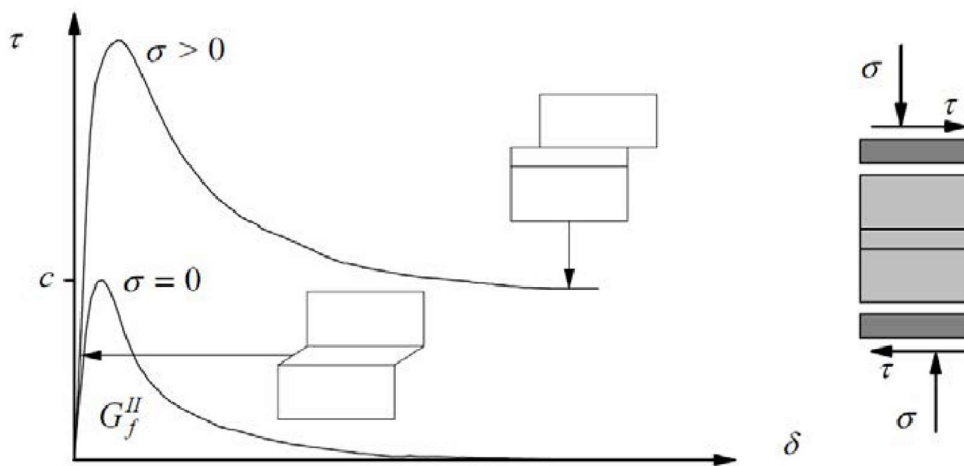
*Comportamiento típico de materiales cuasi-frágiles bajo carga uniaxial y definición de energía de fractura*



*Nota.* La figura muestra (a) carga de tracción ( $f_t$  denota la resistencia a la tracción) y (b) carga de compresión ( $f_c$  indica la resistencia a la compresión). Fuente: Oller S. (1991).

**Figura 14**

*Comportamiento de la mampostería bajo tensión cortante y definición de la energía de fractura  $G_{fII}$  ( $c$  denota la cohesión)*



*Nota.* Fuente: Oller S. (1991).

## 2.2. Modos de falla de la mampostería

La vulnerabilidad sísmica de los edificios está estrictamente relacionada con la respuesta de los muros de mampostería sometidos a cargas laterales. Por tanto, es interesante comprender

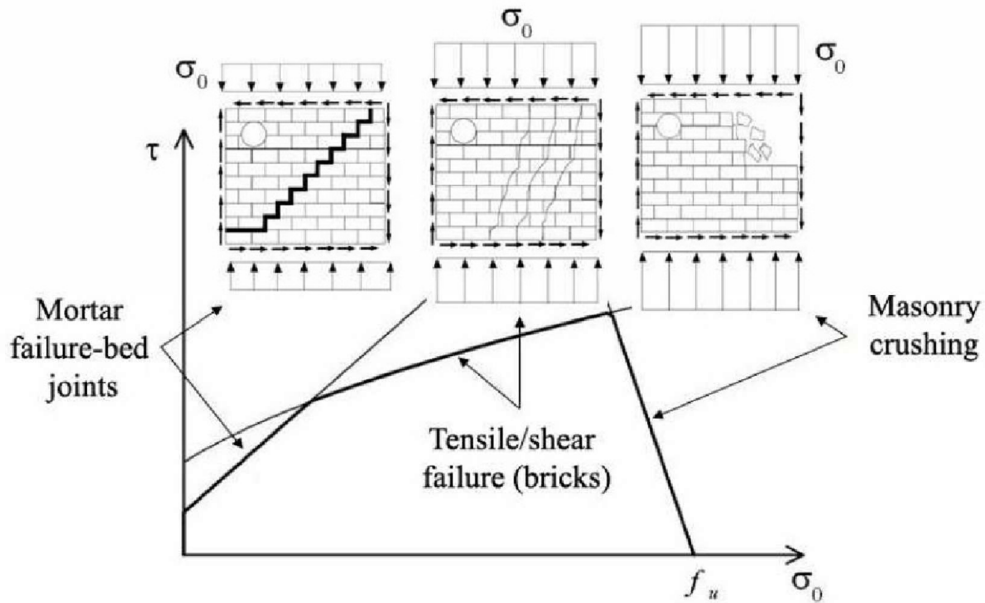
el comportamiento de muros de mampostería mediante la simulación de tales situaciones de carga.

Mann y Müller (1982) realizaron una serie de ensayos sobre paneles de mampostería. Estos paneles fueron sometidos inicialmente a una compresión vertical uniforme  $\sigma_0$  y luego a carga lateral creciente en el extremo superior. Esta es la condición de carga típica que se da cuando un panel, incluido en una estructura, se somete a acciones horizontales. Estos autores han identificado tres mecanismos principales de falla, como se observa en la Figura 15:

- Fisuras en las juntas horizontales cuando los valores de compresión  $\sigma_0$  son bajos;
- Fisuras en los ladrillos debido a cortante y tracción, para valores intermedios de  $\sigma_0$ ;
- Fisuración por aplastamiento de la mampostería, cuando  $\sigma_0$  alcanza valores cercanos a la resistencia a la compresión uniaxial.

**Figura 15**

*Envolvente de falla para caso de carga combinada (corte – compresión), obtenida por Mann y Müller (1982)*

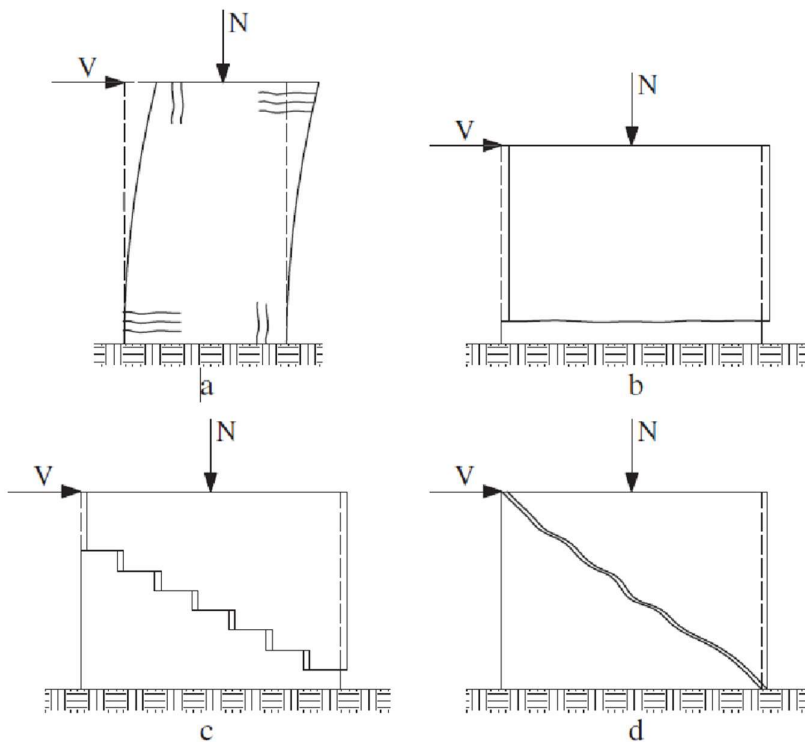


Los ensayos experimentales muestran que son posibles diferentes mecanismos de falla debidos a las acciones combinadas de carga verticales y de cortante, como se muestran en la Figura 16. El mecanismo de falla real depende de la relación entre las dimensiones del panel

(cuando se considera sin aberturas) o de las porciones individuales que constituyen el panel (cuando las ventanas o puertas interrumpen la continuidad del panel), depende también de los parámetros del material y de la carga vertical aplicada.

**Figura 16**

*Mecanismos típicos de falla en estructura de mampostería*



*Nota.* La figura muestra los mecanismos típicos de falla en estructura de mampostería a) a flexión; b) por deslizamiento horizontal; c) deslizamiento diagonal y d) agrietamiento diagonal. Fuente: Quinteros R. (2014).

### 2.3. Base teórica del modelo numérico

El análisis de las estructuras de mampostería es una tarea compleja, ya que el material presenta un comportamiento mecánico muy particular originado, principalmente, en su falta de homogeneidad y estandarización. La respuesta estructural de un material compuesto de este tipo se deriva de la interacción compleja entre las unidades y las juntas de mortero.

Los métodos tradicionales de análisis simplificado no pueden contemplar todos los fenómenos complejos inherentes a la mampostería, tales como apertura de grietas, falla por

compresión y deslizamiento por cortante. Las incompatibilidades entre el comportamiento estructural verdadero observado y las predicciones derivadas de los métodos de análisis convencionales llevaron a la necesidad de utilizar estrategias de cálculo refinadas y avanzadas. El enfoque numérico es, especialmente en los últimos tiempos, una posibilidad efectiva frente a tan complicado problema. Varios métodos y herramientas computacionales están disponibles para la evaluación del comportamiento mecánico estructural de la mampostería. Los enfoques utilizan diferentes teorías, lo que resulta en diferentes niveles de complejidad y costo computacional. Algunas de las estrategias de análisis siguen estando en una fase de estudio, por lo tanto, el problema sigue abierto. Hoy en día, se observa un esfuerzo significativo para desarrollar modelos computacionales de análisis que puedan ser utilizados con éxito para determinar la capacidad estructural y establecer los niveles de daño alcanzado por las estructuras de mampostería bajo diferentes acciones, entre ellas acciones sísmicas. En este caso particular, la determinación de la capacidad debería considerar con precisión el desarrollo del daño localizado y global, normalmente experimentados por las estructuras de mampostería en la condición final. El análisis del fenómeno de agrietamiento también es útil para entender las causas de las fisuras existentes y visibles en estructuras históricas.

En las últimas décadas, la comunidad científica mostró gran interés en el desarrollo de herramientas numéricas sofisticadas para el análisis de estructuras de mampostería, en oposición a la tradición reinante respecto del empleo de reglas prácticas y fórmulas empíricas, en las que frecuentemente se basan las normativas vigentes en cada país. Estas normativas intentan simplificar los mecanismos de comportamiento de la mampostería de ladrillo, lo que trae como consecuencia un sobredimensionamiento de la estructura. Otra de las consecuencias del uso de este tipo de reglas de cálculo es la formación de mecanismos y fisuras no previstas por la simplificación de los procedimientos de evaluación estructural.

Debido a las características particulares que presenta la mampostería surgen numerosas dificultades a la hora de adoptar o adaptar herramientas numéricas ya existentes, que provienen de otros campos de investigación (mecánica del hormigón, roca y materiales compuestos). Todos los factores antes mencionados llevaron a la necesidad de desarrollar herramientas adecuadas y específicas para el análisis de estructuras de mampostería.

La gran cantidad de investigaciones realizadas en este tema hacen hincapié en la poca importancia dada en el pasado a los aspectos numéricos, proponiendo entonces varios

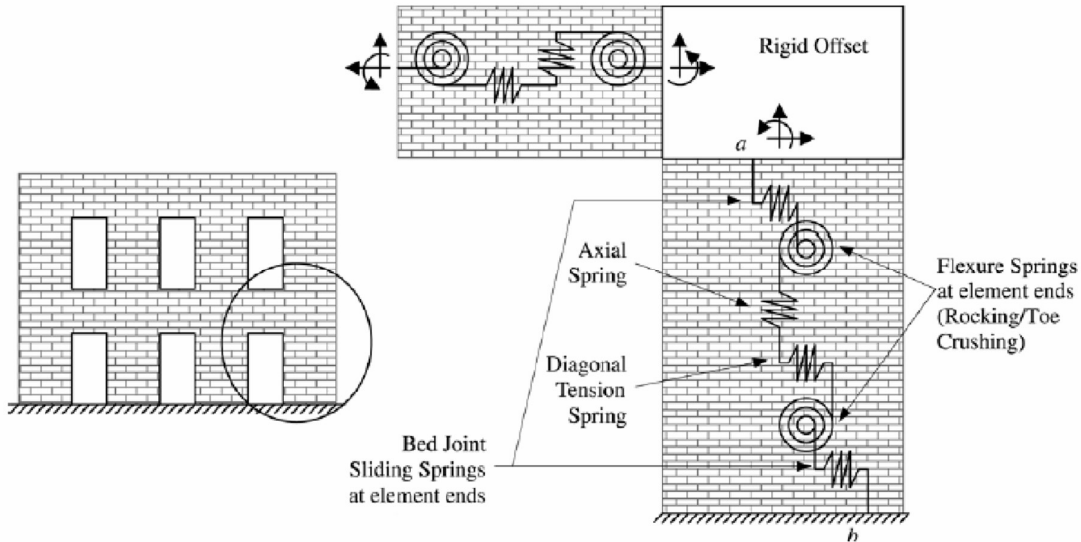
modelos numéricos para el análisis estructural de construcciones de mampostería. Tales modelos se caracterizan por diferentes fundamentos teóricos y niveles de detalle. La causa de estas diferencias es la gran variedad de aspectos que podrían ser estudiados, lo que hace que tratar de lograr un modelo único de aplicación absoluta y validez general no es realista. Varias formas de análisis pueden resultar viables y la elección del analista depende de la información que busca (daño, colapso, mecanismos de falla, etc.), del nivel de precisión requerido (comportamiento local o global de la estructura), de los datos de entrada necesarios (información detallada o aproximada acerca de las características del material) y de los costes (principalmente el tiempo permitido para el análisis) (Pelá, 2009).

### 2.3.1. Modelación con Macro-Elementos

El método más sencillo para el modelado de estructuras de mampostería se basa en representar la misma como una combinación de elementos estructurales, tales como barras, vigas, placas o láminas. Este es el caso de los métodos simplificados a través de macro-elementos. En la literatura se pueden encontrar varios modelos basados en el concepto del método del pórtico equivalente (Magenes y Della Fontana, 1998; Roca et al., 2005; Penelis, 2006; Chen et al., 2008; Belmouden y Lestuzzi, 2009; Grande et al., 2011), donde los muros de la construcción se modelan empleando elementos tales como barras, vigas de antepecho y elementos de unión, como se observa en la Figura 17. Tal como se presenta en la Figura 18, es importante que los macro-elementos sean capaces de simular tanto el modo de falla por cizallamiento, como los modos de falla por flexión, incluyendo el efecto de la deformación flexional sobre los modos de falla de cizallamiento, con una posible parcialización de la sección transversal (Penna et al., 2013). También se desarrollaron macro-elementos bidimensionales, como se ilustra en la Figura 19. En particular, Calió et al. (2012) identificaron algunas limitaciones en el uso de macro elementos unidimensionales, ocasionadas por la imprecisa simulación de la interacción entre macro-elementos y debido al débil modelado de la condición de fisuración de los paneles. Estos autores propusieron la utilización de macro elementos bidimensionales, incorporando el empleo de un conjunto de resortes no lineales, como se observa en la Figura 19.

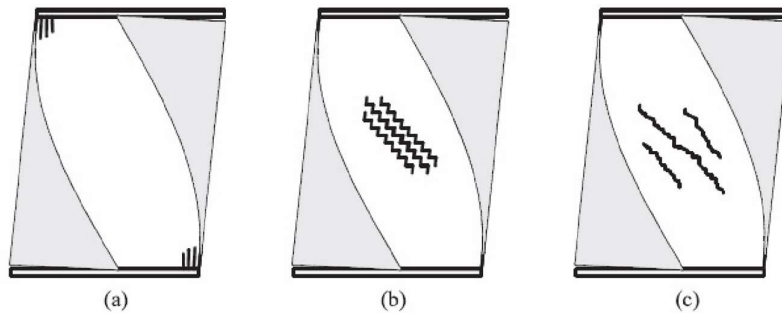
**Figura 17**

*Macro-elemento propuesto por Chen et al. (2008)*

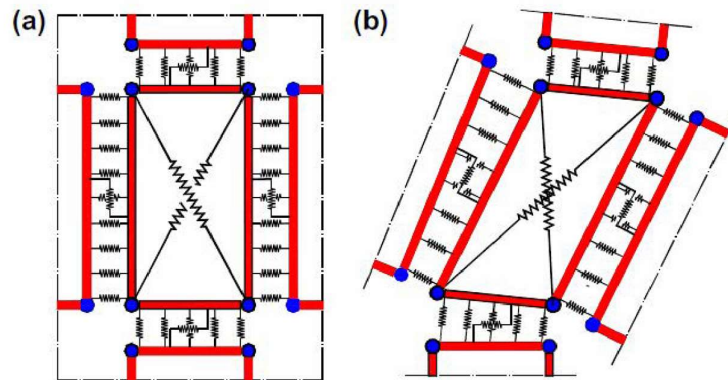


**Figura 18**

*Principales modos de falla de paneles de mampostería sometidos a cargas en el plano (en gris: porción del panel principalmente no comprimida)*



*Nota:* la figura muestra (a) flexión combinada con posible aplastamiento de los extremos, (b) cortante con deslizamiento a lo largo de la junta horizontal mortero – ladrillo y (c) corte con agrietamiento diagonal a través de las unidades y el mortero. Fuente: Penna et al. (2013).

**Figura 19***Macro-elemento básico de Calìo et al. (2012)*

*Nota:* la figura muestra (a) configuración no deformada y, (b) configuración deformada.

Todos los enfoques simplificados citados se caracterizan por un coste computacional muy bajo, ya que cada macro-elemento representa todo un panel de la pared, lo que reduce drásticamente el número de grados de libertad de la estructura. Sin embargo, tales elementos simplificados, por lo general, proporcionan una descripción gruesa del comportamiento del elemento de mampostería real.

### 2.3.2. Modelación con Micro-Elementos y Macro-Elementos

Se indica una rápida mención de las familias de métodos basados en el empleo del Método de Elementos Finitos, que se utilizan para el cálculo del comportamiento mecánico de la mampostería.

La mampostería es un material compuesto formado por unidades o mampuestos (ladrillos cerámicos, bloques, etc.) y juntas de mortero que actúan como planos de debilidad, confiriendo al material compuesto diferentes propiedades direccionales (Lourenço, 1996). En particular, se hace referencia a trabajos destinados a mampostería de ladrillo que es la tipología analizada en esta tesis.

Dependiendo del nivel de precisión y la simplicidad que se desea, es posible utilizar las siguientes estrategias de modelado, como se observa en la Figura 20.

- Micro-modelos (Lourenço y Rots, 1997; Lotfí y Shing, 1994; Xu et al., 2012): analizan la mampostería como un ensamblaje discontinuo de unidades o ladrillos conectados por juntas en su posición real. Se distinguen:

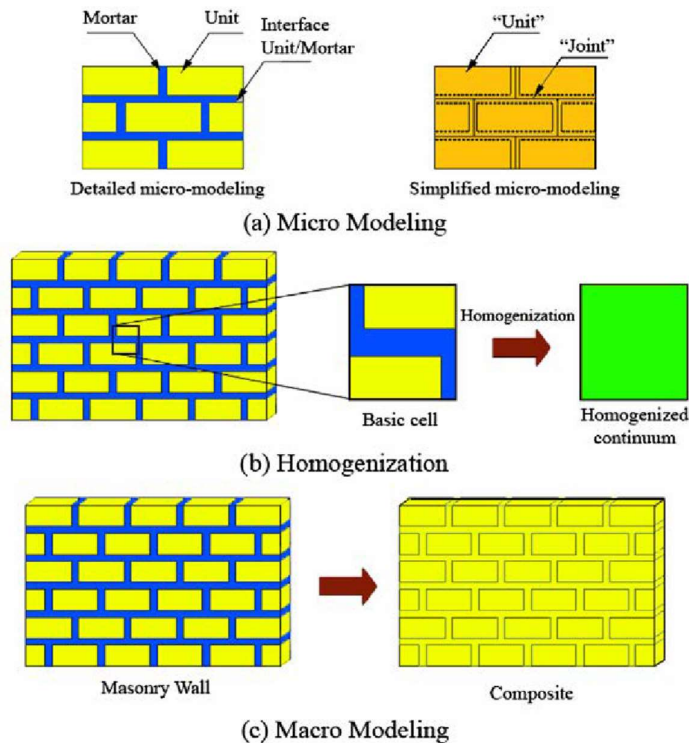
- Micro-modelos detallados: los ladrillos y morteros se representan mediante elementos finitos de comportamiento continuos, mientras que el comportamiento de la interfaz mortero-ladrillo se representa con elementos finitos discontinuos;

- Micro-modelos simplificados: las unidades están representadas a través de elementos de comportamiento continuo mientras que el comportamiento de las juntas de mortero y la interfaz ladrillo-mortero se agrupa en elementos discontinuos.

- Macro-modelos (Lourenço et al., 1997; Lourenço et al., 1998): en este caso ladrillo, mortero e interfaz ladrillo-mortero están representados por un mismo elemento finito. Dentro de este tipo de discretización suele englobarse a las técnicas de homogeneización. Las que básicamente consisten en sustituir la compleja geometría de la celda básica por una geometría simplificada de modo que es posible una solución cerrada del problema homogeneizado.

**Figura 20**

*Estrategias de modelación para mampostería (Bayraktar et al., 2010)*



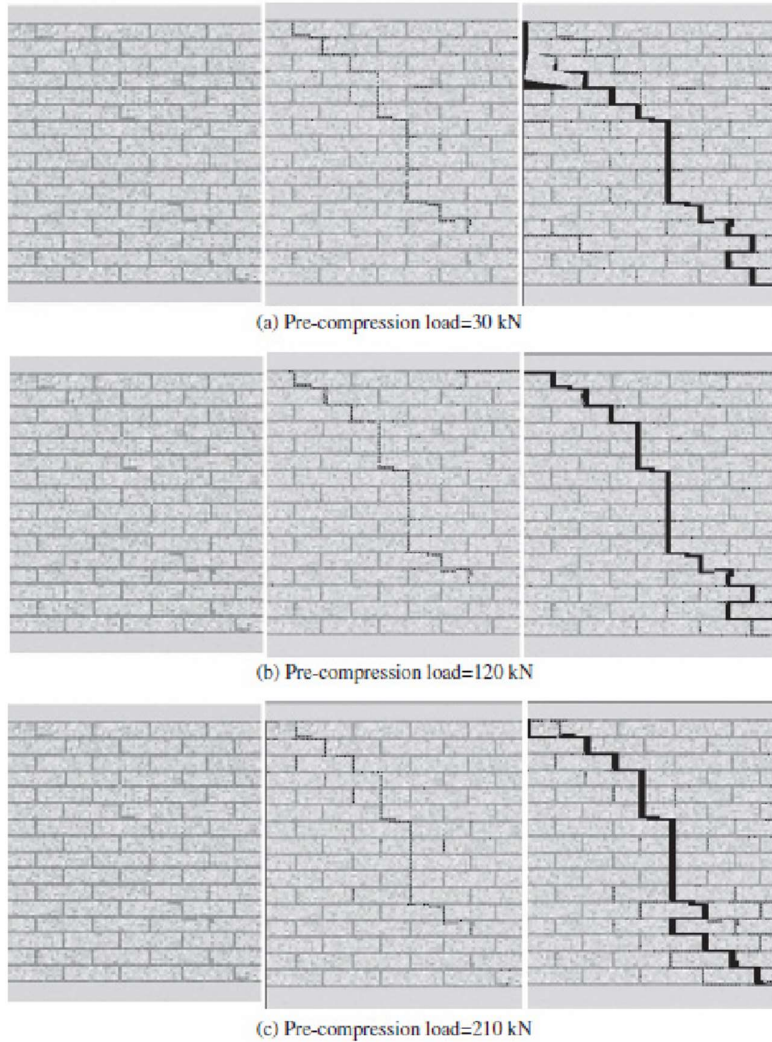
En el enfoque de micro-modelo detallado, el módulo de Young, el coeficiente de Poisson y, opcionalmente, las propiedades inelásticas de ambos materiales se tienen en cuenta para



cualquier tipo de modelo que se utilice. La interfase junta-ladrillo representa una superficie de fisuración potencial con una rigidez ficticia inicial para representar el contacto y evitar la penetración de un material en otro. Esto produce la acción combinada de ladrillo, mortero e interfaz, como se observa en la Figura 21. En el enfoque a través de micro-modelo simplificado, cada junta, formada por el mortero y dos interfases unidad-mortero, se une en una interfaz “promedio” que recoge estos tres componentes con el fin de simplificar el problema sin cambiar la geometría. En consecuencia, la mampostería es considerada como un conjunto de bloques elásticos unidos por potenciales líneas de fractura / deslizamiento en las juntas. Sin embargo, al no estar incluido el efecto de Poisson del mortero, se pierde precisión en los resultados (Lourenço, 1996). Los micro-modelos son probablemente la mejor herramienta para entender el comportamiento de la mampostería. El provecho de su utilización como aproximación se basa en la posibilidad de consideración de diferentes mecanismos de falla (fisuración, deslizamiento). Tienen su campo de aplicación en el estudio del comportamiento local de detalles estructurales de mampostería, como estudio del comportamiento real de la interfase (discontinuidades en la estructura). Este tipo de discontinuidades generalmente son determinantes en el comportamiento global de las estructuras de mampostería. Este tipo de modelización aplica una notable discretización en elementos, lo que comporta un coste computacional muy alto respecto a la escala para la que se utiliza.

**Figura 21**

*Proceso de fractura para distintas cargas de pre-compresión obtenidos por Xu et al. (2012)*



En el enfoque de macro-modelos no se hace distinción geométrica entre las unidades individuales y las juntas, ya que se trata a la mampostería como un continuo homogéneo y anisótropo. Son aplicables cuando la estructura está compuesta por muros con dimensiones lo suficientemente grandes que hacen que las tensiones a través y a lo largo de los elementos sean esencialmente uniformes y de los cuales sólo se requiere el conocimiento del comportamiento de conjunto (Oller, 2002). Ejemplos de este tipo de aproximación se encuentran en las formulaciones basadas en la teoría de mezclas y en la teoría de homogeneización (Oller S., 2003). Evidentemente, la macro-modelización es mucho más

práctica debido al reducido tiempo computacional y memoria requerida (desde el punto de vista de la computación) así como una mayor facilidad en la generación de malla. Este tipo de modelización tiene mayor valor cuando el compromiso entre precisión y eficiencia es necesario.

Tanto los micromodelos como los macromodelos de estructuras de mampostería exigen una descripción de los materiales a través de experimentación. Sin embargo, las propiedades de la mampostería están influenciadas por un gran número de factores como las propiedades intrínsecas del ladrillo y el mortero, la calidad de la mano de obra, el grado de curado, desarrollo, edad.

Por otra parte, dentro de los macro-modelos, las técnicas de homogeneización, permiten establecer relaciones constitutivas en términos de tensiones y deformaciones promedio a partir de la geometría y de las relaciones constitutivas de los componentes individuales; sin duda significan un avance en el modelado de la mampostería, sobre todo debido a la posibilidad de utilizar modelos de materiales estándar y códigos desarrollados originalmente para materiales isotropos. A pesar de la complejidad de la mampostería, se puede obtener mucha información del estudio de las estructuras de mampostería regulares, en las que se produce una repetición periódica de la microestructura debido a una disposición constante de las unidades o ladrillos. El enfoque de homogeneización más popular sustituye la compleja geometría de la celda básica por una geometría simplificada de modo que es posible obtener una solución de forma cerrada del problema homogeneizado (Pande et al., 1989; Maier et al., 1991). La homogeneización generalmente ha sido llevada a cabo en dos pasos, la junta vertical y la junta horizontal se introducen sucesivamente. El uso de dos etapas separadas en la homogeneización no tiene en cuenta de manera explícita la compensación regular de las juntas de mortero verticales pertenecientes a dos capas consecutivas de unidades, lo que resulta en errores significativos en el caso de análisis no lineal. Recientemente, las técnicas de homogeneización se han aplicado de manera efectiva al análisis límite (Milani et al., 2006a, 2006b y 2006c; Milani et al., 2007; Zucchini A and Lourenço, 2009; Zucchini and Lourenço, 2002; Zucchini and Lourenço, 2006; Zucchini and Lourenço, 2007; Addessi y Sacco, 2012).

A pesar de los considerables esfuerzos invertidos en investigación referidos a los enfoques numéricos de modelización de la mampostería, aún existe una brecha entre sus representaciones a niveles del micro y de la macro-escalas, lo que complica la explotación de la información obtenida a través de enfoques micro-mecánicos a los cálculos estructurales. El desarrollo de un marco computacional multi-escala acoplado, que permita la interacción entre

ambas escalas constituye, por tanto, un importante paso en la conexión de estas dos clases de modelos. En este sentido, la teoría de homogeneización, que es ampliamente utilizada en materiales compuestos en general (Oller, 2003) y en mampostería en particular (López et al., 1999), consiste básicamente en dividir el problema en dos o más escalas de diferente orden, denominadas macroscópica o global y microscópica o local. La escala microscópica se utiliza con el objetivo de analizar la estructura interna o micro-estructura del material compuesto y obtener las variables de estado del problema micro-mecánico. Estas variables de estado permiten luego determinar las macro-variables del problema. La escala macroscópica se utiliza para analizar el problema global y en ella se considera al material compuesto como un material homogéneo.

Las técnicas de homogeneización aplicadas a nivel estructural, fundamentadas en los conceptos básicos de la teoría de homogeneización, han suscitado un interés creciente. El objetivo de las mismas es obtener una representación continua del comportamiento de dominios periódicos, al mismo tiempo que se preserva la información de las propiedades y la geometría de sus componentes. Debido a la periodicidad que presenta la configuración de la mampostería, es posible utilizar estas herramientas o técnicas para representar y modelar su comportamiento.

Lo descrito anteriormente debe complementarse mediante la implementación de modelos constitutivos acordes a las características de cada material componente que reproduzcan de la manera más fiel posible su comportamiento no lineal. Es por ello que se enfoca el problema en la formulación y/o adaptación de modelos constitutivos de daño, con el fin de su aplicación a los componentes marcadamente friccionantes correspondientes a la mampostería.

## **CAPÍTULO II**

### **ENSAYOS EXPERIMENTALES**

#### **1. Introducción**

En el presente capítulo se describe la metodología utilizada en los ensayos experimentales de los muretes de mampostería construidos para cumplir con los objetivos de la tesis. Los ensayos experimentales tienen la finalidad de determinar los parámetros mecánicos y las leyes constitutivas de los diferentes muros de mampostería en sus distintas tipologías, las cuales serán descriptas en el presente capítulo.

La primera serie de ensayos experimentales se realizó en el Laboratorio de Estructura del INPRES (Instituto Nacional de Prevención Sísmica) en la Provincia de San Juan, donde los muretes fueron sometidos a carga axial de compresión vertical hasta llegar a la rotura. Para este conjunto de ensayos experimentales se fabricaron pilas de mampostería compuestas por ladrillos cerámicos macizos y morteros de cemento y cal. Se fabricaron tres pilas de mampostería con diferentes dimensiones de espesores totales, simulando las características constructivas de las construcciones de la década del 1900.

La segunda serie de ensayos experimentales se realizó en el Laboratorio de Estructura del IMERIS (Instituto de Mecánica Estructural y Riesgo Sísmico) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo, en la Provincia de Mendoza, donde se planificó un protocolo de ensayo con fuerzas verticales de compresión constante y fuerzas horizontales cíclicas, hasta alcanzar la rotura de los diferentes muretes de mampostería. Para esta serie de ensayos experimentales se construyeron muretes de mampostería con diferentes espesores, usando los mismos ladrillos cerámicos macizos y morteros utilizados en la primera serie de ensayos experimentales. Se fabricaron tres muretes de mampostería por cada espesor y como se planificaron tres muretes de mampostería de espesores diferentes, se obtuvo un total de 9 prototipos de ensayo.

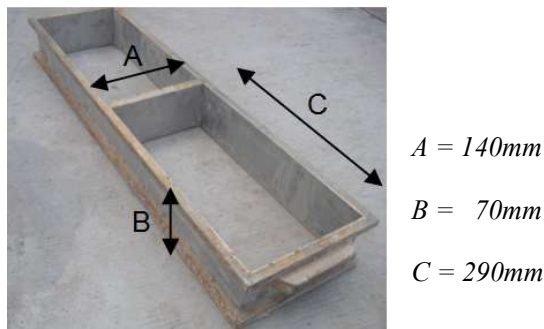
## 2. Fabricación y ensayos de especímenes a cargas verticales

Se construyeron en laboratorio muretes de mampostería, que fueron construidos utilizando mampuestos de ladrillos cerámicos macizos y morteros con características similares a los encontrados en los edificios históricos de la década del 1900, de tal manera que los ensayos experimentales tuvieran una correlación con aquellas edificaciones existentes.

Para la elaboración de los ladrillos cerámicos macizos se fabricó un molde de aluminio con el fin de que las dimensiones finales de los mampuestos sean representativas de las dimensiones relevadas en las construcciones históricas existentes. En la Figura 22 se observa el molde especialmente construido para fabricar los mampuestos con las medidas representativas.

**Figura 22**

*Molde de aluminio para fabricación de ladrillos cerámicos macizos*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

En cuanto al proceso de fabricación de los ladrillos, se utilizó como materia prima principal arcilla, posteriormente se los moldeó sobre un molde de aluminio con dimensiones especiales adecuadas a los mampuestos que se encontraron en los relevamientos de los muros de algunos de los edificios. El paso siguiente implicó el proceso de desmolde y secado de los ladrillos y, finalmente, se los cocinó en hornos a una temperatura promedio de 350°C.

Las probetas de mortero no se encabezaron, mientras que las probetas de ladrillos se encabezaron con un mortero de cemento y yeso en partes iguales.




Las probetas de morteros fueron sometidas a un curado húmedo por 28 días, ubicadas sobre un tanque de agua con temperatura controlada.

En el laboratorio se fabricaron tres pilas de mampostería, cada pila respondía a un espesor diferente, manteniendo las otras dos dimensiones geométricas iguales para todos los muretes.

Las pilas de mampostería no tuvieron encabezado. En la Tabla 2 se indican las características geométricas de las pilas.

**Tabla 2**

*Características geométricas de las pilas de mampostería*

ID	Largo (mm)	Espesor (mm)	Altura (mm)	Foto
<b>PL140</b>	285	140	450	
<b>PL290</b>	285	285	450	
<b>PL450</b>	285	430	450	

*Nota.* Fuente: elaboración propia.

Los ladrillos fueron cerámicos macizos de dimensiones 290mm x 140mm x 70mm. Las juntas de mortero tuvieron un espesor promedio de 20mm y fueron elaboradas con una dosificación en volumen con las siguientes proporciones: 1 Cemento, 7 Arena y 2 Cal Aérea Común. Estas proporciones fueron propuestas en la tesis con la finalidad de representar la resistencia a compresión de los morteros utilizados en las construcciones de mampostería históricas. Las dosificaciones propuestas se tomaron como antecedente las indicada por la normativa CIRSOC 103-III incrementando el volumen de Cal como era habitual en las construcciones de la época.

Con el objetivo de caracterizar los morteros y los ladrillos cerámicos macizos, se fabricaron probetas para cada uno de ellos y se realizaron los ensayos experimentales correspondientes.

Para determinar las características mecánicas de los morteros se fabricaron tres probetas con dimensiones normalizadas en CIRSOC 103-III. En la Figura 23 se observa la preparación de tres probetas del mortero, con dimensiones de cada probeta de 70mm x 70mm x 70mm.

**Figura 23**

*Probetas de mortero*

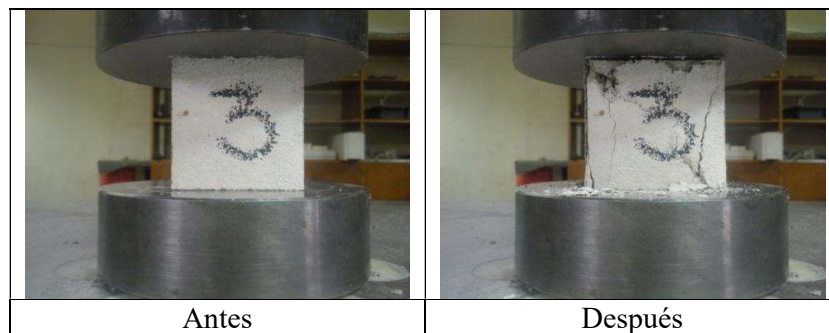


*Nota.* Fuente: elaboración propia.

En la Figura 24 se observa el ensayo a compresión de las probetas de mortero, mostrando la situación antes y después del ensayo experimental.

**Figura 24**

*Ensayo a compresión de morteros*



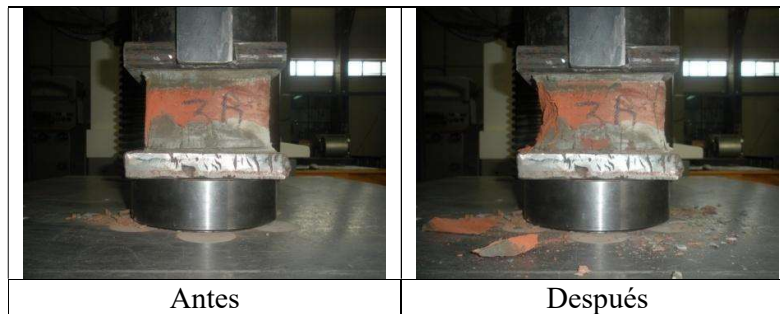
*Nota.* Fuente: elaboración propia.

Con el objetivo de determinar el comportamiento de los ladrillos cerámicos macizos a compresión se realizaron ensayos experimentales sobre diferentes probetas. Se tomaron de forma aleatoria una serie de ladrillos cerámicos macizos y se prepararon las correspondientes probetas. En la Figura 25 se observa la probeta de ladrillo cerámico macizo y el ensayo a compresión realizado.



**Figura 25**

*Ensayo a compresión de ladrillos cerámicos macizos*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

A continuación de los ensayos experimentales de los morteros y ladrillos cerámicos macizos se construyeron en laboratorio las pilas de mampostería. Cada una de ellas poseía un espesor diferente. En la Figura 26 se muestra la etapa final de construcción de las pilas de mampostería fabricadas con las dimensiones indicadas en la Tabla 2.

**Figura 26**

*Pilas de mampostería con espesores diferentes*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

Los ensayos experimentales se realizaron aplicando una carga axial vertical controlada, en el laboratorio de estructuras del INPRES (Instituto Nacional de Prevención Sísmica) en la Provincia de San Juan. Para ello, se utilizó la máquina universal, marca Shimadzu, con una

capacidad de carga de 1000 KN y un sistema integrado de adquisición de datos en tiempo real. En la Figura 27 se muestran imágenes de la máquina utilizada para realizar los ensayos experimentales.

**Figura 27**

*Máquina universal de ensayos Shimadzu. Sistema de adquisición de datos*

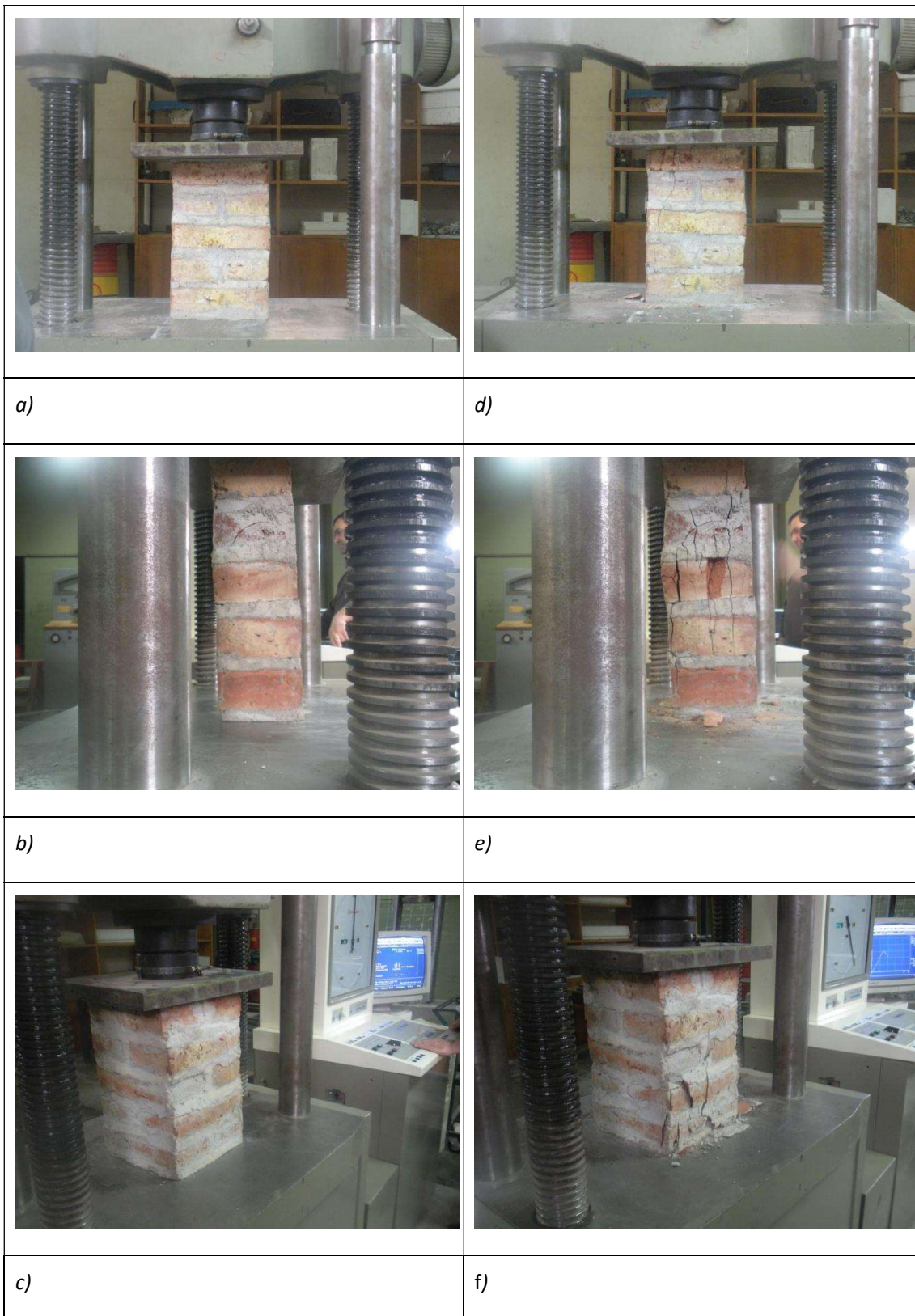


*Nota.* Fuente: elaboración propia.

Todos los muretes fueron ensayados hasta alcanzar la carga máxima de rotura. En la Figura 28 se muestra un estado previo y posterior a los ensayos experimentales realizados sobre los tres tipos diferentes de pilas de mampostería.

**Figura 28**

*Ensayos a compresión axial de las pilas de mampostería*



*Nota.* Las fotografías a), b) y c) muestran el estado inicial del ensayo experimental para las pilas PL140, PL290 y PL450 respectivamente. Las fotografías d), e) y f) muestran el estado posterior del ensayo experimental para las pilas PL140, PL290 y PL450 respectivamente.

Fuente: elaboración propia.

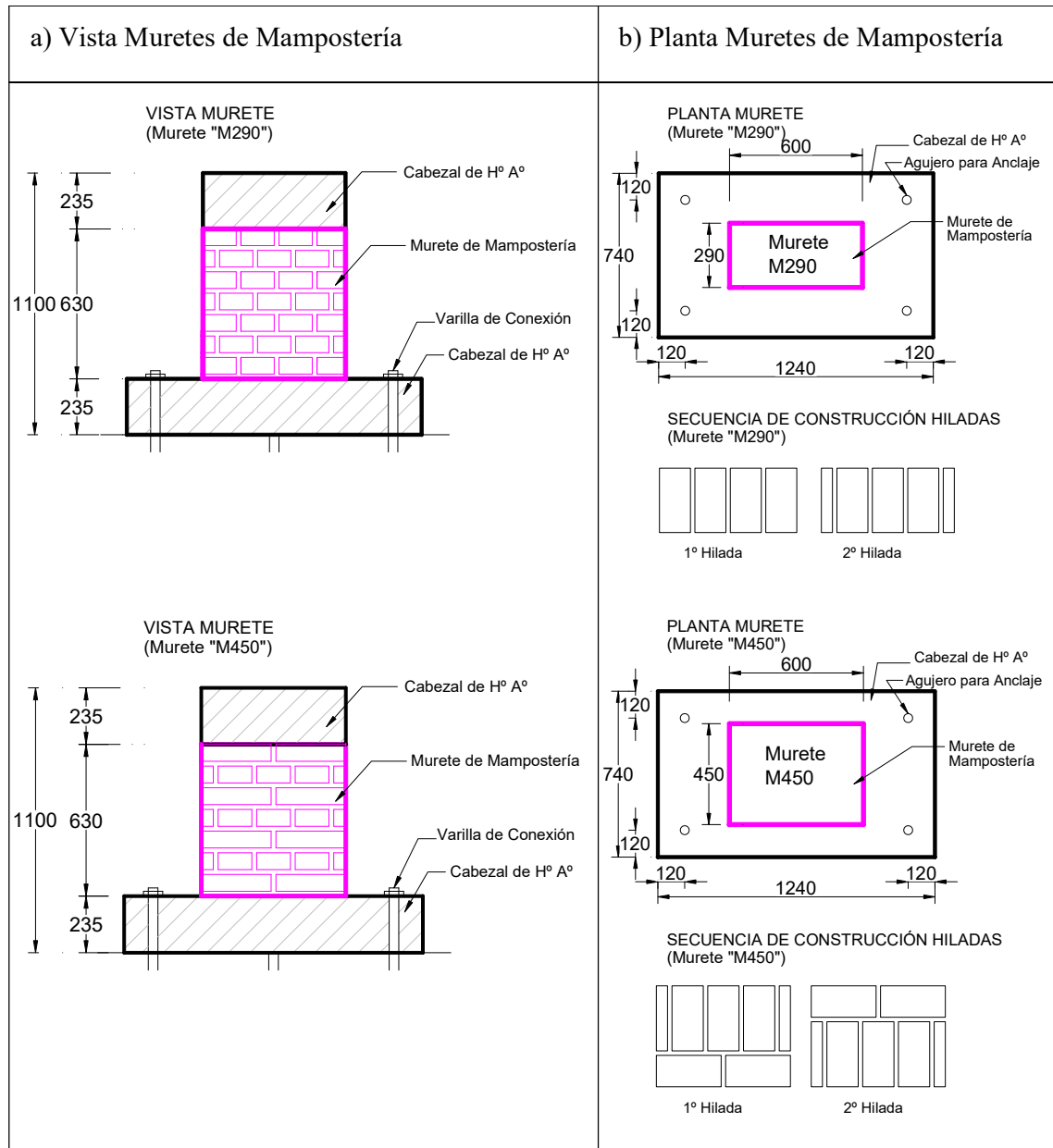
### **3. Fabricación y ensayos de los muretes para cargas verticales constantes y cargas horizontales cíclicas**

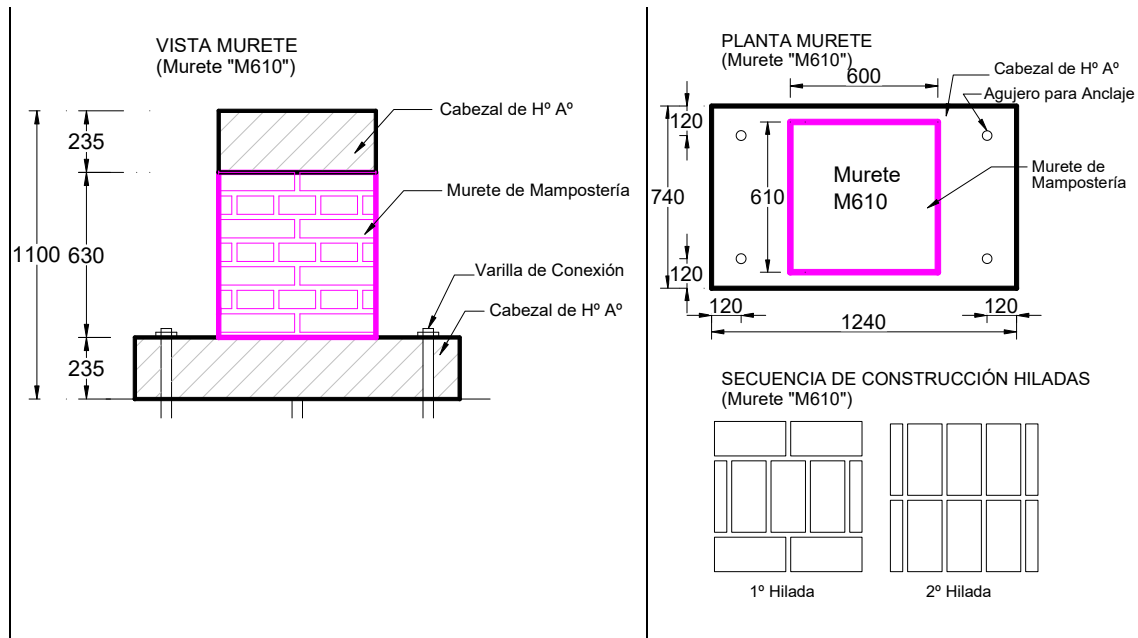
Se construyeron muretes de mampostería en laboratorio, utilizando los ladrillos y morteros con características similares a lo relevado en los edificios existentes de los años de 1900. Las características de los ladrillos y morteros utilizados en los muretes son los mismos que se utilizaron para la fabricación de las pilas de mampostería. En tal sentido se construyeron nueve muretes de mampostería con dimensiones de 630 mm de altura y 600 mm de largo, con tres espesores diferentes (610 mm, 450 mm y 290 mm respectivamente). En la Figura 29 se muestran los esquemas con las dimensiones generales de los muretes de mampostería construidos.

En la construcción de los muretes fue prevista la materialización de un cabezal superior y otro inferior de hormigón armado para una distribución uniforme de las cargas previamente definidas en el protocolo de ensayo experimental. Los cabezales inferiores y superiores están compuestos en su núcleo, de una armadura de acero formando una malla espacial de diámetro 8 mm y separación de 100 mm, posteriormente se realizó un encofrado de madera y se procedió al colado del hormigón. Finalizada la etapa de endurecimiento de los cabezales se montaron las diferentes hiladas de ladrillo cerámico macizo utilizando como ligante el mortero de cemento y cal indicado en los apartados anteriores. Luego de alcanzar con la última hilada la altura definida del murete se dispuso el cabezal superior con idénticas características al cabezal inferior.

#### **Figura 29**

*Muretes de mampostería*



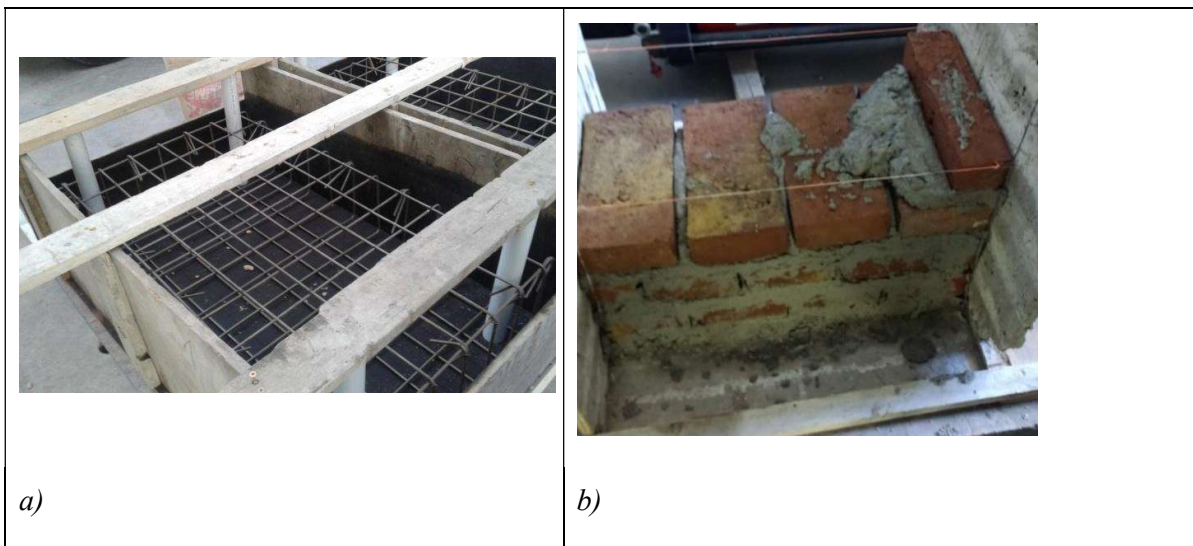


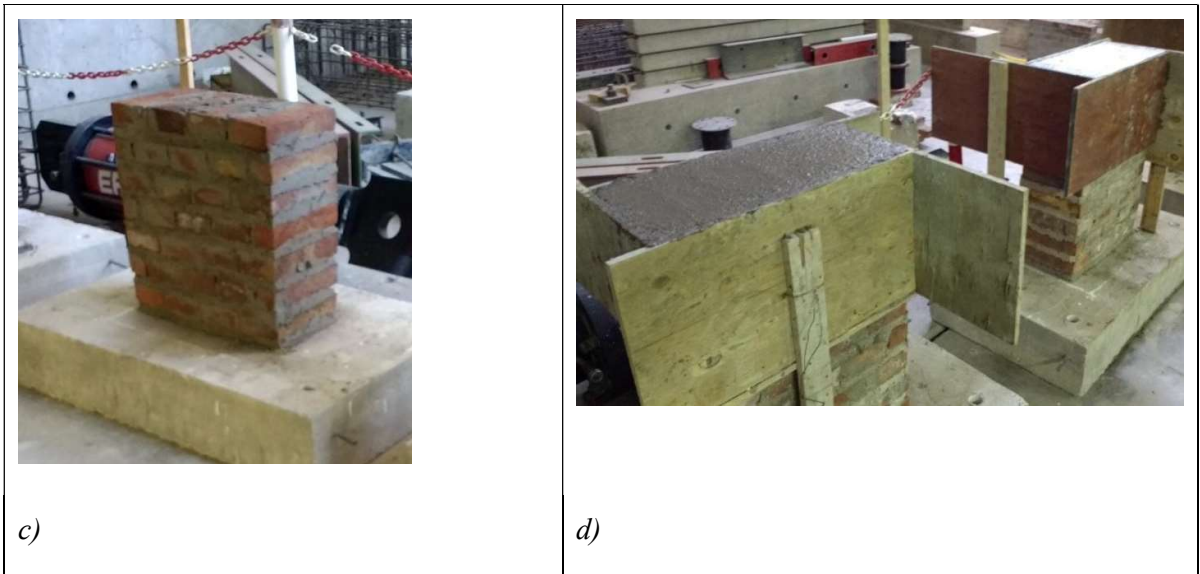
Nota. La figura muestra a) Vista y b) Planta y secuencia de construcción de las diferentes hiladas de ladrillo. Todas las medidas en (mm). Fuente: elaboración propia.

En la Figura 30 se observa la cronología constructiva de los citados muretes de mampostería.

### Figura 30

#### Cronología de construcción de muretes de mampostería



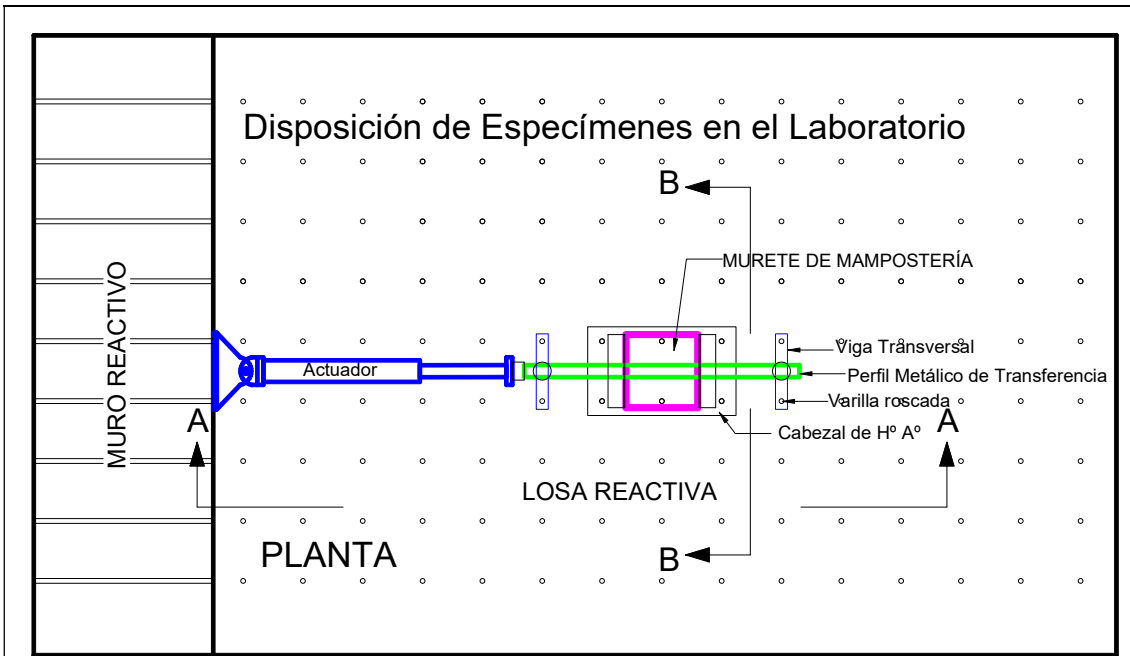


*Nota.* La figura muestra a) Armadura de acero y encofrado del cabezal inferior de hormigón armado, b) Montaje de las primeras hiladas de ladrillos cerámicos macizos, c) Finalización de hiladas de ladrillo y d) Colado de hormigón sobre el cabezal superior de hormigón armado. Fuente: elaboración propia.

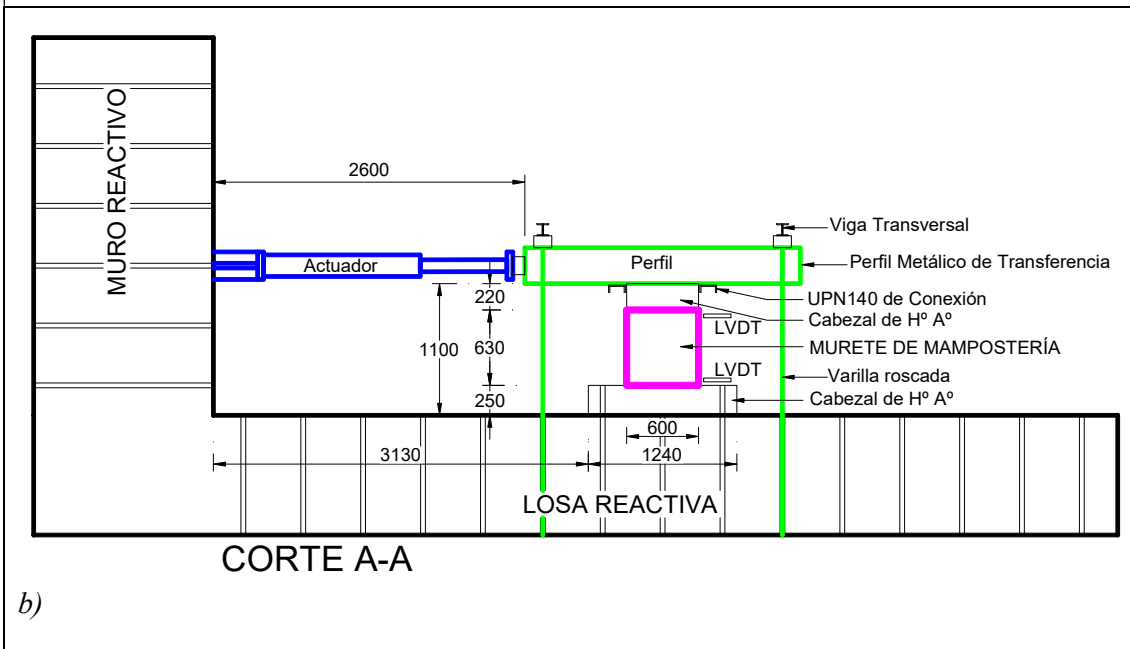
Los ensayos experimentales se realizaron en el laboratorio de estructuras del IMERIS, el cual posee una losa y un muro reactivo; ambas son estructuras de hormigón armado de sección multi-tubular. Para aplicar la carga horizontal cíclica se utilizó un actuador hidráulico de 245 kN de capacidad de carga, con un rango de desplazamiento +/- 100 mm, el cual es operado con un equipo de carga hidráulico con control de velocidad y presión. Para aplicar la carga vertical se utilizaron cuatro varillas roscadas fijadas a la losa reactiva y en los perfiles metálicos de transferencia ubicados sobre el cabezal superior. El esquema del ensayo se observa en la Figura 31 .

### **Figura 31**

*Esquema de ensayo de muretes de mampostería en laboratorio*

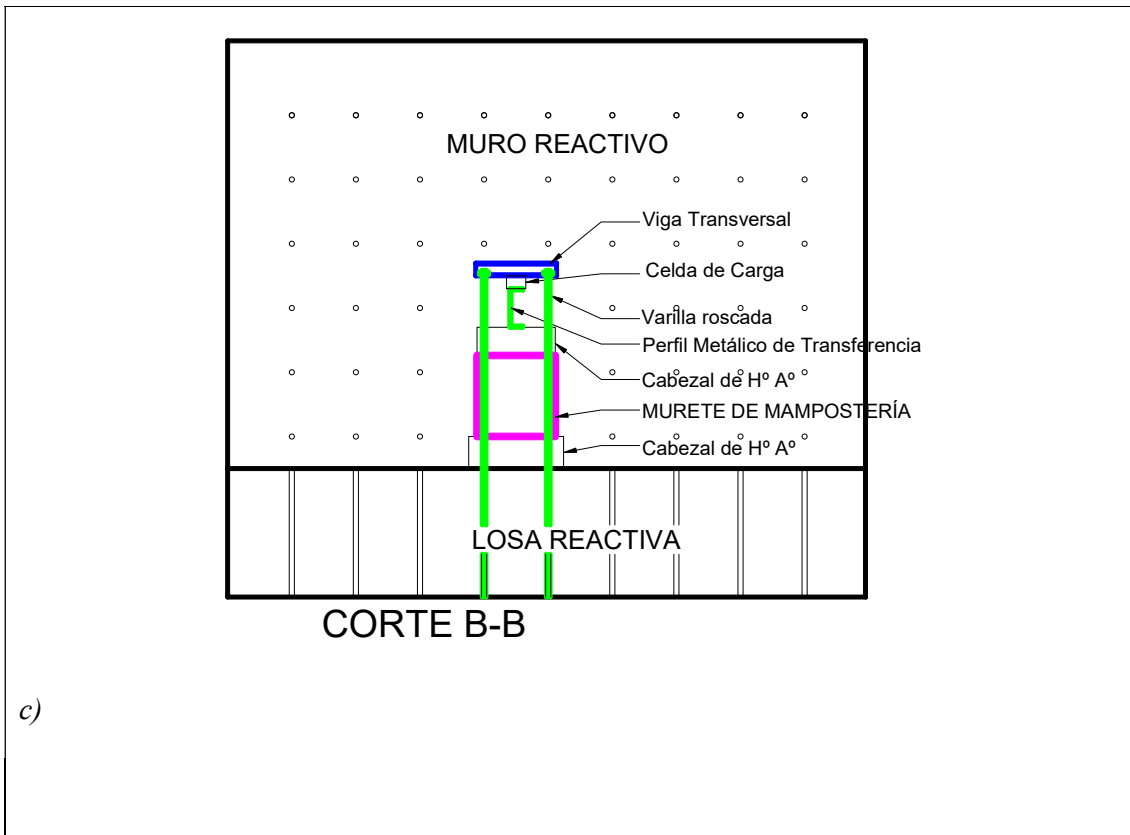


a)



b)





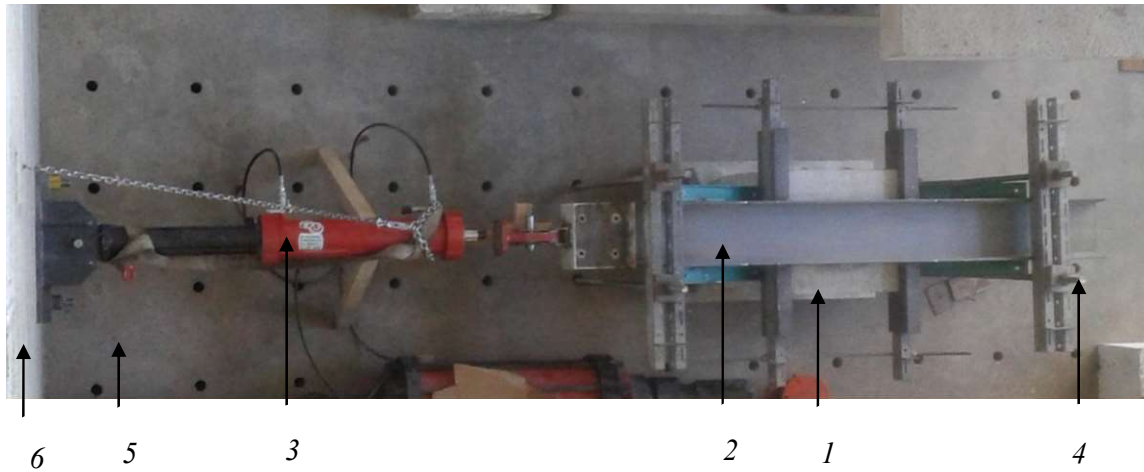
*Nota.* La figura muestra a) Planta laboratorio con esquema aplicación carga, b) Corte longitudinal laboratorio con esquema aplicación de carga y c) Corte transversal laboratorio. Fuente: elaboración propia.

El laboratorio posee un sistema de adquisición de datos digital que se compone de sensores, hardware de medidas y una PC con software programable en tiempo real. Los sensores utilizados fueron una celda de carga para medir las fuerzas verticales y otra celda para medir las fuerzas horizontales, un transductor diferencial de variación lineal (LVDT según sus siglas en inglés) para medir los desplazamientos horizontales y diagonales de cada murete de mampostería.

En la Figura 32 se observa el murete de mampostería en el laboratorio previo a la realización del ensayo experimental.

**Figura 32**

*Vista superior del laboratorio IMERIS. Disposición del murete de mampostería en el laboratorio*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

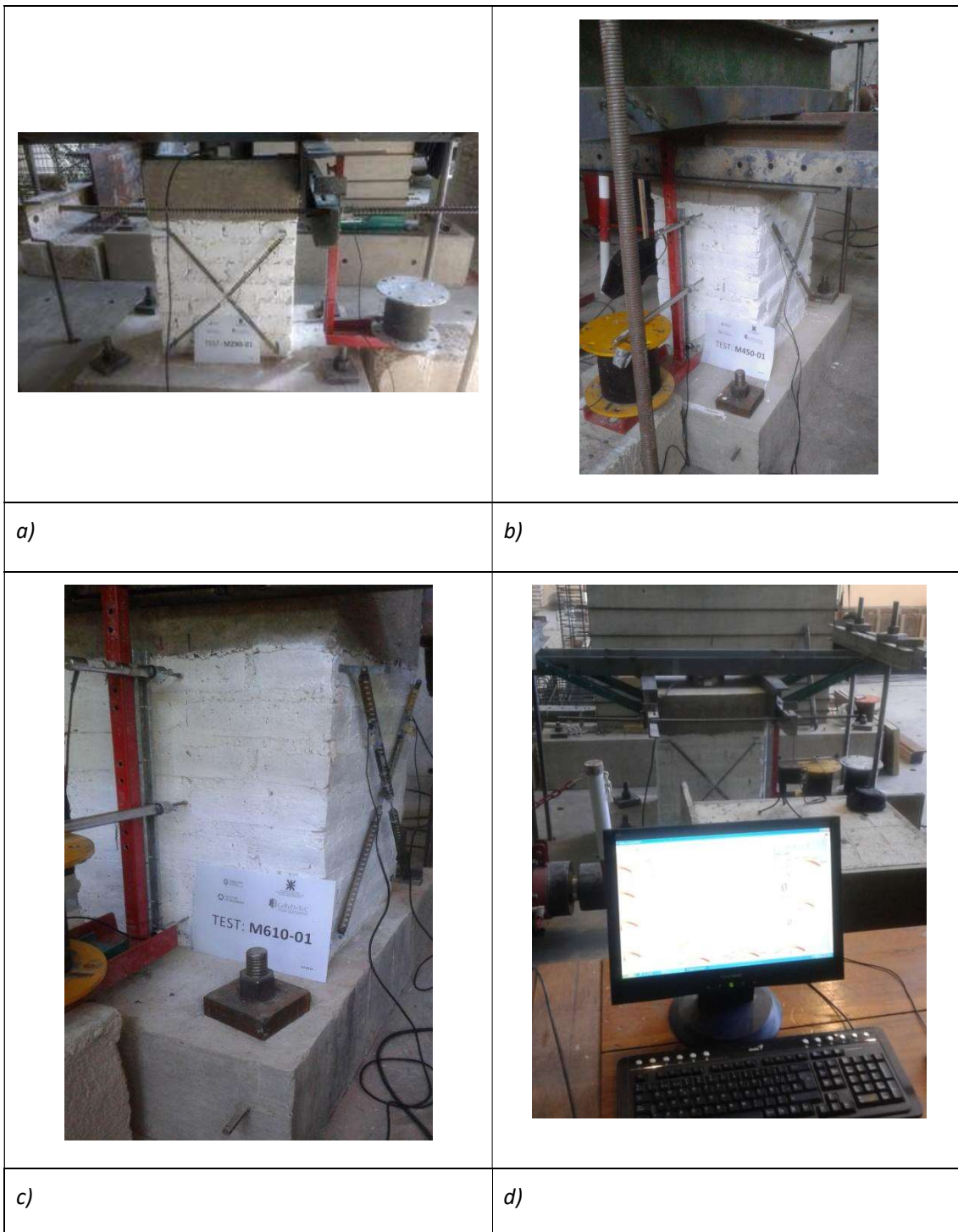
En la figura pueden distinguirse los diversos elementos:

- 1- Murete de Mampostería.
- 2- Perfil de acero para transferencia de cargas.
- 3- Actuador hidráulico para cargas horizontales.
- 4- Varilla o cable de tensión de acero para transferencia de carga vertical.
- 5- Losa reactiva de hormigón armado.
- 6- Muro reactivo de hormigón armado.

En la Figura 33 se observa la disposición de los muretes de mampostería antes de los ensayos experimentales.

**Figura 33**

*Muretes de mampostería en el laboratorio previo al ensayo experimental*



*Nota.* La figura muestra a) Vista frontal del murete previo al ensayo experimental, b) Vista en perspectiva del murete y dispositivo de medición, c) Vista en perspectiva del murete con

identificación de este, d) Computadora para la adquisición de datos del ensayo experimental.

Fuente: elaboración propia.

Los muretes de mampostería fueron ensayados mediante la aplicación de una carga vertical constante mientras que la carga horizontal variaba de forma incremental. Los diferentes ciclos de carga horizontal se realizaron con incrementos de  $10000\text{ N}$  hasta alcanzar la rotura del murete. Por medio del sistema de adquisición de datos, en tiempo real y para cada ciclo de carga y descarga horizontal, se obtuvieron los valores de fuerzas y desplazamientos horizontales.

A partir de los datos generados de los ensayos experimentales a cargas verticales constantes y cargas horizontales cíclicas fue posible determinar:

- La relación fuerza – desplazamiento mediante la gráfica de la curva de histéresis.
- Los ciclos histeréticos o comportamiento no lineal obtenidos del gráfico fuerza – desplazamiento.
- Los esquemas de fisuración para todos los muretes de mampostería.
- La carga de rotura y el desplazamiento máximo para todos los muretes de mampostería.

## **CAPÍTULO III**

### **RESULTADOS EXPERIMENTALES**

#### **1. Introducción**

En el presente capítulo se resumen los principales resultados obtenidos de los diferentes ensayos experimentales. En tal sentido se recuerda que se fabricaron dos grupos de especímenes, en el primer grupo se construyeron pilas de mampostería compuesta por ladrillos cerámicos macizos y morteros de cemento y cal, en el segundo grupo se construyeron muretes de mampostería utilizando los mismos mampuestos y morteros que el primer grupo. En ambos grupos de especímenes la característica distintiva fue la variación de la dimensión del espesor total de pilas y muretes de mampostería, manteniendo el resto de las dimensiones de forma invariable.

#### **2. Resultados de los ensayos de especímenes a cargas verticales. Pilas de mampostería**

La primera serie de ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Estructuras del INPRES (Instituto Nacional de Prevención Sísmica) en la Provincia de San Juan, donde los especímenes fueron sometidos a carga axial vertical de compresión. Se fabricaron en laboratorio muretes de mampostería utilizando ladrillos cerámicos macizos y morteros de cemento y cal con características similares a los relevados en los edificios históricos. Las características de los mampuestos y los morteros utilizados se encuentran definidos en el Capítulo II.

Las dimensiones de las pilas de mampostería se encuentran detalladas en la Tabla 2 del Capítulo II. El valor distintivo entre cada pila de mampostería es el espesor final de la misma y se mantienen constantes el resto de las dimensiones. Un resumen de las dimensiones que posee cada pila de mampostería se presenta en la Tabla 3 .

**Tabla 3**

*Características geométricas de las pilas de mampostería*

ID	Largo (mm)	Espesor (mm)	Altura (mm)
PL140	285	140	450
PL290	285	285	450
PL450	285	430	450

*Nota.* Fuente: elaboración propia.

Las probetas de morteros se ensayaron a compresión vertical, recordando que las probetas tienen dimensiones de 70mm x 70mm x 70mm y fueron elaboradas con una dosificación en volumen con las siguientes proporciones: 1 Cemento, 7 Arena y 2 Cal Aérea Común.

En la Tabla 4 se indican los resultados obtenidos del ensayo a compresión para las probetas de morteros. En la Figura 34 se observa la probeta de mortero al finalizar el ensayo experimental.

**Tabla 4**

*Resultados ensayo a compresión de probetas de morteros.*

ID	$F_{cm}$ [N]	$R_{cm}$ [MPa]	Promedio $R_{cm}$ [MPa]	Dispersión de $R_{cm}$
MC701	22900	4.67	4.56	0.12
MC702	21700	4.43		
MC703	22370	4.57		

*Nota.* Fuente: elaboración propia.

Donde:

- $F_{cm}$  = Carga de rotura a compresión mortero (IRAM 1622).
- $R_{cm}$  = Resistencia a compresión mortero (IRAM 1622).

**Figura 34**

*Ensayo a compresión en probeta de mortero*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se realizaron los ensayos a compresión vertical de las probetas de ladrillos cerámicos macizos. Los resultados de los ensayos experimentales sobre las probetas de ladrillo cerámico macizo se muestran en la Tabla 5. En la Figura 35 se observa la probeta de ladrillo cerámico macizo

**Tabla 5**

*Resultados Ensayo a Compresión Ladrillos Cerámicos Macizos*

ID	$F_{cb}$ [N]	$\sigma_{pkm'}$ [MPa]	$\delta$ Dispersión	$\sigma_{pk'}$ [MPa]
L1 - 1A	211700	9.26	0.32	5.06
L2 - 1B	109200			
L3 - 2A	86200			
L4 - 2B	87000			
L5 - 3A	109000			
L6 - 3B	128700			
L7 - 4A	174000			
L8 - 4B	177700			

L9 - 5A	151500			
L10 - 5B	99000			

Nota. Fuente: elaboración propia.

Donde:

- $F_{cb}$  = Carga de rotura a compresión ladrillo (IRAM 12586).
- $\sigma_{pkm}'$  = Resistencia a compresión promedio (IRAM 12586).
- $\sigma_{pk}'$  = Resistencia característica a compresión (IRAM 12586).
- $\delta$  = Dispersión relativa (IRAM 12586).
- $\sigma_i$  = Resistencia a compresión de la probeta (IRAM 12586).

Siendo:

$$\sigma_{pk}' = \sigma_{pkm}' (1 - 1,4 \delta) \quad \text{Ec. 4.1}$$

$$\delta = \frac{1}{\sigma_{pkm}'} \sqrt{\frac{\sum_1^n (\sigma_{pkm}' - \sigma_i)^2}{n-1}} \quad \text{Ec. 4.2}$$

### Figura 35

Ensayo a compresión sobre probetas de ladrillos cerámicos macizos



Nota. Fuente: elaboración propia.



Además de los ensayos de los morteros y mampuestos se realizaron los ensayos experimentales sobre las pilas de mampostería. En la Figura 36 se muestra la etapa final de construcción de las pilas de mampostería, según las dimensiones indicadas en la Tabla 3.

**Figura 36**

*Pilas de mampostería con espesores diferentes*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

A continuación se realizaron los ensayos sobre las pilas de mampostería aplicando una carga axial vertical controlada. Todos los especímenes fueron ensayados hasta alcanzar la carga máxima de rotura. En la Figura 37 se muestra una pila de mampostería finalizado el ensayo a compresión.

**Figura 37**

*Ensayo a compresión axial de pilas de mampostería*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 6 se resumen los valores obtenidos de los ensayos a compresión en las pilas de mampostería.

**Tabla 6**

*Resultados del Ensayo a Compresión en pilas de mampostería*

ID	Peso kg	Vol m <sup>3</sup>	Peso Específico N/m <sup>3</sup>	Carga Máxima KN	Def. en Carga Máx. mm	Tensión Máxima MPa	Def. Espec. en Tensión Máxima mm/mm	Carga Máx. / Peso "CMP"	Carga Máx. / Vol. "CMV"
PL140	28.48	0.02	15860	397	3.43	9.97	0.0076	14	22
PL290	60.80	0.04	16630	596	4.22	7.34	0.0094	10	16
PL450	92.40	0.06	16750	664	4.00	5.42	0.0089	7	12

*Nota.* Fuente: elaboración propia.

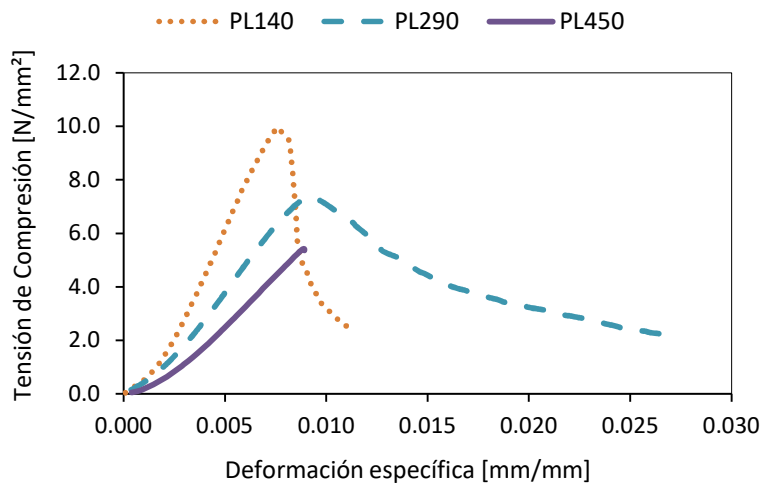
Donde:

- *CMP*: Carga máxima obtenida dividido el peso de la pila.
- *CMV*: Carga máxima obtenida dividido el volumen de la pila.

Con los resultados obtenidos se confeccionaron curvas que indican la evolución de la carga impuesta en relación con la deformación medida sobre la pila de mampostería. En la Figura 38 se muestran las curvas que relacionan la tensión axial con la deformación específica para las pilas de mampostería de distintos espesores ensayadas.

**Figura 38**

*Ensayos a compresión axial. Curvas de tensión-deformación de las pilas de mampostería con distintos espesores*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

La curva de PL450 se interrumpe abruptamente debido a que se alcanzó su máxima resistencia a compresión, posteriormente la curva indica un cambio de pendiente positiva a negativa, consecutivamente no se pudo continuar con la medición debido a inconvenientes técnicos del propio ensayo.

Para considerar la incidencia de la esbeltez con relación a la respuesta de los ensayos a compresión realizados, se incorporan los factores de corrección indicados en el INPRES-CIRSOC 103. La Tabla 7 muestra los factores de corrección de la resistencia en función de la esbeltez de las pilas de mampostería correspondiente al INPRES-CIRSOC 103.

**Tabla 7**

*Factores de corrección de la resistencia en función de la esbeltez de las pilas de mampostería. IC103-III-2018*

Esbeltez	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Factor de corrección	0.83	0.90	0.95	1	1.02	1.05

*Nota.* Fuente: elaboración propia.

Las dimensiones geométricas y la esbeltez de cada pila de mampostería se indican en la Tabla 8.

**Tabla 8**

*Esbeltez de las pilas de mampostería*

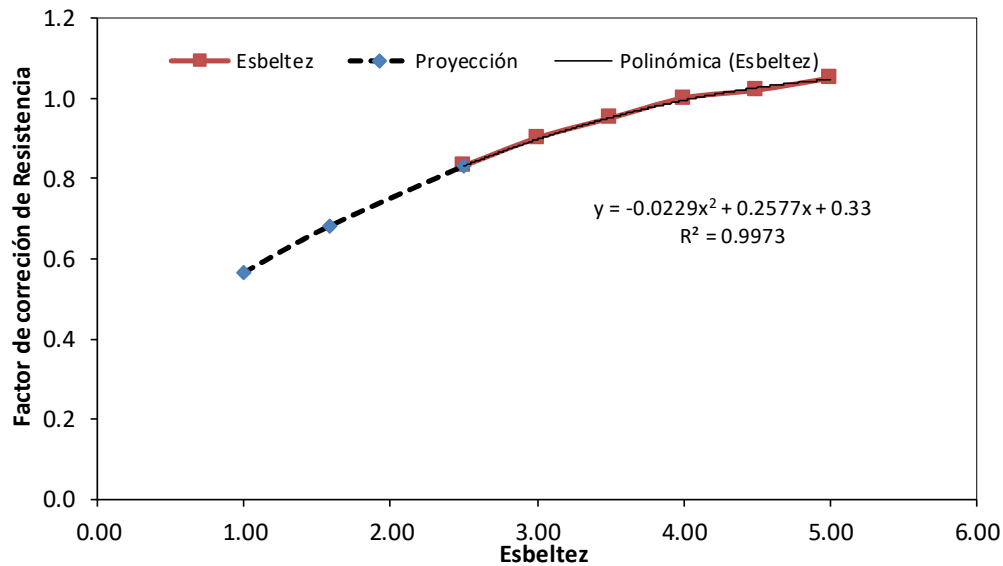
ID	Largo (mm)	Espesor (mm)	Altura (mm)	Esbeltez (Altura/espesor menor)
PL140	285	140	450	3.21
PL290	285	285	450	1.58
PL450	285	430	450	1.58

*Nota.* Fuente: elaboración propia.

Se presenta en la Figura 39 la curva de tendencia del factor de corrección de resistencia respecto a la variación de diferentes valores de esbeltez.

**Figura 39**

*Variación del factor de corrección de resistencia en función de la esbeltez*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

Si para la esbeltez de la PILA290 y PILA450 se asignan los factores de corrección de resistencia 0.68 a cada uno según la proyección indicada en la Figura 39, los resultados indicados en la Tabla 6 se modifican de la siguiente manera y se muestran en la Tabla 9.

**Tabla 9**

*Corrección de Carga Máxima y Tensión Máxima*

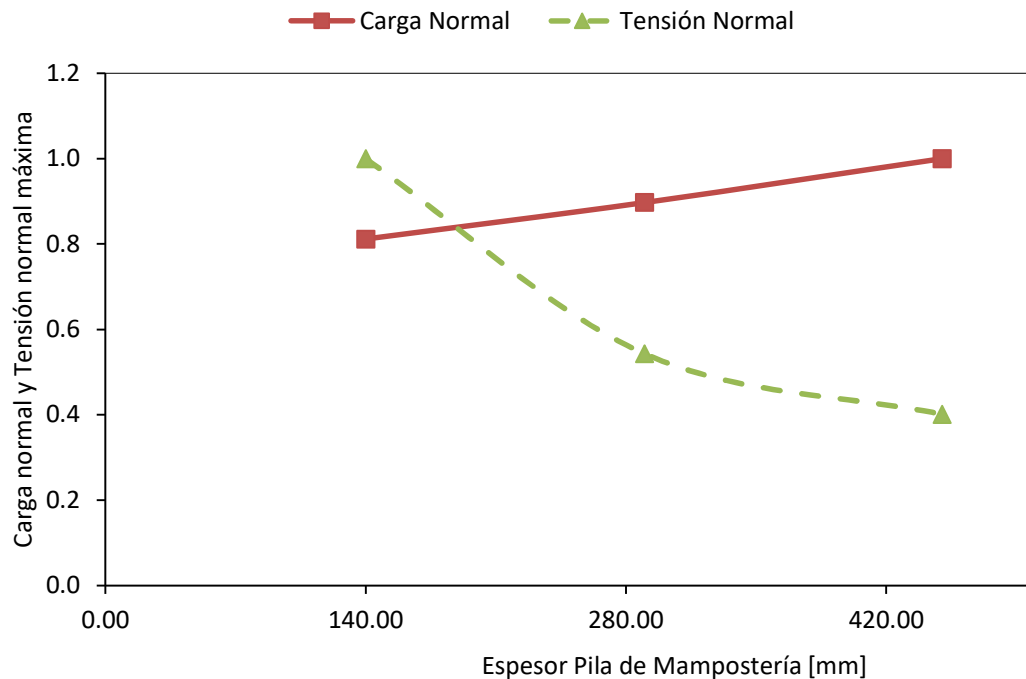
ID	Esbeltez (Altura/espesor menor)	Ensayo Experimental		Corrección Carga Máxima y Tensión Máxima		
		Carga Máxima KN	Tensión Máxima MPa	Factor de corrección	Carga Máxima KN	Tensión Máxima MPa
PL140	3.21	397	9.97	0.92	367	9.19
PL290	1.58	596	7.34	0.68	405	4.99
PL450	1.58	664	5.42	0.68	452	3.69

*Nota.* Fuente: elaboración propia.

En la Figura 40 se muestra la variación del espesor de cada pila con relación a la carga máxima y tensión máxima de compresión normalizada a 1.

**Figura 40**

*Variación de la carga máxima y la tensión máxima de pilas de mampostería*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

En la Figura 38 se muestra que las tensiones máximas a compresión se registran en la pila de mampostería de menor espesor, mientras que la tensión mínima se obtiene sobre la pila de mampostería de mayor espesor. Los resultados obtenidos estarían indicando, en principio, que los espesores de las pilas de mampostería tienen incidencia sobre los valores de tensiones máximas a compresión.

En función de lo observado en la Figura 40, los valores absolutos cambian a partir de la corrección del factor de resistencia por la esbeltez de cada pila. Se observa una tendencia lineal de la carga máxima en función de la variación del espesor de cada pila; sin embargo, la tendencia no es lineal para la relación de la tensión máxima respecto al espesor de la pila.

Cuando se utilizan especificaciones reglamentarias (IC103-III-2018), la resistencia especificada a la compresión de la mampostería  $f'_m$ , se determina con la ecuación 4.3.

$$f'_m = f_{mm}(1 - 1,45\delta_m) \quad \text{Ec. 4.3}$$

Donde:

- $f'_m$  = resistencia especificada a la compresión de la mampostería, en MPa.
- $f_{mm}$  = promedio de los valores de las resistencias a la compresión de los muretes ensayados, en MPa.
- $\delta_m$  = coeficiente de variación según ecuación 4.4.

Siendo:

$$\delta_m = \frac{\sqrt{\frac{\sum_1^n (f_i - f_{um})^2}{n-1}}}{f_{um}} \geq 0,12 \quad \text{Ec. 4.4}$$

Donde:

- $f_i$  = resistencia individual de cada espécimen ensayado, en MPa.
- $f_{um}$  = promedio de los valores de las resistencias determinadas mediante los ensayos correspondientes, en MPa.
- $n$  = número de especímenes ensayados.

En la Tabla 10 se resumen los resultados obtenidos de los ensayos para la resistencia específica de la mampostería utilizando especificaciones del reglamento (IC103-III-2018).

**Tabla 10**

*Resistencia especificada a compresión en muretes de mampostería según el reglamento IC103-III-2018*

ID	Carga Máxima a KN	$f_i$ MPa	$\delta_m$	$f'_m$ MPa
PL140	397	9.97	0.30	4.26
PL290	596	7.34		
PL450	664	5.42		

*Nota.* Fuente: elaboración propia.

Los resultados indican que las pilas de mampostería ensayadas proveen una resistencia especificada mayor a la compresión mínima indicada por el reglamento IC103-III. Los resultados corresponden a espesores diferentes de las pilas; sin embargo, no se evidencia una diferencia cualitativa y cuantitativa con el reglamento IC103-III. Si bien la resistencia a compresión entre pilas es muy dispar entre ellas, la resistencia especificada a compresión de todas las pilas es mayor que la establecida en el reglamento. Los resultados dispares de resistencia a compresión poseen una relación directa con el espesor de cada pila de mampostería, como se puede observar en la Figura 40.

### **3. Resultados de los ensayos de especímenes a carga vertical constante y carga horizontal cíclica. Muretes de mampostería**

La segunda serie de ensayos se desarrolla en el Laboratorio de Estructura del IMERIS (Instituto de Mecánica Estructural y Riesgo Sísmico) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo, Provincia de Mendoza. Según se detalló en el Capítulo II los muretes de mampostería poseen tres espesores diferentes, siendo el espesor menor de 290 mm, el espesor mayor de 610 mm y un espesor intermedio correspondiente a 450 mm, el resto de las dimensiones geométricas del murete se mantienen constantes. En la Figura 41 se observa el murete de mampostería finalizado en su etapa de construcción.



**Figura 41**

*Murete de mampostería construido en laboratorio*

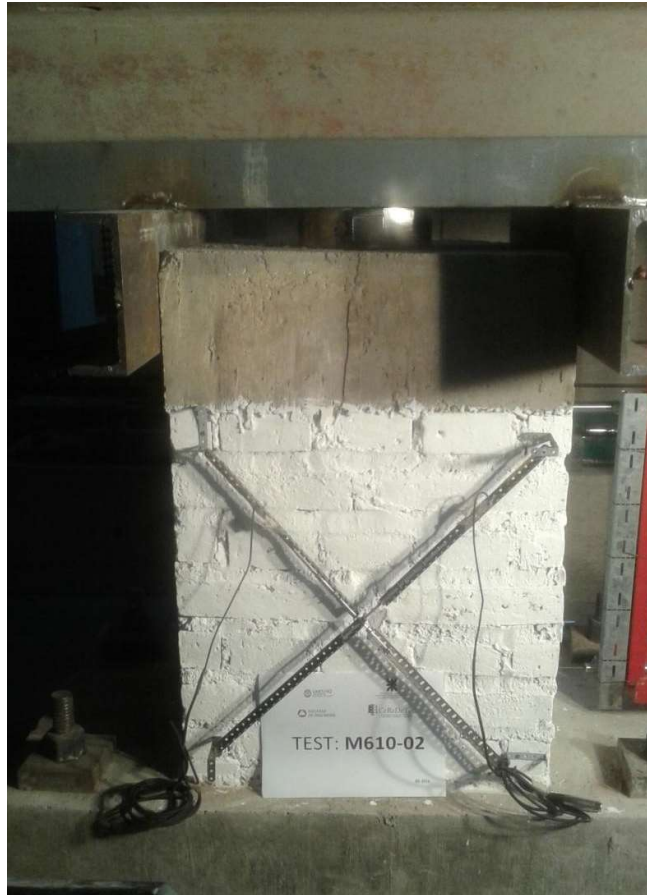


*Nota.* Fuente: elaboración propia.

La Figura 42 muestra un murete de mampostería en el laboratorio previo al ensayo experimental.

**Figura 42**

*Murete de mampostería en laboratorio previo al ensayo experimental*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

Tal cual se mencionó en el Capítulo II, se construyeron tres muretes de mampostería por cada espesor, lo que arrojó un total de nueve especímenes. Los espesores de los muretes fueron de 290mm, 450mm y 610mm y se identificaron como M290, M450 y M610 respectivamente. En relación al murete de menor espesor se utilizó la nominación M290 y para cada uno de los tres muretes M290 de dicho espesor se identificaron con las denominaciones M290-01, M290-02 y M290-03. De manera análoga se procedió para los muretes de mampostería con otros espesores, es decir, M450-01, M450-02, M450-03, M610-01, M610-02 y M610-03. En la Tabla 11 se resumen las dimensiones geométricas y las identificaciones de los muretes de mampostería.

**Tabla 11***Resumen de datos para los ensayos de los muretes de mampostería*

ID	Longitud (mm)	Altura (mm)	Espesor (mm)	Tensión Vertical (MPa)	Fuerza Horizontal (N)
M290	600	655	290	0.15	Ciclos de carga de 10000 N hasta alcanzar la rotura.
M450	600	655	450	0.15	
M610	600	655	610	0.15	

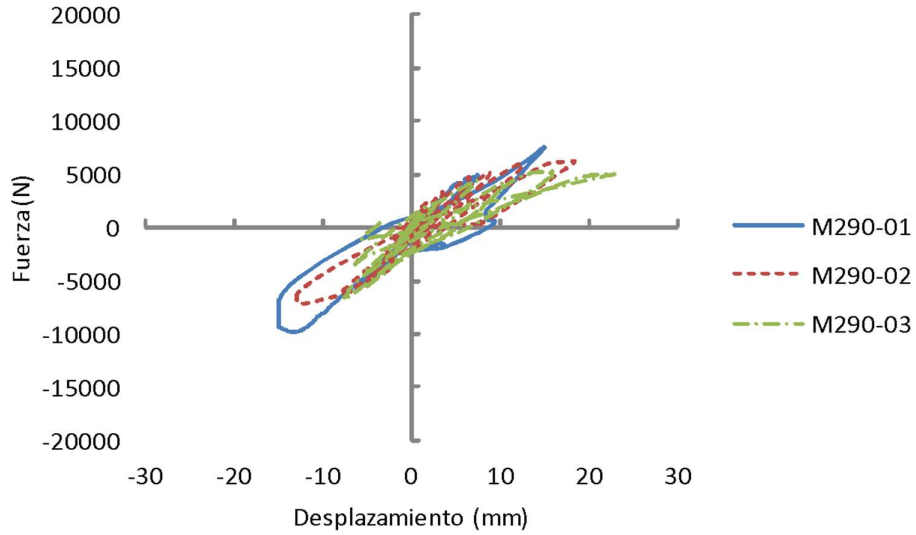
*Nota.* Fuente: elaboración propia.

El protocolo de ensayos cíclicos consistió en aplicar en cada murete de mampostería una tensión vertical constante equivalente a 0.15 MPa y realizar ciclos de cargas horizontales de valor incremental equivalente a 10000 N hasta alcanzar la rotura, para cada ciclo de carga se fue registrando el desplazamiento horizontal en la parte superior del murete de mampostería. La tensión vertical de 0.15 MPa aplicada de forma constante en cada ensayo se fundamenta en que la misma no fuese una variable adicional en el análisis de las respuestas experimentales. El valor de tensión vertical de 0.15 MPa refleja las posibles demandas de cargas verticales a las que pueden verse sometidas este tipo de estructuras y finalmente es un valor adoptado que habitualmente se encuentra en el rango contemplado por diferentes autores en sus programas experimentales.

En la Figura 43 se representan las curvas de fuerza horizontal versus desplazamiento horizontal obtenidas para los muretes de mampostería con espesor 290 mm, en la Figura 44 las correspondientes al espesor 450 mm y en la Figura 45 las correspondiente al espesor 610mm. Con el objeto de poder comparar las respuestas obtenidas, en las Figuras se ha mantenido la escala de la Fuerza en el eje vertical o eje de ordenadas y la escala del desplazamiento horizontal en el eje horizontal o eje de abscisas.

**Figura 43**

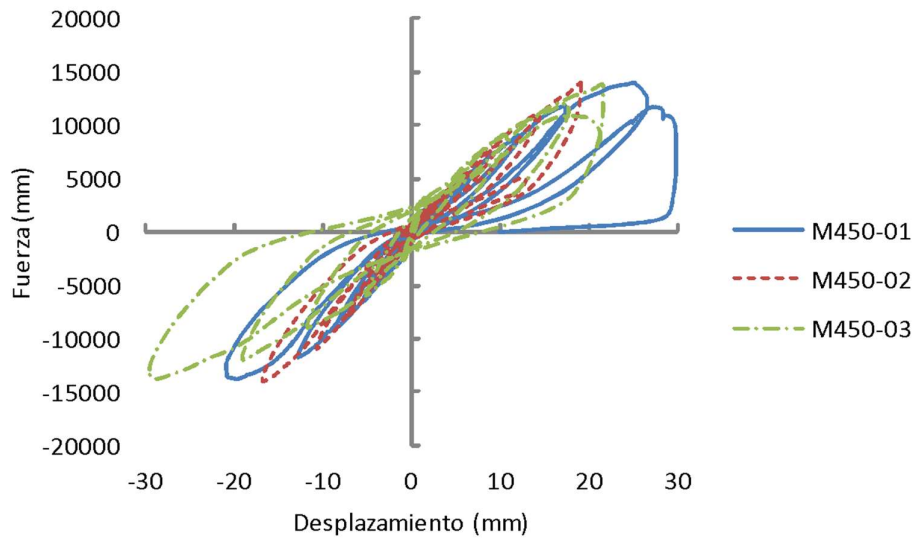
*Relación fuerza-desplazamiento para los muretes de 290 mm de espesor*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

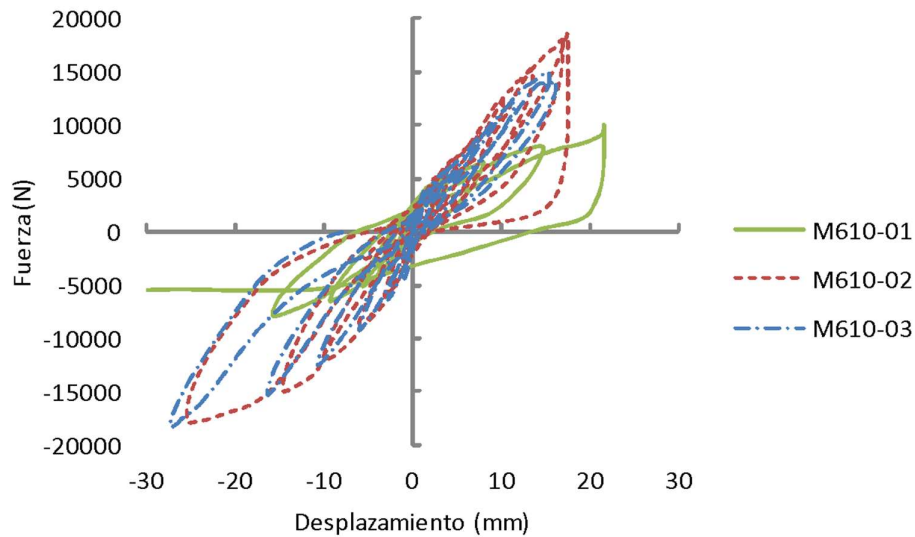
**Figura 44**

*Relación fuerza-desplazamiento para los muretes de 450 mm de espesor*



**Figura 45**

*Relación fuerza-desplazamiento para los muretes de 610 mm de espesor*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

Los ensayos experimentales correspondientes a la Figura 43 comenzaron por el murete denominado M290-01, producto de la calibración del protocolo de ensayo. Para el primer murete se registraron algunos errores de lectura, los cuales se ven reflejados sobre la Figura 43 del murete M290-01. La Figura 43 muestra una respuesta dispersa entre los tres muretes de mampostería analizados, sin embargo, la forma de las curvas para los especímenes (M290-02 y M290-03) son similares. En la Figura 44 se observa un cierto grado de similitud para los tres muretes de mampostería (M450-01, M450-02 y M450-03) y muestra que la capacidad de carga aumenta aproximadamente al doble respecto a los muretes M290. La respuesta experimental en términos de capacidad de carga que muestra la Figura 45, indica un leve incremento en relación a la lograda por los muretes M450. En la Figura 44 y 45 se observa que algunos ciclos presentan una descarga vertical, correspondiente a la rama positiva de la curva, estos ciclos coinciden con el límite de carga horizontal del murete luego de un avanzado estado de rotura del mismo. En la Figura 45 se observa que la resistencia lateral del M610-01 es menor que la resistencia de M610-02 y M610-03 dado que se registraron errores de lectura durante el ensayo experimental correspondiente al murete M610-01.

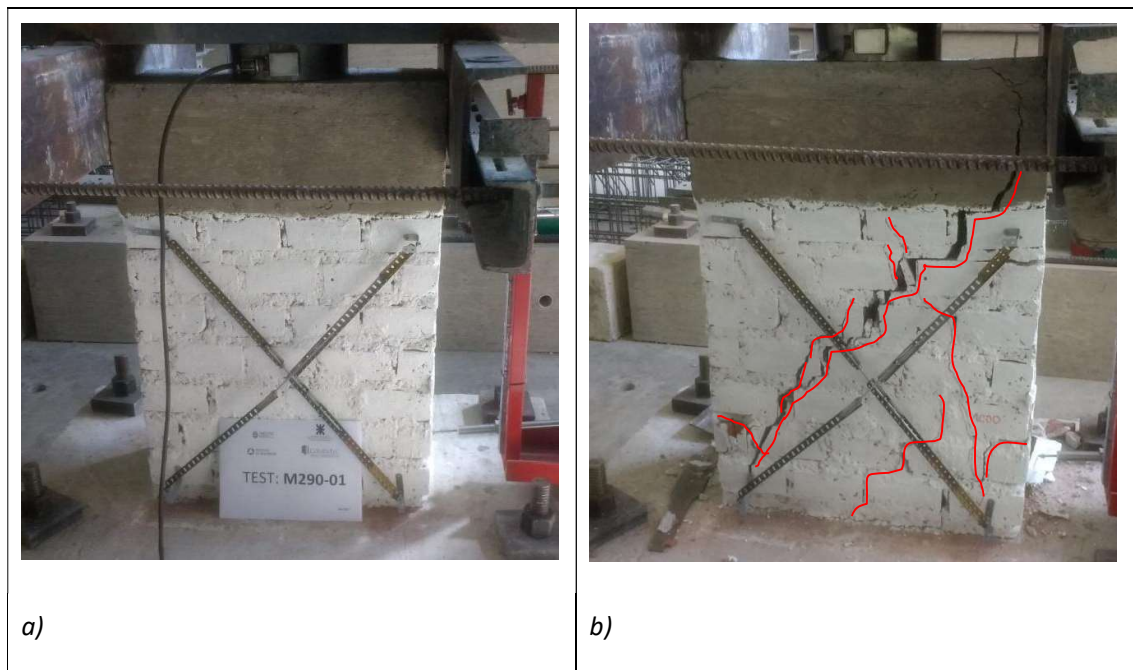
Con relación a las respuestas en término de desplazamiento se observa que los muretes de mampostería M450 acusan un desplazamiento máximo de 20% superior que la de los muretes de mampostería M290.

Si se comparan los ciclos histeréticos de las Figura 43 y Figura 44, en términos de cantidad de energía disipada puede observarse que los muretes de mampostería M450 disipan mayor energía que los M290. La Figura 45 no muestra un incremento significativo de la cantidad de energía disipada de los M610 si se la compara con su análogo M450, por lo tanto los ciclos histeréticos presentan formas dispares frente al aumento del espesor del murete de mampostería.

De los ensayos experimentales se visualizaron esquemas de fisuración en función del incremento de los diferentes ciclos de carga horizontal. En la Figura 46 se observa la situación previa y final del ensayo experimental para el murete de mampostería de espesor 290 mm.

**Figura 46**

*Ensayo murete de espesor 290 mm.*

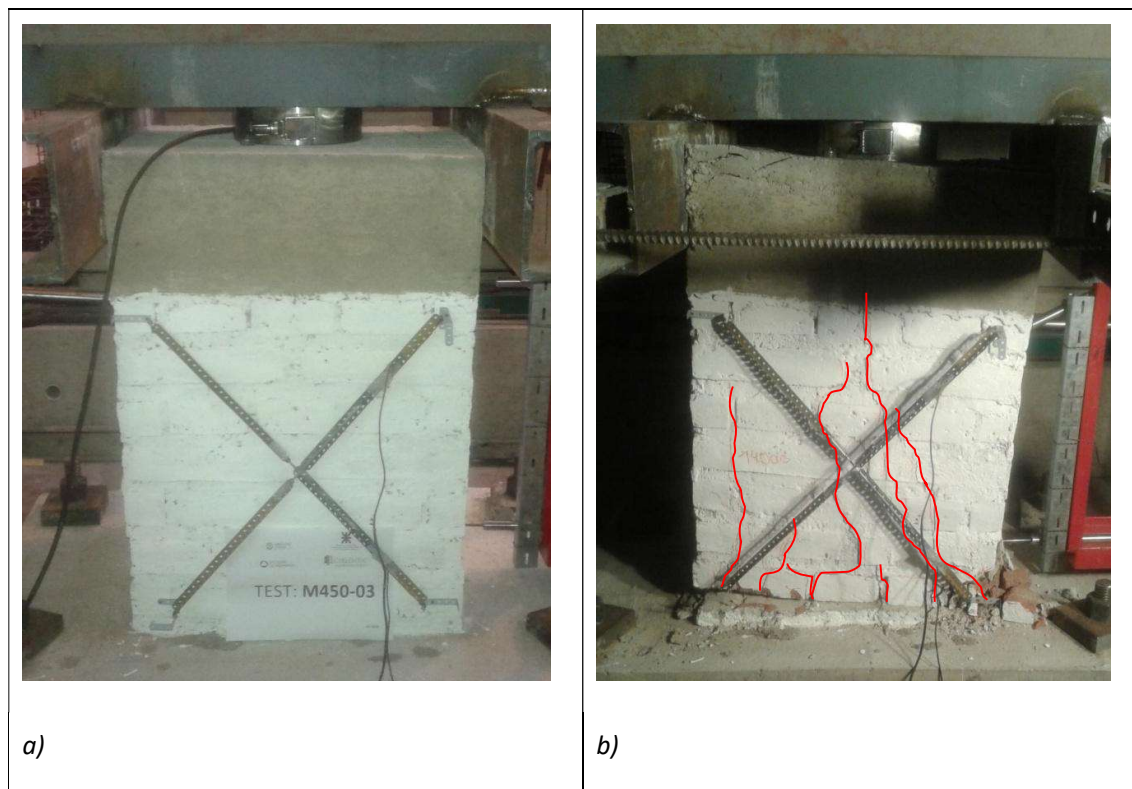


*Nota.* La figura muestra a) Previo al ensayo experimental, b) Después del ensayo experimental. Fuente: elaboración propia.

De manera análoga en la Figura 47 se muestra el esquema de fisuración para el ensayo de los muretes de espesor 450 mm y en la Figura 48 la correspondiente a los muretes de espesor 610 mm.

**Figura 47**

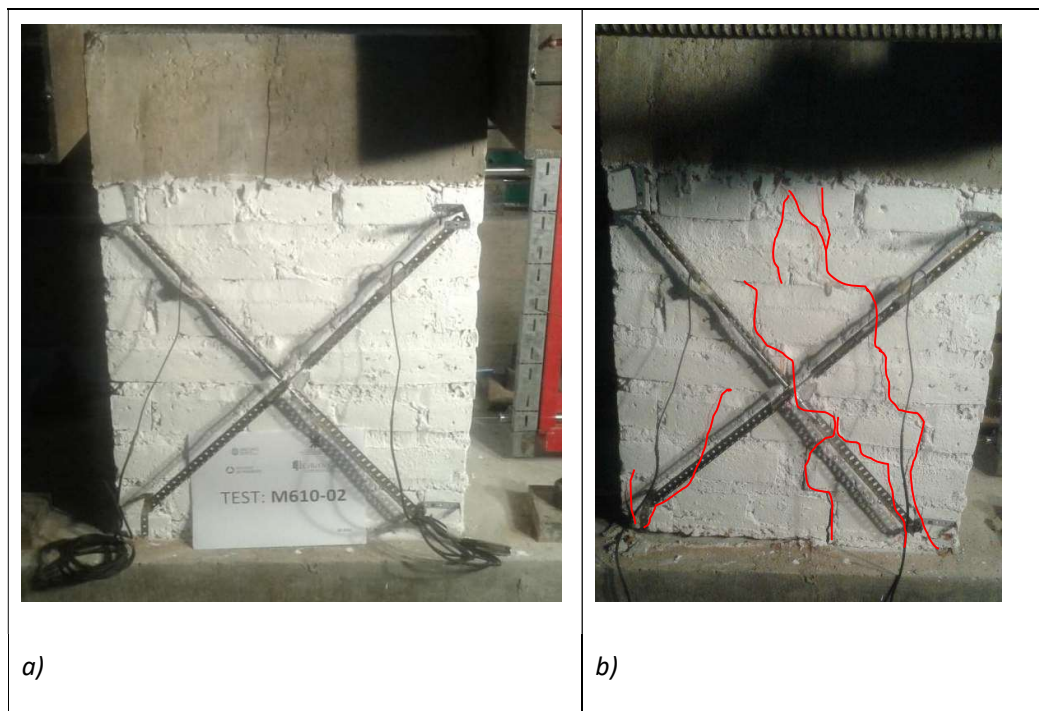
*Ensayo murete de espesor 450 mm*



*Nota.* La figura muestra a) Previo al ensayo experimental y b) Después del ensayo experimental. Fuente: elaboración propia.

**Figura 48**

*Ensayo murete de espesor 610 mm*



*Nota.* La figura muestra a) Previo al ensayo experimental y b) Después del ensayo experimental. Fuente: elaboración propia.

La Figura 46 presenta fisuras bien marcadas con una orientación de aproximadamente  $45^\circ$  respecto a un eje horizontal, también se muestran en menor medida fisuras con tendencias verticales. La Figura 47 y 48 muestran un esquema de fisuración vertical o con un ángulo de inclinación respecto a un eje horizontal que supera los  $60^\circ$ . Se observa que los muretes de mampostería de espesor 450 mm y 610 mm presentan un esquema de fisuración muy diferente a los muretes de espesor 290 mm. Sin embargo, no presentan grandes cambios los esquemas de fisuración entre los muretes M450 y los M610.

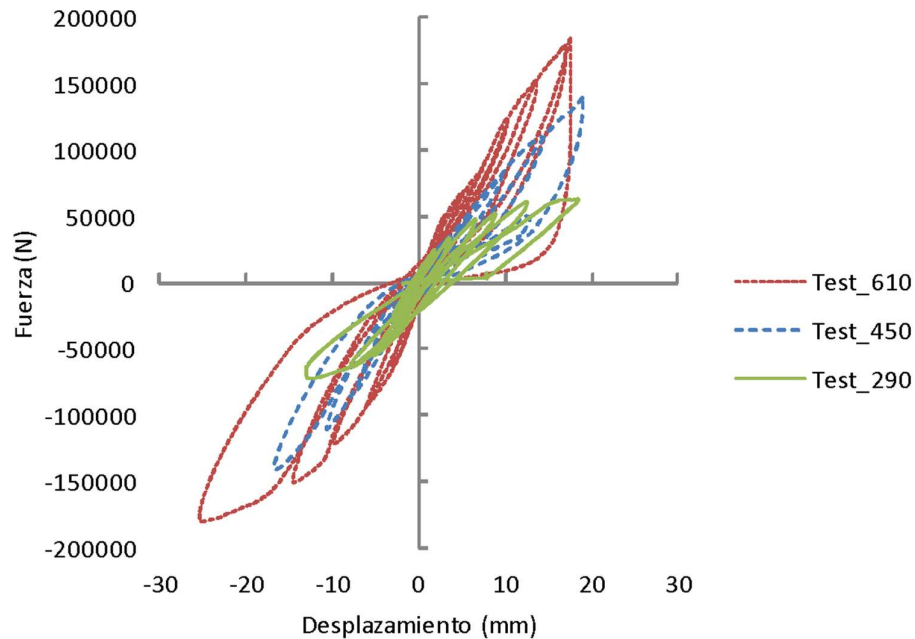
En la Figura 49 se muestran las curvas obtenidas de los ensayos para cada murete de mampostería de espesor diferente. Teniendo en cuenta que por cada espesor diferente de murete de mampostería se realizaron tres ensayos, en la Figura 48 se ha representado



solamente una de las curvas representativas para cada uno de los espesores analizados, definiendo a la curva representativa como el promedio de las tres curvas obtenidas.

**Figura 49**

*Curvas fuerza-desplazamiento para los tres espesores de muretes estudiados, superpuestas*



Siendo:

- Test\_290: Curva representativa de los ensayos experimentales de los muretes de mampostería M290-01, M290-02 y M290-03.
- Test\_450: Curva representativa de los ensayos experimentales de los muretes de mampostería M450-01, M450-02 y M450-03.
- Test\_610: Curva representativa de los ensayos experimentales de los muretes de mampostería M610-01, M610-02 y M610-03.

En la Figura 48 se observa una similitud de los ciclos histeréticos entre los muretes de mampostería M450 y M610; sin embargo, los ciclos histeréticos de los muretes M290 se diferencian con estos últimos. De igual manera se observan estas diferencias en la respuesta en término de capacidad de carga última, donde el incremento del M450 respecto al M290 es aproximadamente del 120% y el incremento de M610 respecto al M450 es de solamente el 30%. Dicho en otros términos para un aumento del espesor del 55% (entre el M290 y el

M450) la carga última se incrementó más del doble mientras que para un incremento de espesor del 35% (entre el M450 y el M610) la carga última sólo se incrementó un 30%, lo que indica nuevamente que no existe una relación directa entre el espesor del murete y la carga última obtenida.

### 3.1. Otros parámetros de las respuestas experimentales

Para evaluar el comportamiento experimental de los muretes de mampostería bajo otros parámetros de respuestas se realizaron análisis comparativos de otros parámetros con el objeto de encontrar tendencias que estuviesen relacionadas con el espesor de los muretes estudiados.

#### 3.1.1 Degradación de rigidez

La degradación de rigidez de un murete de mampostería sujeto a cargas laterales cíclicas en su plano depende del nivel de daño que experimenta durante su respuesta cíclica. Con el propósito de evaluar la degradación de rigidez de los muretes hasta el nivel de deformación que le corresponde a la fuerza máxima, se obtiene la relación de degradación en función de la deriva o distorsión medida  $\Delta$ , como se representa en la Figura 50. Siguiendo los lineamientos de Tomazevic M. (1999), la rigidez efectiva fue determinada por la ecuación 4.5.

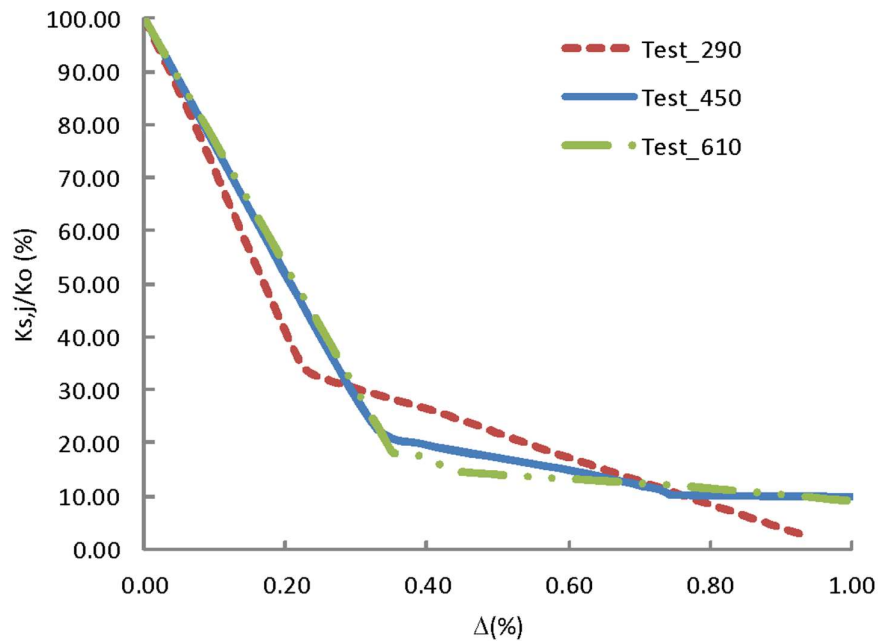
$$K_{s,i} = \frac{\Delta F}{\Delta D} \quad \text{Ec. 4.5}$$

Donde,

- $K_{s,i}$  = Rigidez efectiva, rigidez secante.
- $K_o$  = Rigidez inicial o rigidez en rango elástico.
- $\Delta F$  = Diferencia entre la fuerza máxima y mínima del ciclo de carga.
- $\Delta D$  = Diferencia entre la deformación máxima y mínima del ciclo de carga.
- $\Delta$  = Distorsión o deriva.

**Figura 50**

*Variación de la Degradación de Rigidez en función de la distorsión medida, para los tres espesores diferentes de los muretes de mampostería*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

La distorsión medida  $\Delta$  se obtiene entre el cociente del desplazamiento horizontal obtenido dividido la altura del murete de mampostería, esto se determina para cada ciclo de carga en la rama positiva.

La Figura 50 muestra que la degradación de rigidez de los muretes de mampostería M290 varía en relación a los muretes de mampostería M450 y M610, siendo estos últimos similares entre sí. Se observa que los muretes M290 degradan su rigidez a valores menores de distorsiones en relación con el M450 o el M610 y que, alcanzado dicho punto, la velocidad de degradación es mayor para el M290, atento a que la pendiente del segundo tramo del diagrama es mayor que la del M450 o M610. No se observan diferencias importantes en el proceso de degradación para los muretes M450 y M610, los cuales comienzan su degradación a valores mayores de distorsiones y la velocidad de degradación es menor que la de los M290.

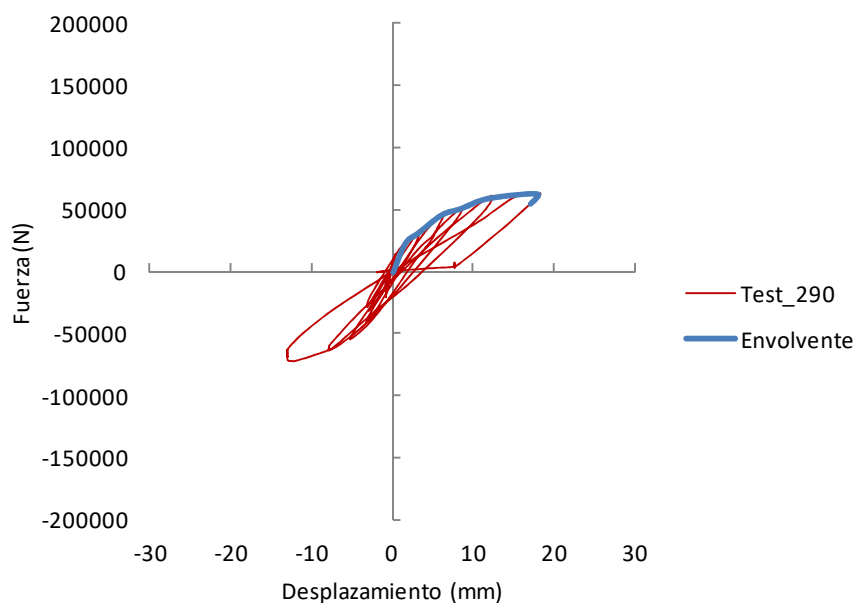
El resultado obtenido puede ser una propiedad importante de los muros con espesores grandes cuando están sujetos a acciones sísmicas y las mismas dependen de la duración del mismo.

### 3.1.2. Resistencia al Corte

Se evaluó la resistencia al corte de los muretes de mampostería ensayados utilizando la relación entre la tensión tangencial de corte  $v_n$  y la raíz cuadrada de la resistencia a compresión  $f'_m$ . Según Matsumura A. (1988) la representación a partir de la relación mencionada tiene en cuenta el estado de carga vertical de compresión y el estado de carga de corte en el plano del murete de mampostería, situación representativa de las acciones sísmicas que podrían soportar estas estructuras. La relación entre la tensión tangencial de corte y la resistencia a compresión se define como  $(v_n / \sqrt{f'_m})$  y se correlaciona con el desplazamiento superior lateral de los muretes de mampostería. El valor adoptado de  $f'_m$  es de 0.15 MPa. Para graficar estas relaciones, se debe obtener previamente el tramo inicial de la curva envolvente de los ciclos histeréticos a partir de los resultados experimentales, que relaciona la fuerza y el desplazamiento horizontal de los muretes. En las Figuras 51, 52 y 53 se muestran las curvas envolventes para cada uno de los ensayos realizados sobre los muretes.

**Figura 51**

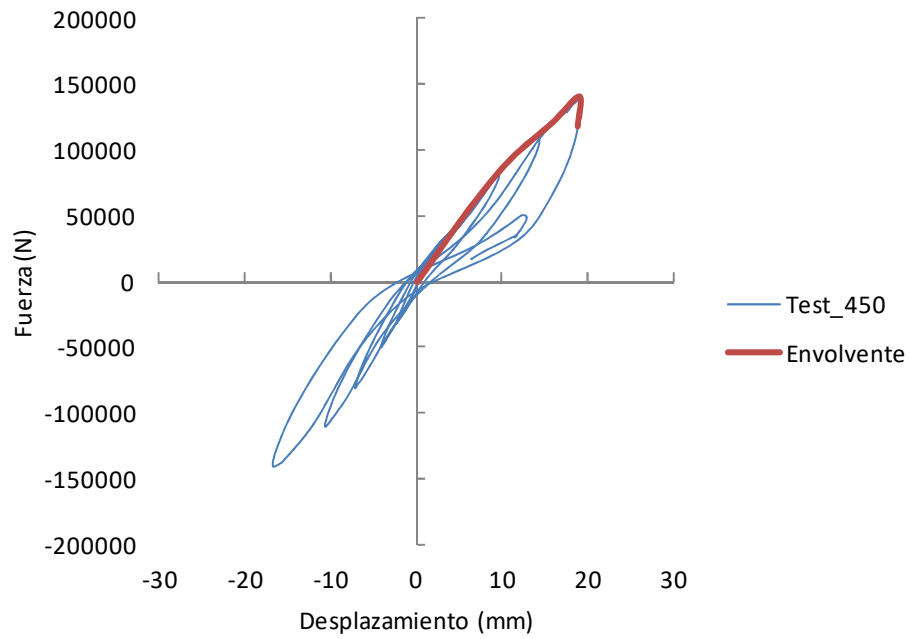
*Curva envolvente para el murete de espesor 290 mm*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

**Figura 52**

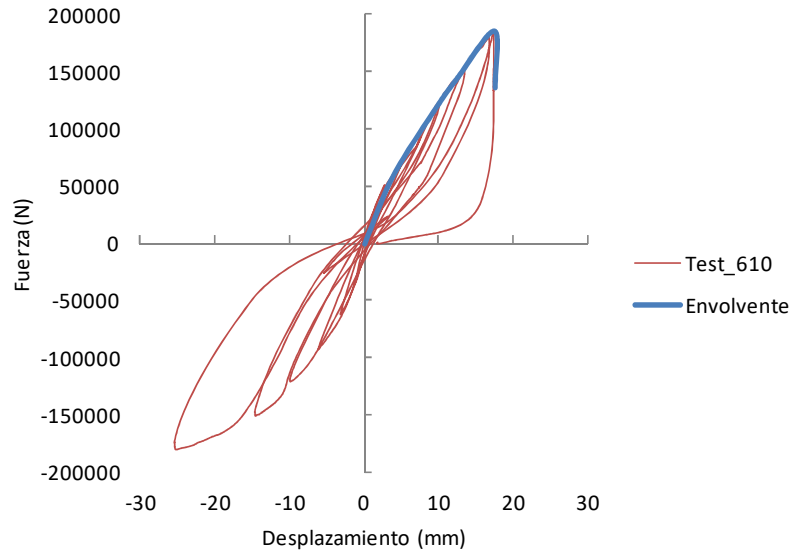
*Curva envolvente para el murete de espesor 450 mm*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

**Figura 53**

*Curva envolvente para el murete de espesor 610 mm*

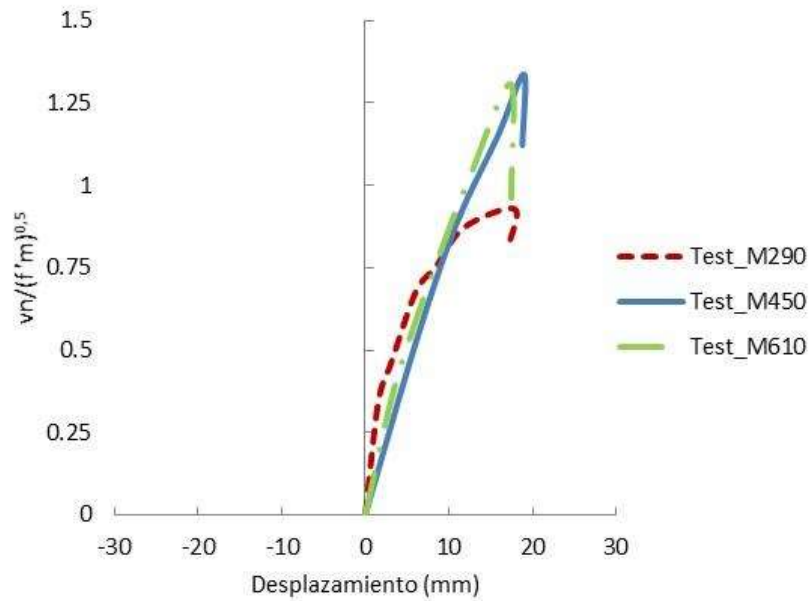


*Nota.* Fuente: elaboración propia.

A continuación se grafica la relación entre la tensión tangencial de corte y la resistencia a compresión definida como  $(v_n / \sqrt{f'_m})$  y el desplazamiento superior lateral. En la Figura 54 se presentan las curvas que relacionan la resistencia al corte con el desplazamiento lateral superior de los muretes de mampostería.

**Figura 54**

*Resistencia al Corte para los tres espesores diferentes de los muretes ensayados*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

La Figura 54 muestra la diferencia de la resistencia al corte de los muros de mampostería M290 en relación con los M450 y M610. La resistencia al corte de los muretes M290 son menores que los M450 y M610. La resistencia al corte entre el M450 y el M610 no varía sustancialmente indicando que un aumento del espesor no implica un aumento de la resistencia al corte. Otro resultado que indica la Figura 54 es que la resistencia máxima de corte se obtiene para el mismo nivel de desplazamiento, independientemente del espesor del murete.

### 3.1.3. Ductilidad experimental

En esta sección se determinaron valores de ductilidad experimental con el objeto de observar diferencias entre los distintos muretes ensayados, de ninguna manera tiene la finalidad de contradecir el comportamiento frágil que diferentes autores han definido para la mampostería. La determinación de la ductilidad experimental es otro parámetro que puede ser útil para mostrar la respuesta de un murete con un espesor determinado respecto de los otros muretes de espesores diferentes.

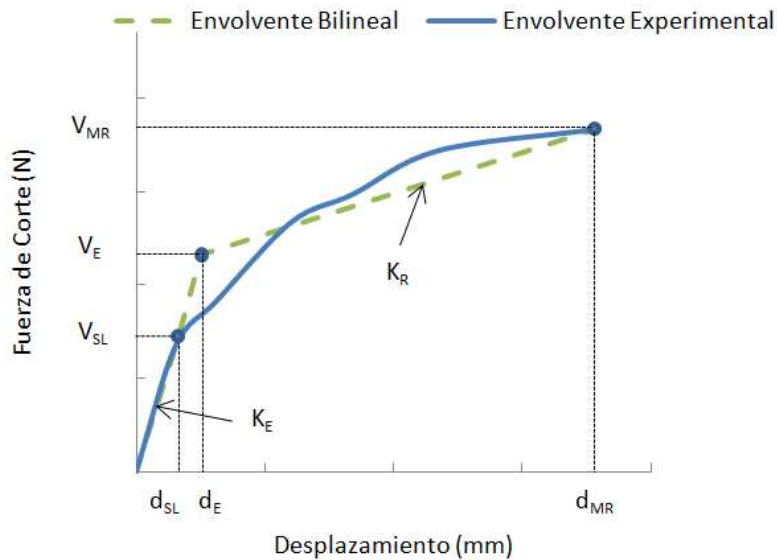
La ductilidad se define como el parámetro que mide la capacidad de un elemento para resistir repetidos ciclos alternados de deformación inelástica sin una degradación significativa de la resistencia. El enfoque usado para estimar la ductilidad es a través de la curva envolvente bilineal que se obtiene de la curva experimental fuerza-desplazamiento. Según Lüders e Hidalgo (1987) la ductilidad de desplazamiento ( $\mu_{MR}$ ) está proporcionada por la ecuación 4.6, donde se relaciona el desplazamiento máximo ( $d_{MR}$ ), asociado al punto de máxima fuerza lateral de corte, y el desplazamiento elástico idealizado ( $d_E$ ).

$$\mu_{MR} = \frac{d_{MR}}{d_E} \quad \text{Ec. 4.6}$$

En la Figura 55 se observa de manera conceptual la construcción de la curva bilineal para obtener la ductilidad de desplazamiento, (Lüders e Hidalgo, 1987).

**Figura 55**

*Metodología para construir la curva envolvente bilineal (Lüders e Hidalgo, 1987)*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

Para construir la envolvente bilineal que muestra en la Figura 55, deben trazarse dos segmentos lineales, el primer segmento o recta lineal se logra uniendo el origen de la curva hasta un punto donde se estima que el comportamiento elástico finaliza ( $V_{SL}$ ,  $d_{SL}$ ). Este punto corresponde al nivel de desplazamiento de la primera fisura en la superficie del muro, la cual se detecta visualmente y también donde se observa un notable cambio en la pendiente de la



tangente de la curva envolvente. Con este criterio, la rigidez secante experimental ( $K_E$ ) se calcula como la relación entre  $V_{SL}$  y  $d_{SL}$ . Para el segundo segmento de la idealización bilineal se elige una línea recta con una pendiente ( $K_R$ ), donde dicha recta formada por el punto de máxima fuerza ( $V_{MR}$ ;  $d_{MR}$ ) y con una pendiente tal que la cantidad de energía debajo de la envolvente bilineal fuese equivalente a la energía debajo de la envolvente experimental.

Siguiendo el criterio explicado, se localizaron los puntos ( $V_E$ ;  $d_E$ ) donde los dos segmentos o rectas se cruzan y donde se presume que el comportamiento elástico ha finalizado.

Primero se determina la rigidez elástica teórica ( $K_{E,teo}$ ) para cada uno de los muretes, utilizando la teoría de flexión de vigas, según se indica en la ecuación 4.7.

$$K_{E,teo} = \frac{1}{\frac{h_{ef}^3}{3 E_m I_n} + \frac{1.2 h_{ef}}{G_m A_{nv}}} \quad Ec. 4.7$$

Donde:

- $K_{E,teo}$  = rigidez elástica teórica, en N/mm.
- $h_{ef}$  = longitud del murete efectiva, en mm.
- $E_m$  = módulo de elasticidad longitudinal, en MPa.
- $G_m$  = módulo de elasticidad transversal, en MPa.
- $I_n$  = momento de inercia murete de mampostería, en mm<sup>4</sup>.
- $A_{nv}$  = área de corte murete de mampostería, en mm<sup>2</sup>.

La ecuación 4.7 es válida para una condición de vínculo de tipo columna empotrada en un extremo y libre en otro extremo, sin embargo los muretes ensayados presentan una configuración diferente debido al sistema de aplicación de cargas verticales, considerando que la celda de carga vertical restringe de forma parcial la rotación superior del murete. Por lo que se ha considerado como altura efectiva  $h_{ef}$  del murete menor a la altura total del mismo, siendo el valor de  $h_{ef}$  equivalente a 400 mm.

En la Tabla 12 se resumen los resultados obtenidos de la idealización de la curva bilineal para los diferentes muretes ensayados.

**Tabla 12**

*Resumen de resultados obtenidos para la idealización de la curva bilineal*

ID	$V_{SL}$	$d_{SL}$	$V_E$	$d_E$	$V_{MR}$	$d_{MR}$	$K_{E,exp}$	$K_{R,exp}$	$K_{E,teo}$	$\mu_{MR}$
	(N)	(mm)	(N)	(mm)	(N)	(mm)	(N/mm)	(N/mm)	(N/mm)	
M290	23000	1.54	39473	2.50	62500	17.85	15789	1500	13702	7.1
M450	78000	9.12	100000	11.74	139900	19.01	8520	5487	21262	1.6
M610	69000	5.20	118298	9.00	185600	17.43	13144	7984	28822	1.9

*Nota.* Fuente: elaboración propia.

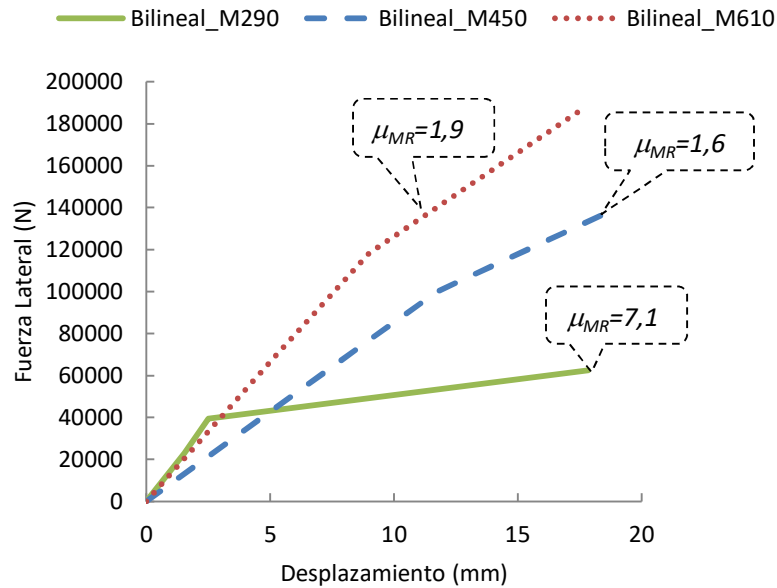
Donde:

- $K_{E,teo}$  = rigidez elástica teórica, en N/mm.
- $K_{E,exp}$  = rigidez elástica experimental, en N/mm.
- $K_{R,exp}$  = rigidez inelástica experimental, en N/mm.
- $\mu_{MR}$  = ductilidad experimental.

En la Figura 56 se presentan las curvas bilineales obtenidas para los diferentes muros de mampostería analizados.

**Figura 56**

*Ductilidad Experimental. Envolvente bilineal para los diferentes muretes de mampostería ensayados*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos en la Tabla 12 indican que la ductilidad experimental de los muretes M290 son aproximadamente 450% mayores que la de los M450 y M610. Luego, la Figura 56 indica que la pendiente de la recta que define el comportamiento inelástico del M290 tiene diferencias importantes en relación a los muretes de mayores espesores, fundamentalmente, con relación a la pendiente de la recta que define el comportamiento elástico; es decir, en el M290 es posible visualizar un punto (aproximadamente 2.50 mm) donde el murete entra en rango inelástico. Por otro lado, y con relación al mismo espesor (M290), se observa que el rango inelástico del murete se desarrolla con tendencia creciente.

Los muretes con espesores mayores (M450 y M610) no muestran claramente el punto en el cual comienzan a fluir y como tal no está claramente diferenciado el comportamiento elástico del inelástico. Si bien fue posible encontrar un punto donde la gráfica cambia de pendiente no es posible afirmar que los muretes hayan entrado en fluencia dado que posiblemente hayan alcanzado la carga máxima de rotura en rango elástico.

### 3.1.4. Disipación de energía

En función de la idealización bilineal obtenida para cada murete de mampostería (Figura 56) se evaluó la capacidad de disipación de energía para el nivel máximo de carga. La energía disipada ( $E_T$ ) se midió a partir del cálculo del área que encierra los ciclos histeréticos. En la Tabla 13 se muestran los valores obtenidos de energía disipada para cada murete ensayado.

**Tabla 13**

*Energía disipada para cada murete de mampostería*

ID	M290	M450	M610
$E_T$ (Nmm)	831982	1459198	1813274

*Nota.* Fuente: elaboración propia.

La disipación de energía crece en la medida que aumenta el espesor y, al mismo tiempo, se observa que la cantidad de energía disipada acompaña de forma proporcional al incremento del espesor de los muretes ensayados.

### 3.1.5. Capacidad al corte según la reglamentación

Se evaluaron diferentes capacidades de carga utilizando distintos reglamentos con el objeto de evaluar cómo ha evolucionado este parámetro con el aumento del espesor de los muretes. Los muretes de mampostería ensayados no poseen encadenados como lo establecen los diferentes reglamentos, sin embargo el objetivo de este análisis es obtener una referencia de la respuesta experimental respecto a las reglamentaciones vigentes.

No se realizaron ensayos para evaluar la resistencia a corte de los muretes de mampostería. Los valores adoptados de  $f'_v$  y  $f_v$  fueron referenciales con el objetivo de analizar la respuesta para los diferentes reglamentos mencionados. Para el valor de  $f_v$  fijado corresponde el equivalente de 37 PSI de tensión de corte mínimo indicado en el reglamento ACI530-2011.

Según el reglamento INPRES CIRSOC 103-III (IC103-III, 2018), la capacidad al corte se obtiene con la resistencia nominal de corte del muro  $V_n$ . En la ecuación 4.8 se presenta la expresión de  $V_n$ .

$$V_n = (f'_v + 0.40 f_o)A_g \leq 2.00 f'_v A_g \quad \text{Ec. 4.8}$$

Donde:

- $V_n$  = resistencia nominal de corte, en N.
- $f'_v$  = resistencia especificada al corte de la mampostería, en MPa.
- $f_o$  = tensión media de compresión que actúa sobre el muro, en MPa.
- $A_g$  = área bruta de la sección horizontal del muro, en mm<sup>2</sup>.

En la Tabla 14 se resumen los valores obtenidos.

**Tabla 14**

*Capacidad de carga al corte de los muretes de mampostería. (IC103-III-2018)*

ID	$f'_v$	$f_o$	$V_n$
	(MPa)	(MPa)	(N)
M290	0.2	0.15	45240
M450	0.2	0.15	70200
M610	0.2	0.15	95160

*Nota.* Fuente: elaboración propia.

De igual modo se analizó la capacidad de carga de corte según el reglamento Código de Construcciones Sismorresistentes de la Provincia de Mendoza (CCSR, 1987), en el cual se evalúa la capacidad de carga al corte  $T_u$  en función de la tensión de referencia del mampuesto utilizado y de la calidad del mortero  $\tau_o$ , y del esfuerzo normal  $N_u$  que actúa simultáneamente sobre el muro de mampostería. En la ecuación 4.9 se presenta la expresión de  $T_u$ .

$$T_u = \tau_o e l + 0.3 N_u \leq 2 \tau_o e l \quad \text{Ec. 4.9}$$

Donde:

- $T_u$  = Capacidad a corte de muros de mampostería, en N.
- $\tau_o$  = Tensión de corte de referencia, en MPa.
- $e$  = espesor del muro, en mm.
- $l$  = longitud del muro, en mm.
- $N_u$  = Esfuerzo normal sobre el muro, en N.

En la Tabla 15 se resumen los valores obtenidos.

**Tabla 15**

*Capacidad de carga al corte de los muretes de mampostería (CCSR, 1987)*

ID	$\tau_o$	$N_u$	$T_u$
	(MPa)	(N)	(N)
M290	0.2	26100	42630
M450	0.2	40500	66150
M610	0.2	54900	89670

*Nota.* Fuente: elaboración propia.

Análogamente, se analizó la resistencia al corte de los muretes de mampostería con el reglamento *Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures* (TMS402-ACI530-ASCE5, 2011), donde se indica que la resistencia al corte  $V$  de un muro de mampostería se evalúa en función de la tensión de corte de la mampostería y de las características geométricas del muro de mampostería. En la ecuación 4.10 se presenta la ecuación de resistencia al corte  $V$ .

$$V = \frac{f_v I_n b}{Q} \quad \text{Ec. 4.10}$$

Donde:

- $V$  = resistencia al corte en el plano del muro de mampostería, en N.
- $f_v$  = tensión de corte del muro de mampostería, en MPa.
- $I_n$  = momento de inercia del área de corte, en  $\text{mm}^4$ .
- $b$  = espesor o ancho de muro de mampostería, en mm.
- $Q$  = momento estático o momento de primer orden del área de corte, en  $\text{mm}^3$ .

En la Tabla 16 se resumen los valores obtenidos.

**Tabla 16**

*Resistencia al corte (TMS402-ACI530-ASCE5, 2011)*

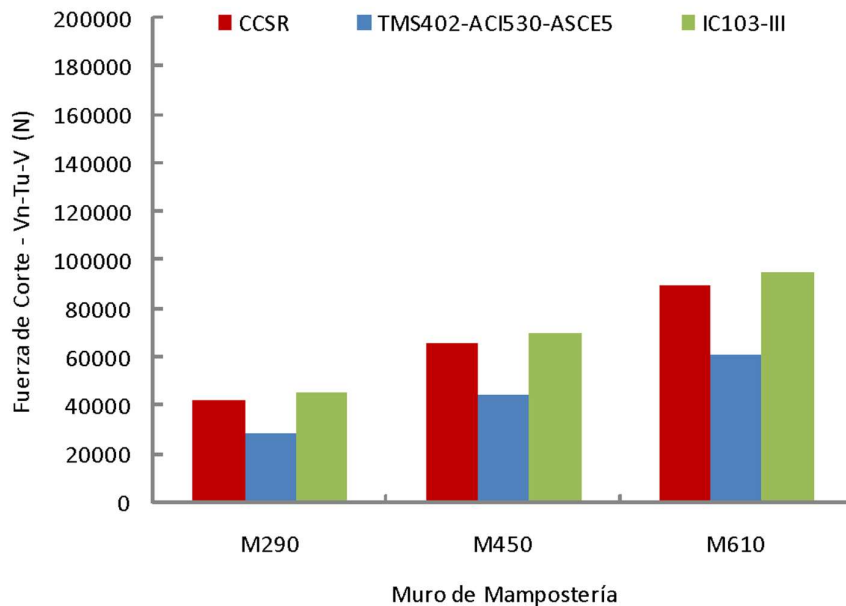
ID	$f_v$	$I_n$	$Q$	$b$	$V$
	(MPa)	(mm <sup>4</sup> )	(mm <sup>3</sup> )	(mm)	(N)
M290	0.25	5220000000	13050000	290	29000
M450	0.25	8100000000	20250000	450	45000
M610	0.25	10980000000	27450000	610	61000

Nota. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 57 se muestran los resultados obtenidos de la capacidad de carga al corte en el plano de los muretes de mampostería, comparando los mismos con los diferentes reglamentos mencionados precedentemente.

**Figura 57**

*Capacidad al Corte de los muros de mampostería, para los tres espesores diferentes y para los reglamentos analizados*



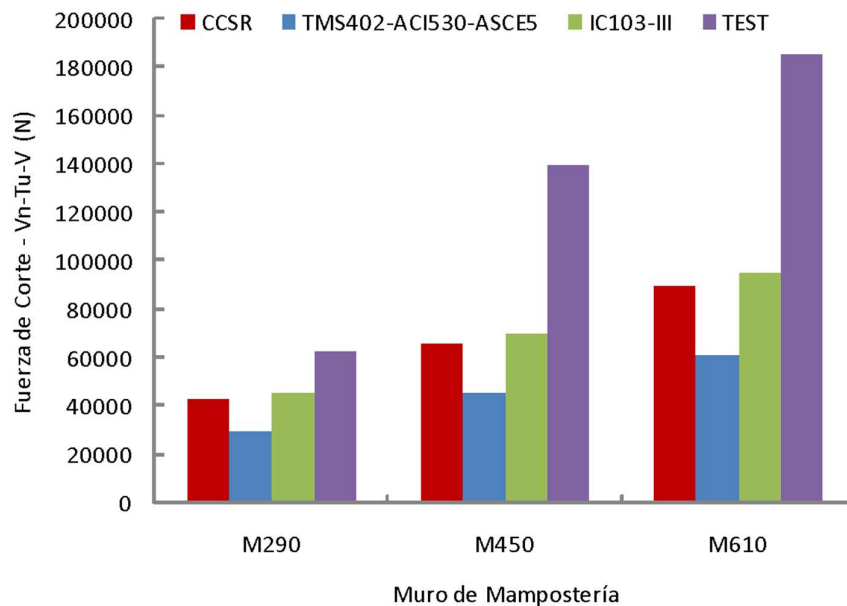
Nota. Fuente: elaboración propia.

Los resultados mostrados en la Figura 57 marcan diferencias en la capacidad de carga al corte entre los distintos reglamentos indicados, a su vez estas diferencias se mantienen con el incremento del espesor de los muretes de mampostería. También se muestra en la Figura 57 que el aumento de la capacidad de carga al corte acompaña de forma lineal al incremento del espesor de los muretes de mampostería.

Si en la Figura 57 se incluyen los resultados de la fuerza de corte último alcanzado en los ensayos experimentales de cada murete de mampostería, se observa un aumento en la capacidad de carga al corte en función del incremento del espesor, muy diferente a lo obtenido con los reglamentos mencionados. En la Figura 58 se presentan los resultados de la capacidad de carga al corte de los muretes de mampostería evaluados para los diferentes reglamentos y para los ensayos experimentales.

**Figura 58**

*Capacidad al Corte de los muros de mampostería, comparando los resultados de los reglamentos con los ensayos experimentales*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

La Figura 58 indica que a medida que se aumenta el espesor total de los muretes de mampostería, la evolución de la capacidad de carga al corte reflejado en los ensayos



experimentales es sensiblemente mayor a la evolución que presenta con la valoración de los reglamentos. Por otro lado, la diferencia de la capacidad de carga entre el ensayo experimental y los reglamentos es mínimo para el caso de los muretes de mampostería M290; sin embargo, esta diferencia es notablemente mayor para los muretes de mampostería M450 y M610 respectivamente.

Si se evalúan los incrementos de los diferentes parámetros estudiados, puede observarse cómo varían cada uno de ellos en función del espesor del murete de mampostería. Adicionalmente, se cuantificó la cantidad de área de junta vertical de mortero y cómo evoluciona con el incremento de los espesores de los muretes de mampostería. El área de junta vertical se cuantificó considerando el plano de planta para cada murete. Todos estos parámetros fueron comparados tomando como base los correspondientes al murete de mampostería M290.

En la Tabla 17 se presentan los incrementos tomando como base el murete de mampostería M290.

**Tabla 17**

*Fuerza de corte, espesor y área de junta vertical de los muretes de mampostería*

ID	INCREMENTOS					
	Fuerza de Corte <i>CCSR</i> <i>1987</i>	Fuerza de Corte <i>ACI530</i> <i>2011</i>	Fuerza de Corte <i>IC103-III</i> <i>2018</i>	Fuerza de Corte <i>Ensayo</i> <i>Experimental</i>	Espesor Murete de Mampostería	Área Junta Vertical
M290	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
M450	1.55	1.55	1.55	2.24	1.55	1.86
M610	2.10	2.10	2.10	2.97	2.10	2.93

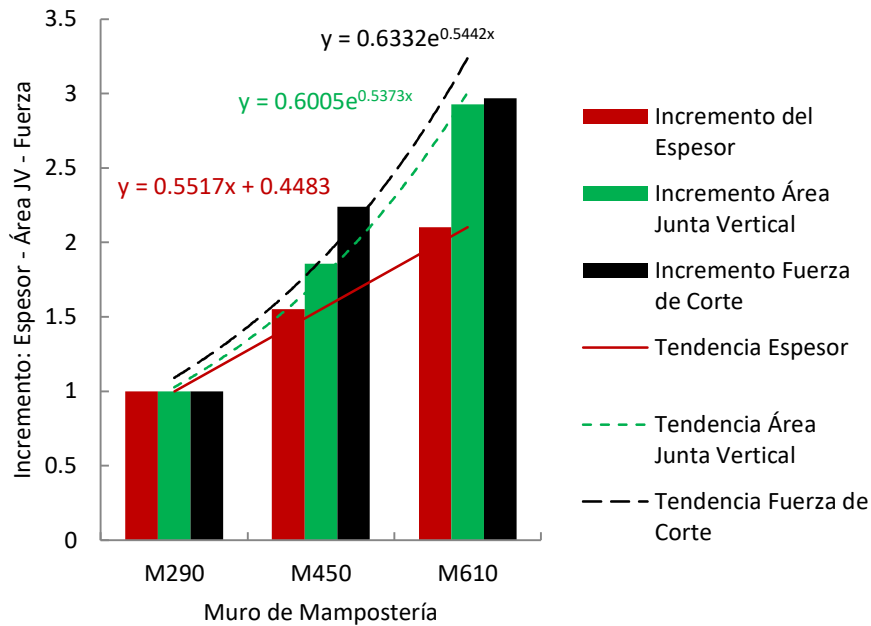
*Nota.* Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 17 se observa que los incrementos de la fuerza de corte para los diferentes reglamentos crecen linealmente con el aumento del espesor del muro de mampostería; sin embargo, los resultados experimentales no acompañan esa linealidad, tendiendo a un crecimiento exponencial de la fuerza de corte. Por otro lado, se compararon los resultados del

área de la junta vertical y la fuerza de corte experimental en función de los espesores de los muretes de mampostería. Los resultados indican un crecimiento no lineal del área de junta vertical que poseen los muretes de mampostería a medida que aumenta el espesor total del mismo. La Figura 59 muestra las relaciones de tendencia que presentan la fuerza de corte experimental, el área de junta vertical y el espesor del murete de mampostería.

**Figura 59**

*Tendencia de incremento del espesor, área de junta vertical y fuerza de corte en función del espesor del murete de mampostería*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

En la Figura 59 se observa que la tendencia de crecimiento de la fuerza de corte experimental no concuerda con la tendencia de crecimiento del espesor del murete de mampostería. Sin embargo, la tendencia de crecimiento del área de la junta vertical de los muretes de mampostería es similar a la tendencia de crecimiento de la fuerza de corte experimental. La figura 59 muestra una correlación significativa entre la tendencia incremental de la fuerza de corte y la tendencia incremental del área de la junta vertical.

## **CAPÍTULO IV**

### **MODELOS NUMÉRICOS. VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN**

#### **1. Introducción**

En función de los resultados obtenidos por distintos autores (Lourenço et al., 1995; Page, 1981; López et al., 1998; Roca et al., 2010; Aref et al., 2013; Sánchez, 2014), donde concluyen: i) que para el estudio de muros de mampostería no reforzada de dimensiones reducidas es conveniente el uso de la micromodelación ii) que la respuesta estructural depende de las características elásticas e inelásticas de los materiales iii) que las variables del modelo de plasticidad utilizado para representar numéricamente el comportamiento de la mampostería son sensibles y conducen a variadas respuestas estructurales, en el trabajo de la presente tesis se realiza un análisis de los muretes de mampostería no reforzada contemplando todas las variables mencionadas.

Por lo tanto, el presente capítulo tiene como objeto determinar la respuesta estructural de los muretes a través de una simulación numérica, proponiendo una micromodelación de los muretes ensayados experimentalmente y descriptos en los capítulos precedentes. Se propone un determinado criterio de plasticidad, atento a que se cuenta con la información del comportamiento mecánico de los materiales ladrillos y morteros, que componen los muretes.

Como herramienta de trabajo se utiliza el código comercial ABAQUS (2003), con el cual se ha generado un modelo de elementos finitos que permite representar el comportamiento obtenido en los ensayos experimentales. Para ello, se proponen parámetros que calibran con buena aproximación las respuestas estructurales experimentales.

#### **1.1 Modelo de Plasticidad**

Las deformaciones irreversibles que resultan de mecanismos de deslizamiento o de dislocaciones a una escala atómica y que, por lo tanto, conducen a cambios dimensionales permanentes, se conocen como deformaciones plásticas. Tales deformaciones ocurren para valores de tensión por encima de un valor umbral conocido como límite elástico o tensión de fluencia. En el ámbito de la teoría de la plasticidad, la cuestión fundamental consiste en la formulación matemática de las relaciones tensiones-deformaciones adecuadas para la

descripción de las deformaciones plásticas y en adoptar un criterio de fluencia apropiado para predecir el comienzo del comportamiento plástico (ABAQUS, 2003). La formulación matemática de las relaciones tensiones-deformaciones se realiza a través de modelos de plasticidad.

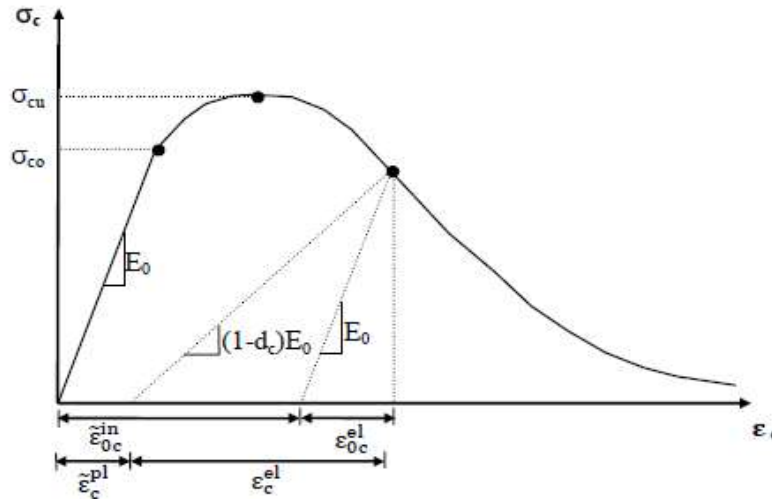
#### 1.1.1. Modelo Concrete Damaged Plasticity CDP

El modelo *CDP* forma parte de la biblioteca de materiales base que posee el programa comercial ABAQUS. El modelo *CDP* tiene una aceptable capacidad para modelar hormigón y otros materiales cuasi-frágiles en todos los tipos de estructuras. Utiliza conceptos de elasticidad de daño isotrópica en combinación con la tracción isotrópica y plasticidad compresiva para representar el comportamiento inelástico del hormigón. El modelo tiene en cuenta la degradación de la rigidez elástica inducida por el esfuerzo plástico tanto en tracción como en compresión y explica adecuadamente los efectos de recuperación de rigidez bajo carga cíclica.

Es necesario definir el comportamiento en el plano de tensión-deformación del material en compresión uniaxial fuera del rango elástico. Los datos de tensiones de compresión se presentan como una función de la deformación inelástica y la curva de tensión-deformación se puede definir más allá de la tensión última, en el régimen de deformación de ablandamiento. Los datos de endurecimiento pueden expresarse en función de una deformación inelástica, en lugar de la deformación plástica. En la Figura 60 se observa la relación tensión versus deformación para una carga de compresión.

**Figura 60**

*Modelo de plasticidad CDP. Relación tensión-deformación para una carga de compresión (ABAQUS, 2003)*



La deformación inelástica de compresión se define como la deformación total menos la deformación elástica correspondiente al material no dañado, según se presenta en la ecuación 5.1.

$$\varepsilon^{in} = \varepsilon - \varepsilon_0^{el} \quad Ec. 5.1$$

Donde:

- $\varepsilon^{in}$  = deformación inelástica.
- $\varepsilon$  = deformación total.
- $\varepsilon_0^{el}$  = deformación elástica.

El código comercial ABAQUS convierte automáticamente los valores de deformación inelástica a los valores de deformación plástica mediante la ecuación 5.2.

$$\varepsilon^{pl} = \varepsilon^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad Ec. 5.2$$

Donde:

- $\varepsilon^{pl}$  = deformación plástica.
- $\varepsilon^{in}$  = deformación inelástica.
- $d_c$  = variable de degradación de rigidez.
- $E_0$  = módulo elasticidad inicial.

- $\sigma_c$  = tensión de compresión.

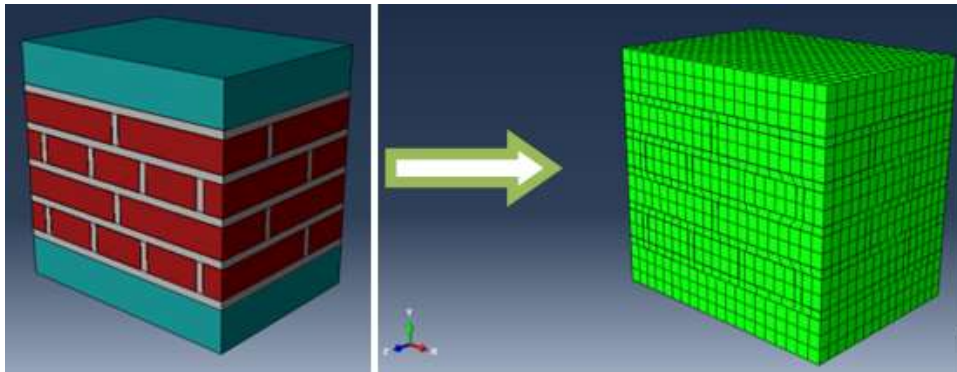
La degradación de la rigidez elástica está caracterizada por la variable de daño  $d_c$ , que es función de la deformación plástica  $\varepsilon^{pl}$ . La variable de daño  $d_c$  puede tomar valores desde cero hasta uno, donde el valor cero representa el material no dañado y el valor uno representa la pérdida total de la tensión.

## 2. Modelo de elementos finitos utilizado

Para simular el murete de mampostería se utilizaron elementos sólidos deformables en tres dimensiones del tipo C3D8R, el cual es un elemento estándar de ABAQUS con 8 nodos de contacto, integración reducida y control de *hourglass*. Para la micromodelación, se utilizaron elementos de interacción para simular las juntas de contacto entre los ladrillos y el mortero. Los contactos entre superficies se definieron con la opción “*surface-surface*”, especificando superficies maestras (*master*) y esclavas (*slave*), cuya característica es que la superficie maestra no puede ser penetrada por la superficie esclava. La interacción de las superficies fue definida para un comportamiento longitudinal y transversal. Para el primero se especificó un comportamiento de contacto rígido o duro (*Hard Contact*) y para el segundo, un comportamiento friccional con penalización de fricción según el coeficiente de fricción definido. En la Figura 61 se muestra un esquema general del modelo de elementos finitos utilizado para unos de los muretes de mampostería.

**Figura 61**

*Modelo de elementos finitos utilizados en la plataforma ABAQUS para uno de los muretes de mampostería*



*Nota: Fuente Elaboración Propias*

### **2.1 Modelo *Concrete Damaged Plasticity CDP* en ABAQUS**

El modelo de plasticidad utilizado y seleccionado de la biblioteca de materiales que posee el programa ABAQUS requiere la especificación de diferentes características mecánicas de los materiales, algunas de ellas fueron determinadas a partir de ensayos experimentales ejecutados sobre los ladrillos y morteros, otras características fueron definidas con valores predefinidos por el programa computacional. En las siguientes tablas se indican los valores adoptados para el modelo. Las características del ladrillo utilizadas en el modelo *CDP* se resumen en las Tablas 18, 19 y 20 respectivamente.

Las propiedades de los materiales utilizados para el modelo numérico fueron determinadas por los ensayos a compresión realizados sobre los ladrillos y los morteros indicados en la sección 3.2; sin embargo, otras propiedades de los materiales fueron adoptadas de manera referencial. En Tabla 18 se adoptó el valor del coeficiente de Poisson, en Tabla 19 se muestran los valores adoptados y en Tabla 20 se muestran los valores obtenidos a partir del ensayo a compresión del ladrillo. De manera análoga, se definieron los valores indicados en Tabla 21, 22 y 23. El valor del módulo de elasticidad  $E$  para ladrillo y mortero se obtuvo del ensayo a compresión respectivamente.

**Tabla 18**

*Características elásticas del ladrillo [N-mm]*

Ladrillo		
Mass	E	Coefficiente
Density		Poisson
0.0000143	668	0.15

*Nota.* Fuente: elaboración propia.

**Tabla 19**

*Características CDP del ladrillo [N-mm]*

Ladrillo				
Dilation Angle	Eccen- tricity	$f_{b_0}/f_{c_0}$	k	Viscosity Parameter
7	0.1	1.16	0.66	0.0005

*Nota.* Fuente: elaboración propia.

**Tabla 20**

*Características no lineales del ladrillo [N-mm]*

Ladrillo		
Comportamiento a Compresión		
Tensión $\sigma_c$	Deformación Inelástica	Variable de Daño



	$\varepsilon^{in}$	$d_c$
10.000	0.00000	0
10.664	0.00091	0
11.092	0.00153	0
11.653	0.00251	0
11.725	0.00369	0
11.744	0.00535	0
11.994	0.00621	0
12.192	0.00776	0
12.217	0.00896	0
12.222	0.01070	0
12.225	0.01193	0
12.261	0.01372	0
12.194	0.01505	0.005
11.917	0.01722	0.028
11.694	0.01878	0.046
11.353	0.02114	0.074
11.158	0.02266	0.090
10.922	0.02486	0.109
10.772	0.02622	0.121
10.594	0.02834	0.136

10.481	0.02974	0.145
10.281	0.03188	0.162
10.164	0.03320	0.171
9.997	0.03529	0.185
9.875	0.03670	0.195
9.647	0.03889	0.213
9.481	0.04025	0.227
9.325	0.04233	0.239
9.175	0.04381	0.252
8.975	0.04596	0.268
8.889	0.04729	0.275

Nota. Fuente: elaboración propia.

Las características del mortero utilizadas en el modelo *CDP* se resumen en las Tablas 21, 22 y 23 respectivamente.

**Tabla 21**

*Características elásticas del mortero [N-mm]*

Mortero		
Mass Density	E	Coef. Poisson
0.000024	202	0.20

Nota. Fuente: elaboración propia.

**Tabla 22**

*Características CDP del mortero [N-mm]*

Mortero				
Dilation Angle	Eccentricity	$f_{b0}/f_{c0}$	k	Viscosity Parameter
7	0.1	1.16	0.66	0.0005

*Nota.* Fuente: elaboración propia.

**Tabla 23**

*Características no lineales del mortero [N-mm]*

Mortero		
Comportamiento a Compresión		
Tensión $\sigma_c$	Deformación Inelástica $\varepsilon^{in}$	Variable de Daño $d_c$
4.357	0.00000	0
4.437	0.00184	0
4.489	0.00208	0
4.536	0.00235	0
4.559	0.00273	0
4.573	0.00317	0
4.573	0.00367	0

4.568	0.00419	0.001
4.564	0.00461	0.002
4.531	0.00527	0.009
4.474	0.00605	0.022
Mortero		
Comportamiento a Compresión		
Tensión $\sigma_c$	Deformación Inelástica $\varepsilon^{in}$	Variable de Daño $d_c$
4.390	0.00697	0.040
4.296	0.00793	0.061
4.197	0.00892	0.082
4.103	0.00989	0.103
4.019	0.01080	0.121
3.910	0.01184	0.145
3.802	0.01292	0.169
3.708	0.01379	0.189
3.610	0.01477	0.211
3.483	0.01590	0.238
3.370	0.01696	0.263
3.271	0.01794	0.285

3.158	0.01900	0.309
3.064	0.01997	0.330
2.956	0.02100	0.354
2.853	0.02201	0.376
2.759	0.02297	0.397
2.660	0.02396	0.418
2.585	0.02473	0.435
2.491	0.02570	0.455
2.392	0.02669	0.477
2.303	0.02763	0.496
2.200	0.02864	0.519
2.110	0.02958	0.539
2.026	0.03050	0.557
1.932	0.03146	0.578
1.847	0.03238	0.596
1.730	0.03346	0.622
1.645	0.03438	0.640
1.575	0.03512	0.656
1.490	0.03604	0.674
1.419	0.03689	0.690
1.344	0.03776	0.706
1.288	0.03854	0.718

1.222	0.03937	0.733
1.161	0.04017	0.746
1.105	0.04095	0.758
1.039	0.04177	0.773
0.996	0.04248	0.782
0.949	0.04316	0.792
0.898	0.04392	0.804
0.851	0.04465	0.814
0.804	0.04538	0.824
0.771	0.04604	0.831

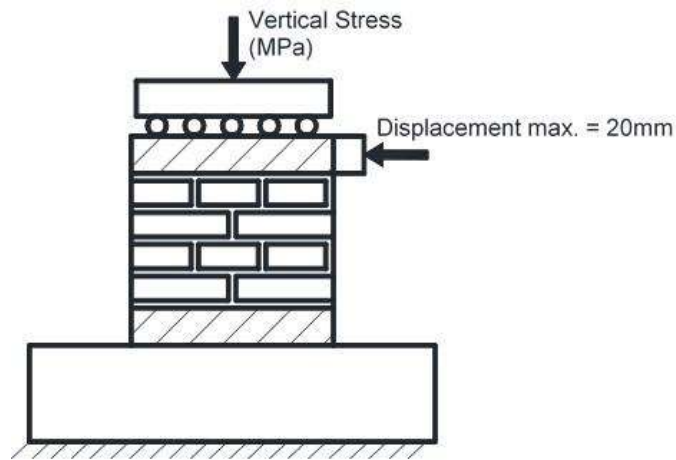
Nota. Fuente: elaboración propia.

## 2.2. Hipótesis de las condiciones de borde del modelo

El modelo de elementos finitos posee restricción en la parte inferior del murete de mampostería, en coincidencia con el cabezal inferior de hormigón armado, en las tres direcciones posibles de desplazamientos, en la parte superior es totalmente libre. Se definieron dos acciones, la primera es la aplicación de una carga vertical constante y la segunda acción una carga horizontal variable, incremental para ciclos de carga con incrementos de  $10000\text{ N}$  hasta alcanzar el desplazamiento máximo horizontal de 20 mm, el cual es correspondiente a los valores alcanzados en los ensayos estructurales de los muretes de mampostería. En la Figura 62 se muestran las condiciones de borde impuestas al modelo numérico y de manera esquemática las cargas aplicadas.

**Figura 62**

*Condiciones de borde y esquema de cargas aplicadas al murete*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 24 se presentan las características geométricas y plan de cargas combinadas para cada modelo numérico procesado.

**Tabla 24**

*Resumen de datos de los modelos numéricos procesados*

Modelo	Longitud (mm)	Altura (mm)	Espesor (mm)	Fuerza Vertical (N)	Tensión Vertical (MPa)	Fuerza Horizontal (N)
Model_290	600	630	290	26100	0.15	Ciclos de carga de 10000 N hasta alcanzar la rotura.
Model_450	600	630	450	40500		
Model_610	600	630	610	54900		

*Nota.* Fuente: elaboración propia.

### 3. Resultados del modelo de elementos finitos

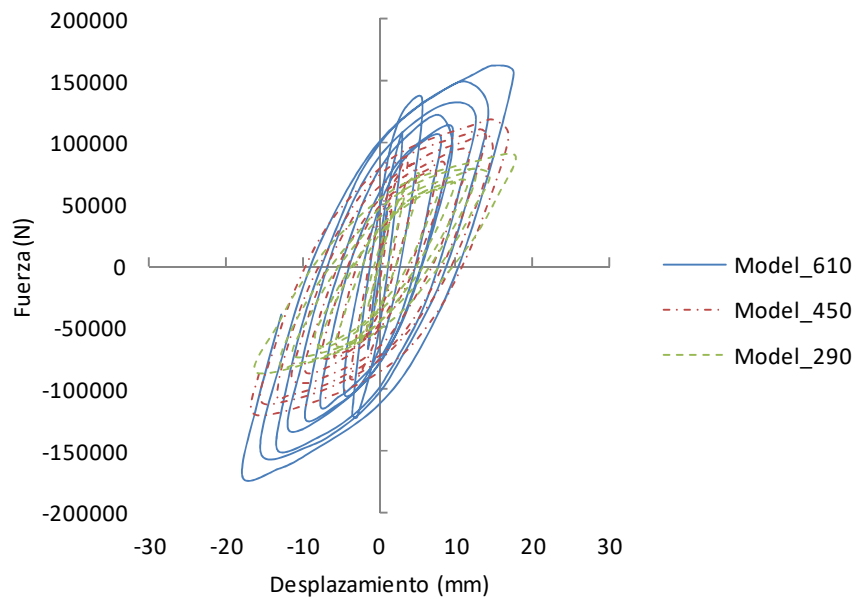
#### 3.1 . Respuestas obtenidas del modelo de elementos finitos

Las respuestas de los modelos de muretes se evaluaron en términos de curvas de desplazamientos horizontales versus fuerzas horizontales. Los resultados se obtuvieron para las características de ladrillos y morteros, cuyas características se definieron precedentemente. Dichos valores fueron determinados experimentalmente a través de los ensayos descritos en el Capítulo II.

En la Figura 63 se observa la relación fuerza horizontal versus desplazamiento horizontal para el modelo M290, M450 y M610.

**Figura 63**

*Respuesta numérica de los muretes con diferentes espesores. Model290, Model450 y Model610*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

Donde:

- Model\_290: respuesta numérica del modelo para el murete M290.
- Model\_450: respuesta numérica del modelo para el murete M450.



- Model\_610: respuesta numérica del modelo para el murete M610.

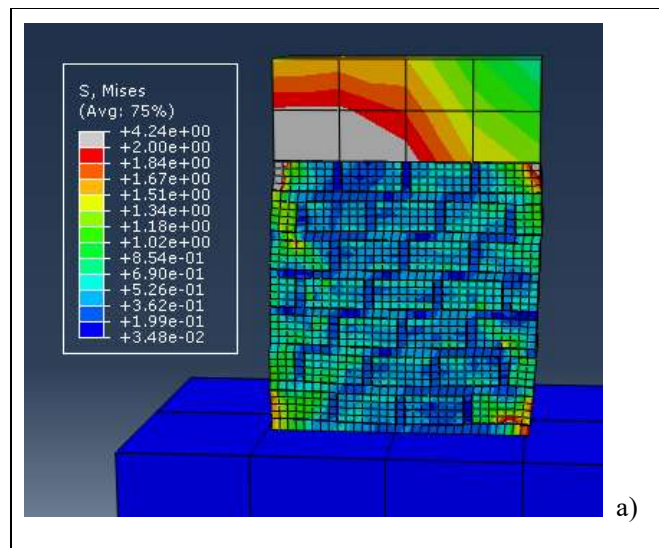
En la Figura 63 se aprecia una evolución del desplazamiento en relación con la carga, con características similares para los diferentes muretes donde en los primeros ciclos histeréticos el ángulo difiere de los ciclos histeréticos consecutivos, indicando un cambio de rigidez y una respuesta inelástica.

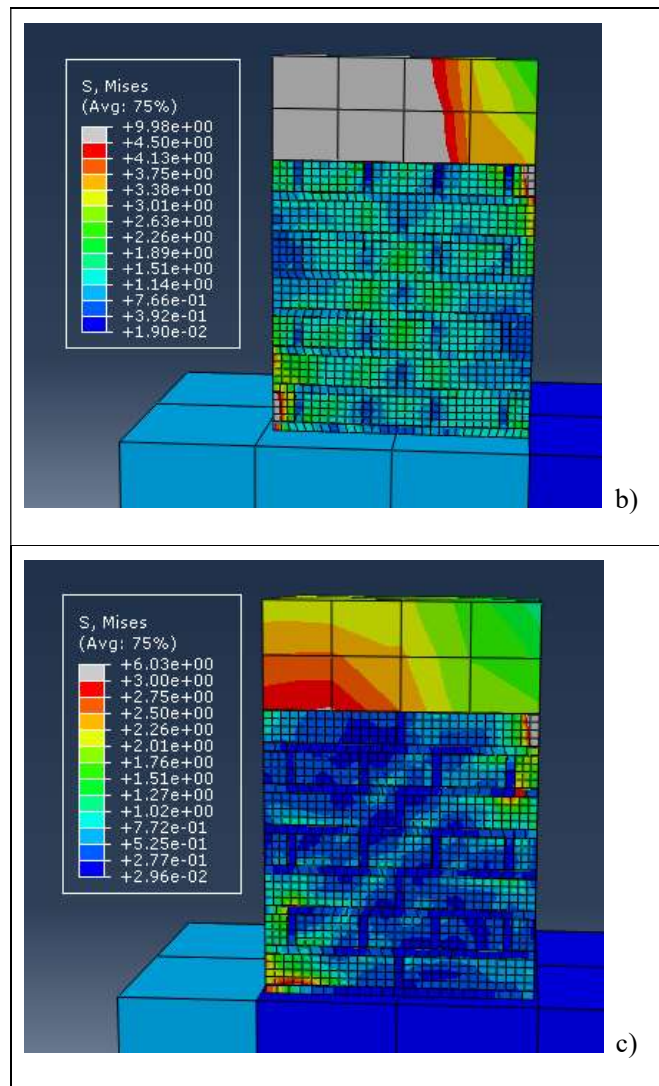
En la Figura 63 se observa un incremento de la fuerza última horizontal que acompaña de manera aproximadamente lineal el incremento del espesor de los muretes de mampostería. Las respuestas de los modelos numéricos para los diferentes espesores de muretes son similares entre sí en los primeros ciclos histeréticos; sin embargo, en la medida que evolucionan los ciclos histeréticos la respuesta se diferencia en función del cambio de espesor. Los resultados muestran una respuesta en la primera fase que aproximadamente es común para todos los muretes, independiente del espesor. La segunda fase muestra diferencias en el cambio de la rigidez y en la cantidad de energía que disipa a través de los distintos ciclos histeréticos.

En la Figura 64 se presenta el estado de tensiones según Von Mises y en la Figura 65 se presenta el estado de tensiones según Tresca, para los tres muretes de mampostería analizados y para el desplazamiento lateral último que correspondió a los ensayos experimentales.

**Figura 64**

*Estado de tensiones según Von Mises*

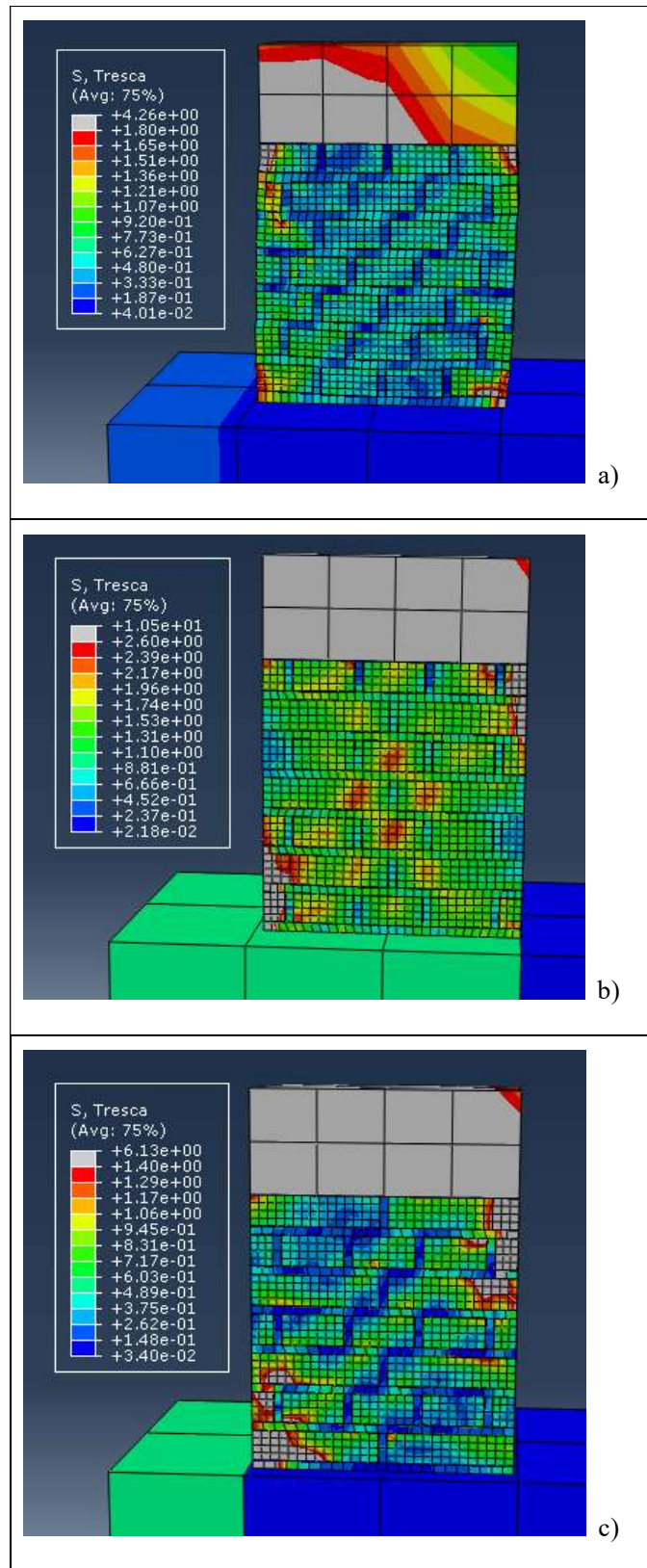




Nota. La figura muestra a) Model290, b) Model450 y c) Model610. Fuente: Abaqus (2003).

**Figura 65**

*Estado de tensiones según Tresca*



*Nota.* La figura muestra a) Model290, b) Model450 y c) Model610. Fuente: Abaqus (2003).

El estado tensional según Von Mises representa la combinación de todas las tensiones actuantes en el espacio. La Figura 64 indica que para la respuesta numérica del modelo para el murete M290 los valores máximos se presentan en los cuatro bordes extremos; sin embargo, en la respuesta numérica para el murete M450 y M610 los valores máximos se observan sobre la parte superior derecha y la parte inferior izquierda.

El estado tensional según Tresca define el criterio de máxima tensión tangencial. La Figura 65 presenta para el murete M290 tensiones máximas en los cuatro bordes extremos; sin embargo, en la respuesta para el murete M450 y M610 las tensiones máximas se presentan sobre el borde superior derecho y el borde inferior izquierdo.

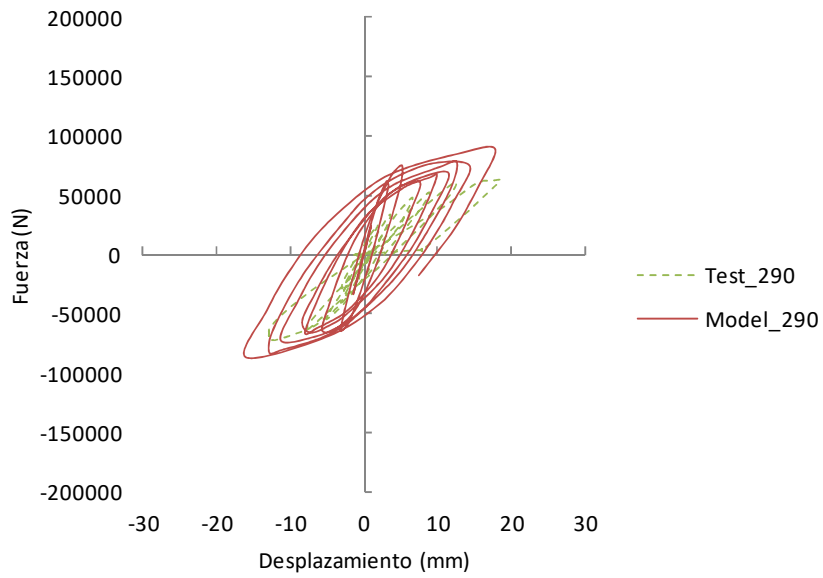
El estado tensional de Von Mises y Tresca presenta tensiones máximas en sectores diferentes según el murete de mampostería analizado, es decir que para el murete de menor espesor M290 se concentran las tensiones máximas en todos los bordes extremos y para los muretes de mayores espesores M450 y M610 respectivamente, se observan las tensiones máximas en dos bordes extremos opuestos diagonalmente.

### **3.2. Comparación de las respuestas numéricas con las respuestas experimentales**

Para evaluar la correlación entre los resultados de los ensayos experimentales y los obtenidos con el modelo numérico, se grafican las relaciones fuerza-desplazamiento de manera superpuestas. En la Figura 66 se muestra la respuesta numérica y experimental para el murete M290, en la Figura 67 la del M450 y en la 68 la del M610.

**Figura 66**

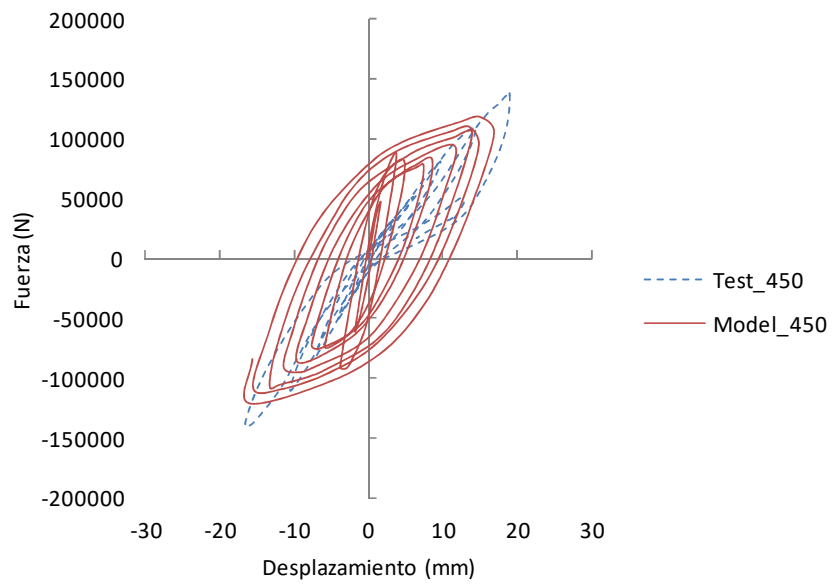
*Curva fuerza-desplazamiento para el murete M290*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

**Figura 67**

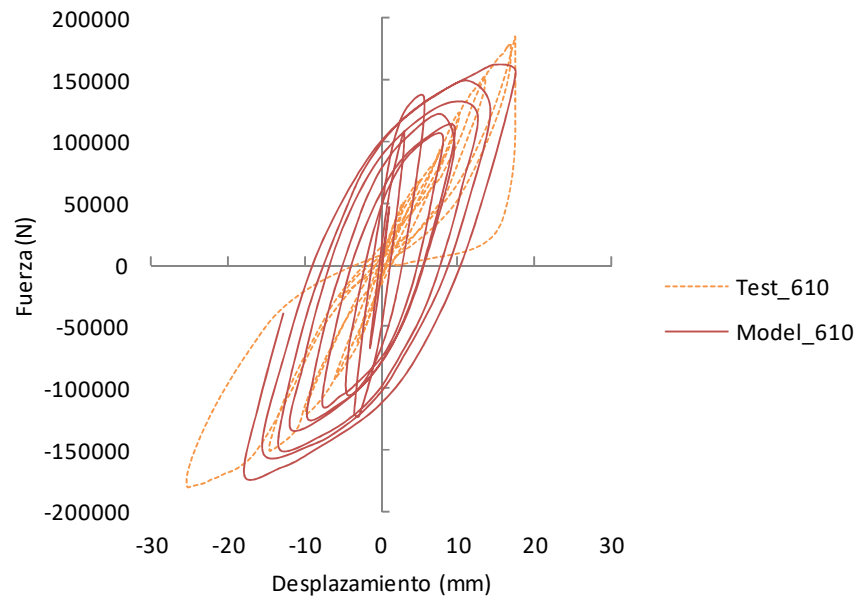
*Curva fuerza-desplazamiento para el murete M450*



Nota. Fuente: elaboración propia.

### Figura 68

Curva fuerza-desplazamiento para el murete M610



Nota. Fuente: elaboración propia.

Donde:

- Test\_290: Curva representativa de los ensayos experimentales de los muretes M290-01, M290-02 y M290-03.
- Test\_450: Curva representativa de los ensayos experimentales de los muretes M450-01, M450-02 y M450-03.
- Test\_610: Curva representativa de los ensayos experimentales de los muretes M610-01, M610-02 y M610-03.

En la Tabla 25 se resumen los resultados obtenidos de los modelos numéricos y de los ensayos experimentales.

**Tabla 25***Resultados comparativos entre el modelo numérico y el ensayo experimental*

Modelo Numérico <i>MN</i>		Ensayo Experimental <i>EE</i>		Diferencia entre <i>MN</i> y <i>EE</i>
ID	Fuerza Horizontal Máxima (N)	ID	Fuerza Horizontal Máxima (N)	
Model_290	89924	M290	62500	27424 (30 %)
Model_450	117716	M450	139900	22183 (19 %)
Model_610	162373	M610	185600	23227 (14 %)

*Nota.* Fuente: elaboración propia.

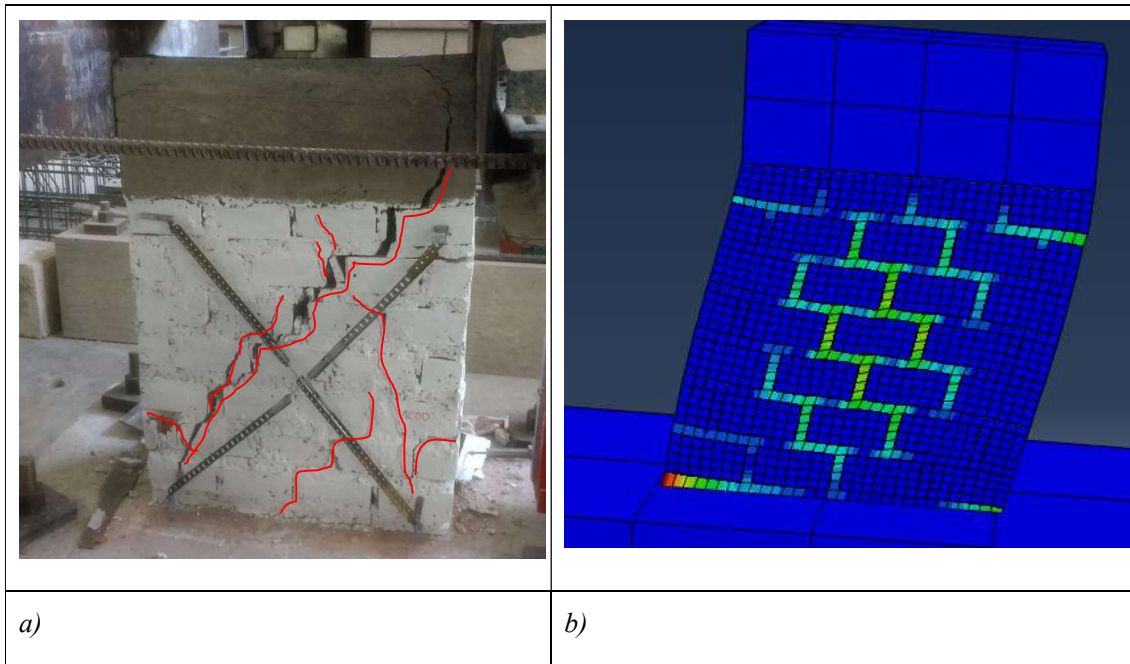
La Tabla 25 indica que las diferencias entre el modelo y los resultados experimentales son menores en los muretes M450 y M610 en relación al murete M290. Los ensayos experimentales se realizaron para un desplazamiento lateral controlado de 20 mm, valor que el modelo predice con muy buena aproximación, al igual que la degradación de rigidez en la medida que crecen los ciclos de histéresis. El modelo no predice con precisión el efecto de pinzamiento del diagrama de histéresis (*pinched shape*), el cual está asociado a la rigidez elevada de los muretes, sin embargo, se observa una buena aproximación en los valores de carga y desplazamiento máximo.

### 3.2.1. Esquemas de daño del modelo numérico y de los ensayos experimentales

Se presenta un análisis cualitativo de los esquemas de daño encontrados en los modelos numéricos en relación a los obtenidos en los ensayos experimentales. El daño obtenido con los modelos de elementos finitos, muestra una variación de la deformación plástica con diferentes intensidades de color. En la Figura 69 se observa el esquema de daño del murete de 290 mm de espesor, en la Figura 70 el esquema de daño del murete de 450 mm de espesor y en la Figura 71 el esquema de daño del murete de 610 mm de espesor.

**Figura 69**

*Comparación de los esquemas de daño para el murete de 290 mm de espesor*

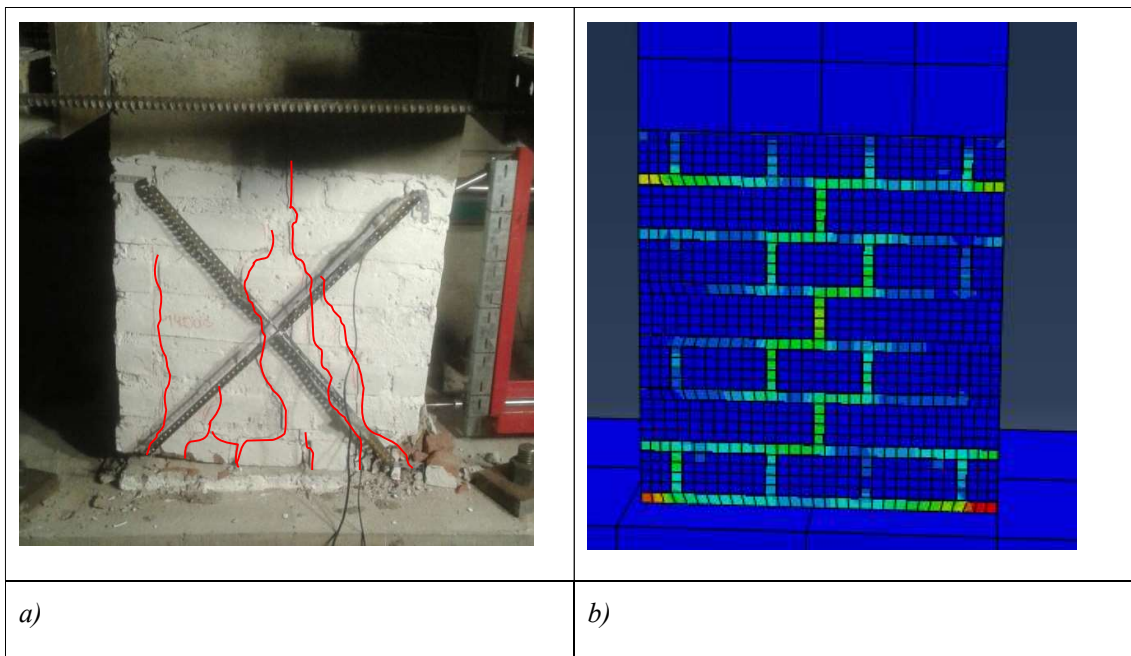


*Nota.* La figura muestra a) Ensayo experimental y b) Modelo numérico. Fuente: elaboración propia. Abaqus (2003).



**Figura 70**

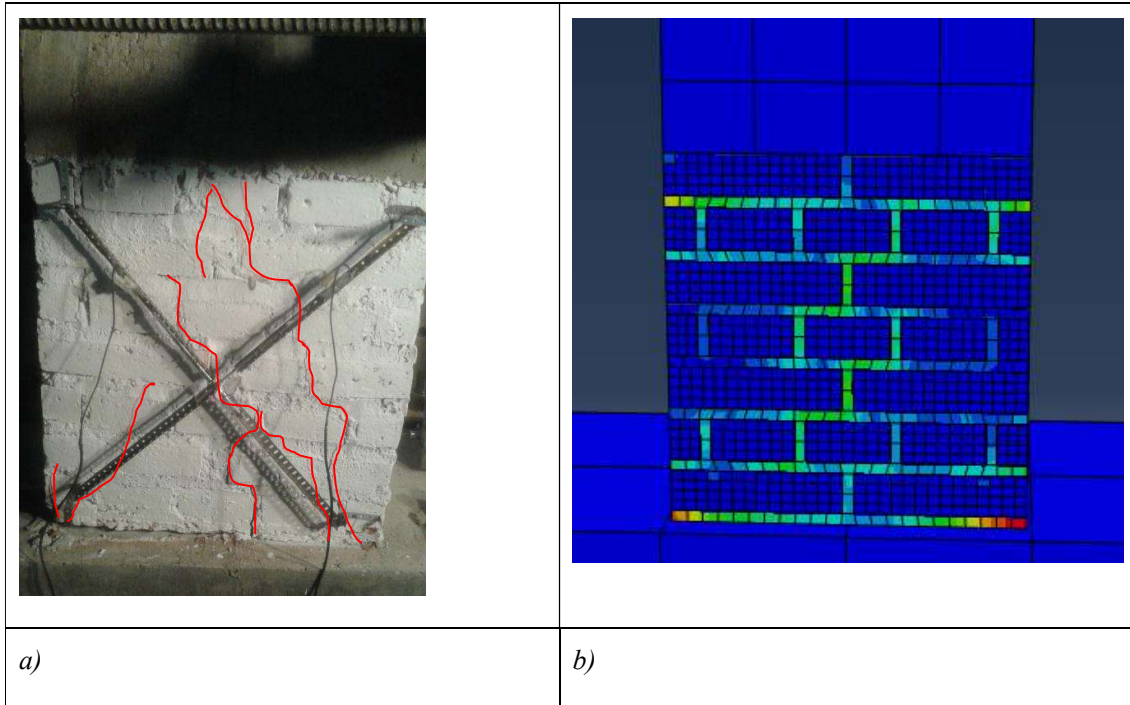
*Comparación de los esquemas de daño para el murete de 450 mm de espesor*



*Nota.* La figura muestra a) Ensayo experimental y b) Modelo numérico. Fuente: elaboración propia. Abaqus (2003).

**Figura 71**

*Comparación de los esquemas de daño para el murete de 610 mm de espesor*



*Nota.* La figura muestra a) Ensayo experimental y b) Modelo numérico. Fuente: elaboración propia. Abaqus (2003).

Los esquemas de daño representados en las Figuras 69, 70 y 71 poseen las siguientes referencias de colores: i) Color azul: daño nulo, ii) Color verde: daño moderado, iii) Color rojo: daño severo. En la Figura 69 se muestra que el modelo numérico capta con moderada aproximación el esquema de daño reflejado en el ensayo experimental. El modelo numérico presenta un daño concentrado en la zona central del murete y disminuye hacia la parte inferior y superior del mismo. En la Figura 70 y Figura 71 el modelo numérico presenta un daño marcado en la zona central y también en los sectores inferiores de los muretes de mampostería, efecto que también se observa en los ensayos experimentales.

#### 4. Comparación de los parámetros de respuesta

En el capítulo III se obtuvieron diferentes parámetros de respuesta de los ensayos experimentales para cada espesor de los muretes de mampostería. Los mismos parámetros se obtuvieron para los modelos numéricos estudiados en el presente capítulo. En la Tabla 26 se resumen los resultados obtenidos de los ensayos experimentales y de los modelos numéricos.

**Tabla 26**

*Resultados comparativos entre los ensayos experimentales y los modelos numéricos*

Resultados Experimentales										
ID	$V_{SL}$	$d_{SL}$	$V_E$	$d_E$	$V_{MR}$	$d_{MR}$	$K_{E,exp}$	$K_{R,exp}$	$K_{E,teo}$	$\mu_{MR}$
	(N)	(mm)	(N)	(mm)	(N)	(mm)	(N/mm)	(N/mm)	(N/mm)	
M290	23000	1.54	39473	2.50	62500	17.85	14935	1500	20503	7.1
M450	78000	9.12	100000	11.74	139900	19.01	9034	5487	31815	1.6
M610	69000	5.20	118298	9.00	185600	17.43	15445	7984	43127	1.9
Resultados Numéricos										
Model	$V_{SL}$	$d_{SL}$	$V_E$	$d_E$	$V_{MR}$	$d_{MR}$	$K_{E,exp}$	$K_{R,exp}$	$K_{E,teo}$	$\mu_{MR}$
	(N)	(mm)	(N)	(mm)	(N)	(mm)	(N/mm)	(N/mm)	(N/mm)	
290	28483	1.08	66426	3.50	89924	17.82	21125	1641	20503	5.1
450	57992	1.95	99615	4.00	117716	16.29	24811	1473	31815	4.1
610	74204	1.30	135990	3.50	162373	17.40	47946	1898	43127	5.0

*Nota.* Fuente: elaboración propia.

Donde:

- $K_{E,teo}$  = rigidez elástica teórica, en N/mm.
- $K_{E,exp}$  = rigidez elástica experimental, en N/mm.
- $K_{R,exp}$  = rigidez inelástica experimental, en N/mm.

- $\mu_{MR}$  = ductilidad.
- $V_{SL}$  = fuerza de corte en el límite elástico, en N.
- $d_{SL}$  = desplazamiento en el límite elástico, en mm.
- $V_E$  = fuerza de equilibrio de corte en el límite elástico, en N.
- $d_E$  = desplazamiento de equilibrio en el límite elástico, en mm.
- $V_{MR}$  = fuerza de corte última, en N.
- $d_{MR}$  = desplazamiento último, en mm.

El modelo realizado con los datos adoptados y determinados experimentalmente tienen algunas coincidencias y otras diferencias respecto a la respuesta experimental.

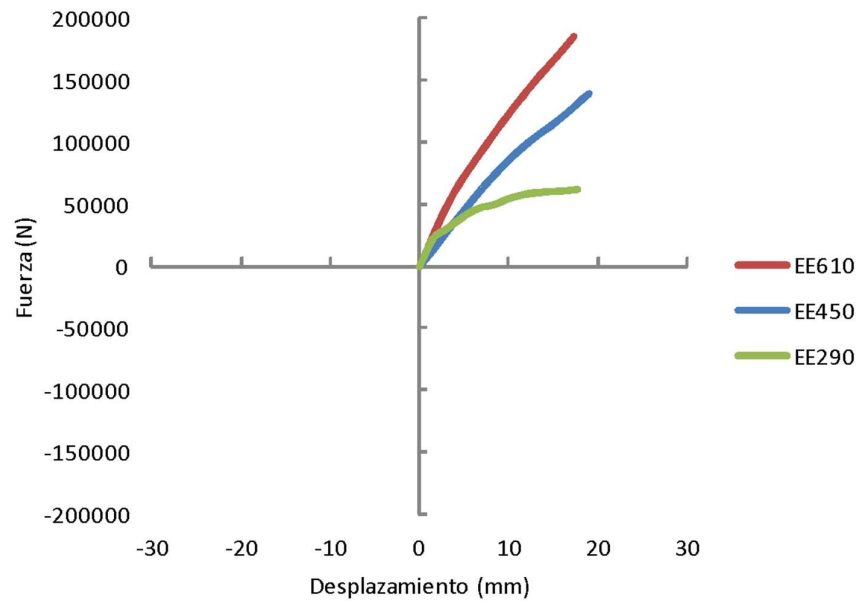
Los resultados muestran que el modelo numérico permite predecir con buena aproximación los valores de fuerza de corte última ( $V_{MR}$ ) y los valores de deformación horizontal último ( $d_{MR}$ ). El modelo numérico correspondiente al murete M290 presenta la mayor parte de los resultados con buena aproximación a los obtenidos experimentalmente mientras que el modelo numérico, para los M450 y M610 presentan valores variables respecto a los resultados experimentales. Tal cual se mencionó precedentemente, el modelo numérico para todos los muretes no representa adecuadamente los ciclos histeréticos de los ensayos experimentales, fundamentalmente relacionadas con las áreas encerradas por los ciclos de carga y descarga (energía disipada) junto con el efecto de pinzamiento (*pinched shape*).

Si se comparan los valores de rigidez elástica experimental ( $K_{E,exp}$ ) y rigidez elástica teórica ( $K_{E,teo}$ ) obtenida de los modelos numéricos, los resultados muestran poca diferencia porcentual, alrededor del 12 % en promedio.

En la Figura 72 y 73 se observan las curvas envolventes de los tramos de carga de la respuesta experimental ( $EE$ ) y numérica ( $EN$ ) respectivamente, obtenidas para los muretes de mampostería de diferentes espesores.

**Figura 72**

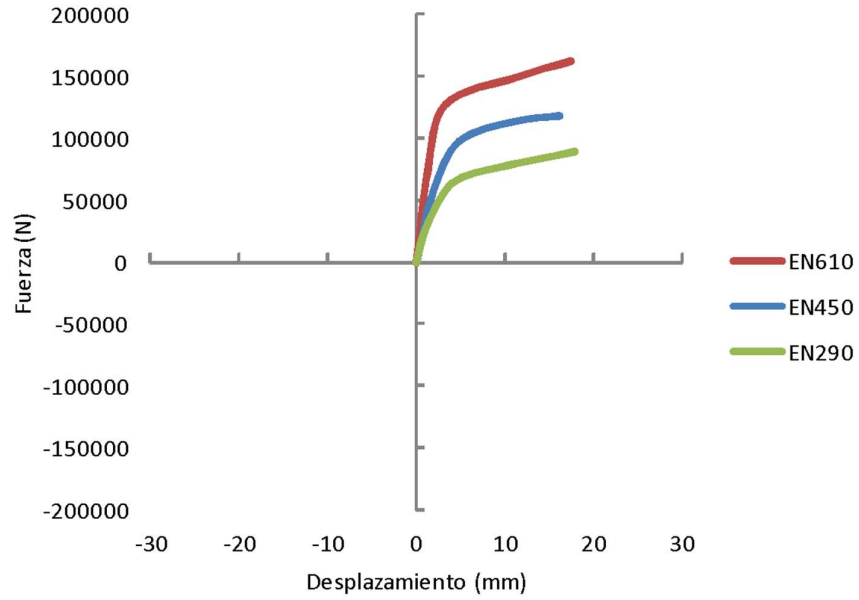
*Curvas envolventes para la respuesta experimental (EE)*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

**Figura 73**

*Curvas envolventes para la respuesta numérica (EN)*

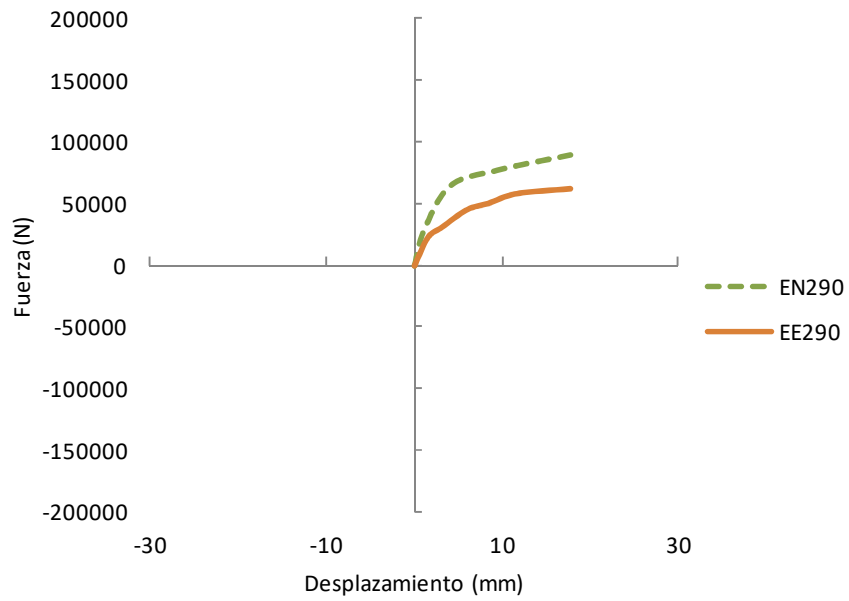


*Nota.* Fuente: elaboración propia.

En la Figura 74, Figura 75 y Figura 76 se muestran las curvas envolventes comparativas entre la respuesta experimental y la respuesta numérica.

**Figura 74**

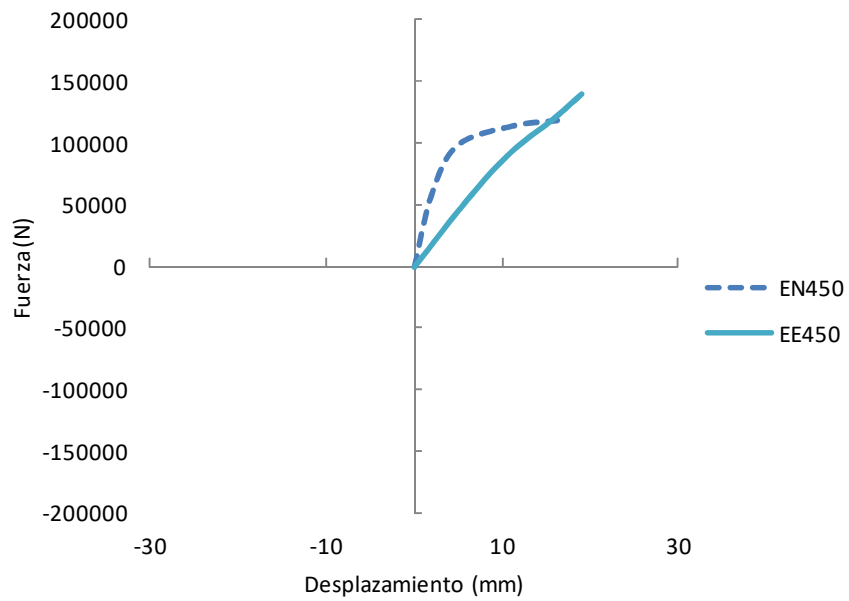
*Curvas envolventes para la respuesta experimental y numérica. M290*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

**Figura 75**

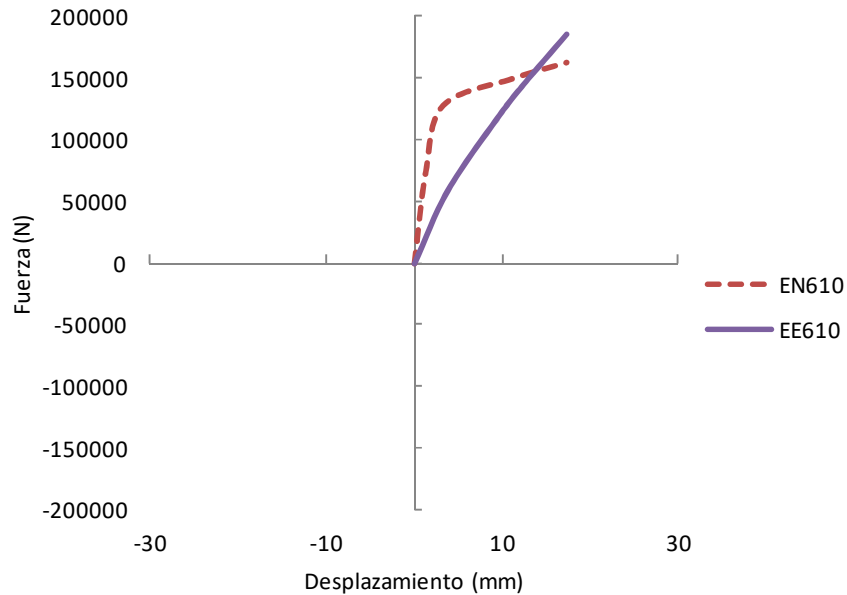
*Curvas envolventes para la respuesta experimental y numérica. M450*



Nota. Fuente: elaboración propia.

**Figura 76**

Curvas envolventes para la respuesta experimental y numérica. M610



Nota. Fuente: elaboración propia.

En las Figuras precedentes se muestra con claridad que las curvas envolventes entre la respuesta experimental y numérica son similares para el murete de espesor 290 mm. Sin embargo, las curvas envolventes, para los espesores de 450 mm y 610 mm, difieren entre sí. Se observa que el modelo numérico tiende a alejarse de la respuesta experimental en función de un aumento del espesor total de los muretes de mampostería.

El parámetro de respuesta ( $K_R$ ) que define la pendiente de la curva en el rango no lineal, presenta valores similares para el caso del murete M290; sin embargo, no se observa lo mismo para los casos M450 y M610 respectivamente, siendo que dicho valor para la respuesta experimental tiende a un crecimiento en función del aumento del espesor del murete de mampostería, pero para la respuesta numérica este valor se mantiene prácticamente invariable. Nuevamente, en la medida en que se aumenta el espesor los valores numéricos se alejan de los experimentales.



El otro parámetro que se diferencia es la ductilidad de desplazamiento ( $\mu_{MR}$ ). El mismo se conserva relativamente constante a medida que aumenta el espesor del murete de mampostería para la respuesta numérica; sin embargo, para la respuesta experimental el valor disminuye fuertemente en función del aumento del espesor del muro de mampostería.

En función de los análisis presentados se puede concluir que los modelos numéricos logran predecir, con un cierto grado de aproximación, parámetros de respuesta con pequeñas diferencias y otros parámetros de respuesta con diferencias mayores. En general, el modelo numérico muestra mejor desempeño para el murete de mampostería M290 y tiende a desviarse de la respuesta experimental para los muretes de mampostería de mayor espesor, como son los M450 y M610. No obstante, el valor de la fuerza de corte última, el modelo numérico muestra una mejor precisión independientemente del espesor de los muretes de mampostería.

En función de los resultados que se han discutido en el presente apartado, los modelos numéricos predicen respuestas de manera independiente al espesor de los muretes.

## **5. Propuesta para la respuesta estructural en mampostería de gran espesor**

En función de los resultados obtenidos en los ensayos experimentales, se observan diferencias en las respuestas (ensayos a carga vertical y horizontal, Tabla 26) para los muretes de espesores mayores (M450 y M610), no así para el murete de menor espesor M290. Por lo tanto, los muretes de mampostería de espesor 450 mm y 610 mm marcan una tendencia diferenciada respecto al M290.

En función de dicha conclusión, se propone una expresión experimental para evaluar la capacidad de carga, particularmente en los muretes de mampostería que poseen espesores mayores a 290 mm.

La capacidad al corte de un muro de mampostería se puede obtener a partir de la geometría del muro, de la resistencia al corte y del nivel de tensión vertical actuante. Por ejemplo, el reglamento INPRES CIRSOC 103-III (IC103-III, 2018) evalúa la capacidad de carga al corte ( $V_n$ ) en función de la resistencia especificada al corte de la mampostería ( $f'_v$ ) y de la tensión media de compresión ( $f_o$ ) que actúa simultáneamente sobre el muro de mampostería. En la ecuación 5.3 se muestra la expresión de ( $V_n$ ).

$$V_n = (f'_v + 0.40 f_o)A_g \quad \text{Ec. 5.3}$$

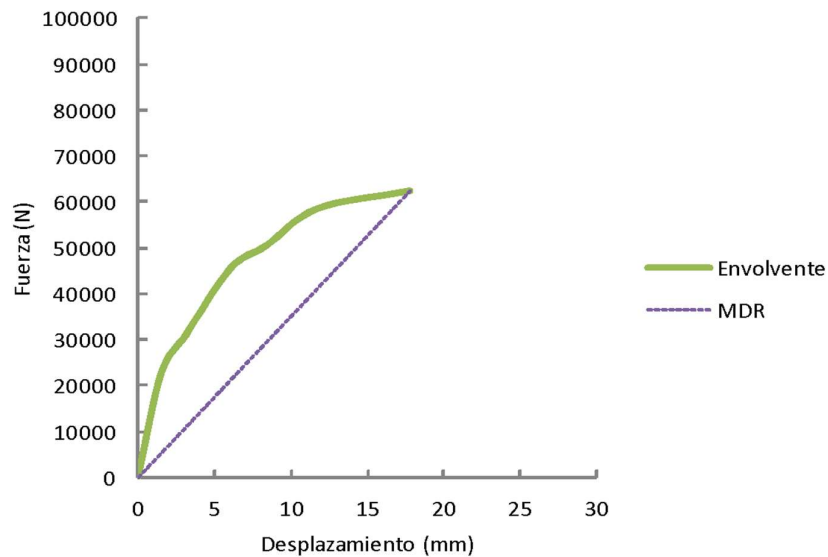
Donde:

- $V_n$  = resistencia nominal de corte, en N.
- $f'_v$  = resistencia especificada al corte de la mampostería, en MPa.
- $f_o$  = tensión media de compresión que actúa sobre el muro, en MPa.
- $A_g$  = área bruta de la sección horizontal del muro, en mm<sup>2</sup>.

De los resultados obtenidos en los ensayos experimentales (Tabla 26), se puede obtener el parámetro definido como Módulo de Deformación de Rotura (*MDR*), que define la relación entre la fuerza de corte última y el desplazamiento horizontal último determinado en la curva envolvente de fuerza versus desplazamiento, como se indica en la Figura 77.

**Figura 77**

*Curva de respuesta envolvente. Módulo de deformación de rotura (MDR)*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 27 se indican los valores obtenidos de MDR para cada espesor de murete. Para evaluar el crecimiento de MDR se realiza una normalización respecto al MDR correspondiente al murete M290.

**Tabla 27***Resultados obtenidos de MDR*

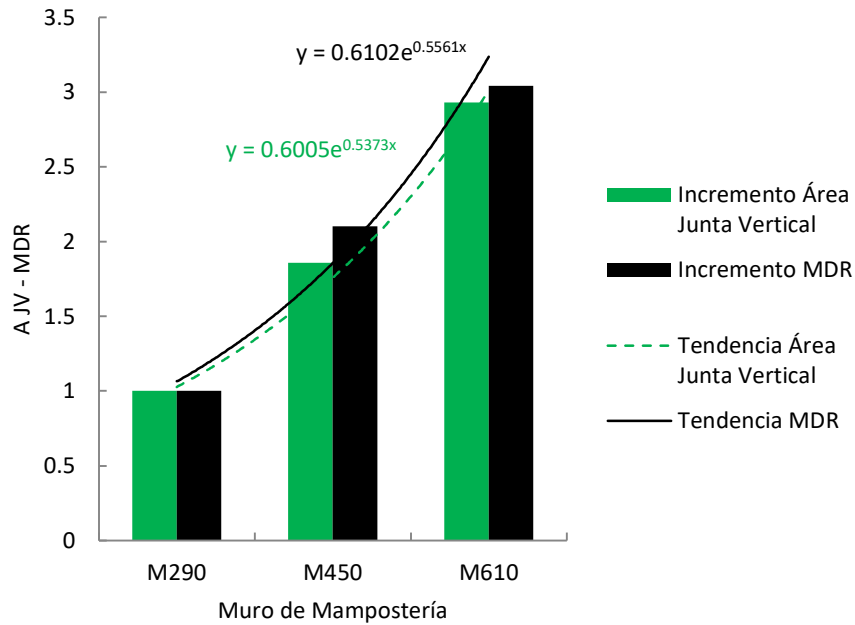
ID	MDR	$MDR/MDR(M290)$
	(N/mm)	
M290	3501	1.00
M450	7359	2.10
M610	10648	3.04

*Nota.* Fuente: elaboración propia.

Se obtuvieron para cada espesor de murete de mampostería el valor de MDR correspondiente a la respuesta experimental y se determinó una tendencia de crecimiento de los valores de MDR. También se computó la cantidad de área de junta vertical de mortero (AJV) colocada en cada murete de mampostería y se obtuvo una tendencia de crecimiento del área de junta vertical (AJV) para los diferentes muretes de mampostería. En la Figura 78 se observa para cada murete de mampostería las tendencias de MDR y AJV respectivamente.

**Figura 78**

Tendencia de crecimiento de AJV y MDR para los diferentes espesores de muretes de mampostería



Nota. Fuente: elaboración propia.

Las tendencias de crecimiento de AJV y MDR son similares, consecuentemente se concluye que la respuesta estructural de los muretes de espesores mayores a 290 mm tiene una relación directa con el área de junta vertical de mortero (AJV). Por lo tanto, los mayores espesores de los muretes pueden representarse a través del parámetro (AJV).

Asumiendo que el aporte de la resistencia a compresión del mortero de junta vertical influye sobre la capacidad al corte del murete de mampostería, se propone una expresión empírica que tenga en cuenta la resistencia especificada al corte de la mampostería, la tensión media de compresión que actúa sobre el murete de mampostería y la resistencia a compresión del mortero de junta vertical. La ecuación 5.4 propone una expresión para determinar la capacidad al corte considerando la influencia del área de junta vertical (AJV), acotada a la relación que indica la ecuación 5.5.

$$V_{np} = (f'_v + 0.40 f_o)A_g + \left(0.3 R_c AJV \exp\left(\frac{AJV}{A_g}\right)\right) \text{ Ec. 5.4}$$

Donde:

- $V_{np}$  = propuesta de resistencia nominal de corte, en N.
- $f'_v$  = resistencia especificada al corte de la mampostería, en MPa.
- $f_o$  = tensión media de compresión que actúa sobre el muro, en MPa.
- $A_g$  = área bruta de la sección horizontal del muro, en mm<sup>2</sup>.
- $R_c$  = Resistencia a compresión del mortero, en MPa.
- $AJV$  = Área de las juntas verticales del murete de mampostería, en mm<sup>2</sup>.
- $\exp$  = exponente.

Se adopta el valor de resistencia especificada a corte igual 0.20 MPa. La consideración del aporte de la resistencia del mortero de la junta vertical a la capacidad de corte del murete de mampostería se debe considerar si se cumple con la ecuación 5.5, que contempla el incremento del área de junta vertical para espesores de muretes mayores a 290 mm.

$$\frac{AJV}{A_g} \geq 0.13 \quad \text{Ec. 5.5}$$

Donde:

- $A_g$  = Área del murete de mampostería, en mm<sup>2</sup>.
- $AJV$  = Área de las juntas verticales del murete de mampostería, en mm<sup>2</sup>.

En la Tabla 28 se presentan los valores obtenidos para la propuesta de capacidad a corte de muretes de mampostería.

**Tabla 28**

*Resultados obtenidos para la propuesta de capacidad al corte de muretes de mampostería*

ID	$A_g$	$f'_v$	$f_o$	$R_c$	$AJV$	$V_{np}$	$V_{MR}$	Error
	(mm <sup>2</sup> )	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(mm <sup>2</sup> )	(N)	(N)	(%)
M450	270000	0.2	0.15	4.56	37700	129502	139900	7.43
M610	366000	0.2	0.15	4.56	59450	190831	185600	2.82

Nota. Fuente: elaboración propia.

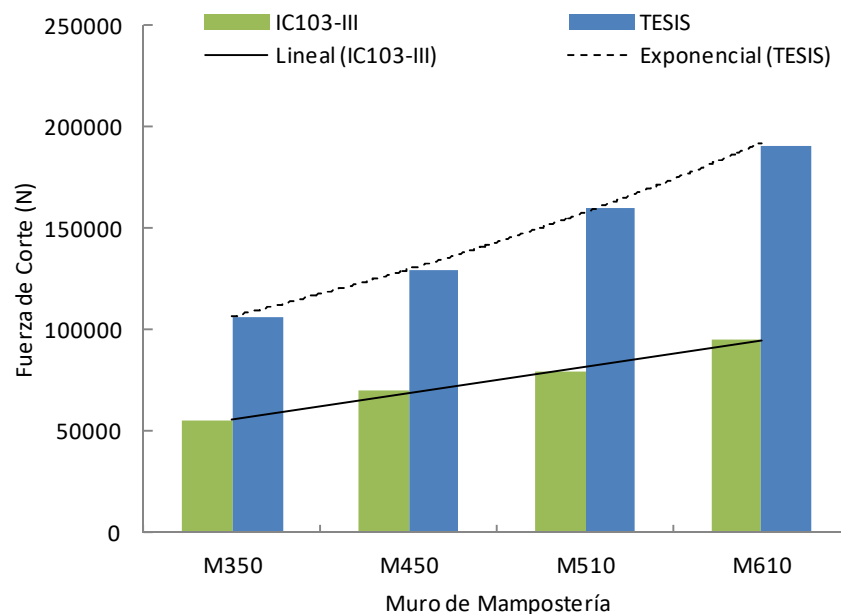
Donde:

- $V_{np}$  = propuesta de resistencia nominal de corte, en N.
- $V_{MR}$  = fuerza de corte última, en N

A modo de ejemplo se adoptaron diferentes espesores de muretes de mampostería y se determinaron sus capacidades de carga al corte. En la Figura 79 se presenta una simulación de la respuesta de la capacidad de carga a corte, en donde se reflejan las diferencias entre la expresión indicada en el reglamento INPRES CIRSOC 103-III (IC103-III, 2018) y la expresión propuesta en la presente tesis.

**Figura 79**

*Capacidad de carga al corte para diferentes espesores de muretes de mampostería*



*Nota.* Fuente: elaboración propia.

La Figura 79 muestra que el crecimiento en la capacidad de carga al corte en función del incremento del espesor total del murete tiende a ser exponencial con la expresión que se propone en la tesis; sin embargo, para la expresión indicada en el reglamento (IC103-III, 2018), el crecimiento tiende a ser lineal.

La expresión propuesta (Ec. 5.4) presenta una buena aproximación comparada con los resultados experimentales obtenidos y tiene en cuenta la incidencia de la junta vertical de mortero con la respuesta final de los muretes de mampostería de mayores espesores. Dicha propuesta de resistencia nominal de corte presenta una resolución rápida y sencilla de procesar, valorando la contribución de la junta vertical de mortero con relación a su cantidad de área y a su resistencia media de compresión. La expresión propuesta supone un comportamiento influenciado por la relación de áreas entre la junta vertical con el largo y espesor total del murete de mampostería, considerando de esta manera que la resistencia al corte depende del aporte de las juntas verticales, principalmente en los muretes de mampostería de espesores mayores a 290mm.

La propuesta de evaluación de resistencia al corte que realiza la tesis también presenta una aceptable aproximación con los resultados encontrados en el modelo de elementos finitos, en donde se puede observar que las diferencias porcentuales comparadas con los ensayos experimentales disminuyen cuando aumenta el espesor de los muretes de mampostería, según se exhibe en la Tabla 26 y Tabla 28, situación que sería pertinente con la propuesta de resistencia al corte que se realiza en el presente trabajo.

La representación de la nueva expresión de resistencia al corte no contradice las teorías actuales conocidas, sino que realiza una corrección y un aporte simple para evaluar la respuesta de muretes de mampostería con espesores mayores a 290 mm.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES**

#### **1. Conclusiones relacionadas con los ensayos experimentales**

Se realizaron ensayos experimentales sobre pilas de mampostería, sometidas a cargas verticales de compresión. En el laboratorio se fabricaron tres pilas de mampostería, cada pila responde a un espesor diferente, manteniendo las otras dos dimensiones geométricas iguales. Los resultados indican que las pilas de mampostería ensayadas proveen una resistencia específica mayor a la compresión mínima indicada por el reglamento IC103-III.

Las tensiones máximas a compresión se registraron en la pila de mampostería de menor espesor mientras que la tensión mínima se obtuvo sobre la pila de mampostería de mayor espesor. Los resultados obtenidos estarían indicando, en principio, que los espesores de las pilas de mampostería tienen incidencia sobre los valores de tensiones máximas a compresión.

Las relaciones encontradas entre el peso de la pila de mampostería y la carga última de rotura evidencian que, a mayor peso de pila de mampostería, mayor carga última de rotura a compresión. Sin embargo, un aumento del peso de la pila de mampostería evidencia una disminución de la tensión máxima a compresión registrada.

Se presenta en las pilas de mampostería una tendencia lineal de la carga máxima a compresión respecto a la variación del espesor de las mismas. Sin embargo, la tendencia no es lineal si se relaciona la tensión máxima de compresión con la variación del espesor de las pilas de mampostería.

Se realizaron ensayos experimentales sobre muretes de mampostería con tres espesores diferentes, con la aplicación de una carga vertical constante de tensión de compresión de 0.15 MPa, efectuando diferentes ciclos de carga horizontal creciente con incrementos de 10000 N hasta alcanzar la rotura total. Los ensayos realizados en muretes de mampostería evidencian un comportamiento frágil, demostrándose que, a mayor espesor total de murete de mampostería, más frágil es su respuesta mecánica.

La degradación de rigidez en función de la distorsión de piso es similar para los tres espesores de muretes de mampostería ensayados.



La rigidez efectiva varía de forma no lineal respecto a la variación del espesor de los muretes de mampostería. Se observa que la ductilidad es baja para los muretes de mampostería de espesores 450 mm y 610 mm, sin embargo para los muretes de mampostería de espesor 290 mm la ductilidad crece discordantemente.

Los resultados obtenidos en términos de la ductilidad experimental indican que los muretes de mampostería M290 son aproximadamente 450% mayores que la de los M450 y M610. Los muretes de mampostería con espesores mayores (M450 y M610) no muestran claramente el punto en el cual comienzan a fluir y como tal no está claramente diferenciado el comportamiento elástico del inelástico. Si bien fue posible encontrar un punto donde la gráfica cambia de pendiente no es posible afirmar que los muretes hayan entrado en fluencia dado que posiblemente hayan alcanzado la carga máxima de rotura en rango elástico.

Los muros de mampostería de espesor 290 mm presentaron un comportamiento elastoplástico definido. El límite elástico fue manifestado por las primeras fisuras que indicaron una tracción sobre los mampuestos, sin embargo el colapso fue precedido por el agotamiento de compresión sobre los mampuestos y juntas de mortero. La inclinación de la tendencia de fisuración diagonal respecto a la línea horizontal manifiesta un ángulo cercano a los 45 grados.

Los muros de mampostería de espesor 450 mm y 610 mm presentaron un comportamiento frágil. También el límite elástico fue representado por las primeras fisuras provenientes del agotamiento de la capacidad de tracción de los mampuestos y morteros. El colapso fue inducido por el agotamiento de compresión de mampuestos y morteros en la parte inferior de los muros. La inclinación de la tendencia de fisuración diagonal respecto a la línea horizontal denota un ángulo superior a los 45 grados.

La energía disipada de la envolvente obtenida de los ciclos histeréticos para los muros de espesor 290 mm son 40 % y 35 % menor que para los muros de espesor 450 mm y 610 mm respectivamente.

La disipación de energía crece en la medida que aumenta el espesor de los muretes de mampostería y al mismo tiempo se observa que la cantidad de energía disipada acompaña de forma proporcional al incremento del espesor de los muretes ensayados.

## 2. Conclusiones relacionadas con el modelo numérico utilizado

Se desarrolló y calibró un modelo numérico para comparar las respuestas numéricas con las respuestas obtenidas experimentalmente. Se evaluó el grado de aproximación con la comparación de los ciclos histeréticos obtenidos con el modelo numérico de daño plástico (CDP) y los generados a partir de los ensayos experimentales, para cada uno de los muretes de mampostería.

Los resultados obtenidos indican que el modelo numérico seleccionado queda adecuadamente validado en cuanto a capacidad de carga horizontal última, desplazamiento horizontal último. Sin embargo, el modelo numérico no representa correctamente los ciclos histeréticos iniciales y finales.

El modelo numérico no predice con adecuada precisión en efecto de pinzamiento del diagrama de histéresis (*pinched shape*), el cual está asociado a la rigidez elevada de los muretes, en tal sentido, el modelo predice un comportamiento más dúctil de los muretes, asociada a una mayor disipación de energía.

El modelo numérico de los muros de mampostería de espesor 290 mm proyecta ciclos histeréticos post-fluencia con una aproximación aceptable respecto a los resultados experimentales, sin embargo en términos de área de ciclos histeréticos presentan diferencias.

La rigidez inelástica que exhibe la respuesta del modelo numérico es similar a la obtenida en los ensayos experimentales.

Las respuestas de los modelos numéricos de los muros de mampostería de espesor 450 mm y 610 mm, en términos de área de ciclos histeréticos, son superiores a los resultados experimentales. Sin embargo, la rigidez inelástica que presentan los modelos numéricos son similares a lo observado en los resultados experimentales, presentando diferencias aproximadas al 12% en promedio.

La respuesta experimental y numérica son similares para el murete de mampostería de espesor 290 mm. Sin embargo, las curvas envolventes, para los muretes de espesores de 450 mm y 610 mm, difieren entre sí. Se observa que el modelo numérico tiende a alejarse de la respuesta experimental en función de un aumento del espesor total de los muretes de mampostería.

La implementación de modelos de elemento finitos utilizando el código Abaqus, permite obtener una relación fuerza - desplazamiento que cualitativamente presenta una adecuada coincidencia con la obtenida del ensayo experimental. Las fuerzas y desplazamientos máximas y mínimas del modelo de daño plástico (CDP) son similares a los obtenidos en los ensayos experimentales.

En función de los análisis presentados se puede concluir que los modelos numéricos logran predecir, con un cierto grado de aproximación, parámetros de respuesta con pequeñas diferencias y otros parámetros de respuesta con diferencias mayores. En general el modelo numérico muestra mejor desempeño para el murete de mampostería M290 y tiende a desviarse de la respuesta experimental para los muretes de mampostería de mayor espesor como son los M450 y M610. No obstante, el valor de la fuerza de corte última, el modelo numérico muestra una mejor precisión independientemente del espesor de los muretes de mampostería.

### **3. Conclusiones finales**

Se observó que la tendencia de crecimiento de la capacidad de carga última horizontal experimental sobre los muretes de mampostería no concuerda con la tendencia de crecimiento del espesor del murete de mampostería. Sin embargo, la tendencia de crecimiento del área de la junta vertical de los muretes de mampostería es similar a la tendencia de crecimiento de la capacidad de carga última horizontal experimental de los mismos.

La capacidad de carga última horizontal de los muretes de mampostería ensayados indica un incremento en relación al aumento del espesor de los mismos. Sin embargo, el incremento de la capacidad de carga horizontal no posee una correlación con las normativas de referencia, mostrando que los valores obtenidos en los ensayos son muy superiores a los establecidos en dichas normativas.

La expresión propuesta para evaluar la resistencia al corte de los muretes de mampostería presenta una aceptable aproximación comparada con los resultados experimentales obtenidos y tiene en cuenta la incidencia de la junta vertical de mortero con la respuesta final de los muretes de mampostería de espesores superiores a 290 mm. Dicha propuesta de resistencia nominal de corte presenta una resolución rápida y sencilla de procesar, valorando la contribución de la junta vertical de mortero con relación a su cantidad de área y a su resistencia media de compresión. Se aclara que los resultados que arroja la expresión

propuesta en la tesis ha sido obtenida bajo ciertas condiciones de carga e hipótesis de ensayo descritas precedentemente, las cuales responden a las limitaciones que hemos tenido en los ensayos experimentales.

La expresión propuesta supone un comportamiento influenciado por la relación de áreas entre la junta vertical de mortero con el largo y espesor total del murete de mampostería, considerando de esta manera que la resistencia al corte depende del aporte de las juntas verticales, principalmente en los muretes de mampostería de espesores mayores a 290 mm.

La propuesta de evaluación de resistencia al corte que realiza la tesis también presenta una aceptable aproximación con los resultados encontrados en el modelo de elementos finitos, en donde se puede observar que las diferencias porcentuales comparadas con los ensayos experimentales disminuyen cuando aumentaba el espesor de los muretes de mampostería, situación que sería pertinente con la propuesta de resistencia al corte que se realiza en el presente trabajo.

La representación de la nueva expresión de resistencia al corte no contradice las teorías actuales conocidas, sino que realiza una corrección y un aporte simple para evaluar la respuesta de muretes de mampostería con espesores mayores a 290 mm.

#### **4. Propuesta para futuras investigaciones**

El desarrollo de la tesis ha permitido cumplir con los objetivos impuestos para la misma; no obstante, futuros trabajos de investigación en esta línea permitirán avanzar en el nivel de conocimiento logrado en el presente trabajo. Por lo que las futuras investigaciones deberían estar orientadas en las siguientes líneas:

- Evaluar experimentalmente muros de mampostería de espesor diversos mayores a 290 mm con el objetivo de generar predicciones más robustas.
- Investigar la respuesta experimental de los muros de mampostería para distintas características mecánicas individuales de morteros y mampuestos.
- Investigar el comportamiento dinámico de los muros de mampostería a través de experimentos en mesa vibratoria.

- Investigar el comportamiento estructural de los muretes de mampostería reforzados con diferentes técnicas de refuerzo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abaqus Inc. (2003). *ABAQUS analysis user manual*, USA.
- Agüera N., Tornello M., Frau C. (2015). Structural behavior of unreinforced masonry piles of different thicknesses subject to compression loads. *PANACM 2015. 1st Pan-American Congress on Computational Mechanics. XI Argentine Congress on Computational Mechanics MECOM 2015*, Buenos Aires, Argentina. ISBN: 978-84-943928-2-5.
- Agüera N., Tornello M., Frau C. (2016). Structural response of unreinforced masonry walls. *Journal of Civil Engineering and Architecture*. 10(2), pp. 219-231.
- Addressi D., Sacco E. (2012). A multi-scale enriched model for the analysis of masonry panels. *International Journal of Solids and Structures*, 49, 865-880.
- Anecchiarico F., et al. (2009). FE simulation of masonry wall samples of Mustafa Pasha mosque by homogeneous continuum models: Analysis and calibration. *Protection of Historical Buildings PROHITECH09*, 1, 95-100.
- Anthoine A., Magonette G., Magenes G. (1995). Shear-compression testing and analysis of brick masonry wall. In Dumas G (ed.), *Proceedings of 10th European Conference on Earthquake Engineering* 3. Balkema, 1657-1662.
- Aref A.J., Dolatshashi K. M. (2013). A three-dimensional cyclic meso-scale numerical procedure for simulation of unreinforced masonry structures. *Computers and Structures*, 120, 9-23.
- Atkinson R.H., Amadei B.P., Saeb S., Sture S. (1989). Response of masonry bed joints in direct shear, *Journal of Structural Engineering*, 115 (9), 2277-2296.
- Backes H.P. (1985). *On the behaviour of masonry under tension in the direction of the bed joints (in German)*. Dissertation, Aachen University of Technology, Aachen, Germany.
- Bayraktar A., Sahin A., Özcan D.M., Yildirim F. (2010). Numerical damage assessment of Hagia Sophia bell-tower by nonlinear FE modelling. *Applied Mathematical Modelling*, 34, 92-121.
- Belmouden Y., Lestuzzi P. (2009). An equivalent frame model for seismic analysis of masonry and reinforced concrete buildings. *Construction and Building Materials*, 23(1), 40-53.
- Betti, M. y Vignoli A. (2008), Assessment of seismic resistance of a basilica-type church under earthquake loading: Modelling and analysis. *Advances in Engineering Software*, 39, 258-283.
- Binda L., Fontana A., Frigerio G. (1988). Mechanical behavior of brick masonries derived from unit and mortar characteristics. In J.W. de Courcy (ed) *Proceedings 8th*

*International Brick and Block Masonry Conference*, Elsevier Applied Science, London, UK, 205-216.

- Bosiljkov V., Page A. W., Bokan-Bosiljkov V., Žarnić R. (2003). Performance based studies of in-plane loaded unreinforced masonry walls, *Masonry International*, 16(2), 39-50.
- Bustamante A., Carbo G., Peña Mondragón F. (2007). Revista de Ingeniería Sísmica N° 77, 71-88.
- Caliò I., Marletta M., Pantò B. (2012). A new discrete element model for the evaluation of the seismic behavior of unreinforced masonry buildings. *Engineering Structures*, 40, 327-338.
- Calvi G.M., Kingsley G.R., Magenes G. (1996). Testing of masonry structures for seismic assessment, Earthquake Spectra, *Journal of Earthquake Engineering Research Institute*, 12(1), 145-162.
- Chen S.Y., Moon F.L., Yi T. (2008). A macroelement for the nonlinear análisis of in-plane unreinforced masonry piers. *Engineering Structures*, 30, 2242-2252.
- Código de Construcciones Sismorresistentes de la Provincia de Mendoza* CCSR (1987). Decreto Acuerdo N° 4235/87 del Gobierno de la Provincia de Mendoza. Ordenanza N° 2965 y 13283/89 del Concejo Deliberante de la Ciudad de Mendoza. Exp. N° 310-D-89 y 12334-O-89.
- Costa A. (2012). *Seismic Assessment of the out-of-plane performance of traditional stone masonry walls*. PhD thesis, University of Porto, Portugal.
- Crisafulli, F. J. (1997). *Seismic Behaviour of Reinforced Concrete Structures with Masonry Infills*, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Canterbury.
- Dhanasekar M., Page A.W. (1986). The influence of brickmasonry infill properties on the behaviour of infilled frames, *Proceedings Institution of Civil Engineers, Part 2*, 81, 593-605.
- El-Dakhkhni W., Hamid A., Hakam Z., Elgaaly M. (2006). Hazard Mitigation and strengthening of unreinforced masonry walls using composites. *Composite Structures* 73, 458–477.
- El-Dakhkhni W., Banting B., Miller S. (2013). Seismic performance parameter quantification of shear-critical reinforced concrete masonry squat walls. *J Structures Engineering*, 139, 957-973.
- Giordano A. et al. (2002). Modelling of historical masonry structures: comparison of different approaches through a case study. *Engineering Structures*, 24, 1057-1069.
- Grande E., Imbimbo M., Sacco E. (2011). A beam finite element for nonlinear analysis of masonry elements with or without fiber-reinforced plastic (FRP) reinforcements. *International Journal of Architectural Heritage*, 5(5-6), 693-716.
- Inpres-Cirsoc 103-III (2018). *Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes. Construcciones de Mampostería*. INPRES.

- Iram 12586 (1979). *Ladrillos y bloques cerámicos para la construcción. Métodos de determinación de resistencia a la compresión*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- Iram 1622 (2006). *Cemento Portland. Determinación de resistencias mecánicas*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- Karapitta L. et al. (2010). Explicit finite-element analysis for the in-plane cyclic behaviour of unreinforced masonry structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 40, 175-193.
- López, J., Oller, S., Oñate, E. (1998). *Cálculo del Comportamiento de la Mampostería Mediante Elementos Finitos*. Monografía del Centro Internacional de Métodos Numéricos de Ingeniería CIMNE 46.
- Lotfi H.R., Shing P.B. (1994). Interfase model applied to fracture of masonry structures, *Journal of Structural Engineering*, 120(1), 63-80.
- Lourenço P.B. (1994). Analysis of masonry structures with interfase elements, Theory and Applications, *TNO Building and Construction Research*, Report no. 03-21-22-0-01
- Lourenço P.B. (1994). *Computational strategies for masonry structures*. Delft University Press.
- Lourenço P.B. (1996). *Computations of historical masonry structures*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. ISBN 90-407-1221-2.
- Lourenço P. B., Rots J. G., Blaauwendraad J. (1998). Two Approaches for the Analysis of Masonry Structures: Micro-and Macro-Modeling. *Heron*, 40(4), 313-340.
- Lourenço P. B. et al. (2004). Implementation and validation of a constitutive model for the cyclic behaviour of interfase elements. *Construction and Building Materials*, 82(17), 1451-1461.
- Lourenço P. B. et al. (2004). Shear testing of stack bonded masonry. *Construction and Building Materials*, 18(2), 125-132.
- Lourenço P. B. et al. (2007). 3D homogenized limit analysis of masonry buildings under horizontal loads. *Engineering Structures*, 29(11), 3134-3148.
- Lourenço P. B., Milani G., Tralli A., Zucchini A. (2007). Analysis of masonry structures: review of and recent trends of homogenization techniques. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34, 1443–1457.
- Lourenço P. B. et al. (2011). Modeling Masonry Historic Buildings by Multi-Body Dynamics. *International Journal of Architectural Heritage*, 5(4-5), 483-512.
- Lubliner J.; Oliver J.; Oller S.; Oñate E. (1989). A plastic-damage model for concrete; *International Journal of solids and structures*, 25(3), 299-326.



- Lüders C., Hidalgo P., Gavilán C. (1985). *Comportamiento sísmico de muros de albañilería armada*. Proyecto N° 70/83. Departamento de Ingeniería Estructural. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Magenes G. (1992). *Seismic behavior of brick masonry: strength and failure mechanisms*, PhD Thesis, Department of Structural Mechanics, University of Pavia.
- Magenes G., Della Fontana A. (1998). Simplified non-linear seismic analysis of masonry buildings. *Proceedings of the British Masonry Society*, 8,190-195.
- Maldonado G., Martín P., Maldonado I. (2011). Seismic Mitigation of a Historic Masonry Building, *The Open Construction and Building Technology Journal*, 5, 61-70.
- Mann W., Müller H. (1982). *Failure of shear-stressed masonry - an enlarged theory, tests and application to shear walls*. Proc. British Ceramic Society, 30, 223-235.
- Martín P. (1997). *Estudio Teórico del Comportamiento de la Mampostería*. Tesis de Magister en Ingeniería Estructural. Universidad Nacional de Tucumán.
- Martín P., et al. (2012). Análisis No Lineal de Muros de Gran Espesor Mediante Aplicación de Superficie de Interacción en Abaqus. *X Congreso Argentino de Mecánica Computacional*, Salta, Argentina
- Mase G. E. (1977). *Theory and Problems of Continuum Mechanics*. Ed. McGraw-Hill Mexico, 247.
- Matsumura A. (1988). Shear strength of reinforced masonry walls. *Proc. 9th World Conf. on Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan
- MSJC (2011). *Masonry Standards Joint Committee. Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures*. TMS402-ACI530-ASCE5/2011.
- Meguro K., Pandey B. H. (2004). Simulation of Brick Masonry Wall Behavior Under In-Plane Lateral Loading Using Applied Element Method (Paper N° 1664). *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada
- Michele G., Francesco V., Shenghan Z., Katrin B. (2019). Quasi-static shear-compression tests on stone masonry walls with plaster: Influence of load history and axial load ratio. *Engineering Structures*, 192, 264–278.
- Milani G., Lourenço P.B., Tralli A. (2006a). Homogenized limit analysis of masonry walls. Part I: Failure surfaces. *Computers & Structures*, 84,166-180.
- Milani G., Lourenço P.B., Tralli A. (2006b). Homogenized limit analysis of masonry walls. Part II: Structural examples. *Computers & Structures*, 84,181–195.
- Milani G., Lourenço P.B., Tralli A. (2006c). A homogenization approach for the limit analysis of out-of-plane loaded masonry walls, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 132(10),1650-1663.
- Milani G., Lourenço P.B., Tralli A. (2007). 3D homogenized limit analysis of masonry buildings under horizontal loads. *Engineering Structures*., 29, 3134-3148.

- Mojsilovic N., et al. (2015). Displacement capacity of contemporary unreinforced masonry walls: An experimental study, *Engineering Structures*, 89, 1–16.
- Mojsilovic N., et al. (2015). Masonry wallettes with a soft layer bed joint: Behaviour under static-cyclic loading, *Engineering Structures*, 86, 16–32.
- Oller S. (2001). *Fractura mecánica un enfoque global*. Centro Internacional de Métodos Numéricos de Ingeniería. ISBN: 84-89925-76-3.
- Oller S. (2002). *Análisis y cálculo de estructuras de materiales compuestos*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE).
- Oller S. (2003). *Simulación numérica del comportamiento mecánico de los materiales compuestos*. Monografía del Centro Internacional de Métodos Numéricos de Ingeniería CIMNE 74.
- Orduña, A.; Ayala, G. (2001). Análisis no lineal de muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales, *Revista Engenharia Civil*, 11, 21-34.
- Page A. W. (1980). A Biaxial Failure Criterion for Brick Masonry in the Tension-Tension Range, *International Journal Masonry Construction*, 1(1), 26-29.
- Page A. W., (1982). An Experimental Investigation of the Biaxial Strength of Brick Masonry, *Proceedings. Sixth International Brick Masonry Conference*, Rome, Italy, 3-15.
- Page A.W. (1978). Finite element model for masonry, *Journal of the Structural Division*, ASCE, 104(8), 1267-1285.
- Pande G.N., Liang J.X., Middleton J. (1989). Equivalent elastic moduli for unit masonry. *Comp. Geotech*, 8,243-265.
- Pelá L. (2009). *Continuum Damage Model for Nonlinear Analysis of Masonry Structures*. Ph.D. Thesis. Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria. Universidad Politècnica de Catalunya.
- Penna A., Lagomarsino S., Galasco A. (2013). A nonlinear macroelement model for the seismic analysis of masonry buildings. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 43, Issue 2, 159-179.
- Penelis G.G. (2006). An efficient approach for pushover analysis of unreinforced masonry (URM) structures. *Journal of Earthquake Engineering*, 10(3),359-379.
- Quinteros R. (2014). *Modelización del comportamiento de estructuras de mampostería mediante la teoría de homogeneización*. Tesis Doctoral. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Salta.
- Ramírez P., Sandoval C., Almazán J.L. (2016). Experimental study on in-plane cyclic response of partially grouted reinforced concrete masonry shear walls. *Engineering Structures*, 126, 598-617.

- Roca P. (2000). *Construcciones históricas. Efecto de los sismos en construcciones de obra de fábrica. Estructuras sometidas a acciones sísmicas*. En E. Car, López A. Y S. Oller (Editores), CIMNE.
- Roca P., Cervera, M., Giuseppe, G., Pela, L. (2010). Structural Analysis of Masonry Historical Constructions, *Arch Comput Methods Eng*, 17, 299–325.
- Samarasinghe W., Page A. W., Hendry A. W. (1981). Behaviour of masonry shear walls. *Structural Engineering*, 59B(3),42–8.
- Tomazevic M. (1999). Earthquake-resistant design of masonry buildings. London Imperial College Press. *Series in innovation in structures and construction*, 1.
- Tornello M., et al. (2005). Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de un edificio educacional (Paper N° A04-08). *Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica. IX Jornadas*, Concepción, Chile. ISSN 07118-2678.
- Torrisi G. (2012). *Análisis y Diseño de Estructuras de Hormigón Armado y Mampostería*, Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Cuyo.
- Torrisi G., Crisafulli F.J. (2010). Modelación refinada de muros de mampostería encadenada; *XXXIV Jornadas de Ingeniería Estructural*, San Juan, Argentina.
- Van der Pluijm, R. and Vermeltoort, A. Th. (1991). Deformation controlled tensile and compressive tests on units, mortar and masonry, report B-91-0561, TNO-BOUW/TU Eindhoven, *Building and Construction Research, The Netherlands* (in Dutch).
- Vermeltoort, A. Th. (1994). *Compression properties of masonry and its components*, 10th International Brick Block Masonry Conference, Calgary, Canada,1433-1442.
- Vermeltoort, A. Th., Raijmakers, Th.M.J. (1993). *Deformation controlled tests in masonry shear walls*, part2. Report TUE/BKO/93.08, Eindhoven, University of Technology, Eindhoven, The Netherlands.
- Vermeltoort, A. Th., Raijmakers, Th.M.J. and Janssen, H.J.M. (1993). Shear tests on masonry walls, *Proceedings 6th North American Masonry Conference*, Philadelphia, U.S.A., 1183-1193.
- Xu C., Xiangli C., Bin L. (2012). Modelling of influence of heterogeneity on mechanical performance of unreinforced masonry shear walls. *Construction and Building Materials*, 26,90-95.
- Zucchini A., Lourenço P.B. (2002). A micro-mechanical model for the homogenization of masonry. *International Journal of Solids and Structures*, 39, 3233-3255.
- Zucchini A, Lourenço P.B. (2006). Homogenisation Approaches for Structural Analysis of Masonry Buildings. *Structural Analysis of Historical Constructions*, New Delhi.
- Zucchini A., Lourenço P.B. (2007). Mechanics of masonry in compression: Results from a homogenization approach. *Computers and Structures*, 85,193-204.

Zucchini A., Lourenço, P.B. (2009). A micro-mechanical homogenisation model for masonry: Application to shear walls. *International Journal of Solids and Structures*, 46, 871–886.