



Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

MODELACIÓN ESTÁTICA NO LINEAL EN PAREDES DE MAMPOSTERÍA CONFINADA CON CARGAS SÍSMICAS

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingenieros
Civiles.

Autores:

Pedro Esteban Jara Sarmiento

Genaro David Heras Vera

Director:

Juan Carlos Jiménez Pacheco

ORCID:  0000-0002-8977-9879

Tutor:

Hernán Alfredo García Erazo

ORCID:  0000-0002-0279-1112

Cuenca, Ecuador

2024-09-19

Resumen

En esta tesis se analiza el comportamiento estructural de paredes de mampostería confinada (MC) frente a cargas laterales, considerando específicamente el impacto de aberturas tipo puerta y ventana. Mediante el uso de simulaciones numéricas con los programas STKO y *OpenSees*, se evalúa la capacidad de carga y la distribución de deformaciones en paredes de MC. El estudio confirma que la presencia de aberturas reduce significativamente la rigidez y resistencia lateral de las paredes, siendo este efecto más pronunciado en aberturas de mayor tamaño y en posiciones críticas. La distribución del daño varía según la ubicación y tamaño de las aberturas, con concentraciones de daño alrededor de aberturas grandes y Elementos Volumétricos Representativos (RVE), se logró una modelación precisa de las propiedades mecánicas de la mampostería, validando los resultados obtenidos con estudios experimentales previos. Se recomienda desarrollar modelos numéricos que representen con precisión el módulo de falla final y las deformaciones de la mampostería confinada, utilizando STKO para capturar las interacciones complejas y el comportamiento no lineal. Futuros estudios deben enfocarse en la macro modelación de elementos de mampostería confinada, investigando la interacción entre columnas y muros bajo cargas laterales para mejorar la precisión de las predicciones estructurales y optimizar el diseño sismorresistente de estas estructuras.

Palabras clave: mampostería confinada, puertas, ventanas, análisis sísmico, carga máxima.



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

In this thesis, the structural behavior of confined masonry (CM) walls under lateral loads is analyzed, specifically considering the impact of door and window openings. Using numerical simulations with the programs STKO and *OpenSees*, the load capacity and deformation distribution in CM walls are evaluated. The study confirms that the presence of openings significantly reduces the stiffness and lateral resistance of the walls, with this effect being more pronounced for larger openings and critical positions. The damage distribution varies according to the location and size of the openings, with concentrations of damage around large openings and Representative Volume Elements (RVE). A precise modeling of the mechanical properties of the masonry was achieved, validating the obtained results with previous experimental studies. It is recommended to develop numerical models that accurately represent the ultimate failure mode and deformations of confined masonry, using STKO to capture the complex interactions and nonlinear behavior. Future studies should focus on the macro modeling of confined masonry elements, investigating the interaction between columns and walls under lateral loads to improve the accuracy of structural predictions and optimize the seismic-resistant design of these structures.

Keywords: confined masonry, doors, windows, seismic analysis, maximum load.



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

Capítulo 1: Introducción y objetivos	9
1.1. Planteamiento del problema.....	9
1.2. Objetivo general.....	10
1.3. Objetivos específicos.....	10
Capítulo 2: Estado del arte	11
2.1 Introducción.	11
2.2 Características de las paredes de mampostería confinada.	11
2.3 Normativa nacional e internacional.....	14
2.4 Vulnerabilidad estructural.	17
2.5 Conclusiones.	19
Capítulo 3: Modelación mediante elementos finitos de paredes de mampostería confinada.	20
3.1 Introducción.	20
3.2 Definición de los elementos representativos de volumen en mampostería confinada.....	21
3.3 Configuración geométrica de las paredes de mampostería confinada.	23
3.4 Características mecánicas y propiedades de los diferentes tipos de materiales.....	28
3.5 Conclusiones.	29
Capítulo 4: Determinación de la capacidad sísmica de las paredes de MC.....	30
4.1 Introducción.	30
4.2 Análisis elástico no lineal de los casos modelados.	31
4.2.1 Valor de masa y análisis modal	31
4.2.2 Análisis <i>pushover</i>	31
4.2.3 Solución numérica	32
4.3 Rigidez elástica teórica de las paredes de mampostería confinada.	33
4.4 Comparación de estados de daño con artículos.	34
4.4 Casos modelados	38
4.4.3 Análisis de casos modelados de aberturas por puertas	41
4.4.3.1 Relación alto/ancho 1.....	41
4.4.3.2 Relación alto/ancho 1.5	45
4.4.3.3 Relación alto/ancho 2.....	48
4.4.4 Análisis de casos modelados de aberturas por ventanas	51
4.4.4.1 Relación alto/ancho 1.....	51
4.4.4.2 Relación alto/ancho 1.5	54

4.4.4.3	Relación alto/ancho 2.....	57
4.5.5.4	Análisis de rigidez elástica y capacidad de cortante basal	60
4.6	Conclusiones.	63
Capítulo 5: Conclusiones, recomendaciones y líneas de investigación		64
5.1	Conclusiones.	64
5.2	Recomendaciones.	65
5.3	Líneas de investigación futura.....	65
Referencias.....		67

Índice de figuras

Figura 1: Diseño y refuerzo de columnas en Mampostería Confinada	12
Figura 2: RVE de mampostería compuesta de ladrillos sólidos.	23
Figura 3: Sección de columna y viga de confinamiento.	24
Figura 4: Geometría del Muro Confinado tomado de <i>Effective properties of masonry structures and macro-model analysis with experimental verification</i> [Manuscrito enviado para publicación] (García, Jiménez-Pacheco, & Ulloa, 2023)	34
Figura 5: Curvas de fuerza-desplazamiento experimentales (línea discontinua roja) y FEM resultados del macro modelo (línea azul)	36
Figura 6 Geometría del Muro Confinado tomado de Efecto del Refuerzo Horizontal en el comportamiento de Mampostería Confinada ante Cargas Laterales (RAMOS, 1997).....	37
Figura 7 Curvas de fuerza-desplazamiento experimentales (azul) y FEM resultados del macro modelo (línea roja).....	38
Figura 8: Curvas <i>pushover</i> de paredes de MC llena de relaciones b/h 1, 1.5 y 2.	40
Figura 9: Gráfica de rigidez elástica y relación b/h de paredes de MC llena.	40
Figura 10: Gráfica de capacidad de cortante basal y relación b/h de paredes de MC llena.	41
Figura 11: Curvas <i>pushover</i> de paredes de MC con puerta de relación b/h 1 y aberturas 25%, 30%, 35% y 40%.	43
Figura 12: a) Relación entre rigidez elástica y porcentaje de abertura-puerta para b/h 1. b) Daño en rigidez elástica.	44
Figura 13: Gráfica de capacidad de cortante basal y porcentaje de abertura-puerta para b/h 1. b) Daño en capacidad de cortante basal.	44
Figura 14: Curvas <i>pushover</i> de paredes de MC con puerta de relación b/h 1.5 y aberturas 25%, 30%, 35% y 40%.	46
Figura 15: a) Gráfica de rigidez elástica y porcentaje de abertura-puerta para b/h 1.5. b) Daño en rigidez elástica.	47
Figura 16: a) Gráfica de capacidad de cortante basal y porcentaje de abertura-puerta para b/h 1.5. b) Daño en capacidad de cortante basal.	48
Figura 17: Curvas <i>pushover</i> de paredes de MC con puerta de relación b/h 2 y aberturas 25%, 30%, 35% y 40%.	49
Figura 18: a) Gráfica de rigidez elástica y porcentaje de abertura-puerta para b/h 2. b) Daño en rigidez elástica.	50
Figura 19: a) Gráfica de capacidad de cortante basal y porcentaje de abertura-puerta para b/h 2. b) Daño en capacidad de cortante basal.	50
Figura 20: Curvas <i>pushover</i> de paredes de MC con ventana de relación b/h 1 y aberturas 15%, 20%, 25% y 30%.	52
Figura 21: a) Gráfica de rigidez elástica y porcentaje de abertura-ventana para b/h 1. b) Daño de rigidez elástica.	53
Figura 22: a) Gráfica de capacidad de cortante basal y porcentaje de abertura-ventana para b/h 1. b) Daño de capacidad de cortante basal.	54
Figura 23: Curvas <i>pushover</i> de paredes de MC con ventana de relación b/h 1.5 y aberturas 15%, 20%, 25% y 30%.	55
Figura 24: a) Gráfica de rigidez elástica y porcentaje de abertura-ventana para b/h 1.5. b) Daño en rigidez elástica.	56
Figura 25: a) Gráfica de capacidad de cortante basal y porcentaje de abertura-ventana para b/h 1.5. b) Daño en capacidad de cortante basal.	57

Figura 26: Curvas <i>pushover</i> de paredes de MC con ventana de relación b/h 2 y aberturas 15%, 20%, 25% y 30%.	58
Figura 27: a) Gráfica de rigidez elástica y porcentaje de abertura-ventana para b/h 2. b) Daño en rigidez elástica.	59
Figura 28: a) Gráfica de capacidad de cortante basal y porcentaje de abertura-ventana para b/h 2. b) Daño en capacidad de cortante basal.	60
Figura 29: a) Gráfica de rigidez elástica en abertura-puerta, con distintos b/h . b) Daño en la rigidez estática, con distintos b/h .	61
Figura 30: a) Gráfica de capacidad de cortante basal en abertura-puerta, con distintos b/h . b) Daño en la capacidad de cortante basal, con distintos b/h .	61
Figura 31: a) Gráfica de rigidez elástica en abertura-ventana, con distintos b/h . b) Daño en la rigidez estática, con distintos b/h .	62
Figura 32: a) Gráfica de capacidad de cortante basal en abertura-ventana, con distintos b/h . b) Daño en la capacidad de cortante basal, con distintos b/h .	63

Índice de tablas

Tabla 1: Requisitos mínimos para Mampostería Confinada, según NEC SE DS	15
Tabla 2: Requisitos mínimos para Mampostería Confinada según (COSUDE).....	16
Tabla 3: Requisitos mínimos para Mampostería Confinada según Norma Chilena	16
Tabla 4: NTC-M: Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería	17
Tabla 5: Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo	17
Tabla 6: a) Paredes de relación de aspecto 1, b) Paredes de relación de aspecto 1.5, c) Paredes de relación de aspecto 2.	25
Tabla 7 Dimensiones de aberturas con puerta en centímetros para relación de aspecto 1, 1.5 y 2.....	27
Tabla 8 Dimensiones de aberturas con ventana en centímetros para relación de aspecto 1, 1.5 y 2.....	27
Tabla 9: Propiedades promedio de elemento volumétrico representativo de la mampostería de (García, Jiménez-Pacheco, & Ulloa, 2023).....	29
Tabla 10: Propiedades de hormigón y acero (Guido Camata & Nicola Tarque, 2019).....	29
Tabla 11: Propiedades utilizadas en el ensayo y en la macro modelación del muro confinada tomado de Effective properties of masonry structures and macro-model analysis with experimental verification [Manuscrito enviado para publicación] (García, Jiménez-Pacheco, & Ulloa, 2023)	35
Tabla 12 Propiedades utilizadas en el ensayo y en la macro modelación del muro confinada tomado de Efecto del Refuerzo Horizontal en el comportamiento de Mampostería Confinada ante Cargas Laterales (RAMOS, 1997)	37
Tabla 13: Análisis <i>pushover</i> y daño de paredes de MC con relación alto/ancho 1, 1.5 y 2. .	39
Tabla 14: Análisis <i>pushover</i> y daño de paredes de MC con puerta centrada y relación alto/ancho 1.....	42
Tabla 15: Análisis <i>pushover</i> y daño de paredes de MC con puerta centrada y relación alto/ancho 1.5.	45
Tabla 16: Análisis <i>pushover</i> y daño de paredes de MC con puerta centrada y relación alto/ancho 2.....	48
Tabla 17: Análisis <i>pushover</i> y daño de paredes de MC con ventana centrada y relación alto/ancho 1.....	51
Tabla 18: Análisis <i>pushover</i> y daño de paredes de MC con ventana centrada y relación alto/ancho 1.5.	54
Tabla 19: Análisis <i>pushover</i> y daño de paredes de MC con ventana centrada y relación alto/ancho 2.....	57

Capítulo 1: Introducción y objetivos

1.1. Planteamiento del problema.

Las construcciones de mampostería son predominantes en todo el mundo, especialmente en nuestro país y en la ciudad de Cuenca. Según el GAD de Cuenca (GAD Cuenca, 2015), en la ciudad hay más de 60.000 edificios; de ellos, el 43% son de mampostería confinada (Cornejo Pintado & Zúñiga Saca, 2020). Lo que motiva al estudio de comportamiento de paredes de mampostería confinada frente a eventos sísmicos.

Los estudios experimentales y de inspección de daños frente a eventos sísmicos han mostrado que uno de los factores más determinantes en el comportamiento sísmico de las edificaciones de mampostería confinada es la distribución y la geometría de las aberturas de sus paredes de mampostería confinada (MC). El daño que experimenta una pared de mampostería confinada (MC) bajo carga lateral creciente es muy sensible a la variación en el tamaño y la ubicación de la abertura. Esta inestabilidad en la evolución del daño y los modos de falla que presentan las paredes de mampostería confinada MC ha imposibilitado, hoy en día, la existencia de un macro modelo enteramente satisfactorio para evaluar su desempeño sísmico, y por extensión el desempeño sísmico de las edificaciones de paredes de MC (Borah, Kaushik, & Singhal, 2023) (Pérez Gavilán Escalante, y otros, 2023).

Si bien es conocido que la influencia de las aberturas en el comportamiento bajo carga lateral de las paredes llenas de mampostería confinada (MC) se traduce en la disminución de su rigidez y capacidad de resistencia ante dicha carga lateral, no se han llegado a establecer formulaciones analíticas que abarquen toda la casuística del problema (Castillo Barreto, 2022). Sin considerar la variabilidad de las características de las paredes de MC, el tipo (puerta o ventana), la presencia o no de elementos de borde, el tamaño, la ubicación son variables asignables a la abertura como una de las partes del problema. Actualmente, en la literatura existen formulaciones que cubren un ámbito muy restringido de casos, dentro del cual no caen las tipologías de paredes de uso mayoritario en Ecuador y, en particular, en la ciudad de Cuenca.

La caracterización de los materiales en mampostería presenta desafíos significativos, ya que los ensayos experimentales a gran escala son costosos y requieren equipos especializados, lo que limita su viabilidad (Standardization, 1995) (Tomazevic, 1999). Como alternativa, se suele estimar la resistencia de la mampostería en función de la resistencia de ladrillos y mortero, lo que permite pruebas en laboratorios más pequeños (Standardization, 1995). Eurocode (Standardization, 1995) presenta ecuaciones empíricas que relacionan las propiedades de ladrillos y morteros una prueba de resistencia a la compresión de la

mampostería, sin embargo, no siempre son precisas y no representan las características ortótropas de la mampostería.

Una estrategia innovadora para la caracterización de la mampostería es el uso del Método de Homogeneización Computacional de primer orden (en inglés, CHM) y (en inglés, RVE) que capture la estructura microscópica de la mampostería. Sin embargo, el CHM presenta desafíos, especialmente para materiales cuasi-frágiles como la mampostería, debido a la localización de deformaciones. Autores como Massart et al. (Massart, Peerlings, & Geers, 2007) han desarrollado enfoques que abordan este desafío mediante la homogeneización multiescalar con localización de daño. Esta innovadora metodología permite obtener propiedades de mampostería con mayor precisión (Nguyen, Stroeve, & Sluys, 2011).

La metodología pionera en el estudio de daño en paredes de MC propuesta por García et al. (García, Jiménez-Pacheco, & Ulloa, 2023) surge ante la necesidad de que los modelos se adapten tanto a las propiedades de las paredes de MC local como a las irregularidades de los elementos. Esto permite obtener las propiedades medias del material en diferentes direcciones y considerar así el comportamiento ortótropo de la mampostería. Además, los RVE se analizan utilizando el modelo de daños desarrollado en (Petracca, 2016).

La resolución de este desafío se llevará a cabo mediante el empleo de simulaciones numéricas en el software STKO. Esta plataforma proporcionará las herramientas necesarias para analizar de manera detallada el comportamiento estructural y evaluar la eficacia de la metodología propuesta en condiciones sísmicas.

1.2. Objetivo general.

Tomando como referencia tres paredes de MC llenas con diferentes relaciones de aspecto, analizar mediante análisis estático no lineal tipo *pushover*, la influencia del incremento del tamaño de las aberturas (tipo puerta y tipo ventana, centradas) en las características básicas de su curva de capacidad (rigidez elástica y capacidad de cortante basal).

1.3. Objetivos específicos.

- Reforzar la validación de: 1) una metodología de establecimiento de propiedades efectivas para mampostería de ladrillo, y 2) una estrategia de macro modelización con elementos finitos homogeneizados para análisis estático no lineal tipo *pushover* de Paredes de mampostería confinada.
- Establecer para un conjunto de 3 paredes de MC (relaciones b/h de 1, 1.5 y 2), mediante un estudio paramétrico, la degradación en las características de las curvas *pushover*, caracterizando la disminución de la Rigidez Elástica, capacidad de carga

lateral máximo ante el aumento de tamaño de aberturas tipo ventana y tipo puerta (4 variaciones, en términos porcentuales área de abertura/área de paredes de MC).

Capítulo 2: Estado del arte

2.1 Introducción.

Dentro de nuestro medio, en la construcción residencial de hasta 3 pisos las viviendas son construidas principalmente con Mampostería Confinada (MC), la cual según (NEC-SE-MP., 2014) se refiere a “mampostería construida rígidamente rodeada en sus cuatro lados por columnas y vigas de hormigón armado para que trabajen como pórticos resistentes a flexión”, además una ventaja adicional es la facilidad de entendimiento de su metodología y proceso constructivo (Barajas, 2017). Este tipo de estructuras fueron constituidas por técnicas empíricas, por lo que, siguiendo con la línea de investigación dada por docentes y estudiantes en la Universidad de Cuenca, y guiándonos en investigaciones previas (Penna, 2011), es de suma importancia obtener información de las paredes de MC frente a cargas sísmicas, apoyándonos en modelos modernos con programas óptimos para detallar el comportamiento que podría tener las paredes de MC, con diferentes aberturas representando puertas y ventanas frente a una carga lateral.

2.2 Características de las paredes de mampostería confinada.

La mampostería confinada es una técnica constructiva que combina elementos de mampostería (ladrillos o bloques) con elementos de concreto reforzado (columnas y vigas). Este capítulo detalla las características principales de las paredes de mampostería confinada, abordando aspectos como materiales, comportamiento estructural, diseño y construcción, y evaluación sísmica.

2.2.1. Materiales Utilizados

Las paredes de mampostería confinada están compuestas por ladrillos o bloques y concreto reforzado. Los materiales utilizados son cruciales para la integridad estructural y la resistencia sísmica.

- **Ladrillos o Bloques:** Se utilizan principalmente ladrillos de arcilla cocida o bloques de concreto. Los ladrillos de arcilla cocida deben cumplir con las normas técnicas específicas de resistencia y durabilidad. La elección entre ladrillos y bloques depende de varios factores, incluidos los costos, la disponibilidad local y las propiedades específicas de cada

material. Los ladrillos de alta calidad presentan menos fisuras y mejor uniformidad dimensional, lo que mejora la cohesión estructural y la distribución de cargas.

- **Mortero:** El mortero actúa como agente de unión entre los ladrillos o bloques. Su composición típica incluye cemento, arena y agua en proporciones específicas. Un mortero bien mezclado y curado proporciona una unión fuerte que distribuye las cargas de manera uniforme y mejora la resistencia general de la mampostería confinada. Las propiedades del mortero, como la resistencia a la compresión y la adherencia, son cruciales para el desempeño sísmico de la mampostería confinada.
- **Concreto Reforzado:** Las vigas y columnas de confinamiento, son miembros de concreto reforzado (con varillas de acero). Este refuerzo proporciona la ductilidad y capacidad de absorción de energía necesarias para soportar cargas sísmicas. Las varillas de acero deben estar adecuadamente ancladas y distribuidas para garantizar una transferencia eficaz de cargas entre los elementos de concreto y la mampostería. La calidad del concreto, medida en términos de resistencia a la compresión y durabilidad, es esencial para la integridad de las estructuras de confinamiento.

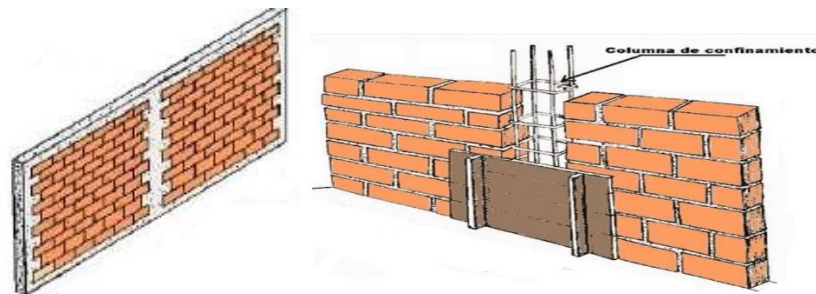


Figura 1: Diseño y refuerzo de columnas en Mampostería Confinada

2.2.2 Comportamiento Estructural

El comportamiento estructural de las paredes de mampostería confinada se caracteriza por la interacción entre la mampostería y los elementos de confinamiento. Esta interacción mejora significativamente la capacidad de la estructura para resistir cargas laterales y verticales.

- **Resistencia a Cargas Verticales:** La mampostería por sí sola proporciona una excelente resistencia a las cargas verticales, soportando el peso de la estructura sobre ella. La disposición de los ladrillos o bloques en patrones específicos, como el trabado, también contribuye a la estabilidad y resistencia de las paredes de MC. La capacidad de las

paredes de mampostería para soportar cargas verticales depende de la calidad de los materiales y la precisión en la construcción.

- **Resistencia a Cargas Laterales:** Los elementos de concreto reforzado confinan la mampostería, mejorando su capacidad para resistir cargas laterales provocadas por sismos. La mampostería confinada actúa como una estructura compuesta, donde los marcos de concreto evitan la falla prematura de los paneles de mampostería. Los marcos de confinamiento distribuyen las fuerzas sísmicas a través de la estructura, reduciendo el riesgo de colapso localizado y mejorando la capacidad de la edificación para soportar movimientos sísmicos intensos.
- **Ductilidad y Absorción de Energía:** Las varillas de acero en el concreto reforzado proporcionan ductilidad a la estructura, permitiendo que absorba y disipe la energía sísmica de manera efectiva. Esta ductilidad es crucial para evitar el colapso catastrófico de la estructura durante un sismo. La capacidad de absorción de energía de las paredes de mampostería confinada depende en gran medida del diseño y la disposición del refuerzo de acero, así como de la calidad del concreto utilizado.

2.2.3. Diseño y Construcción

El diseño y la construcción de paredes de mampostería confinada requieren una planificación cuidadosa y adherencia a normas técnicas específicas para garantizar la seguridad y eficacia estructural.

- **Diseño de Columnas y Vigas:** Las columnas y vigas de confinamiento deben diseñarse para soportar tanto las cargas gravitacionales como las cargas sísmicas. Se recomienda que las columnas tengan un espaciamiento máximo de 4 metros y una sección transversal adecuada para resistir las fuerzas esperadas. El diseño debe incluir un análisis detallado de las cargas y un dimensionamiento preciso de los elementos de concreto reforzado para asegurar la estabilidad y seguridad de la estructura (Penna, 2011).
- **Construcción de Muros:** Los muros de mampostería se construyen en tramos entre las columnas de confinamiento. Es esencial que el mortero utilizado en la unión de los ladrillos o bloques sea de alta calidad para asegurar la cohesión estructural. La correcta alineación y nivelación de los ladrillos o bloques durante la construcción es crucial para la distribución uniforme de las cargas y la integridad de las paredes de MC (Penna, 2011).
- **Conexión entre Elementos:** La conexión entre los muros de mampostería y las columnas y vigas de confinamiento es crítica. Deben utilizarse estribos y refuerzos adicionales en las juntas para garantizar una transferencia efectiva de cargas. Las conexiones bien diseñadas y ejecutadas aseguran que los elementos estructurales trabajen juntos como

una unidad, mejorando la capacidad de la edificación para resistir cargas sísmicas (Penna, 2011).

2.2.4. Evaluación Sísmica

La evaluación sísmica de las paredes de mampostería confinada es fundamental para determinar su capacidad de resistir terremotos. Se utilizan varios métodos para evaluar y mejorar el desempeño sísmico de estas estructuras.

- **Métodos de Simulación:** Las simulaciones numéricas, como el análisis estático no lineal tipo *pushover*, son utilizadas para evaluar el comportamiento de las paredes de MC bajo cargas sísmicas. Estas simulaciones ayudan a identificar puntos débiles y a diseñar refuerzos adecuados. El análisis *pushover* proporciona un enfoque detallado para comprender cómo se comportará la estructura bajo cargas incrementales, permitiendo ajustes en el diseño para mejorar la resistencia y la ductilidad (Manzi, 2017).
- **Pruebas Experimentales:** Las pruebas de laboratorio, que incluyen ensayos de carga lateral y vertical, son realizadas para obtener datos empíricos sobre el comportamiento de las paredes de mampostería confinada. Estos datos son esenciales para validar modelos teóricos y mejorar los diseños estructurales. Las pruebas experimentales proporcionan una comprensión clara de cómo las diferentes configuraciones de mampostería y refuerzo responden a las cargas sísmicas, informando prácticas de construcción más seguras y eficientes (Penna, 2011).
- **Inspección y Mantenimiento:** La inspección regular de las estructuras existentes y el mantenimiento adecuado son esenciales para asegurar su desempeño sísmico a largo plazo. Las reparaciones y refuerzos deben ser implementados según los resultados de las evaluaciones periódicas. Un programa de inspección y mantenimiento bien establecido ayuda a identificar y corregir problemas potenciales antes de que comprometan la seguridad estructural, garantizando que las edificaciones de mampostería confinada permanezcan seguras y funcionales durante su vida útil (Penna, 2011).

2.3 Normativa nacional e internacional.

La normativa en la construcción de estructuras de mampostería confinada, tanto a nivel nacional como internacional, desempeña un papel crucial en garantizar la seguridad y durabilidad de las edificaciones, especialmente en zonas sísmicas. En esta sección, se detallan las principales normativas aplicables y se discuten sus implicaciones para la práctica de la ingeniería civil, con un enfoque en países con alta sismicidad.

Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), NEC SE DS (Diseño Sismo-Resistente):

Ecuador, debido a su ubicación geográfica en una zona de alta actividad sísmica, ha desarrollado un conjunto robusto de normativas para la construcción de estructuras sismo-resistentes.

Las NEC proporcionan lineamientos específicos para la construcción sismo-resistente de mampostería confinada. Estas normas abordan aspectos como los materiales, el diseño estructural, y los métodos de construcción. En particular, la NEC SE DS (Norma Ecuatoriana de Construcción - Diseño Sismo-Resistente) especifica los requisitos mínimos para garantizar la integridad estructural bajo cargas sísmicas como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Requisitos mínimos para Mampostería Confinada, según NEC SE DS

Parámetro	Valor
Resistencia a la compresión del ladrillo o bloque	Mínimo 7 MPa
Resistencia a la compresión del mortero	Mínimo 10 MPa
Espesor mínimo de los muros de mampostería confinada	150 mm

Dimensiones de los elementos de confinamiento (vigas y columnas)

Ancho mínimo	120 mm
Área mínima de refuerzo longitudinal en columnas	1% de la sección transversal de la columna
Espaciamiento máximo de los estribos en columnas	200 mm
Relación altura/longitud de los muros	No debe exceder de 1.5 para garantizar estabilidad y evitar el pandeo

Guía para la Construcción de Viviendas Sismo-Resistentes en Mampostería Confinada:

Publicada por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), esta guía ofrece recomendaciones prácticas para la construcción de viviendas utilizando mampostería confinada. Incluye detalles sobre la selección de materiales, técnicas de construcción y procedimientos de inspección (Barajas, 2017) como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Requisitos mínimos para Mampostería Confinada según (COSUDE)

Parámetro	Valor
Mortero de cemento, cal y arena	Relación volumétrica de 1:0.5:4.5
Espesor de juntas horizontales y verticales de mortero	10 mm a 15 mm
Ancho mínimo de las vigas de confinamiento	Igual al ancho del muro, pero no menor de 150 mm
Refuerzo longitudinal de las vigas de confinamiento	Al menos 4 varillas de 10 mm de diámetro
Espaciamiento máximo de los estribos en vigas de confinamiento	150 mm cerca de los extremos y 200 mm en el resto de la viga

Para normativas en países con alta sismicidad, consideraremos las normas de Chile y México, conocidos por su rigurosa normativa sísmica.

Norma Chilena (NCh) proporcionan lineamientos específicos para la construcción sismo-resistente de mampostería confinada como se ve en la Tabla 3:

Tabla 3: Requisitos mínimos para Mampostería Confinada según Norma Chilena

Parámetro	Valor
Resistencia a la compresión del ladrillo	Mínimo 10 MPa
Resistencia a la compresión del mortero	Clase M7.5 (resistencia mínima de 7.5 MPa)
Espesor mínimo de los muros	140 mm

Dimensiones de los elementos de confinamiento

Ancho mínimo de columnas	150 mm
Área mínima de refuerzo longitudinal en columnas	1% de la sección transversal
Espaciamiento máximo de los estribos en columnas	150 mm en las zonas críticas (extremos) y 200 mm en el resto de la columna
Relación altura/longitud de los muros	No debe exceder de 1.2 para muros portantes

Norma Mexicana (NTC):

NTC-M: Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (García, A., & López, J., 2023), proporcionan lineamientos específicos para la construcción sismo-resistente de mampostería confinada como se muestra en Tabla 4:

Tabla 4: NTC-M: Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería

Parámetro	Valor
Resistencia a la compresión del ladrillo o bloque	Mínimo 7.5 MPa
Resistencia a la compresión del mortero	Mínimo 10 MPa
Espesor mínimo de los muros de mampostería confinada	120 mm para muros internos, 150 mm para muros externos

Dimensiones de los elementos de confinamiento

Ancho mínimo de columnas	150 mm
Área mínima de refuerzo longitudinal en columnas	1% de la sección transversal
Espaciamiento máximo de los estribos en columnas	200 mm en zonas intermedias, 100 mm en los extremos
Relación altura/longitud de los muros	No debe exceder de 1.5 para garantizar estabilidad

NTC-DS: Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo (Gómez, 2023), proporcionan lineamientos específicos para la construcción sismo-resistente de mampostería confinada como se muestra en Tabla 5:

Tabla 5: Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo

Parámetro	Valor
Cargas sísmicas de diseño	Basadas en la zonificación sísmica, variando entre 0.1g a 0.4g dependiendo de la ubicación
Factor de comportamiento sísmico (R)	Entre 2 y 3 para mampostería confinada
Refuerzo longitudinal en columnas y vigas	Mínimo 4 varillas de 12 mm de diámetro
Espaciamiento máximo de los estribos en vigas de confinamiento	150 mm en zonas de alta demanda y 200 mm en el resto de la viga

2.4 Vulnerabilidad estructural.

La vulnerabilidad estructural se refiere a la susceptibilidad de una edificación a sufrir daños o colapsar durante eventos sísmicos. En el caso de la mampostería confinada, aunque esta técnica ofrece ventajas significativas en términos de resistencia y durabilidad, aún existen factores que pueden comprometer su desempeño estructural. Estudios específicos, como los realizados por (Fajfar, 2000), destacan que la rigidez y la resistencia inicial de las paredes de mampostería confinada pueden disminuir considerablemente después de eventos sísmicos moderado.

Diseño Inadecuado

Uno de los principales factores que contribuyen a la vulnerabilidad estructural es el diseño inadecuado. Los errores en la planificación y diseño de la estructura pueden llevar a una distribución desigual de las cargas, lo que incrementa el riesgo de fallas durante un sismo. Es esencial que el diseño cumpla con todas las normativas sismo-resistentes para minimizar este riesgo.

Calidad de los Materiales

La calidad de los materiales utilizados en la construcción de mampostería confinada es crucial. Materiales de baja calidad, como ladrillos mal cocidos o morteros con proporciones incorrectas, pueden debilitar la estructura y aumentar su vulnerabilidad. La selección y control de calidad de los materiales deben ser rigurosos para garantizar la integridad estructural.

Técnicas de Construcción

Las técnicas de construcción inadecuadas también contribuyen significativamente a la vulnerabilidad estructural. Una mano de obra no capacitada o el uso de métodos de construcción obsoletos pueden resultar en una estructura débil. La capacitación continua y la supervisión estricta en el sitio de construcción son esenciales para asegurar que las técnicas utilizadas cumplan con los estándares modernos.

Deficiencias en el Confinamiento

El confinamiento inadecuado de los elementos de mampostería es otra causa de vulnerabilidad. Las columnas y vigas de confinamiento deben ser adecuadamente diseñadas y construidas para proporcionar el soporte necesario a los muros de mampostería. Deficiencias en el confinamiento pueden llevar a la falla prematura de la estructura durante un sismo.

Efectos de la Carga Vertical

Las cargas verticales, como el peso propio de la estructura y las cargas vivas (personas, muebles, etc.), pueden afectar significativamente la vulnerabilidad de la mampostería confinada. Si estas cargas no están adecuadamente distribuidas o si la estructura no está diseñada para soportarlas, pueden surgir fallas estructurales. El diseño debe garantizar que las cargas verticales sean distribuidas uniformemente para evitar concentraciones de estrés.

Efectos de la Carga Lateral

Las cargas laterales, como las inducidas por sismos, son particularmente críticas para la mampostería confinada. Si la estructura no está diseñada para resistir estas fuerzas, puede experimentar desplazamientos significativos, agrietamiento o incluso colapso. Es esencial que el diseño considere las cargas sísmicas y se realicen simulaciones para evaluar el comportamiento estructural bajo estas condiciones.

Integridad de la Conexión

Las conexiones entre elementos de mampostería y los elementos de confinamiento (vigas y columnas) son vitales para la estabilidad de la estructura. Conexiones deficientes pueden resultar en la separación de elementos, lo que compromete la integridad global de la edificación. Las conexiones deben ser diseñadas y ejecutadas con precisión para asegurar un comportamiento monolítico durante un sismo.

Altura de los Edificios

La altura de los edificios de mampostería confinada puede influir en su comportamiento sísmico. Estructuras más altas pueden ser más susceptibles a los efectos de las cargas laterales debido a su mayor masa y altura. Las normativas especifican límites de altura y requisitos adicionales de diseño para asegurar que las edificaciones más altas puedan resistir las fuerzas sísmicas adecuadamente.

Tecnología de Simulación

El uso de tecnologías de simulación avanzadas permite a los ingenieros evaluar el comportamiento de las estructuras bajo diversas condiciones de carga, incluidas las sísmicas. Estas simulaciones pueden identificar puntos débiles en el diseño y proporcionar datos para mejorar la resistencia estructural. La integración de estas tecnologías en el proceso de diseño es crucial para optimizar la seguridad y la eficiencia de las edificaciones.

Reforzamiento de Estructuras Existentes

El reforzamiento de estructuras existentes es una estrategia clave para reducir la vulnerabilidad estructural. Esto puede incluir la adición de elementos de confinamiento, el refuerzo de conexiones y la mejora de la calidad del mortero y los ladrillos. Las técnicas de reforzamiento deben ser cuidadosamente diseñadas y ejecutadas para maximizar su efectividad y minimizar la interrupción de las funciones de la edificación.

2.5 Conclusiones.

En el capítulo 2, se ha abordado exhaustivamente el estado del arte en relación con la construcción de viviendas de hasta 2 pisos utilizando mampostería confinada (MC). Se ha

destacado la importancia de comprender las características fundamentales de esta técnica constructiva, desde los materiales utilizados hasta el comportamiento estructural ante cargas verticales y laterales, así como los aspectos relacionados con el diseño, la construcción y la evaluación sísmica.

Se ha enfatizado la relevancia de la normativa nacional e internacional en la construcción de estructuras de mampostería confinada, destacando las especificaciones clave que garantizan la integridad estructural y la resistencia sísmica. Además, se han presentado las principales vulnerabilidades estructurales asociadas con esta técnica constructiva, como el diseño inadecuado, la calidad de los materiales, las técnicas de construcción deficientes, las deficiencias en el confinamiento y los efectos de las cargas verticales y laterales.

Se ha resaltado la importancia del uso de tecnologías de simulación avanzadas y del reforzamiento de estructuras existentes como estrategias clave para mejorar la resistencia sísmica y reducir la vulnerabilidad estructural. Estas conclusiones técnicas subrayan la necesidad de una planificación cuidadosa, el cumplimiento estricto de las normativas y estándares de construcción, y la implementación de prácticas de construcción y mantenimiento adecuadas para garantizar la seguridad y durabilidad de las edificaciones de mampostería confinada en entornos sísmicos.

Capítulo 3: Modelación mediante elementos finitos de paredes de mampostería confinada.

3.1 Introducción.

La modelación mediante elementos finitos se llevó a cabo utilizando el software STKO, el cual emplea *OpenSees* como su mecanismo de cálculo interno. *OpenSees*, ampliamente reconocido en la ingeniería estructural, proporciona una robusta plataforma para el análisis no lineal de estructuras (Mckenna & Fenves, 2008).

Debido a que la mampostería es un material que tiene una amplia variabilidad en sus propiedades es necesario plantear un modelo que utilice una metodología de homogeneización.

Se realizó un macro modelo que utiliza propiedades de los materiales; estas propiedades fueron tomadas de (García, Jiménez-Pacheco, & Ulloa, 2023), quienes establecieron un análisis de elemento volumétrico representativo. Para los elementos de confinamiento, se utilizó el elemento *BeamSectionProperty*. Este elemento requiere la especificación de las propiedades mecánicas y geométricas tanto del hormigón como de las varillas de refuerzo,

que incluyen las armaduras longitudinales y transversales. En particular, el elemento de mampostería se modeló con la sección denominada *PlateFiber*. Esta sección específica requiere la definición detallada de las propiedades mecánicas del material de mampostería, así como su espesor, para representar adecuadamente el comportamiento estructural

En cuanto a los elementos de confinamiento, se empleó un tipo de elemento finito tipo línea. Esta formulación permite una representación más precisa de la distribución de tensiones y deformaciones en los elementos de confinamiento, crucial para el análisis de estructuras con alta ductilidad. Para las paredes de MC, se utilizó un tipo de elemento Shell que considera la no linealidad geométrica, esencial para capturar las grandes deformaciones de las paredes de mampostería bajo cargas severas.

La interacción entre el elemento de mampostería confinada y los elementos de confinamiento se realizó mediante un acoplamiento que transfiere los desplazamientos y rotaciones de los elementos de confinamiento al panel de mampostería. Esta interacción es esencial para simular la cooperación entre la mampostería y los elementos de confinamiento, asegurando que las deformaciones en el confinamiento se transmitan de manera precisa a la mampostería. Este aspecto es crucial para evaluar la respuesta global del sistema estructural bajo cargas sísmicas y otras solicitaciones. Este enfoque metodológico permite una evaluación detallada y precisa del comportamiento estructural, facilitando el diseño de estructuras más seguras y eficientes.

3.2 Definición de los elementos representativos de volumen en mampostería confinada.

El concepto de Elemento Representativo de Volumen (RVE) es fundamental en el análisis y modelado de materiales compuestos como la mampostería confinada. Un RVE se define como la unidad más pequeña de un material heterogéneo que todavía es representativa de sus propiedades globales. En otras palabras, un RVE contiene suficiente información microestructural para capturar el comportamiento macroscópico del material, permitiendo así simplificar los complejos análisis estructurales.

En el contexto de la mampostería confinada, el RVE incluye tanto los ladrillos como el mortero, representando una sección típica de la pared. La elección de un RVE adecuado es crucial para garantizar que las propiedades mecánicas derivadas de su análisis sean representativas del comportamiento global de la estructura.

3.2.1 Características Geométricas y Composición

Un RVE para mampostería confinada se compone generalmente de una configuración específica de ladrillos y mortero. Las características geométricas típicas de los RVEs incluyen.

Ladrillos Sólidos y Huecos: La geometría del RVE puede variar dependiendo del tipo de ladrillos utilizados, ya sean sólidos o huecos. Los ladrillos huecos suelen requerir un mayor número de elementos discretizados debido a su geometría más compleja.

Dimensiones y Distribución: Las dimensiones del RVE se seleccionan para reflejar una sección representativa de la pared de mampostería. Por ejemplo, un RVE puede incluir uno o más ladrillos rodeados por mortero, replicando el patrón real de la construcción (García, Jiménez-Pacheco, & Ulloa, 2023).

3.2.2 Discretización y Malla

La discretización del RVE implica dividirlo en elementos más pequeños para facilitar el análisis numérico. En los estudios de elementos finitos, los RVEs se discretizan en elementos cuadriláteros o tetraédricos, dependiendo de la dimensionalidad del modelo (2D o 3D). Las características típicas de la malla incluyen:

Elementos Cuadriláteros de 10 mm: Esta es una elección común para la discretización de RVEs en modelos 2D, equilibrando la precisión del análisis y la eficiencia computacional.

Nodos y Elementos: El número de nodos y elementos en un RVE varía según su complejidad geométrica. Por ejemplo, un RVE con ladrillos huecos puede tener más nodos y elementos comparado con uno de ladrillos sólidos debido a la mayor superficie y volumen que necesita ser representado.

3.2.3 Propiedades Mecánicas Representadas

El análisis de un RVE debe capturar las propiedades mecánicas esenciales de la mampostería confinada (García, Jiménez-Pacheco, & Ulloa, 2023).

Para que un RVE sea verdaderamente representativo, debe cumplir con ciertos criterios, RVE debe ser lo suficientemente grande para incluir las características esenciales de la microestructura, pero no tan grande que se vuelva ineficiente computacionalmente, las propiedades derivadas del RVE deben ser consistentes con aquellas observadas en muestras más grandes del material, los efectos de las condiciones de contorno en el análisis del RVE deben ser mínimos para asegurar que las propiedades derivadas sean inherentes al material y no a los bordes del RVE (Petracca, 2016).

3.3 Configuración geométrica de las paredes de mampostería confinada.

En cuanto a los elementos de confinamiento, se emplearon columnas y vigas de 15 x 15 centímetros, siguiendo las especificaciones del refuerzo mínimo estipulado en (NEC-SE-MP., 2014). Este refuerzo consiste en cuatro varillas longitudinales de 8 milímetros de diámetro, posicionadas en las esquinas de las secciones transversales de los elementos de confinamiento. Además, se utilizaron estribos de 6 milímetros de diámetro, colocados con una separación de 7.5 centímetros. Para garantizar la durabilidad y la adherencia del hormigón con las armaduras, se consideró un recubrimiento de 2 centímetros en toda la superficie de los elementos de confinamiento. La configuración geométrica y los detalles de los elementos de confinamiento se ilustran en la Figura 3.

Las paredes de MC, que fueron objeto de estudio en esta investigación, se describen y detallan en la Tabla 6. Tales paredes se modelaron teniendo en cuenta las relaciones b/h previamente mencionadas. Esta metodología asegura que los resultados obtenidos sean representativos y aplicables a las condiciones reales de construcción en el país, proporcionando una base sólida para la evaluación del comportamiento estructural de las paredes de mampostería confinada condiciones de carga lateral.

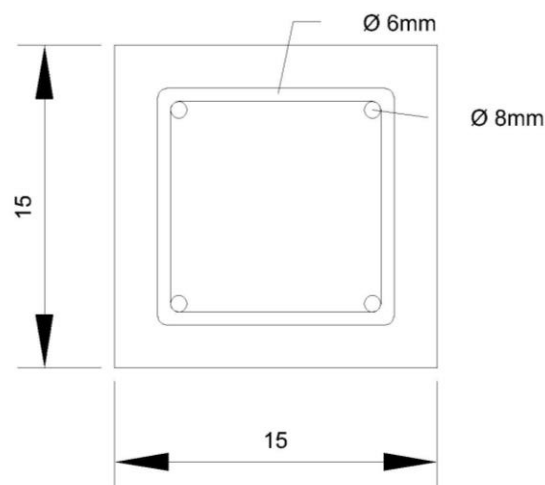
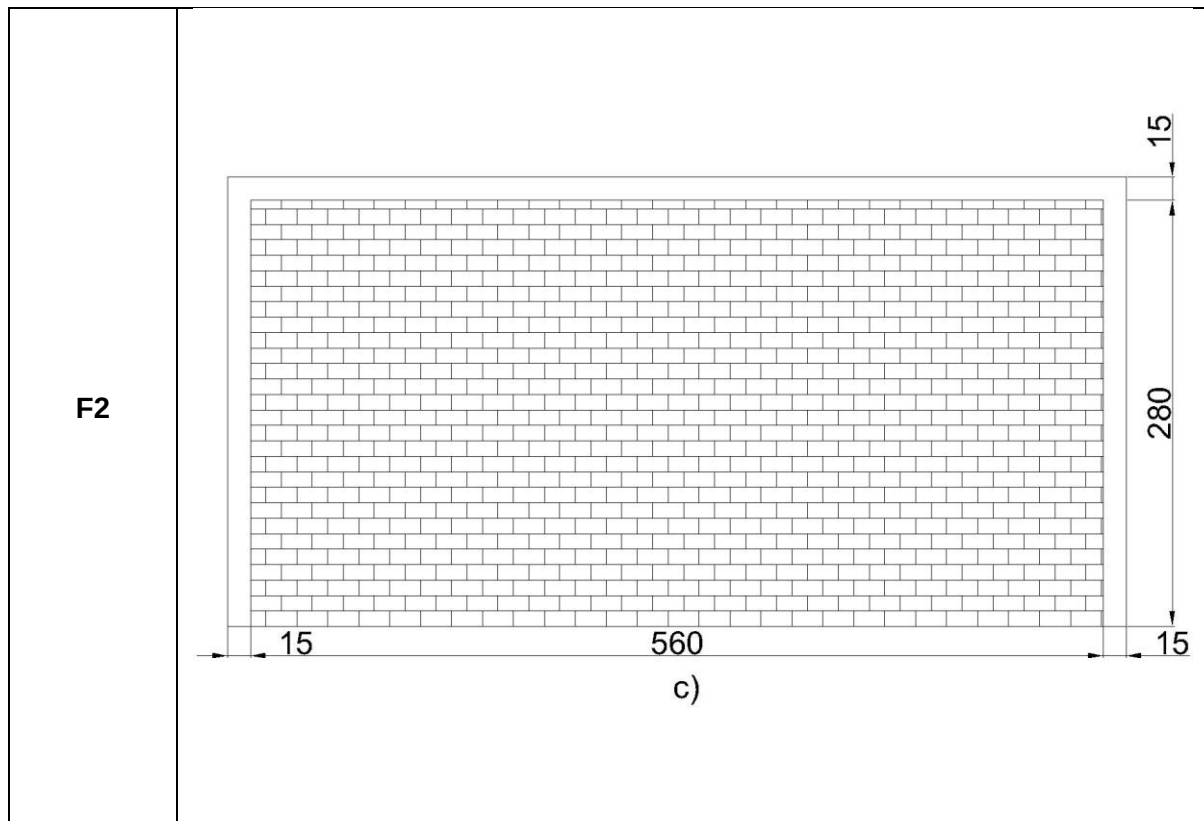


Figura 3: Sección de columna y viga de confinamiento.

Tabla 6: a) Paredes de relación de aspecto 1, b) Paredes de relación de aspecto 1.5, c) Paredes de relación de aspecto 2.

Código	Geometría de Mampostería Confinada
F1	The diagram shows a square masonry wall cross-section. The central masonry area is 280 mm wide and 280 mm high. It is surrounded by a 15 mm margin on all four sides. The total width and height are 310 mm. The label 'a)' is centered below the diagram.
F1.5	The diagram shows a rectangular masonry wall cross-section. The central masonry area is 420 mm wide and 280 mm high. It is surrounded by a 15 mm margin on all four sides. The total width is 450 mm and the total height is 310 mm. The label 'b)' is centered below the diagram.



Las dimensiones de las aberturas de puertas se determinaron en función de una altura estándar de puerta de 2.1 metros. Esta altura se mantuvo constante para asegurar la coherencia con las características arquitectónicas prevalentes, de acuerdo con la información proporcionada en (Bravo Heredia & Flores Cevallos, 2015). La elección de esta altura responde a prácticas arquitectónicas comunes y normativas locales que establecen esta medida como estándar para puertas residenciales y comerciales.

Para calcular el área de abertura necesaria correspondiente a los porcentajes de abertura del 25%, 30%, 35% y 40% para cada relación de aspecto de las paredes de MC, se ajustó el ancho de las puertas. Este enfoque permitió variar el ancho de las aberturas mientras se mantenía constante la altura, asegurando así que los porcentajes de abertura fueran precisos y representativos de las condiciones reales de uso.

Las variaciones en el ancho de las puertas para cumplir con los diferentes porcentajes de abertura se ilustran detalladamente en la Tabla 7. Esta figura muestra cómo se modificaron las dimensiones de las puertas para cada uno de los casos de estudio, proporcionando una visualización clara de las configuraciones geométricas adoptadas.

Las dimensiones de las aberturas de puertas se determinaron en función de una altura estándar desde el piso hasta la parte inferior de la ventana de 0.9 metros. Esta altura se

mantuvo constante para tener coherencia con las características arquitectónicas, de acuerdo con (Bravo Heredia & Flores Cevallos, 2015). A diferencia de las aberturas con puertas se aberturas del 15%, 20%, 25% y 30%. Si se emplearan porcentajes de abertura más grandes, la cantidad de mampostería restante alrededor de la ventana sería insuficiente para mantener la integridad estructural y la estética arquitectónica del muro. Estas variaciones se muestran en la Tabla 8.

Este método asegura que las aberturas sean evaluadas en un contexto realista y aplicable, permitiendo un análisis detallado del impacto de diferentes porcentajes de abertura en el comportamiento estructural de las paredes de mampostería confinada.

Tabla 7 Dimensiones de aberturas con puerta en centímetros para relación de aspecto 1, 1.5 y 2

Geometría de Mampostería Confinada con puerta centrada				
Código	Relación b/h	Alto de Puerta (cm)	Ancho de Puerta (cm)	Porcentaje de abertura
P1_25	1	210	93.33	25%
P1_30	1	210	112	30%
P1_35	1	210	130.66	35%
P1_40	1	210	149.33	40%
P1.5_25	1.5	210	140	25%
P1.5_30	1.5	210	168	30%
P1.5_35	1.5	210	196	35%
P1.5_40	1.5	210	224	40%
P2_25	2	210	186.66	25%
P2_30	2	210	224	30%
P2_35	2	210	261.33	35%
P2_40	2	210	298.66	40%

Tabla 8 Dimensiones de aberturas con ventana en centímetros para relación de aspecto 1, 1.5 y 2.

Geometría de Mampostería Confinada con ventana centrada				
Código	Relación b/h	Alto de Ventana (cm)	Ancho de Ventana (cm)	Porcentaje de abertura
V1_15	1	120	100	15%
V1_20	1	130	120	20%
V1_25	1	140	140	25%
V1_30	1	150	160	30%

V1.5_15	1.5	90	200	15%
V1.5_20	1.5	105	225	20%
V1.5_25	1.5	120	245	25%
V1.5_30	1.5	135	265	30%
V2_15	2	90	270	15%
V2_20	2	105	300	20%
V2_25	2	120	330	25%
V2_30	2	130	360	30%

3.4 Características mecánicas y propiedades de los diferentes tipos de materiales.

Las propiedades mecánicas de la mampostería se obtuvieron a partir de los datos presentados en (García, Jiménez-Pacheco, & Ulloa, 2023). Este estudio proporciona una serie de propiedades detalladas para elementos volumétricos representativos, abarcando diversas combinaciones de mortero y ladrillo. Al ofrecer un amplio espectro de propiedades, este estudio permite una comprensión integral de los diferentes comportamientos mecánicos que pueden presentar las distintas composiciones de mampostería.

Este trabajo, por consideraciones de tiempo se enfoca principalmente en las características geométricas, constituyendo así las variables de estudio paramétricas, en cuanto a las propiedades mecánicas, se opta por utilizar sus valores medias tanto de la mampostería como del hormigón. Al promediar las propiedades, se obtiene un conjunto de parámetros que reflejan adecuadamente las características mecánicas típicas de la mampostería utilizada en el contexto de esta investigación. Las propiedades mecánicas promedio utilizadas en el análisis se presentan detalladamente en la Tabla 9.

Tabla 9: Propiedades promedio de elemento volumétrico representativo de la mampostería de (García, Jiménez-Pacheco, & Ulloa, 2023).

Propiedad	Valores	Unidades
Módulo de Young E	5086	MPa
Módulo de Corte G	1620.2	MPa
Coefficiente de Poisson ν	0.57	
Resistencia a la tracción f_t	0.42	MPa
Energía de fractura por tracción G_t	0.015	N/mm
Resistencia elástica a la compresión f_{c0}	2.42	MPa
Resistencia a la compresión f_c	5.9	MPa
Resistencia a la compresión residual f_r	1.16	MPa
Energía de fractura por compresión G_c	9.04	N/mm
Deformación en fuerza máxima ϵ_p	0.002	

Para los elementos de confinamiento se utilizaron las propiedades del hormigón y acero según (Guido Camata & Nicola Tarque, 2019) que se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10: Propiedades de hormigón y acero (Guido Camata & Nicola Tarque, 2019).

Material	Propiedad	Valores	Unidades
Hormigón	Módulo de Young E	24400	MPa
	Resistencia a la tracción f_t	2.47	MPa
	Energía de fractura por tracción G_t	0.13	N/mm
	Resistencia elástica a la compresión f_{c0}	9.4	MPa
	Resistencia a la compresión f_c	23.5	MPa
	Resistencia a la compresión residual f_r	1	MPa
	Energía de fractura por compresión G_c	11.6	N/mm
	Deformación en fuerza máxima ϵ_p	0.0022	
Acero	Módulo de Young E	210000	MPa
	Esfuerzo de fluencia f_y	4200	MPa

3.5 Conclusiones.

La elección de relaciones b/h de 1, 1.5 y 2 para las paredes de mampostería confinada, basadas en una altura estándar de 2.8 metros, asegura que los resultados obtenidos sean representativos de las construcciones residenciales y comerciales comunes en Ecuador. Esta

metodología se fundamenta en la normativa y las prácticas constructivas locales, lo cual garantiza la aplicabilidad de los hallazgos en el contexto ecuatoriano.

La utilización de columnas y vigas de 15 x 15 centímetros, con refuerzo mínimo según la (NEC-SE-MP., 2014), proporciona una configuración estructural que cumple con las normativas locales de seguridad y durabilidad. El diseño con cuatro varillas longitudinales de 8 milímetros y estribos de 6 milímetros a intervalos de 7.5 centímetros, complementado con un recubrimiento de 2 centímetros, asegura la integridad y resistencia de los elementos de confinamiento.

La determinación de las dimensiones de las puertas con una altura estándar de 2.1 metros, Ajustando el ancho de las puertas para lograr los porcentajes de abertura del 25%, 30%, 35% y 40%.

La elección de una altura estándar de 0.9 metros desde el piso hasta la parte inferior de las ventanas, y la para lograr aberturas de porcentajes de 15%, 20%, 25% y 30%.

Capítulo 4: Determinación de la capacidad sísmica de las paredes de MC

4.1 Introducción.

En este capítulo, se aborda la evaluación de la capacidad sísmica de las paredes de MC de las paredes de mampostería confinada mediante técnicas avanzadas de análisis estructural, incluyendo el análisis modal y el análisis *pushover*. Estas técnicas permiten comprender y predecir el comportamiento no lineal de las estructuras bajo cargas sísmicas, proporcionando una base sólida para mejorar el diseño y la construcción de edificaciones más seguras.

El análisis modal se utiliza para determinar los modos de vibración naturales de la estructura, lo cual es esencial para entender cómo responde a las excitaciones sísmicas. El valor de la masa y la distribución de la rigidez estructural juegan un papel crucial en este análisis, ya que influyen directamente en los modos de vibración y en los factores de participación modal. Estos factores son fundamentales para definir la distribución de cargas en el análisis *pushover*, asegurando que las fuerzas sísmicas se representen de manera precisa y realista.

El análisis *pushover* es una técnica estática no lineal que simula el comportamiento de la estructura bajo cargas laterales incrementales, emulando las fuerzas inerciales generadas durante un sismo (Fajfar, 2000). Este método permite identificar las zonas de la estructura que son más vulnerables al daño, proporcionando información valiosa para el refuerzo y la mejora del diseño estructural. En este capítulo, se detallan los procedimientos utilizados para realizar el análisis *pushover*, incluyendo la definición del patrón de carga y la implementación de soluciones numéricas avanzadas.

Los resultados obtenidos del análisis *pushover*, junto con los diagramas de daño, ofrecen una visión integral del comportamiento de las paredes de mampostería confinada bajo condiciones sísmicas. Estos resultados son esenciales para evaluar la capacidad de deformación y resistencia de las estructuras, así como para desarrollar estrategias efectivas de mitigación de riesgos.

4.2 Análisis elástico no lineal de los casos modelados.

4.2.1 Valor de masa y análisis modal

El valor de la masa de los modelos se calculó utilizando las densidades de los materiales constituyentes. Este cálculo es crucial para determinar el comportamiento dinámico de los modelos tanto en el análisis modal como en el análisis *pushover* posterior. La precisión en la determinación de la masa es fundamental para obtener resultados confiables y representativos en el comportamiento estructural bajo diferentes condiciones de carga.

En el análisis modal, se determinaron los distintos modos de vibración del sistema estructural. El criterio utilizado para considerar que el análisis modal es adecuado fue que la sumatoria de la masa modal efectiva para los modos incluidos debía ser superior al 80% de la masa total del modelo. Este criterio asegura que los modos de vibración más significativos, que contribuyen predominantemente a la respuesta dinámica de la estructura, sean considerados en el análisis.

Los resultados del análisis modal proporcionaron los factores de participación modal, esenciales para entender cómo cada modo de vibración contribuye al comportamiento vibracional global del sistema. Estos factores de participación fueron luego utilizados para definir el patrón de distribución de carga lateral en el análisis *pushover*. El análisis *pushover*, una técnica de análisis estático no lineal requiere la aplicación de un patrón de carga lateral que simule la distribución de fuerzas inerciales durante un evento sísmico. Los factores de participación modal obtenidos del análisis modal se emplearon para escalar las cargas laterales aplicadas en el análisis *pushover*, permitiendo una representación más precisa y realista de las fuerzas sísmicas actuantes en la estructura.

4.2.2 Análisis *pushover*

Para la definición de carga del *pushover* se utilizó el patrón de carga lateral de (Chopra, 2012). Para lo que primero se considera un caso de carga en el que las fuerzas aplicadas $p_i(t)$, tienen el mismo tiempo de variación $p(t)$, y su distribución espacial está dividida por s , que es independiente del tiempo. Entonces:

$$p(t) = sp(t) \tag{1}$$

Donde $\mathbf{s}$ que es la carga modal, está definida como:

$$\mathbf{s} = \sum_{r=1}^N \mathbf{s}_r = \sum_{r=1}^N \Gamma_r \mathbf{m} \Phi_r \quad (2)$$

Donde $\mathbf{m}$ es la matriz de masa, Γ_r es el factor de participación y Φ_r es el modo de forma r . Multiplicando ambos lados de la ecuación (1) por Φ_n^T que es la forma modal y utilizando la ortogonalidad de los modos, se obtiene:

$$\Gamma_r = \frac{\Phi_n^T \mathbf{s}}{M_n} \quad (3)$$

Donde M_n es la masa en el n -ésimo modo natural. La contribución del n -ésimo modo a $\mathbf{s}$ es:

$$\mathbf{s}_n = \Gamma_r \mathbf{m} \Phi_n \quad (4)$$

La cuál al cual es una ecuación normalizada de la masa de la ecuación (3). Además, para el caso de inducción sísmica, las fuerzas de inercia $\ddot{u}_g(t)$ se definen por:

$$\mathbf{p}_{\text{eff}}(t) = -\mathbf{m} \boldsymbol{\iota} \ddot{u}_g(t) \quad (5)$$

Donde $\boldsymbol{\iota}$ es el vector de influencia sísmica del DOF. Al igualar la ecuación (1) con la ecuación (5), se obtiene:

$$\mathbf{s} = \mathbf{m} \boldsymbol{\iota} = \sum_{r=1}^N \mathbf{s}_n = \sum_{r=1}^N \Gamma_n \mathbf{m} \Phi_n \quad (6)$$

Donde Γ_n es:

$$\Gamma_n = \frac{\Phi_n^T \mathbf{m} \boldsymbol{\iota}}{M_n} \quad (7)$$

Obteniendo, con la ecuación (4), el valor de s_n^* que es la carga modal simplificada para el análisis modal *pushover*.

$$s_n^* = m \Phi_n \quad (8)$$

4.2.3 Solución numérica

La solución numérica se llevó a cabo tomando como referencia los desplazamientos calculados en un nodo de control específico. La selección de este nodo de control se realiza de manera estratégica para asegurar que las fuerzas laterales aplicadas sobre el nodo generen únicamente desplazamientos laterales, minimizando la influencia de otros

componentes de deformación. Este enfoque permite una evaluación más precisa del comportamiento lateral de la estructura bajo las cargas aplicadas.

Para ejecutar el análisis *pushover*, el modelo se configuró para generar incrementos de carga hasta alcanzar el desplazamiento objetivo. Se estableció un total de 400 incrementos de carga, lo cual permite capturar detalladamente el comportamiento no lineal de la estructura durante el proceso de empuje. Este método garantiza una representación adecuada del proceso de deterioro y la capacidad de deformación de la estructura bajo cargas incrementales.

El análisis numérico se implementó utilizando el algoritmo de Krylov-Newton, tal como se describe en (Scott & Fenves, 2010). Este algoritmo combina la eficiencia del método de Krylov para la solución de sistemas de ecuaciones lineales con la robustez del método de Newton para resolver problemas no lineales. La utilización del algoritmo de Krylov-Newton en el análisis *pushover* permite manejar grandes sistemas de ecuaciones con un alto grado de precisión, optimizando el proceso de convergencia y reduciendo el tiempo de cómputo.

El algoritmo de Krylov-Newton se ha demostrado como una herramienta eficaz en la resolución de problemas no lineales complejos (Scott & Fenves, 2010), especialmente en el contexto del análisis estructural. La capacidad del algoritmo para adaptarse a las variaciones no lineales de la rigidez y las propiedades materiales de la estructura durante el proceso de empuje es crucial para obtener resultados precisos y confiables. Este enfoque metodológico proporciona una base sólida para evaluar la capacidad de deformación y resistencia de la estructura bajo condiciones de carga extremas, contribuyendo significativamente a la comprensión del comportamiento estructural y al desarrollo de estrategias de diseño más seguras y eficientes.

4.3 Rigidez elástica teórica de las paredes de mampostería confinada.

La rigidez elástica teórica de las paredes de mampostería confinada sin aberturas fue abordada por (Castillo Barreto, 2022) el cuál propone la siguiente ecuación:

$$K_e = \left(\frac{H^3}{\beta E_m I_w} + \frac{kH}{G_m A_w} \right)^{-1} \quad (9)$$

Donde:

H: altura efectiva de la pared de MC.

k: factor de corrección para confinamiento = 1.

β : factor por condiciones de apoyo = 3.

Em: módulo de elasticidad de la mampostería.

Gm: módulo de rigidez al corte de la mampostería.

Aw: área efectiva al corte.

Iw: inercia resistente al corte.

Con esta ecuación se realizó los cálculos para las distintas paredes de mampostería confinada con la relación b/h 1, 1.5 y 2, obtenido valores de 396.44 kN/mm, 608.72kN/mm y 828.95 kN/mm respectivamente.

4.4 Comparación de estados de daño con artículos.

La comparación de los estados de daño observados en las paredes de mampostería confinada con los reportados en diversos artículos científicos proporciona una valiosa perspectiva para validar y contextualizar los resultados obtenidos en el análisis.

En el artículo *Effective properties of masonry structures and macro-model analysis with experimental verification* [Manuscrito enviado para publicación] (García, Jiménez-Pacheco, & Ulloa, 2023), nos presenta un ejemplo de mampostería confinada la cual tiene las siguientes propiedades y geometría, ver en la Tabla 11 y Figura 4.

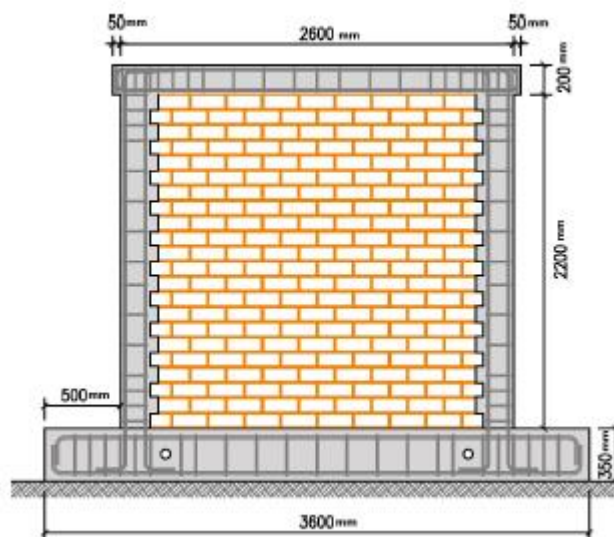


Figura 4: Geometría del Muro Confinado tomado de *Effective properties of masonry structures and macro-model analysis with experimental verification* [Manuscrito enviado para publicación] (García, Jiménez-Pacheco, & Ulloa, 2023)

Tabla 11: Propiedades utilizadas en el ensayo y en la macro modelación del muro confinada tomado de Effective properties of masonry structures and macro-model analysis with experimental verification [Manuscrito enviado para publicación] (García, Jiménez-Pacheco, & Ulloa, 2023)

Propiedad	Valores	Unidades
Módulo de Young E	5086	MPa
Módulo de Corte G	1620.2	MPa
Coeficiente de Poisson ν	0.57	
Resistencia a la tracción f_t	0.42	MPa
Energía de fractura por tracción G_t	0.015	N/mm
Resistencia elástica a la compresión f_{c0}	2.42	MPa
Resistencia a la compresión f_c	5.9	MPa
Resistencia a la compresión residual f_r	1.16	MPa
Energía de fractura por compresión G_c	9.04	N/mm
Deformación en fuerza máxima ϵ_p	0.002	
Mampostería	Valores	Unidades
Young's modulus	3705	MPa
Poisson's ratio	0.15	-
Tensile strength	1.4	MPa
Tensile fracture energy	0.12	N/mm
Compressive elastic strength	4.0	MPa
Compressive strength	10	MPa
Compressive residual strength	2.0	MPa
Compressive fracture energy	6.2	N/mm
Strain at peak strength	0.0035	-
Compressive biaxial strength factor	1.2	-
Concreto	Valores	Unidades
Young's modulus	24400	MPa
Tensile strength	2.47	MPa
Tensile fracture energy	0.13	N/mm
Compressive elastic strength	9.4	MPa
Compressive strength	23.5	MPa
Compressive residual strength	1.0	MPa
Compressive fracture energy	11.6	N/mm
Strain at peak strength	0.0022	-

Acero	Valores	Unidades
Young's modulus of steel	210000	MPa
Yield strength	4200	MPa

Obteniendo como resultado curvas de Curvas de fuerza-desplazamiento, tanto las experimentales como las de la modelación, ver en la Figura 5.

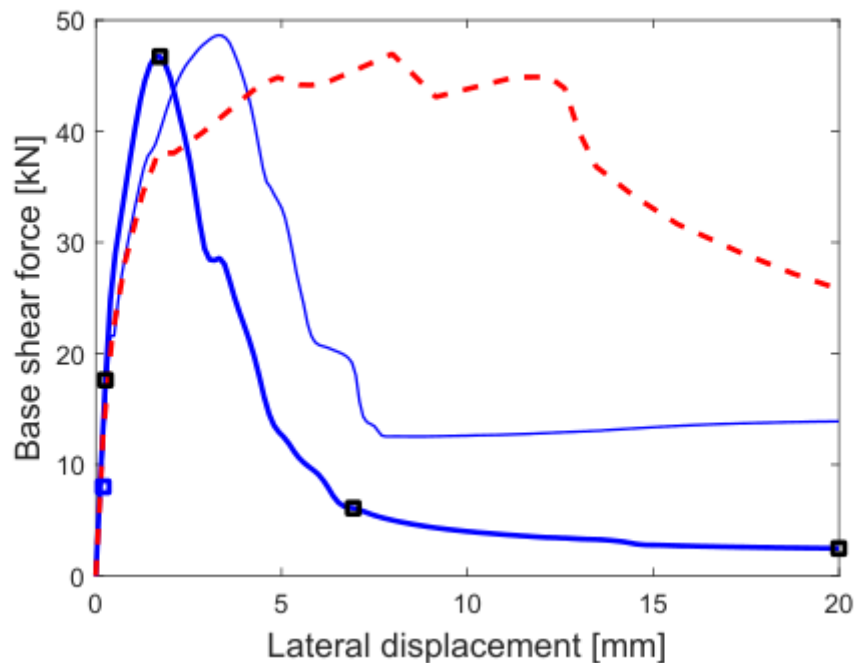


Figura 5: Curvas de fuerza-desplazamiento experimentales (línea discontinua roja) y FEM resultados del macro modelo (línea azul)

Además, se comprobó con otra fuente, en el artículo Efecto del Refuerzo Horizontal en el comportamiento de Mampostería Confinada ante Cargas Laterales (RAMOS, 1997), nos presenta un ejemplo de mampostería confinada la cual tiene las siguientes propiedades y geometría, ver en la Figura 6 y Tabla 12.

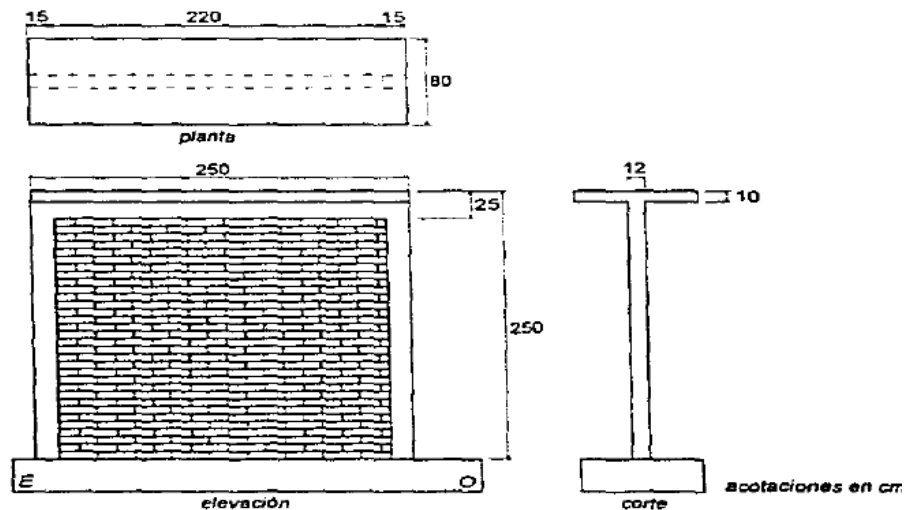


Figura 6 Geometría del Muro Confinado tomado de Efecto del Refuerzo Horizontal en el comportamiento de Mampostería Confinada ante Cargas Laterales (RAMOS, 1997)

Tabla 12 Propiedades utilizadas en el ensayo y en la macro modelación del muro confinada tomado de Efecto del Refuerzo Horizontal en el comportamiento de Mampostería Confinada ante Cargas Laterales (RAMOS, 1997)

Mampostería	Valores	Unidades
Resistencia en compresión	2.6	MPa
Resistencia a fuerza cortante	2.6	MPa
Rigidez elástica	714.7	MPa
Módulo de Cortante	475.8	MPa

Refuerzo	Valores
Refuerzo Castillo Longitudinal	$\rho = 1.58\%$
Refuerzo Castillo Transversal	No, 2 c/6cm
Refuerzo en Dala	No, 2 c/20cm

Obteniendo como resultado curvas de Curvas de fuerza-desplazamiento, tanto las experimentales como las de la modelación, ver en la Figura 7.

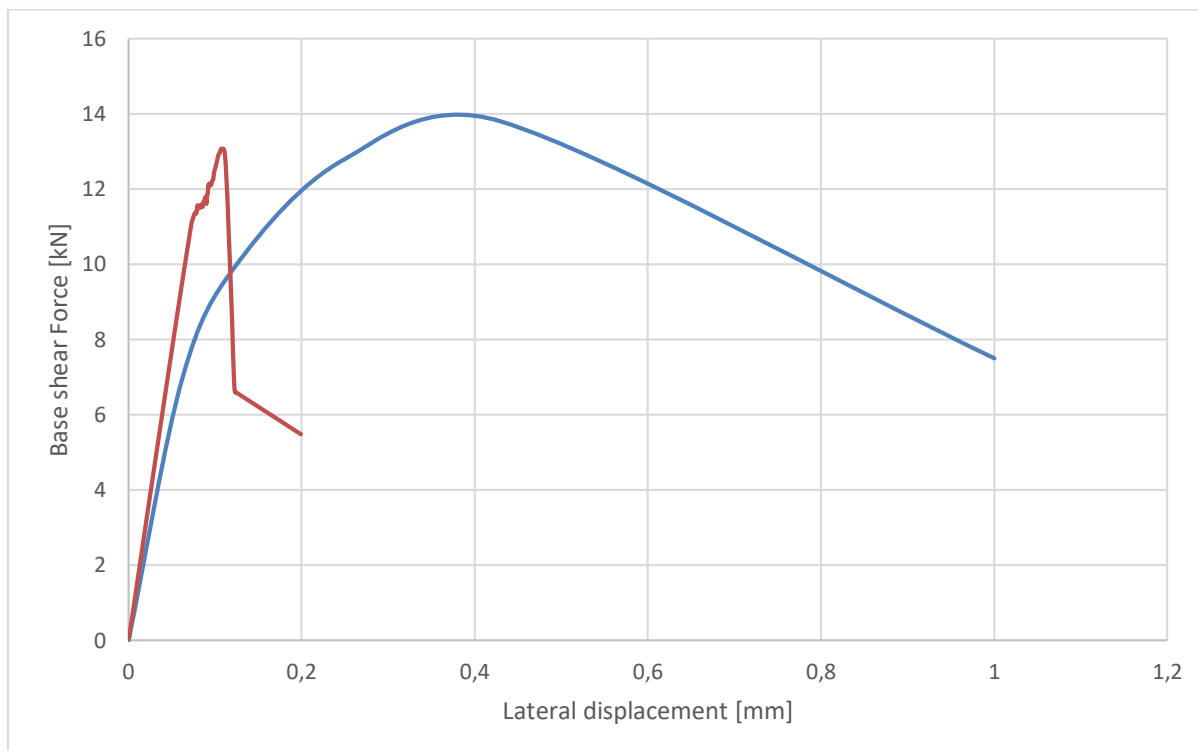
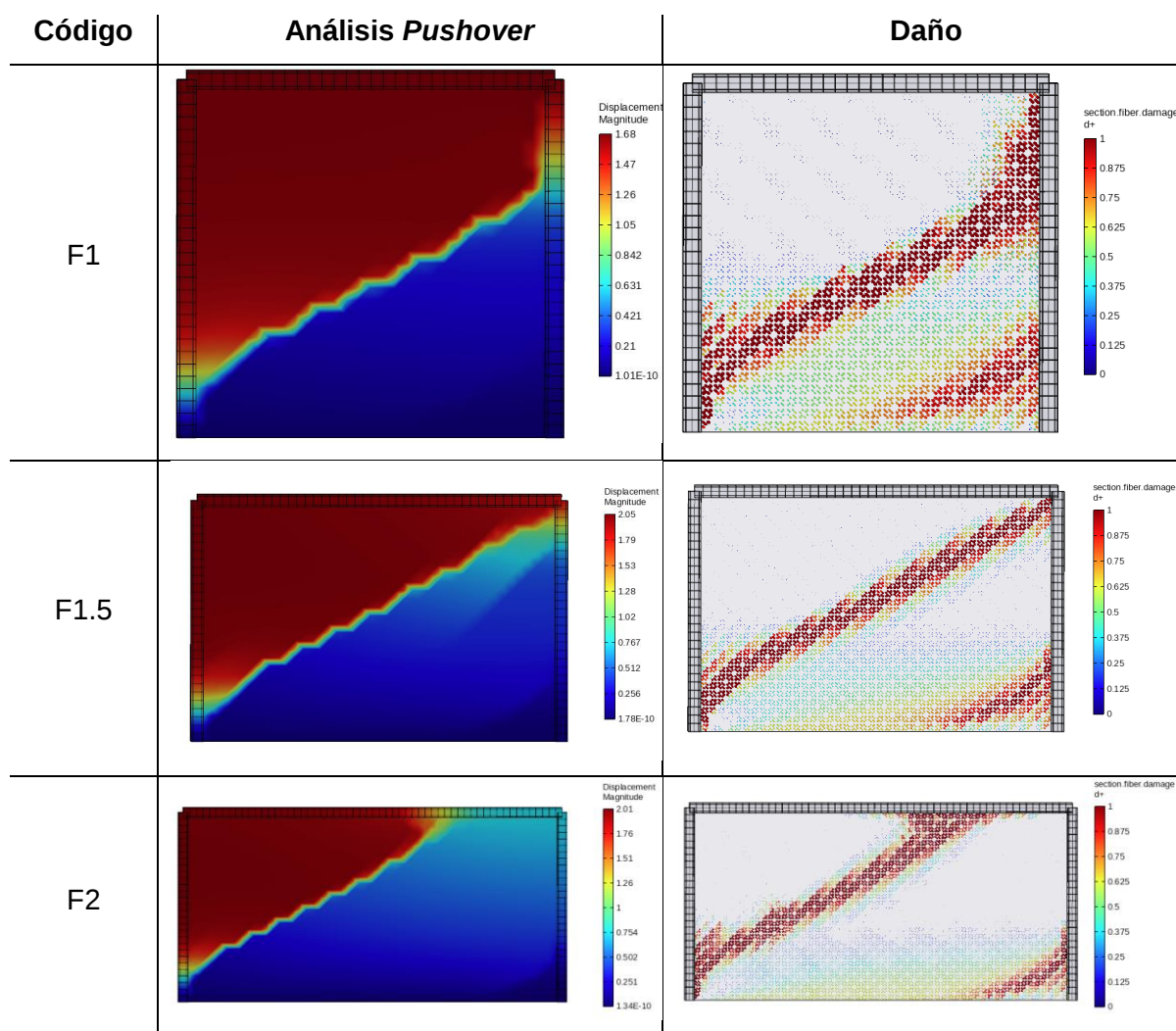


Figura 7 Curvas de fuerza-desplazamiento experimentales (azul) y FEM resultados del macro modelo (línea roja).

4.4 Casos modelados

Se realizaron los modelos para las paredes de mampostería confinada (MC) completas, obteniendo las gráficas *pushover* y los diagramas de daño correspondientes, como se muestra en la Tabla 13. Estos análisis son fundamentales para evaluar el comportamiento estructural de las paredes de mampostería confinada bajo cargas laterales incrementales y para identificar las zonas de mayor vulnerabilidad al daño.

Tabla 13: Análisis *pushover* y daño de paredes de MC con relación alto/ancho 1, 1.5 y 2.

Al realizar un análisis de las curvas *pushover* de las tres paredes completas, como se presenta en la Figura 8.

En la Figura 9 y Figura 10 se ilustran gráficamente las variaciones de rigidez elástica y la capacidad de corte basal respecto a las relaciones b/h de 1, 1.5 y 2. Estas gráficas permiten visualizar claramente las tendencias de comportamiento que emergen a medida que se alteran las proporciones geométricas de las paredes.

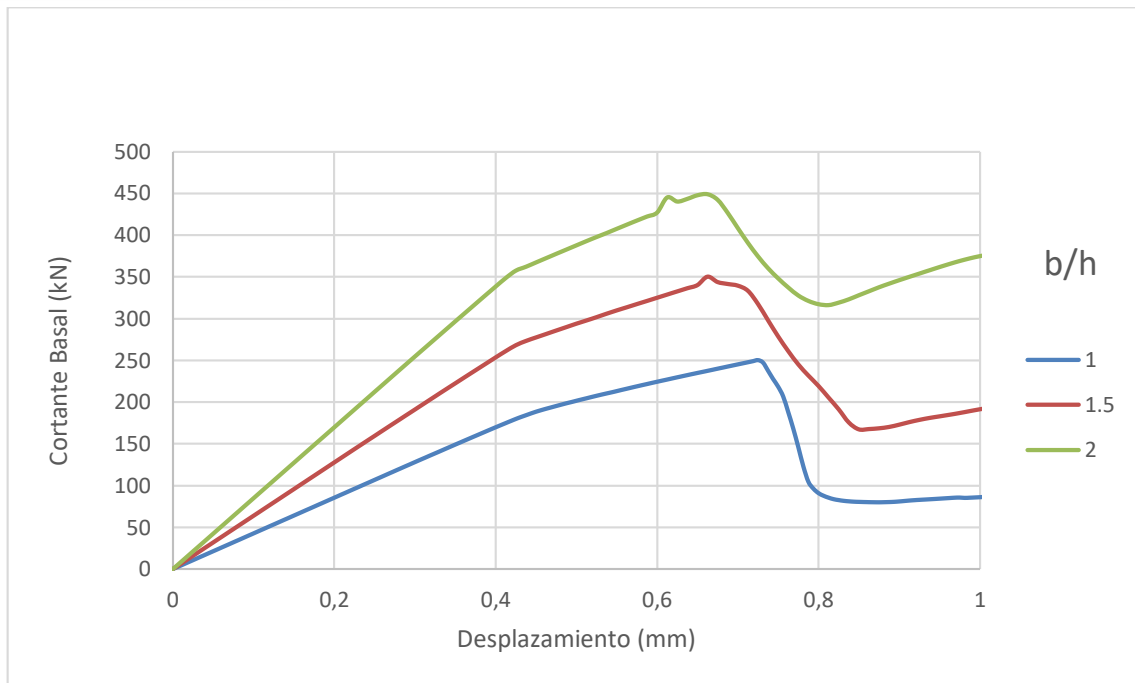


Figura 8: Curvas *pushover* de paredes de paredes de MC llena de relaciones b/h 1, 1.5 y 2.

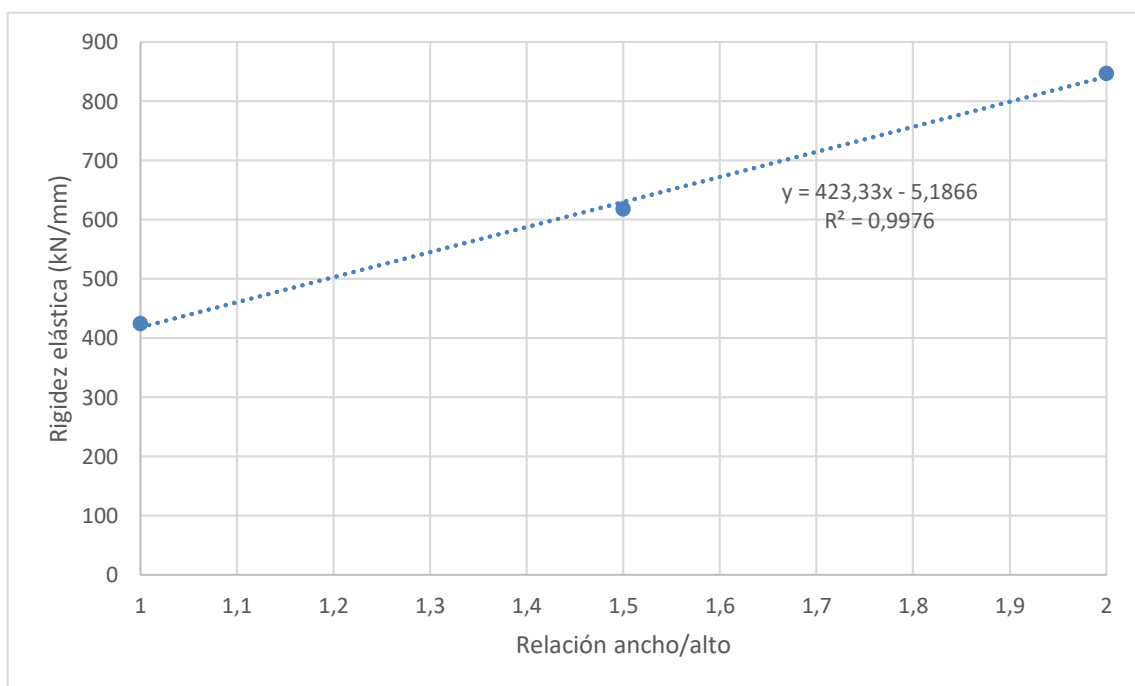


Figura 9: Gráfica de rigidez elástica y relación b/h de paredes de MC llena.

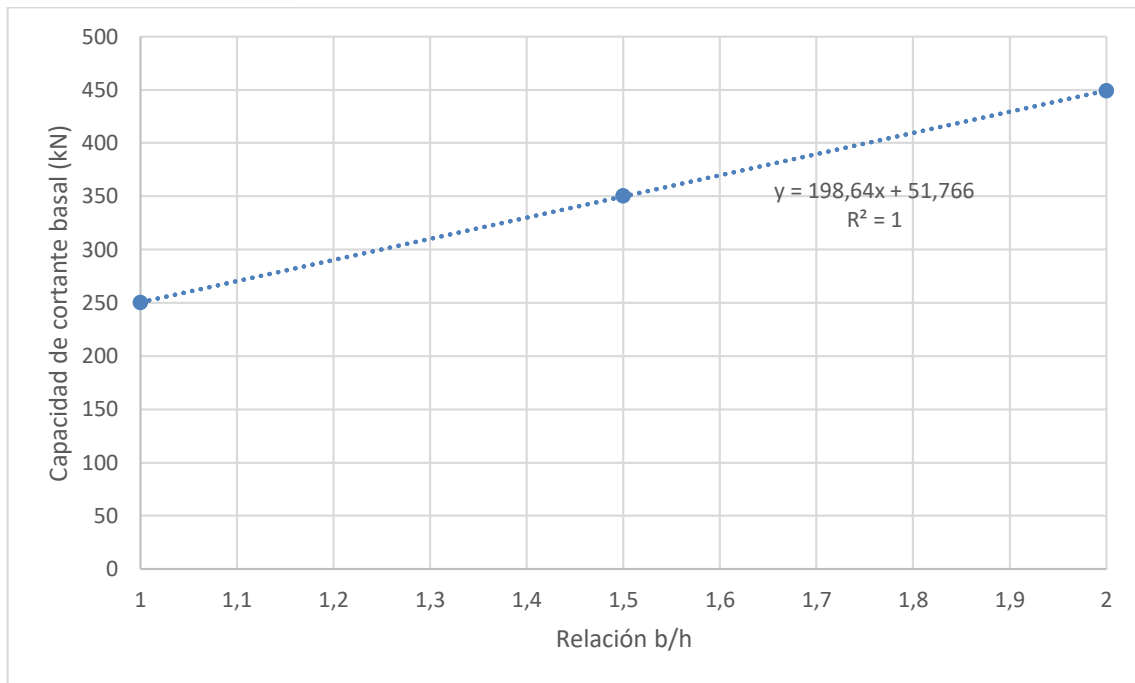


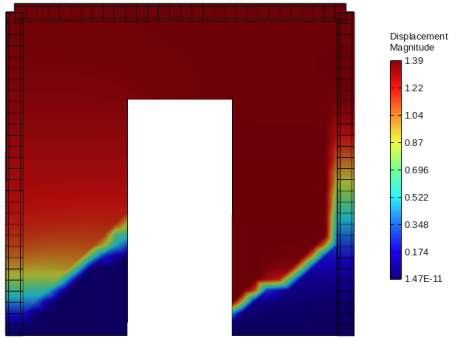
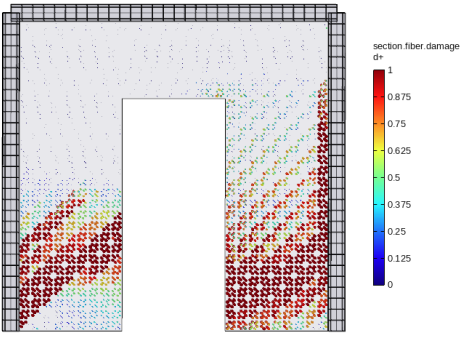
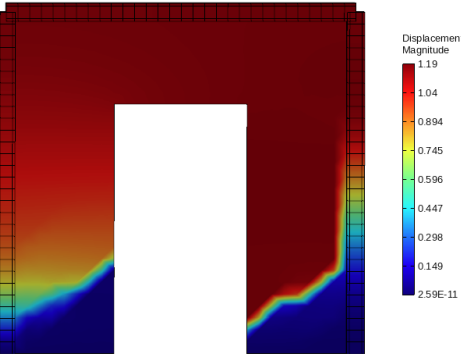
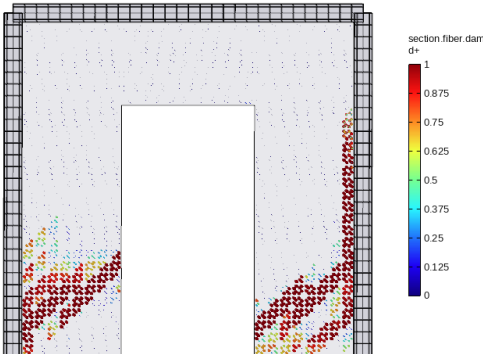
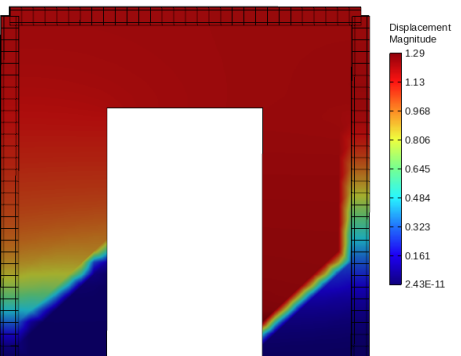
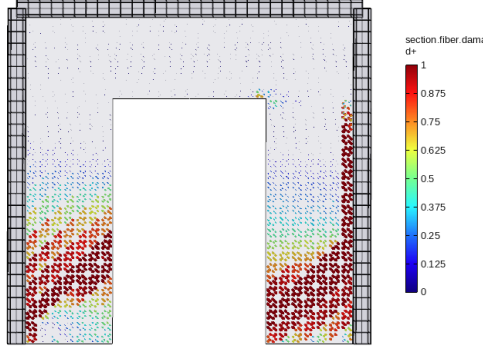
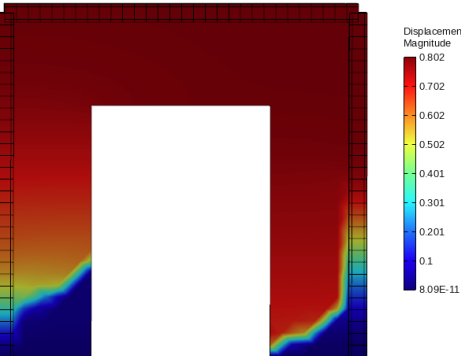
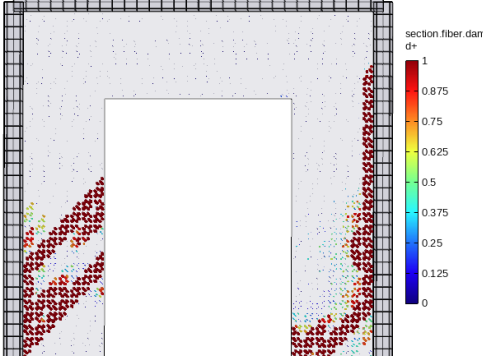
Figura 10: Gráfica de capacidad de cortante basal y relación b/h de paredes de MC llena.

4.4.3 Análisis de casos modelados de aberturas por puertas

4.4.3.1 Relación alto/ancho 1

Se realizaron los modelos para las paredes de mampostería confinada (MC) para aberturas de puertas 25%, 30%, 35% y 40%, obteniendo las gráficas *pushover* y los diagramas de daño correspondientes, como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14: Análisis *pushover* y daño de paredes de MC con puerta centrada y relación alto/ancho 1.

Código	Análisis <i>Pushover</i>	Daño
P1_25		
P1_30		
P1_35		
P1_40		

Al realizar un análisis de las curvas *pushover* de las paredes con puerta con relación b/h 1, como se presenta en la Figura 11.

En la Figura 12 y Figura 13 se ilustran gráficamente las variaciones de rigidez elástica y la capacidad de cortante basal respecto a las aberturas 25%, 30%, 35% y 40%.

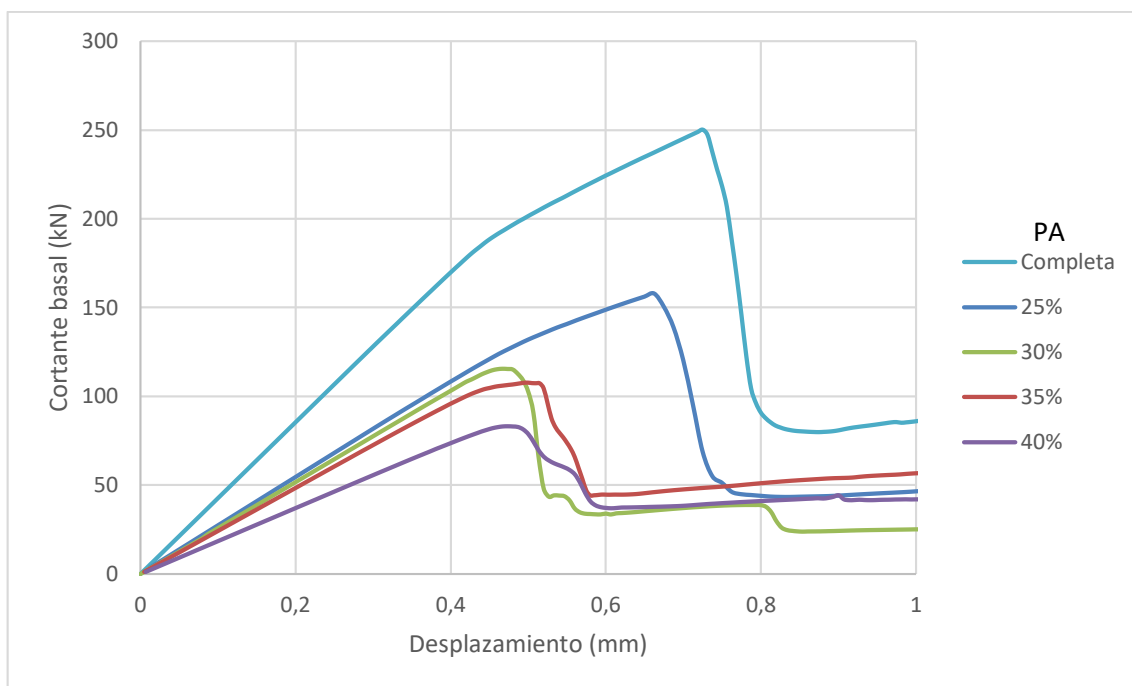
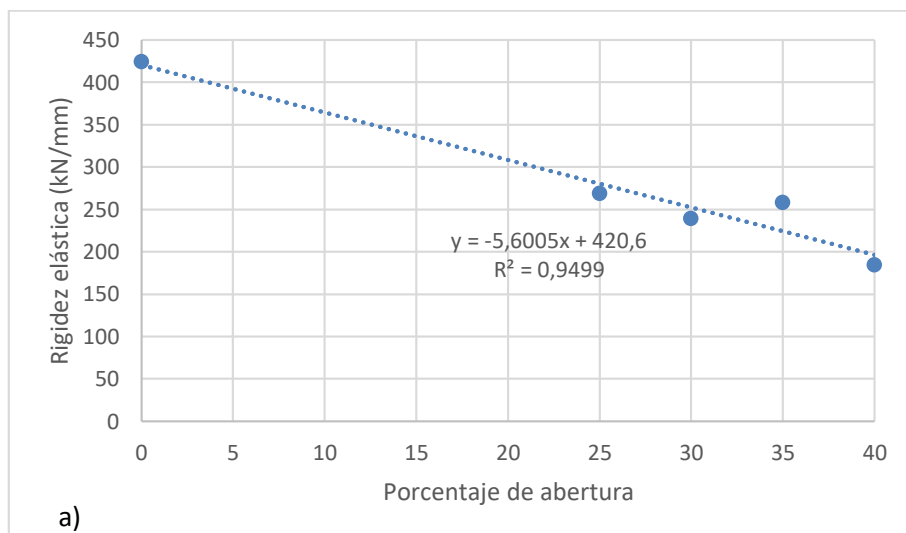


Figura 11: Curvas *pushover* de paredes de MC con puerta de relación b/h 1 y aberturas 25%, 30%, 35% y 40%.



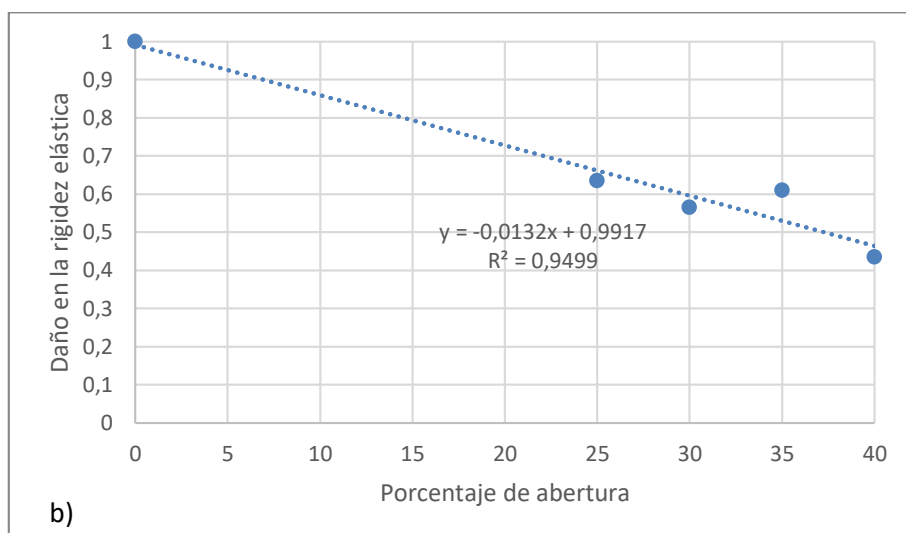


Figura 12: a) Relación entre rigidez elástica y porcentaje de abertura-puerta para b/h 1. b) Daño en rigidez elástica.

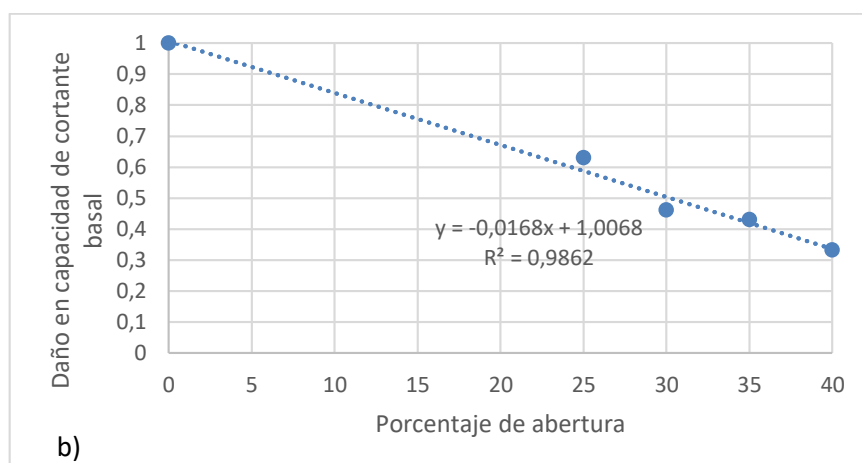
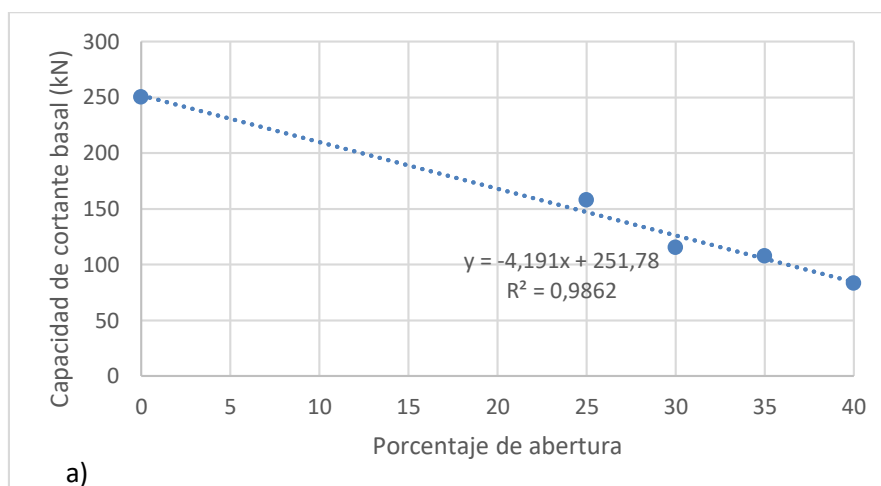
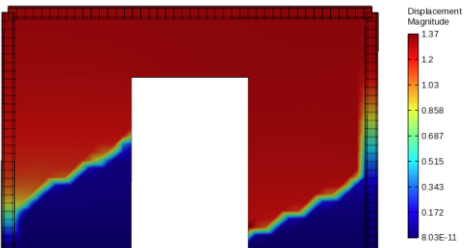
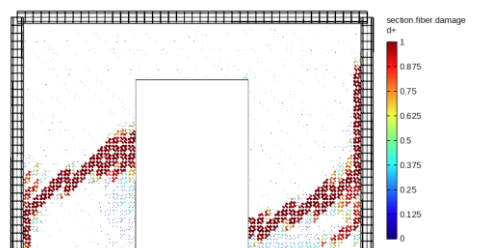
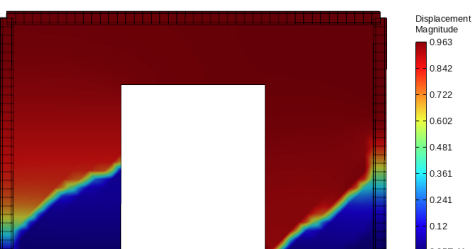
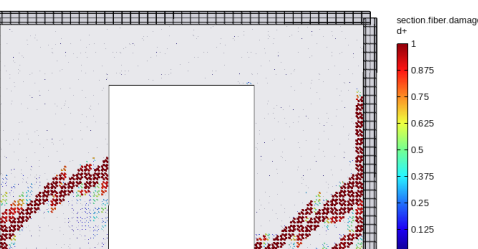
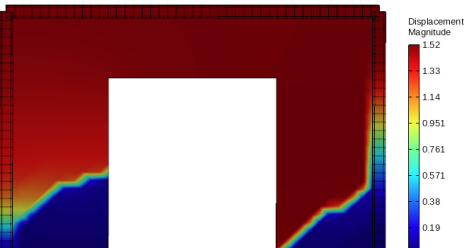
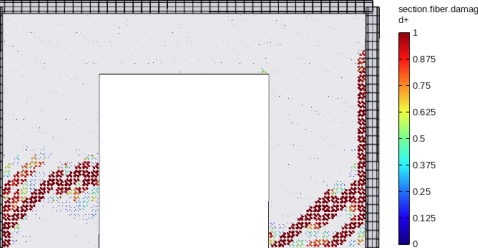
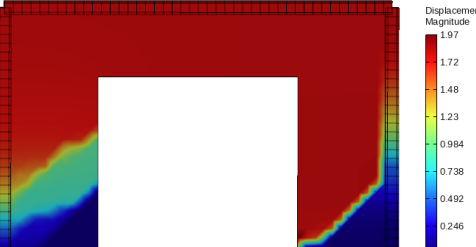
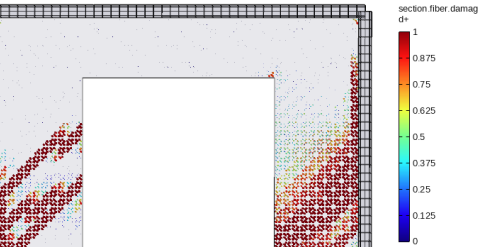


Figura 13: Gráfica de capacidad de cortante basal y porcentaje de abertura-puerta para b/h 1. b) Daño en capacidad de cortante basal.

4.4.3.2 Relación alto/ancho 1.5

Se realizaron los modelos para las paredes de mampostería confinada (MC) para aberturas de puertas 25%, 30%, 35% y 40%, obteniendo las gráficas *pushover* y los diagramas de daño correspondientes, como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15: Análisis *pushover* y daño de paredes de MC con puerta centrada y relación alto/ancho 1.5.

Código	Análisis <i>Pushover</i>	Daño
P1.5_25		
P1.5_30		
P1.5_35		
P1.5_40		

Al realizar un análisis de las curvas *pushover* de las paredes con puerta con relación b/h 1.5, como se presenta en la Figura 14.

En la Figura 15 y Figura 16 se ilustran gráficamente las variaciones de rigidez elástica y la capacidad de cortante basal respecto a las aberturas 25%, 30%, 35% y 40%.

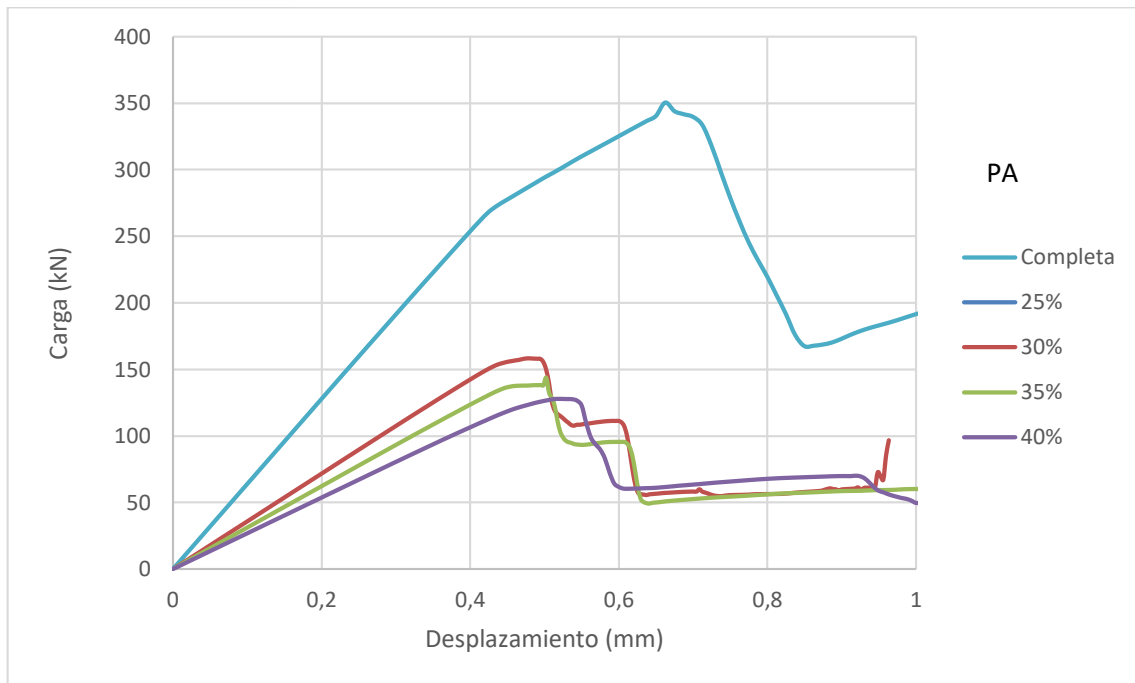
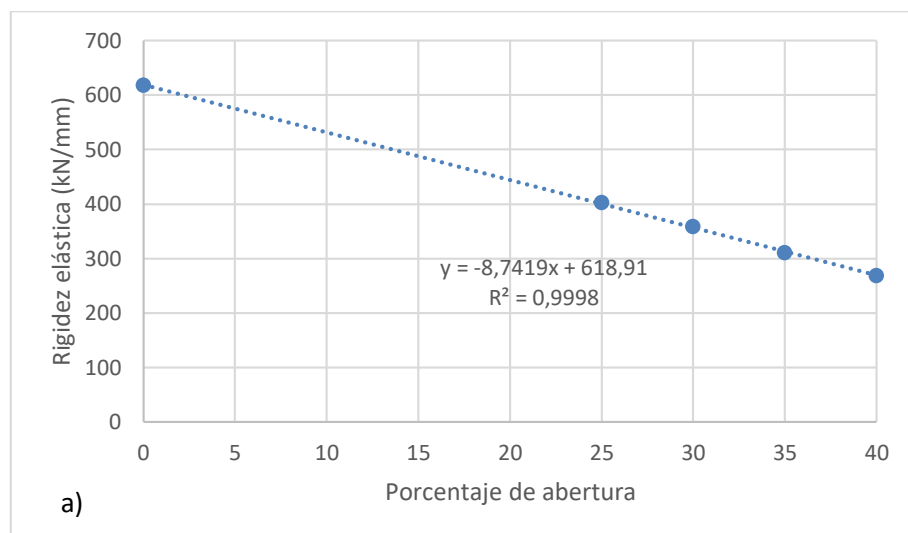


Figura 14: Curvas *pushover* de paredes de MC con puerta de relación b/h 1.5 y aberturas 25%, 30%, 35% y 40%.



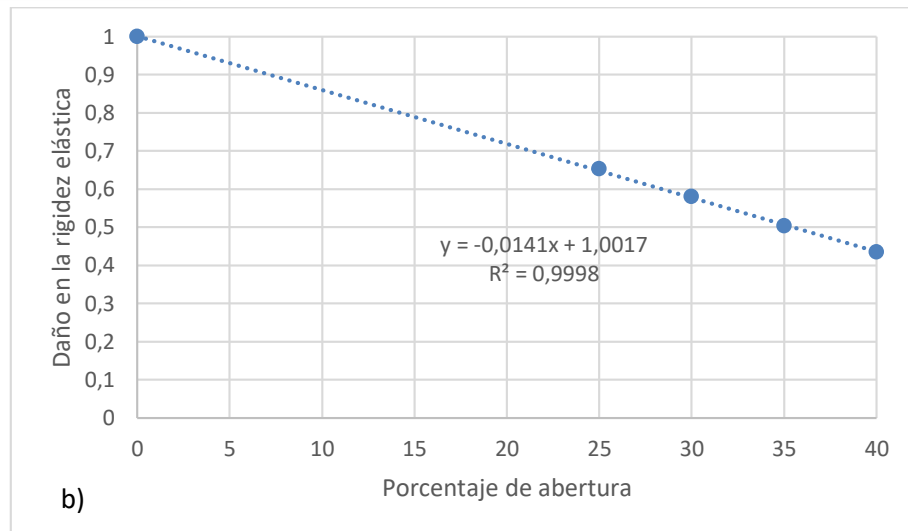


Figura 15: a) Gráfica de rigidez elástica y porcentaje de abertura-puerta para b/h 1.5. b) Daño en rigidez elástica.

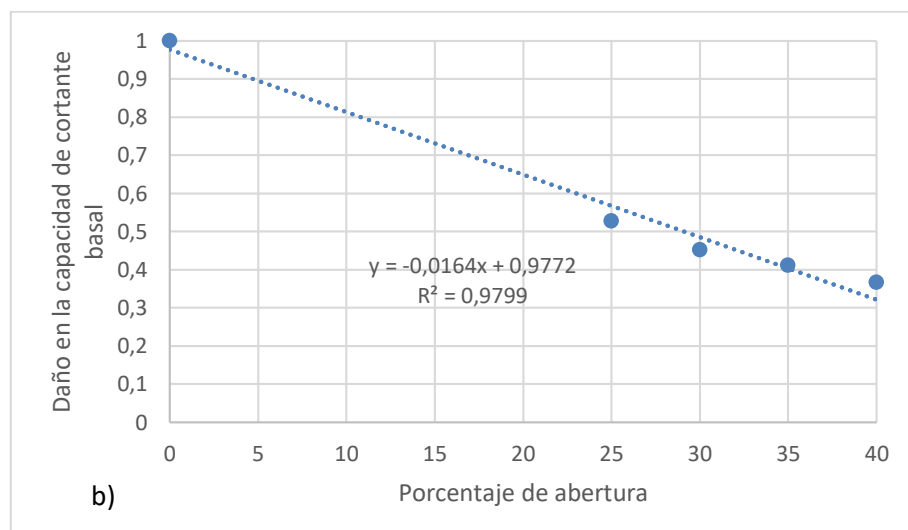
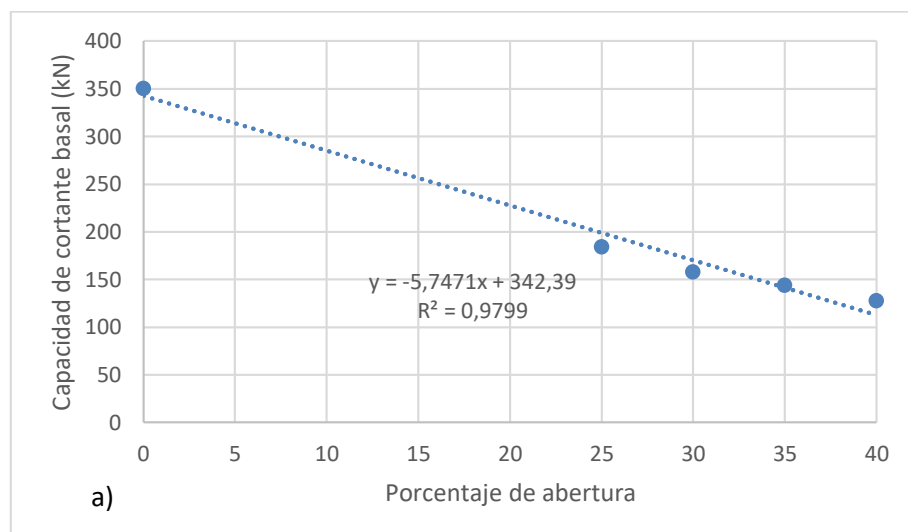


Figura 16: a) Gráfica de capacidad de cortante basal y porcentaje de abertura-puerta para b/h 1.5. b) Daño en capacidad de cortante basal.

4.4.3.3 Relación alto/ancho 2

Se realizaron los modelos para las paredes de mampostería confinada (MC) para aberturas de puertas 25%, 30%, 35% y 40%, obteniendo las gráficas *pushover* y los diagramas de daño correspondientes, como se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16: Análisis *pushover* y daño de paredes de MC con puerta centrada y relación alto/ancho 2.

Código	Análisis <i>Pushover</i>	Daño
P2_25		
P2_30		
P2_35		
P2_40		

Al realizar un análisis de las curvas *pushover* de las paredes con puerta con relación b/h 2, como se presenta en la Figura 17.

En la Figura 18 y Figura 19 se ilustran gráficamente las variaciones de rigidez elástica y la capacidad de cortante basal respecto a las aberturas 25%, 30%, 35% y 40%.

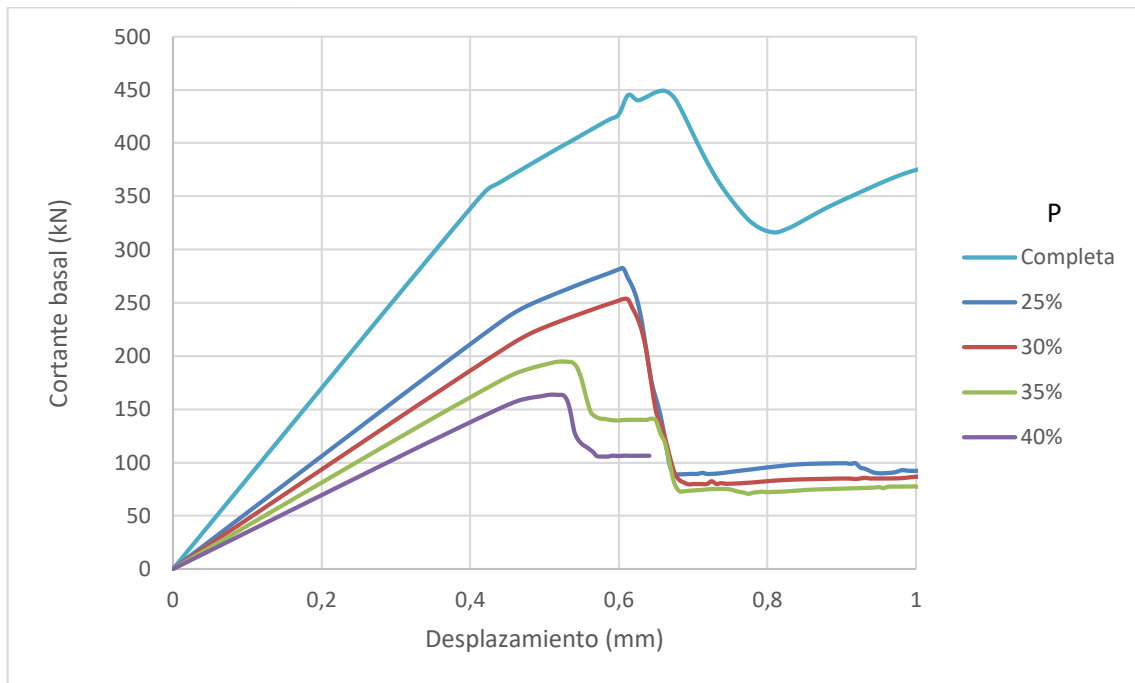
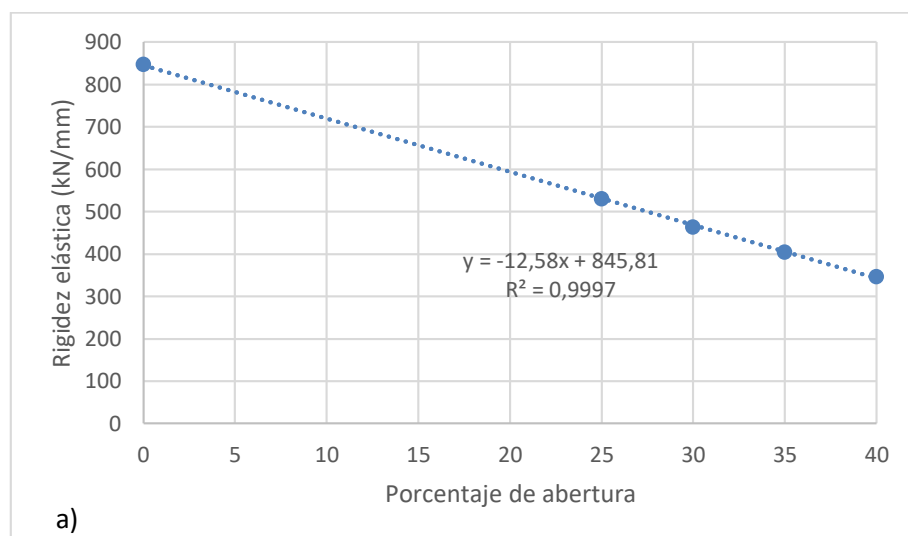


Figura 17: Curvas *pushover* de paredes de MC con puerta de relación b/h 2 y aberturas 25%, 30%, 35% y 40%.



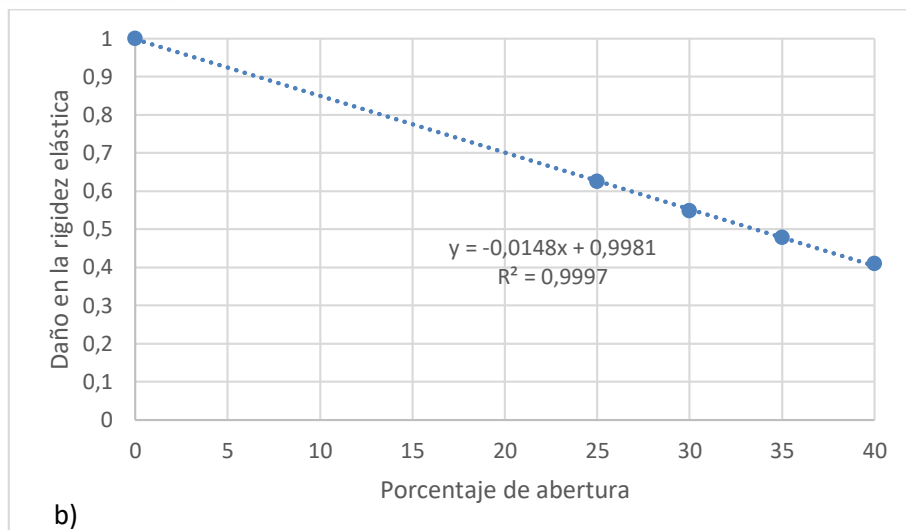


Figura 18: a) Gráfica de rigidez elástica y porcentaje de abertura-puerta para b/h 2. b) Daño en rigidez elástica.

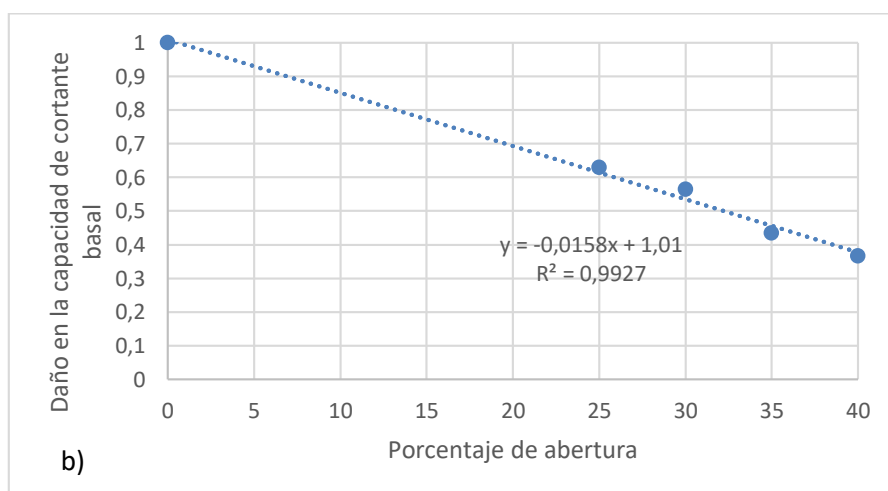
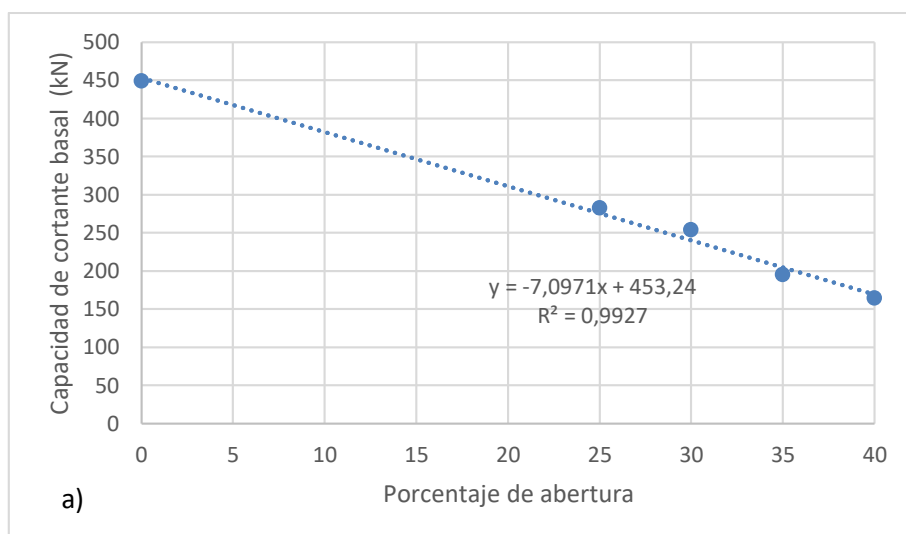


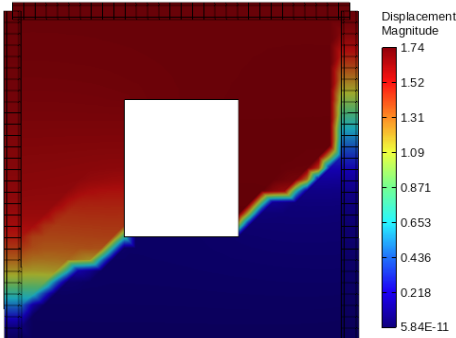
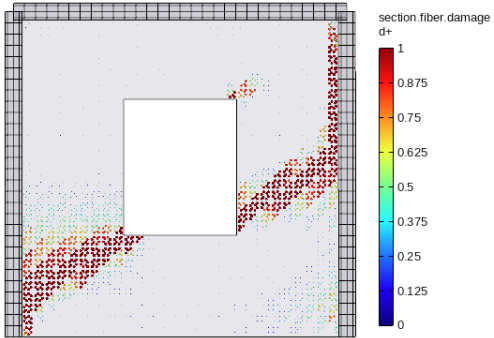
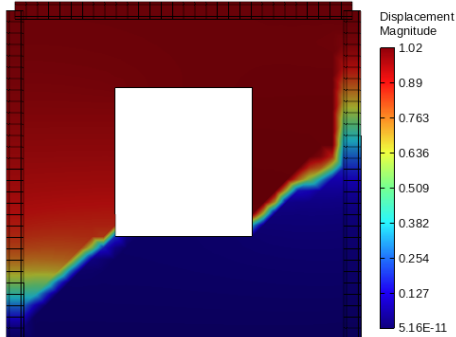
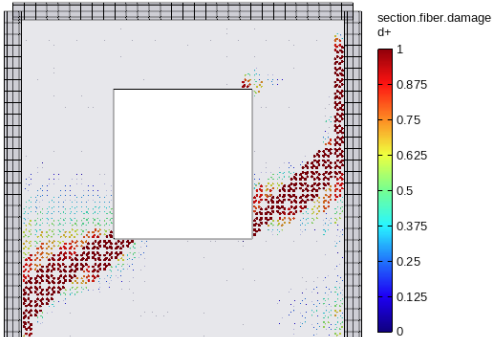
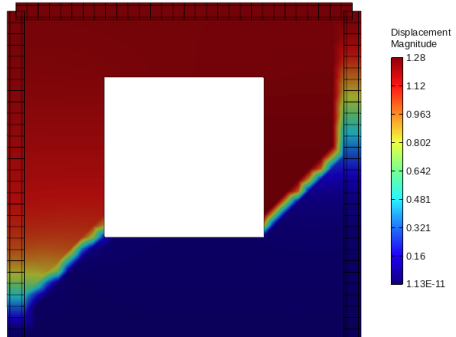
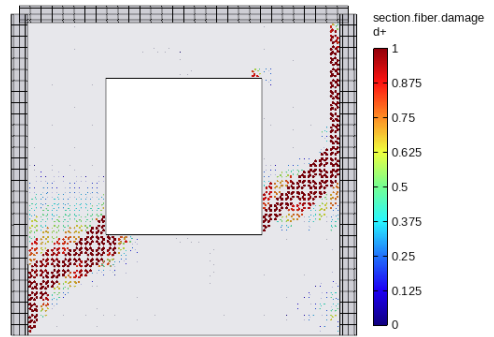
Figura 19: a) Gráfica de capacidad de cortante basal y porcentaje de abertura-puerta para b/h 2. b) Daño en capacidad de cortante basal.

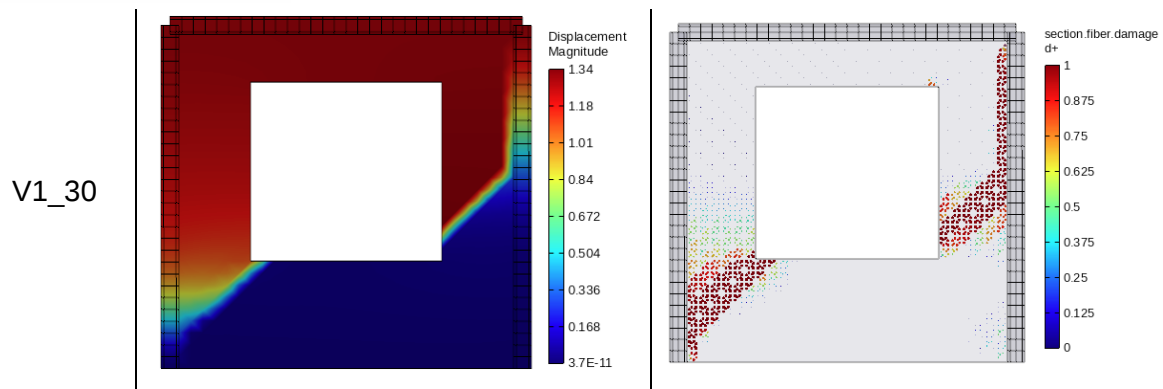
4.4.4 Análisis de casos modelados de aberturas por ventanas

4.4.4.1 Relación alto/ancho 1

Se realizaron los modelos para las paredes de mampostería confinada (MC) para aberturas de ventanas de 15%, 20%, 25% y 30%, obteniendo las gráficas *pushover* y los diagramas de daño correspondientes, como se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17: Análisis *pushover* y daño de paredes de MC con ventana centrada y relación alto/ancho 1.

Código	Análisis <i>Pushover</i>	Daño
V1_15		
V1_20		
V1_25		



Al realizar un análisis de las curvas *pushover* de las paredes con ventana con relación b/h 1, como se presenta en la Figura 20.

En la Figura 21 y Figura 22 se ilustran gráficamente las variaciones de rigidez elástica y la capacidad de cortante basal respecto a las aberturas 15%, 20%, 25% y 30%.

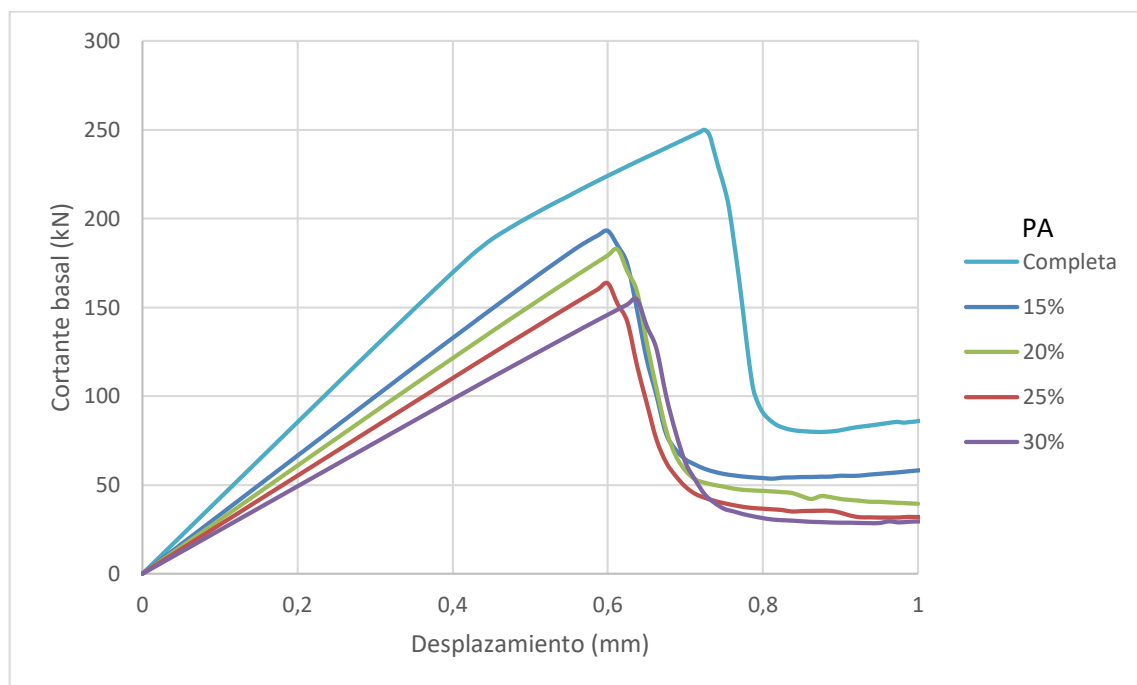


Figura 20: Curvas *pushover* de paredes de MC con ventana de relación b/h 1 y aberturas 15%, 20%, 25% y 30%.

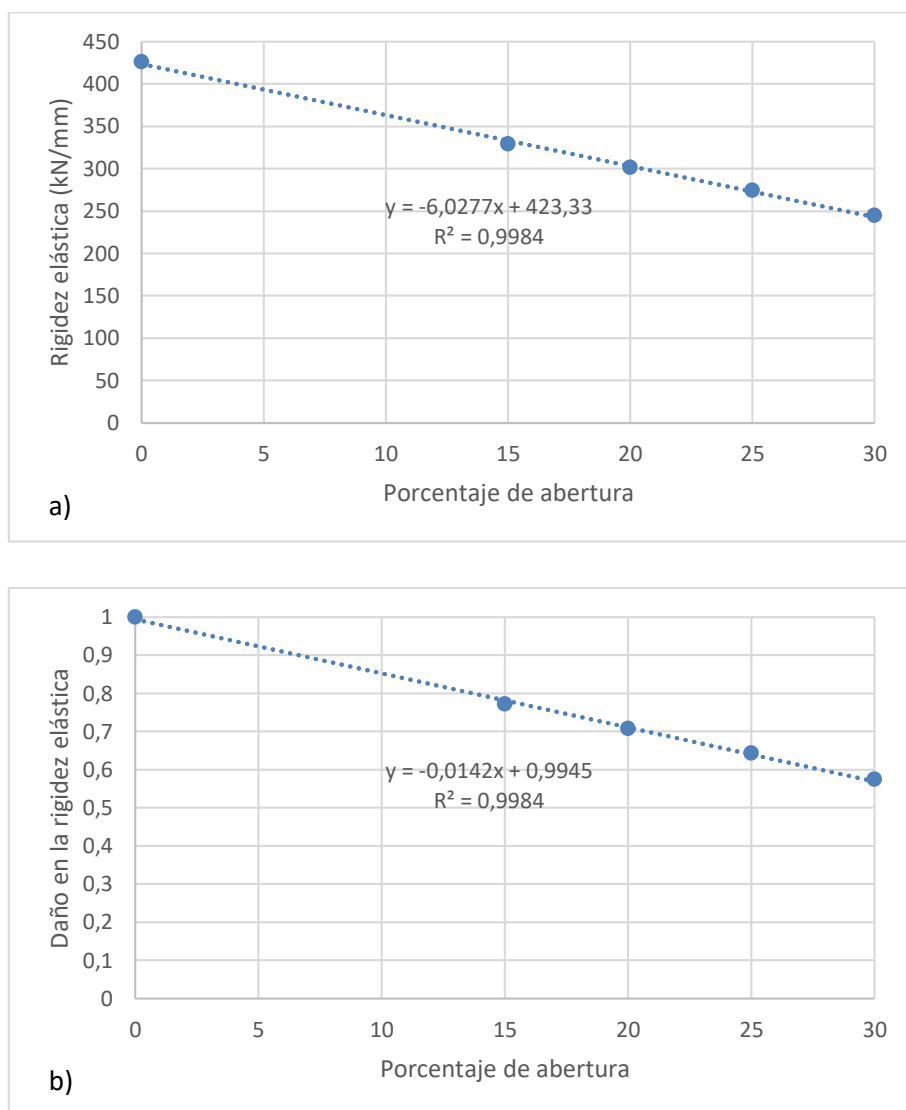
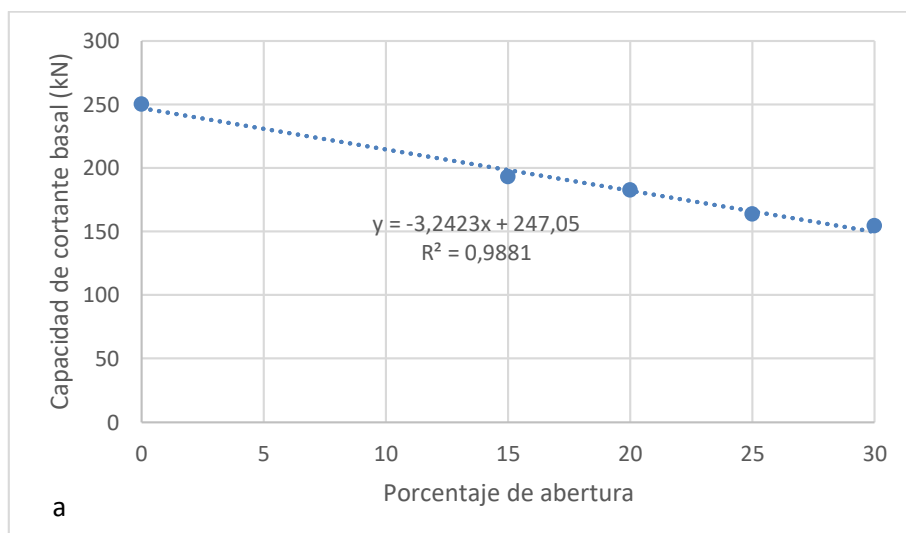


Figura 21: a) Gráfica de rigidez elástica y porcentaje de abertura-ventana para b/h 1. b) Daño de rigidez elástica.



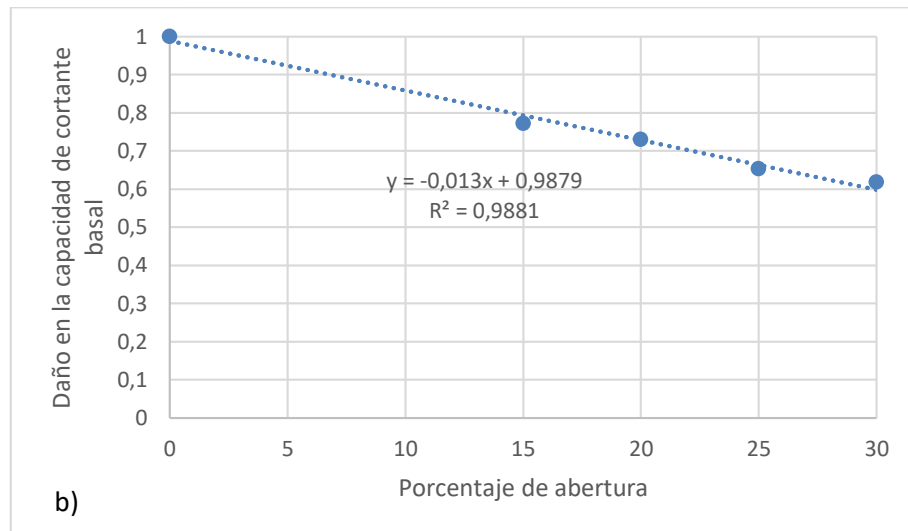


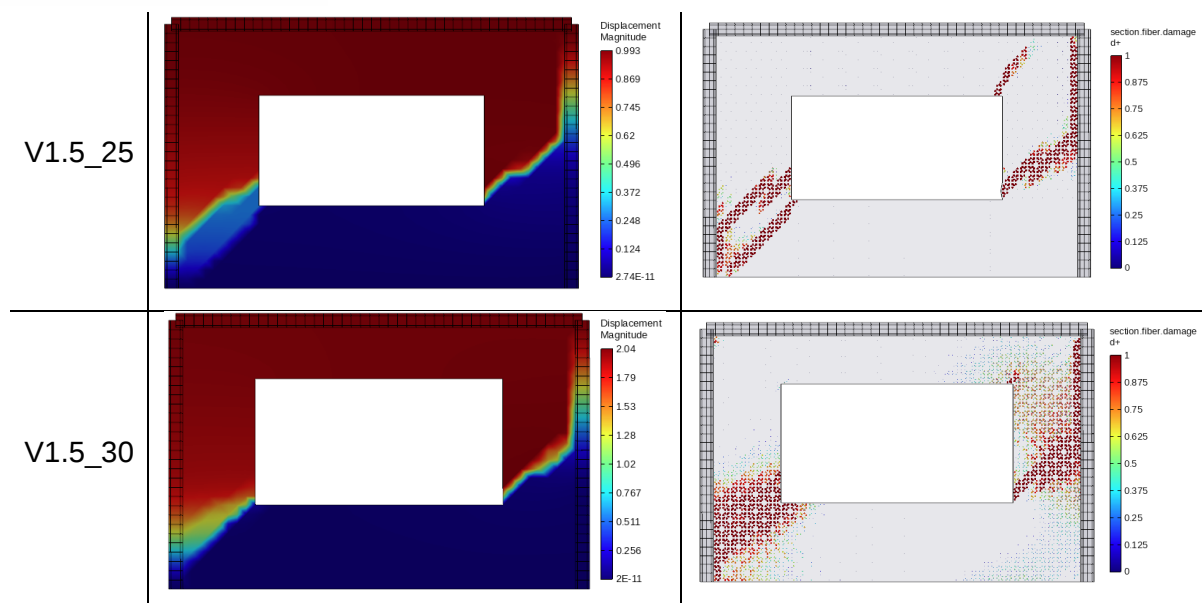
Figura 22: a) Gráfica de capacidad de cortante basal y porcentaje de abertura-ventana para b/h 1. b) Daño de capacidad de cortante basal.

4.4.4.2 Relación alto/ancho 1.5

Se realizaron los modelos para las paredes de mampostería confinada (MC) para aberturas de ventanas de 15%, 20%, 25% y 30%, obteniendo las gráficas *pushover* y los diagramas de daño correspondientes, como se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18: Análisis *pushover* y daño de paredes de MC con ventana centrada y relación alto/ancho 1.5.

Código	Análisis <i>Pushover</i>	Daño
V1.5_15		
V1.5_20		



Al realizar un análisis de las curvas *pushover* de las paredes con ventana con relación b/h 1.5, como se presenta en la Figura 23.

En la Figura 24 y Figura 25 se ilustran gráficamente las variaciones de rigidez elástica y la capacidad de cortante basal respecto a las aberturas 15%, 20%, 25% y 30%.

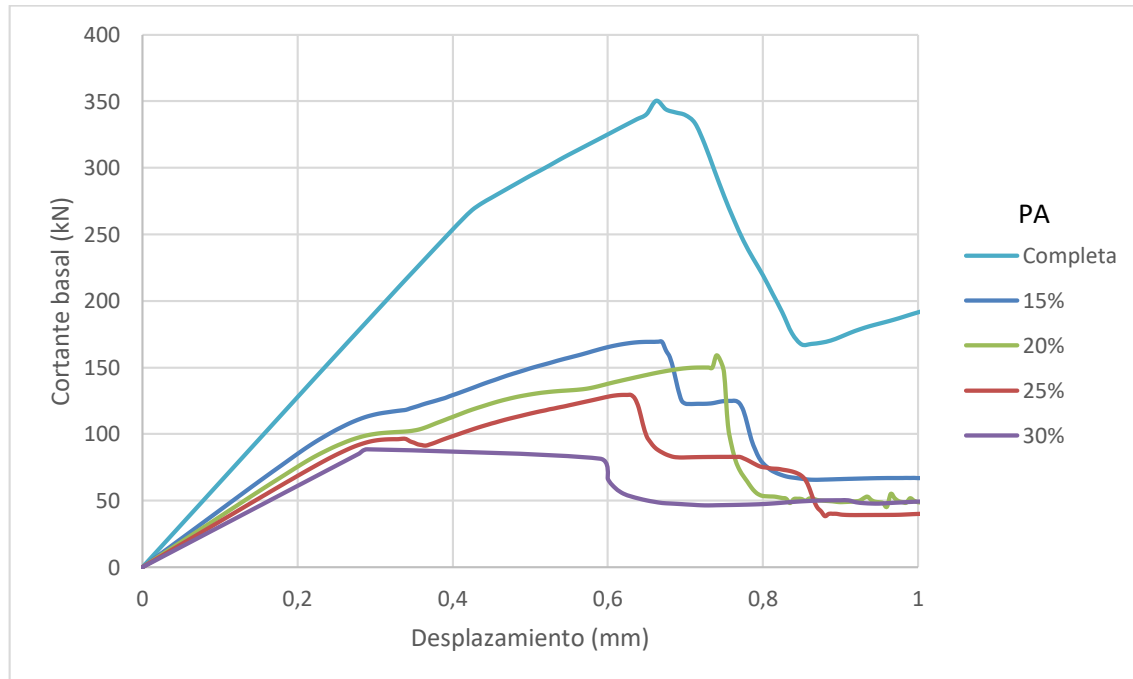


Figura 23: Curvas *pushover* de paredes de MC con ventana de relación b/h 1.5 y aberturas 15%, 20%, 25% y 30%.

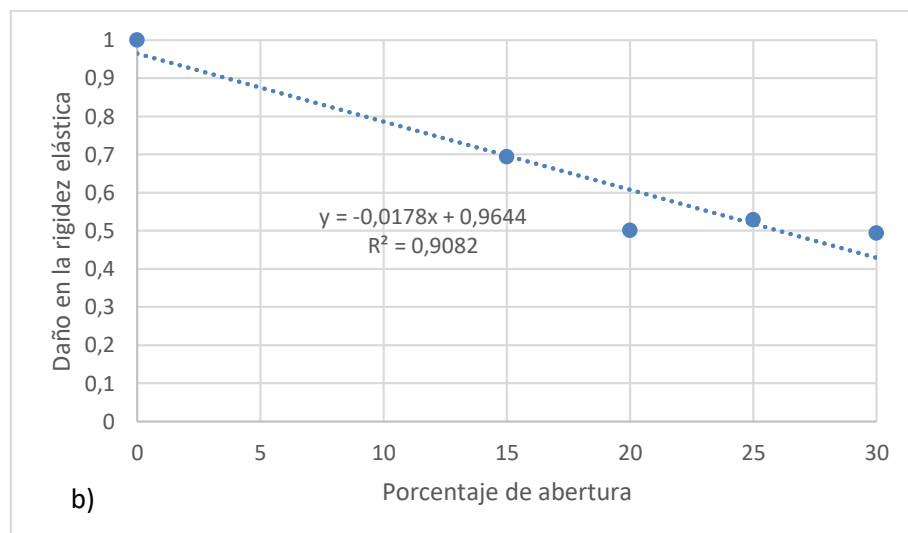
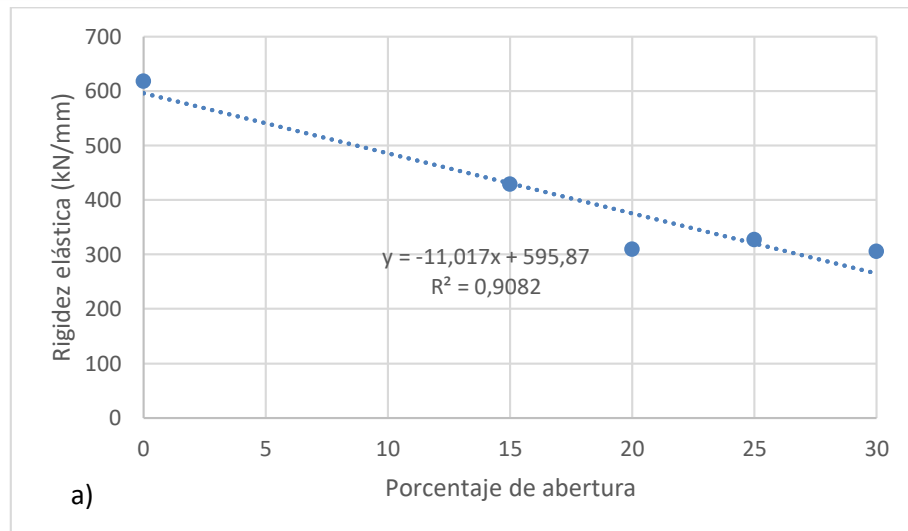
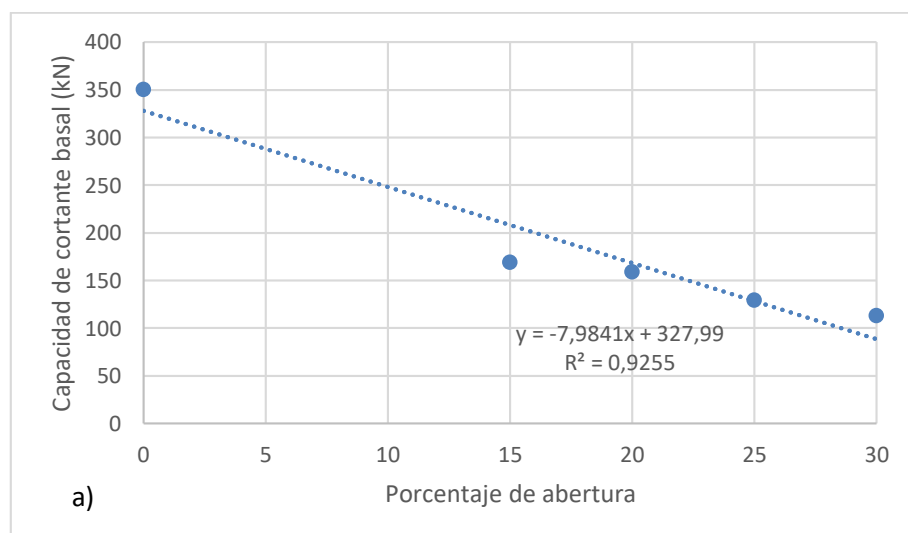


Figura 24: a) Gráfica de rigidez elástica y porcentaje de abertura-ventana para b/h 1.5. b) Daño en rigidez elástica.



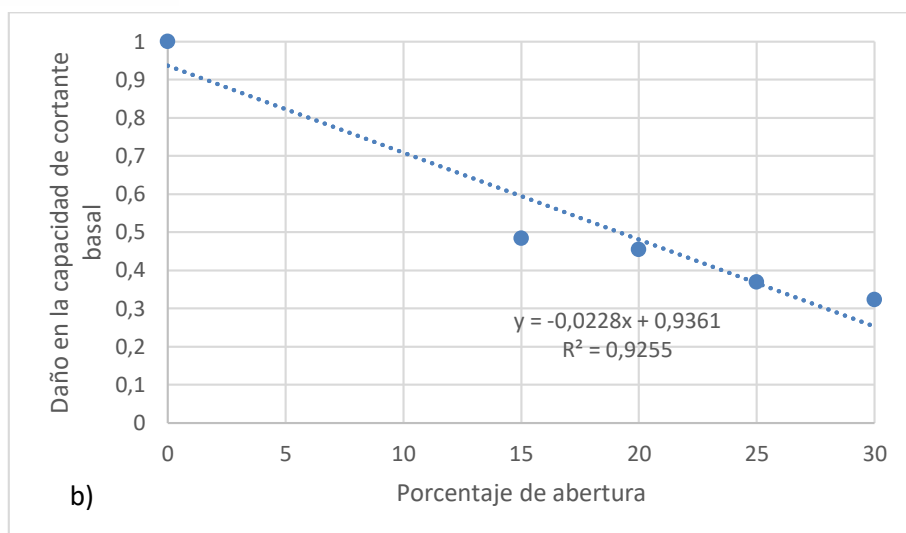


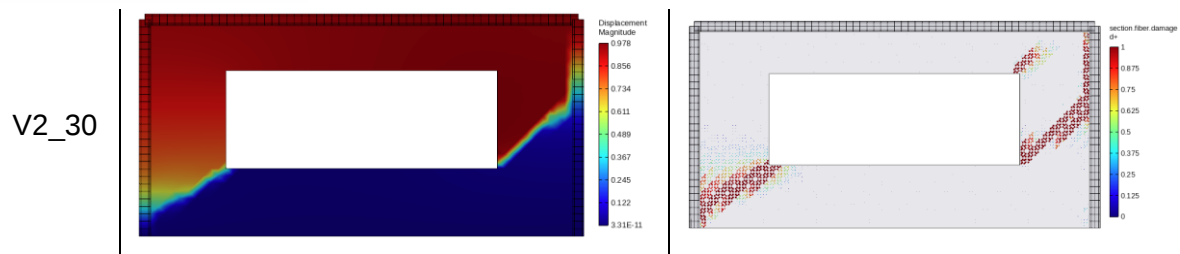
Figura 25: a) Gráfica de capacidad de cortante basal y porcentaje de abertura-ventana para b/h 1.5. b) Daño en capacidad de cortante basal.

4.4.4.3 Relación alto/ancho 2

Se realizaron los modelos para las paredes de mampostería confinada (MC) para aberturas de ventanas de 15%, 20%, 25% y 30%, obteniendo las gráficas *pushover* y los diagramas de daño correspondientes, como se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19: Análisis *pushover* y daño de paredes de MC con ventana centrada y relación alto/ancho 2.

Código	Análisis <i>Pushover</i>	Daño
V2_15		
V2_20		
V2_25		



Al realizar un análisis de las curvas *pushover* de las paredes con ventana con relación b/h 2, como se presenta en la Figura 26.

En la Figura 27 y Figura 28 se ilustran gráficamente las variaciones de rigidez elástica y la capacidad de corte basal respecto a las aberturas 15%, 20%, 25% y 30%.

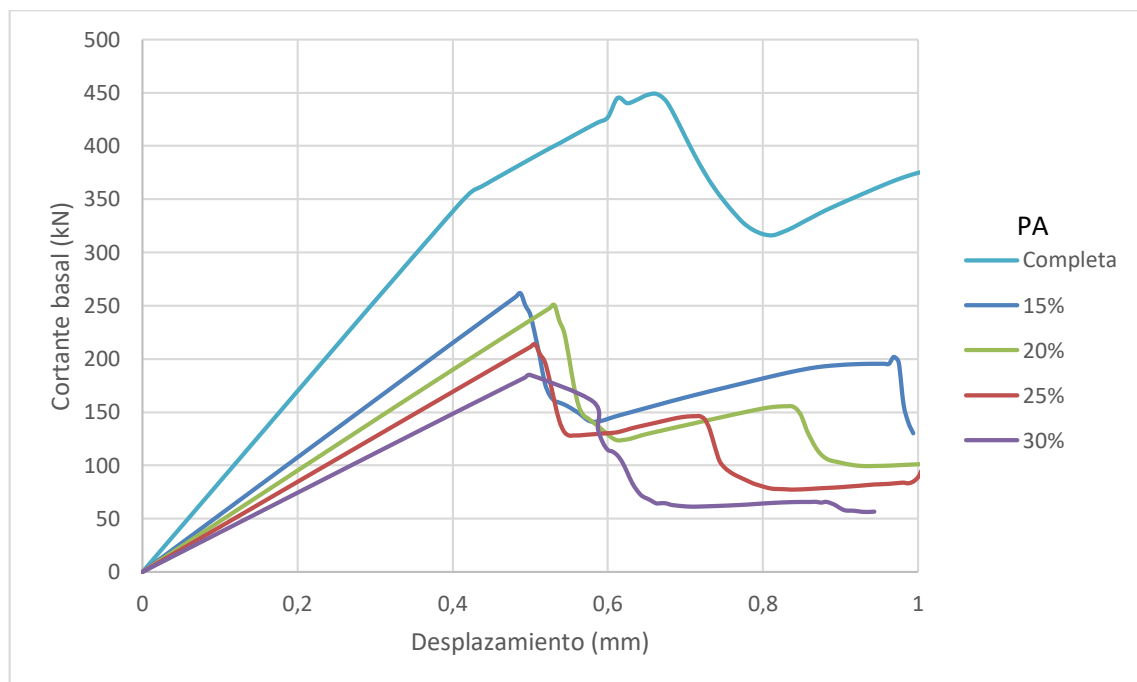


Figura 26: Curvas *pushover* de paredes de MC con ventana de relación b/h 2 y aberturas 15%, 20%, 25% y 30%.

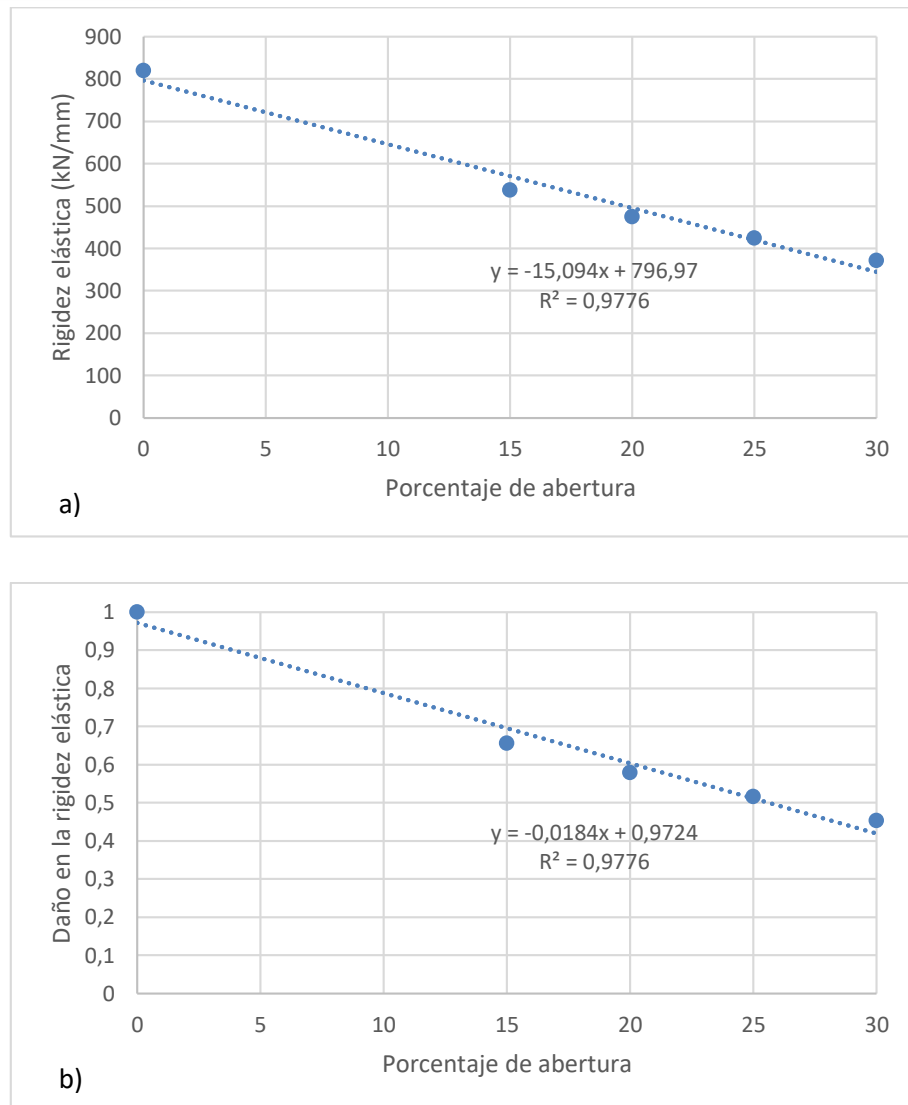
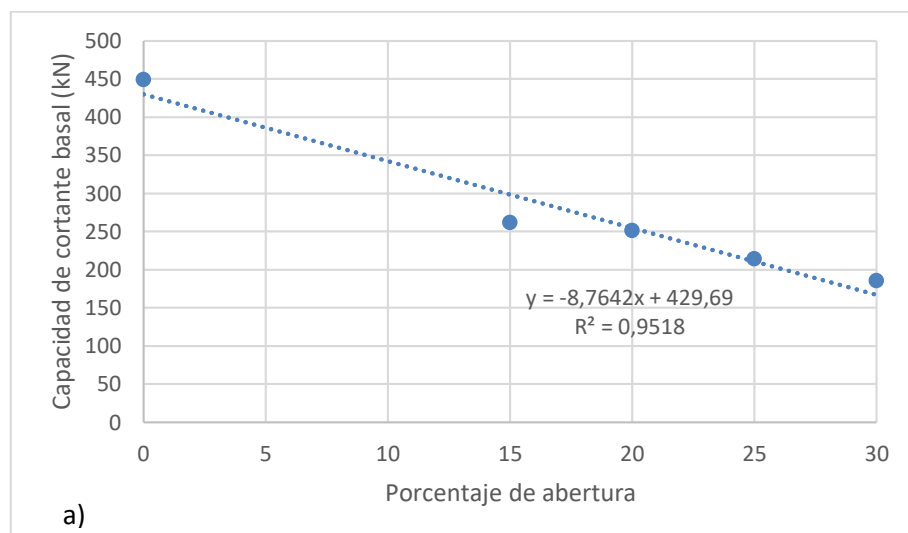


Figura 27: a) Gráfica de rigidez elástica y porcentaje de abertura-ventana para b/h 2. b) Daño en rigidez elástica.



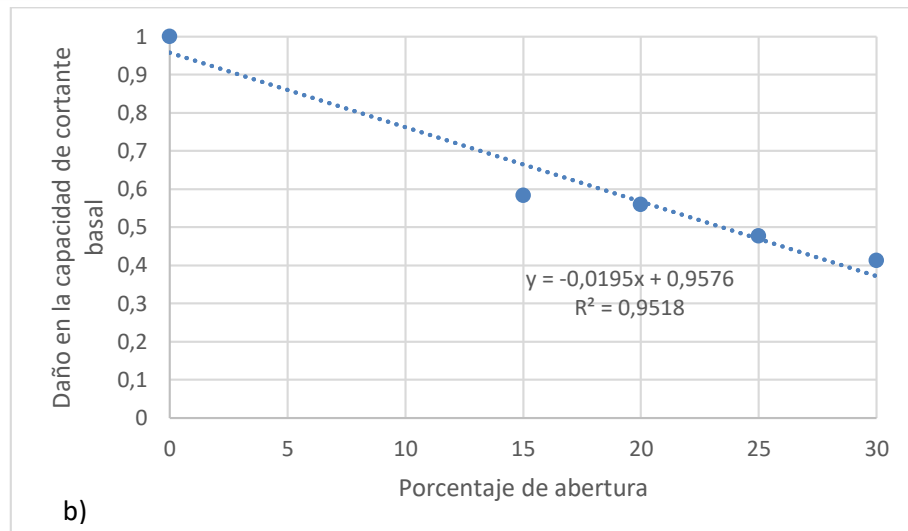
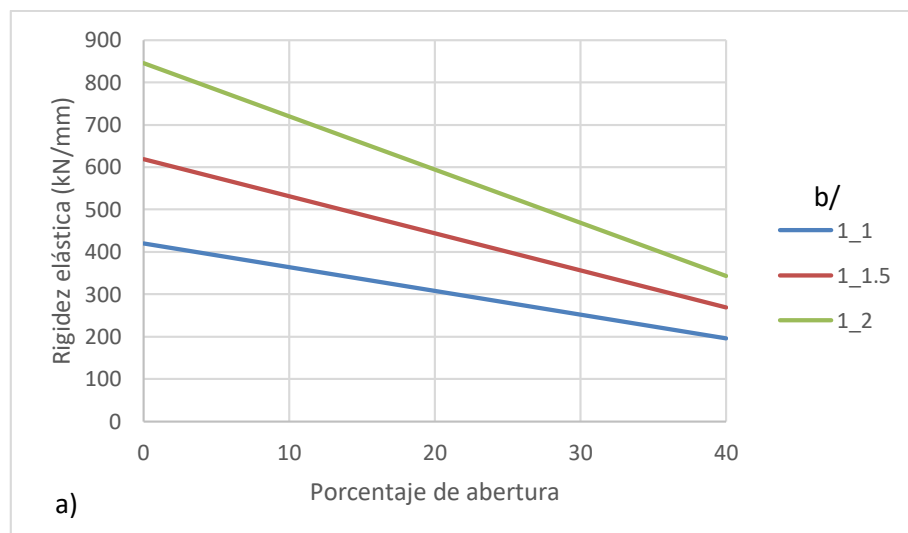


Figura 28: a) Gráfica de capacidad de cortante basal y porcentaje de abertura-ventana para b/h 2. b) Daño en capacidad de cortante basal.

4.5.5.4 Análisis de rigidez elástica y capacidad de cortante basal

Se juntaron las gráficas de rigidez elástica, capacidad de cortante basal y daños de la abertura-puerta y abertura-ventana Figura 29, Figura 30, Figura 31 y Figura 32.



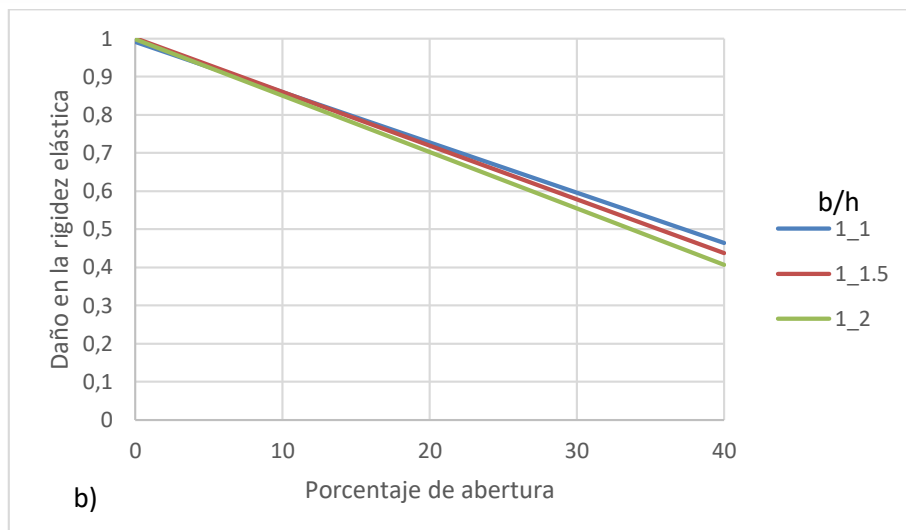


Figura 29: a) Gráfica de rigidez elástica en abertura-puerta, con distintos b/h . b) Daño en la rigidez estática, con distintos b/h .

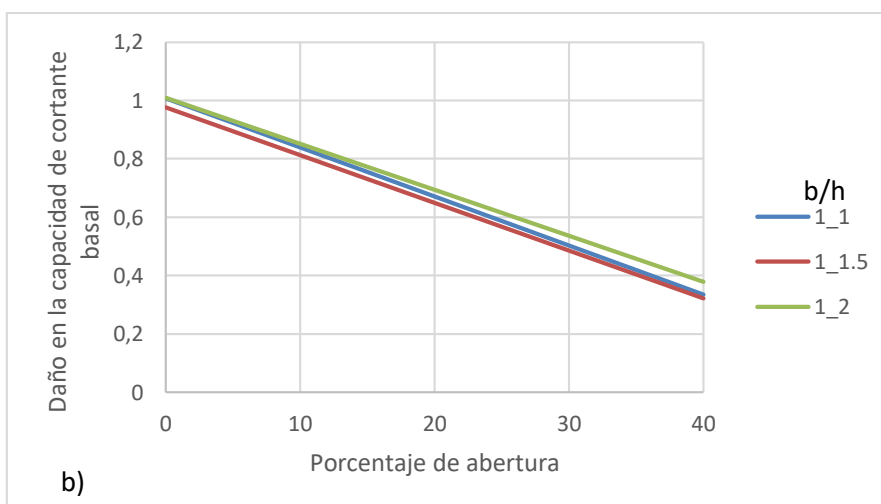
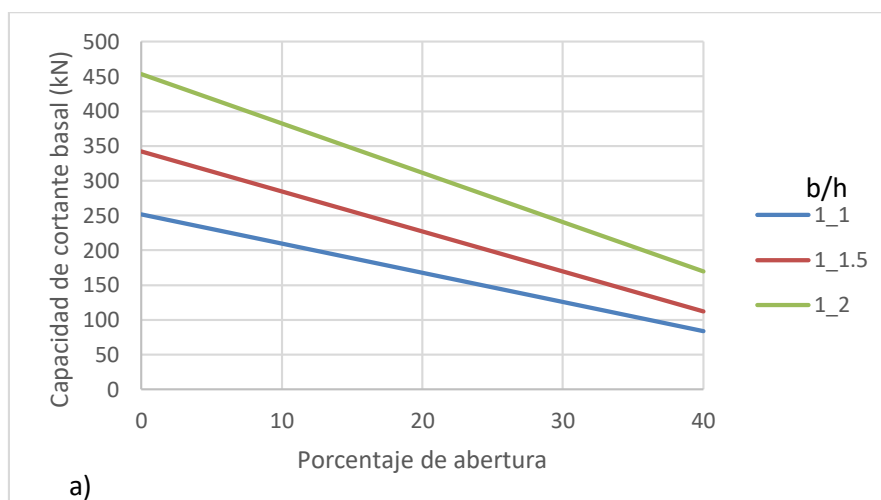


Figura 30: a) Gráfica de capacidad de cortante basal en abertura-puerta, con distintos b/h . b) Daño en la capacidad de cortante basal, con distintos b/h .

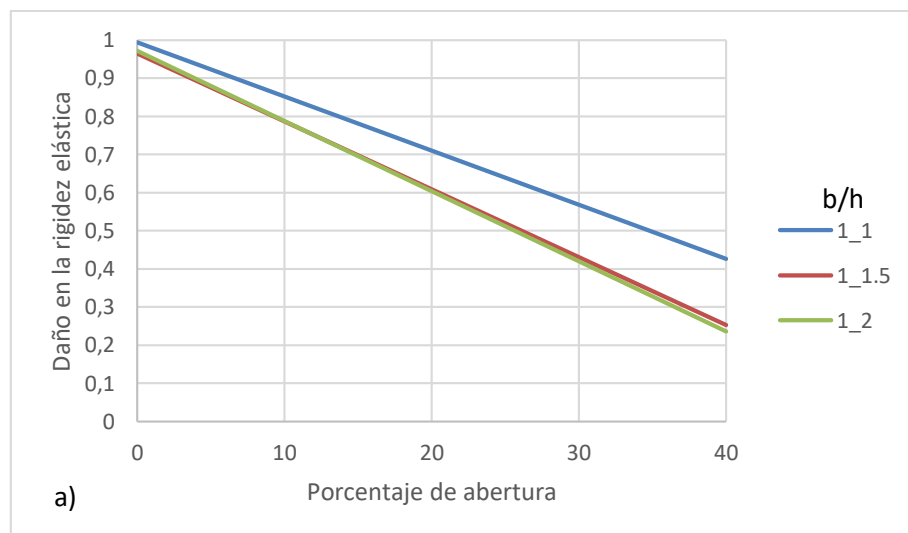
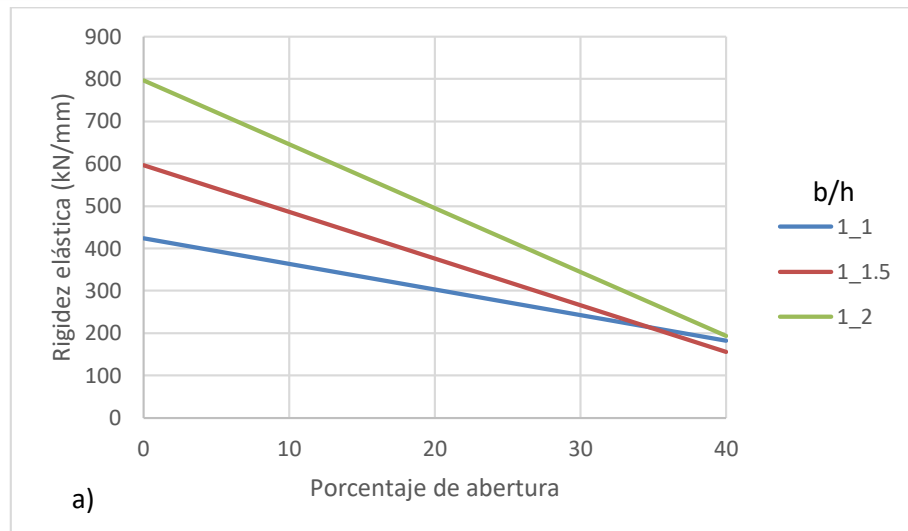
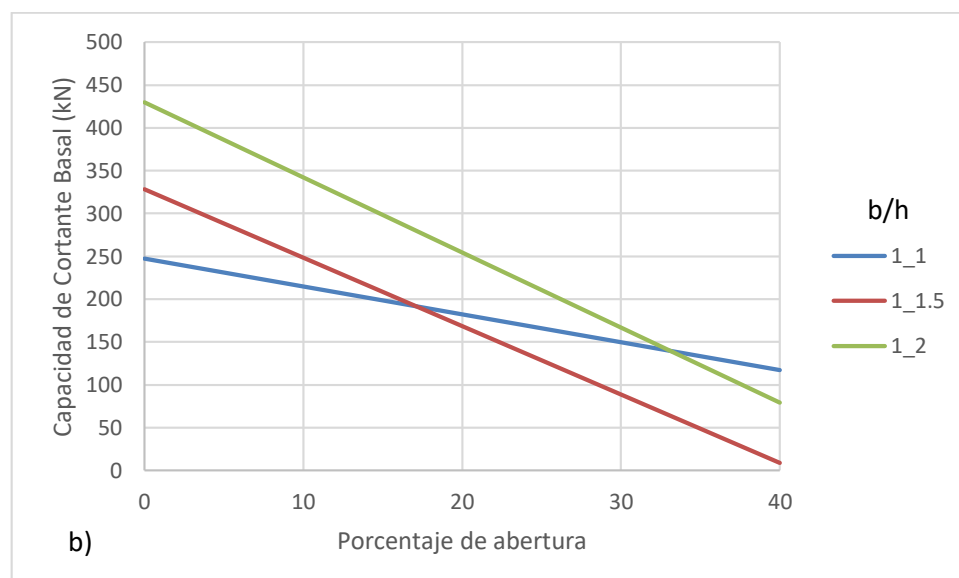


Figura 31: a) Gráfica de rigidez elástica en abertura-ventana, con distintos b/h . b) Daño en la rigidez estática, con distintos b/h .



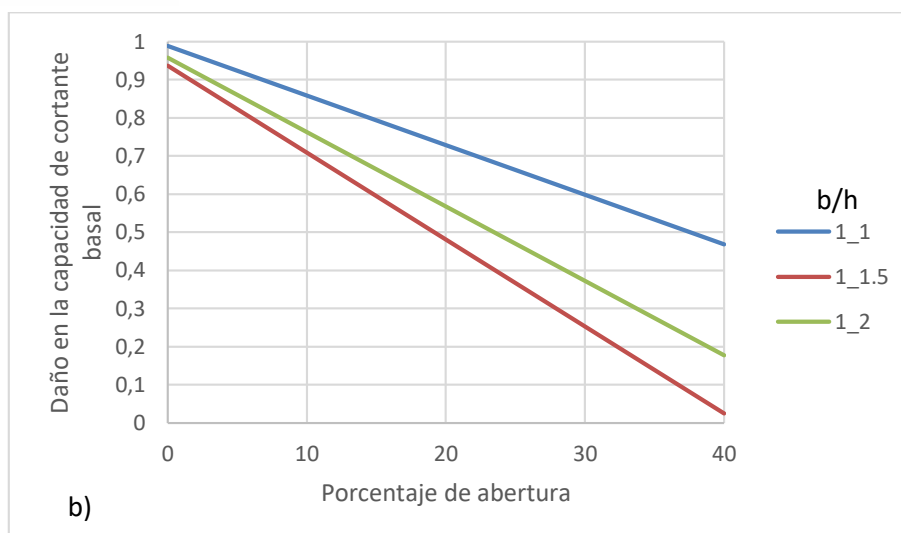


Figura 32: a) Gráfica de capacidad de cortante basal en abertura-ventana, con distintos b/h . b) Daño en la capacidad de cortante basal, con distintos b/h .

4.6 Conclusiones.

De las gráficas analizadas de desplazamiento versus fuerza lateral obtenidas mediante el análisis *pushover*, se observa una concordancia con los resultados reportados en la literatura. Al comparar los datos modelados con los encontrados en estudios previos, se constata que la respuesta elástica y la capacidad de cortante basal alcanzada en ambos casos son congruentes. Esta coincidencia valida la precisión y la fiabilidad de la modelación propuesta, confirmando que las técnicas de análisis utilizadas son adecuadas para predecir el comportamiento estructural de las paredes de mampostería confinada bajo cargas sísmicas.

La comparación detallada revela que, tanto en los modelos numéricos como en los estudios literarios, las paredes de mampostería confinada exhiben un comportamiento elástico bien definido seguido de una fase no lineal hasta alcanzar la capacidad de cortante basal. Sin embargo, es importante señalar que las curvas generadas por la modelación no representan el comportamiento completo de la estructura durante todo el evento sísmico, sino solo los parámetros mencionados. Esto implica que el estado de daño final puede ser altamente variable y dependiente de numerosos factores no completamente capturados en el modelo. La similitud en los patrones de comportamiento elástico y la capacidad de cortante basal, no obstante, respalda la exactitud del enfoque metodológico adoptado, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en el diseño y refuerzo de estructuras en zonas sísmicas.

La revisión de las propiedades mecánicas de las paredes de MC con aberturas con puertas y ventanas, nos arrojan funciones lineales de decaimiento de resistencia. Esto nos indica que

la abertura en la pared tiene una gran relevancia al hacer disminuir la resistencia de las propiedades.

Las propiedades mecánicas de las paredes de mampostería confinada, particularmente la rigidez elástica, muestran una variación significativa en función de la relación b/h . Esto se debe a que el área de mampostería resistente aumenta proporcionalmente con esta relación. A medida que la relación b/h se incrementa, tanto la rigidez elástica como la carga última soportada por las paredes de mampostería confinada aumentan de manera lineal. Este comportamiento indica que las paredes con mayores relaciones b/h poseen una mayor capacidad de resistencia y deformación bajo cargas laterales, lo cual es fundamental para el diseño estructural en áreas sísmicas.

Además de la relación b/h , las propiedades mecánicas de las paredes de mampostería confinada también se ven afectadas por el porcentaje de abertura presente y la relación de aspecto b/h . Los cambios en el porcentaje de abertura tienen un impacto directo en la rigidez elástica y la capacidad de cortante basal que las paredes pueden soportar. A medida que aumenta el porcentaje de abertura, disminuye el área efectiva de mampostería resistente, lo que conduce a una reducción en la capacidad de carga y en la rigidez de la pared. Este efecto es más pronunciado en paredes con relaciones de aspecto más bajas, donde la cantidad de mampostería disponible para resistir las cargas es menor.

Capítulo 5: Conclusiones, recomendaciones y líneas de investigación

5.1 Conclusiones.

La revisión de las propiedades mecánicas de las paredes de MC con aberturas con puertas y ventanas reveló funciones lineales de decaimiento de resistencia, indicando que la abertura en la pared disminuye significativamente la resistencia de las propiedades. Las propiedades mecánicas, particularmente la rigidez elástica, muestran una variación significativa en función de la relación b/h . A medida que la relación b/h se incrementa, tanto la rigidez elástica como la carga última soportada por las paredes de mampostería confinada aumentan de manera lineal. Este comportamiento indica que las paredes con mayores relaciones b/h poseen una mayor capacidad de resistencia y deformación bajo cargas laterales, lo cual es fundamental para el diseño estructural en áreas sísmicas. Además, los cambios en el porcentaje de abertura tienen un impacto directo en la rigidez elástica y la capacidad de cortante basal que las paredes pueden soportar. A medida que aumenta el porcentaje de abertura, disminuye el área efectiva de mampostería resistente, lo que conduce a una reducción en la capacidad de carga y en la rigidez de la pared. Este efecto es más pronunciado en paredes con relaciones de aspecto más bajas, donde la cantidad de mampostería disponible para resistir las cargas es menor.

Los hallazgos obtenidos ofrecen una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en el diseño y reforzamiento de estructuras en zonas sísmicas. La implementación de las recomendaciones derivadas de estos resultados contribuirá a la mejora de la seguridad y durabilidad de las edificaciones en Ecuador y otras regiones con características sísmicas similares. La adherencia a las normativas y la aplicación de prácticas constructivas adecuadas son esenciales para lograr edificaciones seguras y duraderas en entornos sísmicos.

5.2 Recomendaciones.

En base a los resultados obtenidos en esta investigación, se recomienda diseñar modelos que representen con precisión el módulo de falla final de las paredes de mampostería confinada, así como capturar de manera adecuada las deformaciones que experimenta la mampostería bajo cargas laterales. En el diseño de edificaciones con paredes de mampostería confinada, se debe minimizar el tamaño y la cantidad de aberturas en zonas críticas para preservar la integridad estructural.

Se recomienda ubicar las aberturas de manera que se distribuyan las cargas de forma más homogénea. Es necesario revisar y actualizar las normativas de construcción locales para incluir criterios específicos sobre el diseño y ubicación de aberturas en paredes de MC, considerando los hallazgos de esta investigación. Se recomienda llevar a cabo estudios experimentales adicionales para validar y ampliar los resultados obtenidos mediante simulaciones numéricas, especialmente en contextos locales con materiales y técnicas de construcción específicos.

Además, es fundamental capacitar a ingenieros y constructores sobre las mejores prácticas en el diseño y construcción de paredes de MC con aberturas, así como difundir los resultados de esta investigación para mejorar la seguridad estructural en zonas sísmicas.

5.3 Líneas de investigación futura.

A partir de los hallazgos de esta investigación, se identifican varias líneas de investigación futura centradas en la macromodelación de elementos de mampostería confinada mediante el uso del programa STKO y los Elementos Volumétricos Representativos (RVE).

Es crucial continuar desarrollando y refinando modelos numéricos avanzados que consideren la variabilidad en las propiedades de los materiales de mampostería y las condiciones de carga, con el fin de mejorar la precisión de las predicciones del comportamiento estructural. Además, es importante investigar la interacción entre columnas y muros de mampostería confinada, así como el comportamiento de este conjunto ante cargas laterales. Esta línea de

investigación permitirá entender mejor cómo las columnas contribuyen a la distribución de las cargas y cómo influyen en la capacidad de resistencia y deformación de las paredes de MC.

La utilización de STKO en estas investigaciones futuras permitirá una modelación más detallada y precisa, facilitando la captura de las complejas interacciones y comportamientos no lineales de la mampostería confinada bajo diversas condiciones de carga, proporcionando una visión más completa y práctica del rendimiento estructural a largo plazo.

Referencias

- (INN), I. N. (2003). NCh2123: Construcción en Mampostería - Requisitos Generales. *antiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización (INN)*.
- (MIDUVI), M. d. ((2014)). *Normas Ecuatorianas de la Construcción (NEC)*. Quito, Ecuador.
- Barajas, C. &-F. (2017). Guía para la construcción de viviendas sismo-resistentes en mampostería confinada. Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE). *Recuperado de Issuu*.
- Borah, B., Kaushik, H. B., & Singhal, V. (2023). Evaluation of modeling strategies for gravity and lateral load analysis of confined masonry structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21(2), 1273-1301. doi:10.1007/s10518-022-01578-7
- Bravo Heredia, D. F., & Flores Cevallos, L. D. (2015). Análisis estático no lineal de paredes de ladrillo de las casas de Cuenca (Bachelor's thesis). Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23119>
- Castillo Barreto, C. A. (2022). Influencia de las aberturas en el comportamiento sísmico de las paredes de ladrillo confinadas en marcos de hormigón armado. *Universidad de Cuenca*, 143. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/38052>
- Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Obtenido de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:109295692>
- Cornejo Pintado, E. G., & Zúñiga Saca, J. M. (08 de 01 de 2020). Caracterización del patrimonio edificado irregular de baja altura del Centro Histórico de Cuenca, orientado a estudios de vulnerabilidad sísmica. *B.S. Thesis. Cuenca*. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/33785>
- Fajfar, P. (2000). A nonlinear analysis method for performance-based seismic design. *Earthquake Spectra*. 573-592.
- GAD Cuenca. (2015). *Cambio climático, riesgos naturales y crecimiento urbano en ciudades emergentes y sostenibles: Estudio urbano Cuenca*. Cuenca.
- García, A., & López, J. (2023). Diseño sísmico de estructuras de mampostería. *Normas Técnicas Complementarias*, 45-58.
- García, H., Jiménez-Pacheco, J., & Ulloa, J. (2023). Effective properties of masonry structures and macro-model analysis with experimental verification [Manuscrito enviado para publicación]. Cuenca.
- Gómez, L. &. (2023). Evaluación del cumplimiento de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo en edificaciones residenciales. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 112-125.
- Guido Camata, J. Y., & Nicola Tarque, J. S. (2019). Pushover analysis of confined masonry walls using a 3D macro-modelling approach. *Engineering Structures*, 201. doi://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109731

- Manzi, N. (2017). *Valutazione della risposta sismica di un edificio esistente in muratura: Analisi dei meccanismi globali e locali [Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile]*. Università Degli Studi Di Cassino E Del Lazio Meidionale.
- Massart, T. J., Peerlings, R., & Geers, M. (2007). An enhanced multi-scale approach for masonry wall computations with localization of damage. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 69(5), 1022-1059. doi:10.1002/nme.1799
- Mckenna, F., & Fenves, G. (2008). *Using the OpenSees Interpreter on Parallel Computers*. Obtenido de <http://opensees.berkeley.edu>
- NEC-SE-MP. (2014). Ecuador.
- Nguyen, V. P., Stroeven, M., & Sluys, L. J. (2011). Multiscale continuous and discontinuous modelling of heterogeneous materials: A review on recent developments. *Journal of Multiscale Modelling*, 4(3), 229-270. doi:10.1142/S1756973711000509
- OCHOA CUEVA, S. y. (2005). Recomendaciones generales para la fabricación de ladrillo artesanal y su uso en la construcción de vivienda con mampostería confinada. Tesis de grado previo a la obtención del título de ingeniero civil. *Universidad Técnica Particular de Loja*.
- Penna, M. a. (2011). Evaluation of Uncertainties in the Seismic Assessment of Existing Masonry Buildings.
- Pérez Gavilán Escalante, J. J., Brzev, S., Espinosa Cazarin, E. F., Ganzerli, S., Quiun, D., & Reiter, M. T. (2023). Experimental Research Studies on Seismic Behaviour of Confined Masonry Structures: Current Status and Future Needs. 13(7). doi:10.3390/buildings13071776
- Petracca, M. (2016). *Computational multiscale analysis of masonry structures*. UPC, Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental. doi:10.5821/dissertation-2117-96337
- RAMOS, G. A. (1997). Efecto del Refuerzo Horizontal en el comportamiento de Mampostería Confinada ante Cargas Laterales.
- Scott, M. H., & Fenves, G. L. (2010). Krylov Subspace Accelerated Newton Algorithm: Application to Dynamic Progressive Collapse Simulation of Frames. *Journal of Structural Engineering*, 8. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000143
- Standardization, E. C. (1995). *Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures*. Belgium.
- Tomazevic, M. (1999). *Earthquake-resistant Design Of Masonry Buildings*. World Scientific. doi:10.1142/p055.

Anexos

