



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL
DE MUROS DE MAMPOSTERÍA SIN REFORZAR
MEDIANTE MEF: ADAPTADO A NORMATIVA Y
CONDICIONES LOCALES.**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

AUTOR: JOSÉ MICHAEL MENDIETA YUNGA

DIRECTOR: ING. JUAN GABRIEL BARBECHO CHUISACA

CUENCA - ECUADOR

2023

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE MUROS
DE MAMPOSTERÍA SIN REFORZAR MEDIANTE MEF: ADAPTADO
A NORMATIVA Y CONDICIONES LOCALES

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

AUTOR: JOSÉ MICHAEL MENDIETA YUNGA

DIRECTOR: ING. JUAN GABRIEL BARBECHO CHUISACA

CUENCA - ECUADOR

2023

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

Declaratoria de Autoría y Responsabilidad

José Michael Mendieta Yunga portador(a) de la cédula de ciudadanía N.º **0706568425**. Declaro ser el autor de la obra: **“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE MUROS DE MAMPOSTERÍA SIN REFORZAR MEDIANTE MEF: ADAPTADO A NORMATIVA Y CONDICIONES LOCALES”**, sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, **17 de marzo de 2023**



F:

José Michael Mendieta Yunga

C.I. 0706568425

CERTIFICACIÓN

Yo, Ing. Juan Gabriel Barbecho Chuisaca con CI: 0104445929 en calidad de director de tesis certifico que el trabajo “**Análisis del comportamiento estructural de paredes de mampostería de ladrillo sin confinar, con y sin aberturas, usando elementos finitos en base a la literatura existente**”, fue realizado por el estudiante José Michael Mendieta Yunga, bajo mi supervisión.

Cuenca, **14 de marzo del 2023**

Atentamente,

**JUAN
GABRIEL
BARBECHO
CHUISACA**

Digitally signed by JUAN
GABRIEL BARBECHO
CHUISACA
DN: cn=JUAN GABRIEL
BARBECHO CHUISACA c=EC
o=SECURITY DATA S.A. 2
ou=ENTIDAD DE
CERTIFICACION DE
INFORMACION
Reason: I am the author of this
document
Location:
Date: 2023.03.14 12:11:05:00

Ing. Juan Barbecho M.Sc.

DOCENTE

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres, José Gustavo Mendieta y Rosa Alejandrina Yunga, por su esfuerzo y valentía para sacar a sus hijos adelante, quienes siempre han sido una guía en mi vida con sus sabios consejos y alentándome a culminar con éxito mi carrera universitaria.

A mis hermanos, Melva Mendieta y Edwin Mendieta quienes han estado siempre presentes, brindándome su apoyo incondicional en el transcurso de mi vida y formación.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por ayudarme en cada día del transcurso de mi vida.

A la Facultad de Ingeniería, Industria y Construcción de la Universidad Católica de Cuenca, y a sus docentes por su dedicación al formarme como profesional.

Un agradecimiento especial a mi director de trabajo de titulación Ing. Juan Barbecho, por su paciencia y los conocimientos impartidos, ya que sin su apoyo este trabajo no hubiera sido posible.

RESUMEN

El presente proyecto plantea el análisis de 6 tipologías de paredes de mampostería de ladrillo sin reforzar y sin confinar, con y sin aberturas; mediante la técnica de macro modelación y uso del software de elementos finitos, ABAQUS. El objetivo es evidenciar los cambios en el comportamiento estructural de los prototipos al realizar aberturas en su fachada, destinadas a la ubicación de puertas y ventanas. Además, se realiza un análisis comparativo de 3 tamaños de mallado para determinar cómo influye el tamaño de los elementos en la precisión de los resultados.

La metodología a seguir parte con el barrido bibliográfico de las propiedades mecánicas utilizadas para caracterizar los muros de mampostería de ladrillo usando macro modelación. Se recopilan los valores de los parámetros mecánicos de la mampostería y se procede a realizar el ajuste en base al modelo constitutivo de Kent y Park. Finalmente, se modelan los prototipos en el software ABAQUS y los resultados se analizan mediante curvas de fuerza vs desplazamiento.

Los resultados indican un comportamiento frágil en los prototipos de paredes que presentan aberturas grandes (puertas y ventanas) en la fachada, siendo el prototipo M05, el de menor capacidad resistente. Además, se concluye que un mallado con elementos muy grandes no permiten alcanzar a capturar el daño en los puntos en los que debería empezar a producirse la falla.

Este trabajo tiene como finalidad aportar con información sobre macro modelación de muros de mampostería sin confinar y sin reforzar, permitiendo reducir costos y tiempo para su análisis.

Palabras clave: ABAQUS, Kent y Park, macro modelación, mampostería de ladrillo, elementos finitos.

ABSTRACT

This project proposes the analysis of six typologies of unreinforced and unconfined brick masonry walls, with and without openings, through the macro modeling technique and the use of the finite element software ABAQUS. The objective is to demonstrate the changes in the structural behavior of the prototypes when the facade presents openings for the placement of doors and windows. In addition, a comparative analysis of three mesh sizes is conducted to determine how the elements' size influences the results' accuracy.

The methodology followed starts from the bibliographic scan of the mechanical properties used to characterize brick masonry walls using macro modeling. The values of the mechanical parameters of the masonry are compiled, and the adjustment is made based on Kent and Park's constitutive model. Finally, the prototypes are modeled in the ABAQUS software, and the results are analyzed using force vs. displacement curves.

The results indicate a brittle behavior in the prototypes of walls with large openings (doors and windows) in the facade, being the M05 prototype the one with the lowest resistant capacity. Furthermore, it is concluded that a mesh with huge elements does not make it possible to capture the damage at the points where the failure should start to occur.

This work aims to provide information on the macro modeling of unconfined and unreinforced masonry walls, reducing costs and time for their analysis.

Keywords: ABAQUS, Kent and Park, macro modeling, brick masonry, finite elements

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación	2
1.2. Objetivos generales y específicos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
2. CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO	4
2.1 Método De Elementos Finitos	5
2.2. Métodos de Análisis Estructural con Elementos Finitos	6
2.3. Consideraciones para Modelación de Estructuras con Elementos Finitos	7
2.3.1. Geometría.....	7
2.3.2. Mallado.....	9
2.3.3. Materiales	10
2.3.3.1. Modelos Constitutivos Del Material	10
□ Kent y Park	11
□ Daño Plástico del Hormigón (CDP)	12
2.3.4. Condiciones de Contorno	13
2.4. Modelos de Elementos Finitos: Micro modelación y Macro modelación.....	14
2.5. Macro Modelación De Mampostería No Confinada	16
2.5.1. Modos de Falla en Mampostería	16
2.6. Estudios Realizados sobre Modelación de Mamposterías con Elementos Finitos	18
3. CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....	22
3.1. Propiedades Mecánicas de la Mampostería de Ladrillo	22
3.2. Calibración y Ajuste del Modelo Constitutivo de Kent y Park	25
3.3. Pasos para Modelar Mampostería sin Confinar mediante el software ABAQUS	28
3.3.1. Material	28
4. CAPÍTULO III. RESULTADOS.....	36
4.1. Curva Carga – Desplazamiento	36
4.1.1. Prototipo M01	36
4.1.2. Prototipo M02	38
4.1.3. Prototipo M03	41
4.1.4. Prototipo M04	43
4.1.5. Prototipo M05	46

4.1.6. Prototipo M06	48
4.2. Comparativa entre las 6 configuraciones	51
4.2.2. <i>Aumento de Capacidad de Carga por Influencia en el Tamaño del Mallado</i> .	52
5. Conclusiones	53
6. Referencias.....	55

1. INTRODUCCIÓN

Son muchos los países en los que aún hoy por hoy construyen sus viviendas con mampostería de ladrillo, siendo un elemento que parte de una cultura y que se ha mantenido por muchos años. Estas viviendas poseen espacios huecos en sus paredes, destinados a elementos de entrada como puertas y ventanas, las mismas que en ocasiones no contemplan las dimensiones máximas estipuladas en la normativa de construcción vigente; lo cual compromete la resistencia estructural de dichas paredes (Solar, 2015).

Frente a lo expuesto, se han desarrollado estudios importantes acerca del comportamiento de la mampostería ante eventos sísmicos; se han modelado numéricamente estos comportamientos y se han desarrollado metodologías de resolución para verificar el comportamiento de este material. Además, se han estudiado y obtenido nuevos modelos de falla propuestos, que tienden a identificar de manera más ajustada las debilidades estructurales en base a la cantidad y tamaño de las aberturas en los muros (Abdulla, 2017).

El presente proyecto es de carácter investigativo, que parte de una revisión literaria sobre los parámetros mecánicos usados en la modelación numérica de muros de mampostería sin confinar mediante MEF (Método de Elementos Finitos). Se plantea como base de estudio, un análisis tenso-deformación de 6 tipologías de muros de mampostería sin reforzar y sin confinar, con y sin aberturas. Los resultados obtenidos se analizarán en función de curvas de carga vs. desplazamiento, y se identificarán los mecanismos de falla para cada prototipo.

1.1 Justificación

La actividad sísmica en el Ecuador demuestra que las estructuras existentes de mampostería no reforzada y sin confinar, son las más vulnerables frente a los efectos de un sismo afectando de manera significativa su capacidad de resistencia y provocando pérdidas humanas. Su sistema estructural presenta un comportamiento con muy poca ductilidad debido a la baja resistencia a cortante y tracción que presentan, junto con deficiencias constructivas en obra, como son: ladrillos y morteros de mala calidad, conexiones deficientes, etc.

La predicción del comportamiento de las estructuras de mampostería resulta compleja al no contar con herramientas que permitan realizar ensayos experimentales a escala real, por lo que surge la necesidad de realizar un estudio y análisis de estructuras de mampostería no confinada usando elementos finitos, lo que permita reducir costos y tiempo en su determinación.

1.2. Objetivos generales y específicos

1.2.1. Objetivo general

- Analizar el comportamiento estructural de 6 tipologías de muros de mampostería no reforzada y sin confinar, con aberturas en su fachada, mediante modelos de elementos finitos.

1.2.2. Objetivos específicos

- Identificar las 6 principales tipologías arquitectónicas usadas en la solución de fachadas sin confinar.
- Realizar una recopilación del estado del arte sobre parámetros mecánicos usados en normativa y en el marco investigativo para el comportamiento global de la mampostería.
- Construir modelos numéricos de las 6 tipologías de mampostería sin confinar y sin reforzar, adaptando los parámetros mecánicos y condiciones locales actualmente identificadas.
- Validar los modelos construidos a través de investigaciones ya realizadas.
- Analizar y comparar el comportamiento estructural de las 6 fachadas a través de la construcción de curvas Carga vs Desplazamiento.
- Verificar los mecanismos de falla de los muros de mampostería modelados.

2. CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

Las edificaciones de mampostería no confinada son de los materiales estructurales más antiguos y de uso extendido hasta la actualidad, se componen de muros sin refuerzo transversal que soportan cargas gravitacionales y laterales, siendo un método de construcción conformado por ladrillos y mortero, distribuidos regularmente. Para el diseño de estructuras de mampostería y evaluación de estructuras existente, se recurre al modelado numérico para comprender el comportamiento estructural bajo diversas condiciones de carga (Pereira & Lourenço, 2017).

Se han desarrollado diferentes enfoques en la literatura para analizar el comportamiento de las estructuras de mampostería. (Rots & Blaauwendraad, 1995) propuso una clasificación de los modelos de elementos finitos dependiendo del nivel de detalle de la modelación: micro – modelo detallado en el que tanto la unidad de mampostería, como el mortero se representan con distintos elementos, mientras que la interfaz unidad-mortero es representada por elementos de interfaz. Estos modelos son ideales en la precisión de resultados, pero se necesita de mucho esfuerzo computacional; micro – modelo simplificado, en este modelo la unidad de mampostería es representada por un solo material homogéneo, y la junta de mortero con elementos de interfaz; y el macro – modelo, aquí tanto la unidad de mampostería y el mortero, son sustituidos por un material homogéneo equivalente (Annicchiarico, Portioli, & Landolfo, 2010). La distribución de esfuerzos dentro del muro representa un valor promedio del esfuerzo en los distintos materiales.

2.1 Método De Elementos Finitos

El método permite idealizar una estructura como un modelo computacional numérico, el cual se divide en un número finito de partes o elementos. Estos elementos están conectados entre sí mediante puntos específicos llamados nodos. El conjunto de elementos y nodos se lo conoce malla (Pereira & Lourenço, 2017). La ecuación matricial global del modelo se puede escribir como:

$$K * u = f \quad (1)$$

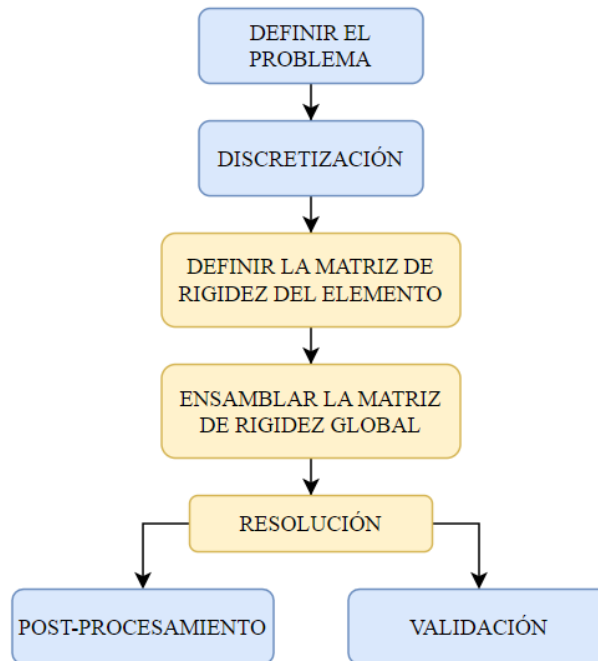
donde K es la matriz de rigidez, u es el vector de desplazamiento nodales y f el vector de fuerzas y momentos nodales equivalentes de toda la malla, que comprende al muro de mampostería (Vargas, 2010).

La resolución de un problema mediante elementos finitos sigue el diagrama de flujo de la Figura 1, con los siguientes pasos:

- Definición del problema: Se definen los materiales, las cargas y condiciones de contorno.
- Discretización: Se define el tamaño del mallado del elemento y el tipo de elementos, sean elementos lineales, elementos sólidos o elementos de superficie.
- Matriz de rigidez del elemento: Se calcula la matriz de rigidez que define cuánto se desplazará cada nodo en el elemento para un conjunto de fuerzas y momentos aplicados a los nodos.
- Matriz de rigidez global: Se ensamblan las matrices de rigidez individuales para todos los elementos de la malla en una matriz de rigidez global, que define cómo se desplazará toda la estructura cuando se le apliquen cargas.
- Solución del modelo.
- Post procesamiento y obtención de resultados.
- Validación del modelo.

Figura 1

Diagrama de flujo de solución por el Método de Elementos Finitos



Nota. Elaborado por el autor.

2.2. Métodos de Análisis Estructural con Elementos Finitos

2.2.1. Análisis Lineal Estático.

La teoría de la elasticidad introducida por Robert Hooke estableció que todos los materiales y estructuras se deforman cuando se someten a una carga. Esta teoría definió la rigidez como la relación entre esfuerzos y deformaciones. El análisis estático lineal asume que el material obedece la ley de Hooke (2):

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (2)$$

La elasticidad lineal no es aplicable al caso de estructuras de mampostería bajo tensión, ya que el material se agrieta con niveles de esfuerzo muy bajos (Pereira & Lourenço, 2017).

2.2.2. *Análisis No Lineal.*

En este tipo de análisis, la relación entre la fuerza y el desplazamiento deja de ser lineal. El objetivo radica en calcular un vector de desplazamiento que equilibre las fuerzas internas y externas, teniendo en cuenta los diferentes efectos no lineales.

La solución para el problema de no linealidad puede ser implícita o explícita. El enfoque explícito resulta útil en problemas estáticos, mientras que el enfoque implícito es más útil para resolver problemas dinámicos (Pereira & Lourenço, 2017).

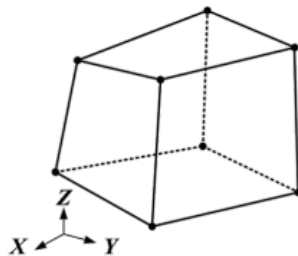
2.3. Consideraciones para Modelación de Estructuras con Elementos Finitos

2.3.1. *Geometría*

La geometría para idealizar un muro de mampostería se puede realizar mediante el uso de elementos lineales (elementos de armadura o viga), elementos bidimensionales en el plano (elementos tipo cáscara, a menudo denominados 2.5D), o elementos tridimensionales completos (elementos tipo sólido); sin embargo, los elementos tipo sólido (Figura 1) son elementos más usados para fines generales (Pereira & Lourenço, 2017).

Figura 2

Representación de un elemento sólido disponible en Abaqus



Nota. Elemento cuadrilátero sólido usando para representar en modelos tridimensionales. Tomado de *Proyecto de Estabilización Sismorresistente: Recomendaciones para el modelado avanzado de sitios históricos de tierra*, 2017.

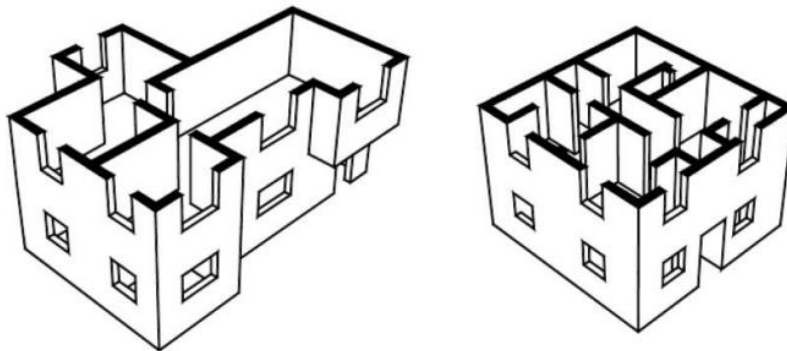
La idealización de la geometría según (NEC-SE-VIVIENDA, 2015), en sistemas con muros portantes de hormigón armado o mampostería, admite aberturas en su fachada que cumplan con los siguientes requerimientos:

- El área total de las aberturas dispuestas en los muros para la colocación de puertas y ventanas no debe sobrepasar el 35% del área total del muro.
- La distancia mínima entre dos aberturas y entre una abertura y el extremo del muro debe ser al menos de 50 cm y en todo caso debe ser mayor que la mitad de la dimensión menor de la abertura.

La Figura 3 presenta esquemáticamente la disposición de las aberturas en un muro.

Figura 3

Disposición de aberturas en muros.



Nota. Representación de la disposición de aberturas en los muros. Tomado de *NEC-SE-VIVIENDA, 2015*.

Tabla 1

Parámetros de disposición de aberturas en muros.

Área Total, $A_T = L t$	
Área de Pared $> 65\% A_T$	Área de Aberturas $< 35\% A_T$

Nota. Recomendaciones en la disposición de aberturas en un muro. Dónde A_t es el área total del muro, L es la longitud del muro y t es el espesor del muro. Tomado de *NEC-SE-VIVIENDA, 2015*.

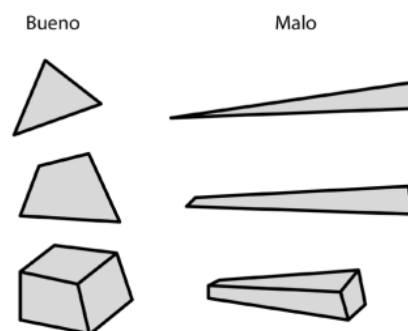
2.3.2. Mallado

Un modelo numérico se puede dividir en elementos finitos individuales de acuerdo con un procedimiento sistemático conocido como mallado. La forma y el tamaño de los elementos tienen un impacto importante en la solución (Figura 2). Una malla demasiado grande puede producir soluciones incorrectas, mientras que una malla demasiado fina dará como resultado un tiempo de cálculo excesivo, particularmente si se lleva a cabo un análisis estático o dinámico no lineal.

Una solución es utilizar mallas más grandes en las regiones con un bajo gradiente de esfuerzos-deformaciones y emplear una discretización más fina en las regiones donde se espera un alto gradiente de esfuerzos-deformaciones (Pereira & Lourenço, 2017).

Figura 4

Ejemplos de elementos con buenas y malas relaciones de aspectos de mallado



Nota. Representación de una buena y mala discretización en el mallado de los elementos. Tomado de *Proyecto de Estabilización Sismorresistente: Recomendaciones para el modelado avanzado de sitios históricos de tierra, 2017*.

2.3.3. Materiales

Las propiedades de los materiales se deciden en función de las condiciones de contorno y de carga presentes en la estructura. Antes de seleccionar las propiedades de los materiales, se debe considerar mantener la elasticidad lineal del material o permitir el cambio de este debido a los procesos de carga y/o al tiempo (Pereira & Lourenço, 2017). El comportamiento global de la mampostería es no lineal y su comportamiento en estados de tensión con un bajo nivel de esfuerzo es inelástico, esto debido al agrietamiento. Por otro lado, el comportamiento en estados de compresión con niveles de esfuerzo más altos es igualmente inelástico, pero en este caso debido al daño irreversible (Pereira & Lourenço, 2017).

La mampostería es un material que exhibe claras propiedades direccionales a causa de las juntas de mortero que actúan como planos de debilidad en el muro. Por tal motivo, el enfoque con respecto a su representación numérica puede centrarse en el micro modelo de los componentes individuales (unidades de ladrillo y mortero), o en el macro modelo de la mampostería como un solo material compuesto (Pereira & Lourenço, 2017).

2.3.3.1. Modelos Constitutivos Del Material

El uso de modelos constitutivos, ya sea desde un enfoque micro o macro modelado, requieren datos de entrada de varias propiedades mecánicas.

Una de las hipótesis en las consideraciones para el análisis lineal es el uso de la Ley de Hooke en el comportamiento de los materiales, esta consideración es válida cuando las deformaciones son pequeñas, ya que el esfuerzo es directamente proporcional a la deformación unitaria del material; sin embargo, a medida que se aumenta la carga aplicada, la relación esfuerzo – deformación deja de ser lineal (Llano, 2015), por lo que para el comportamiento estructural ante cargas sísmicas, no tendría validez un análisis de esta naturaleza.

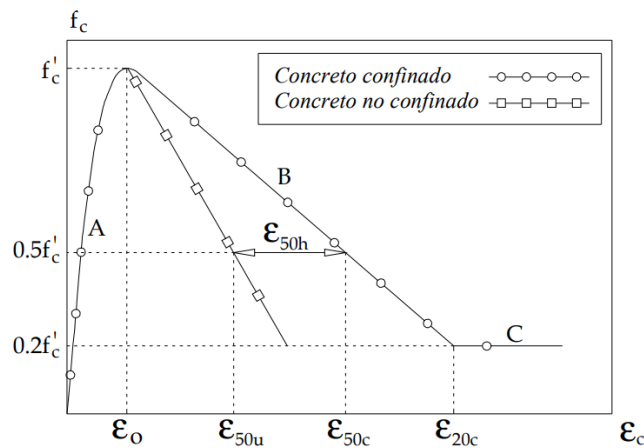
Por tal motivo, se implementó un análisis usando curvas constitutivas de los materiales, con el fin de obtener más precisión en los resultados. Esta inclusión se basa en un estudio del estado del arte en base a dos modelos principalmente propuestos: Keny y Park, y el Modelo de Daño Plástico del Hormigón (CDP, por sus siglas en inglés).

- **Kent y Park**

El modelo constitutivo asume que la máxima capacidad de esfuerzo para el hormigón confinado y no confinado es la misma, mostrando una diferente curva en la zona de descenso de capacidad con una relación lineal (Kent & Park, 1971), como se indica en la Figura 5.

Figura 5

Curva parabólica de esfuerzo – deformación de un hormigón confinado y no confinado.



Nota. La gráfica emplea el modelo constitutivo de Kent y Park (1971), para hormigón confinado y no confinado. Tomado de *Efecto de las fibras de acero sobre el confinamiento de columnas de hormigón*. (p. 14), por N. M. Piza, 2017.

La curva está formada por tres ramas (A, B y C), como se muestra en la Figura 6. En la primera rama el efecto de confinamiento aún no se presenta y su forma es igual a la de un hormigón simple, idealizaba como una parábola de segundo grado.

La rama B se aproxima o se idealiza por una recta, inicia cuando el hormigón alcanza su resistencia máxima y concluye cuando esta se ha degradado en un ochenta por ciento

$f_c = 0.20f'_c$. Su pendiente es función de factores relacionados con el confinamiento de la sección.

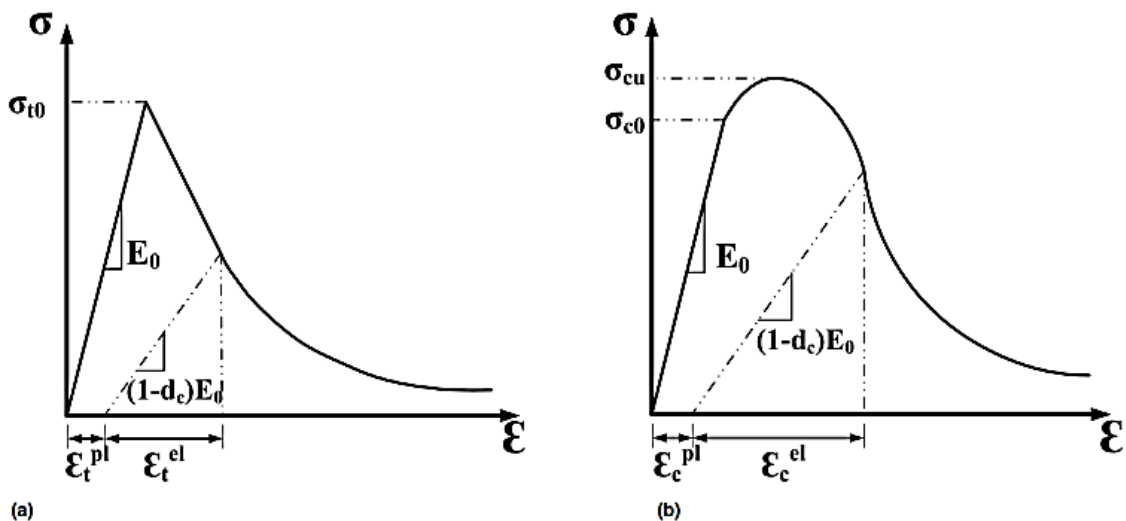
En la rama C, se aprecia que el concreto podrá seguir tomando deformaciones infinitas, lo cual es irreal, pero no podrá tomar esfuerzos adicionales (Kent & Park, 1971).

- ***Daño Plástico del Hormigón (CDP)***

El modelo de Daño Plástico del Hormigón (CDP, por sus siglas en inglés) que utiliza el software ABAQUS es una modificación del modelo Drucker-Prager de Lubliner (Lubliner & Oliver, 1989). El modelo CDP supone que, la falla de agrietamiento por tracción y aplastamiento por compresión del material, está caracterizada por la plasticidad del daño. El modelo utiliza el concepto de evolución del daño isotrópico en combinación con la plasticidad isotrópica a compresión y a tracción para representar la inelasticidad y el comportamiento de fractura del material. Las Figuras 6.a y 6.b muestran las curvas de esfuerzo-deformación típicamente adoptadas en tracción y compresión.

Figura 6

Curva parabólica de esfuerzo – deformación a tracción (a) y compresión (b).



Nota. Los diagramas muestran las relaciones de esfuerzo-deformación: (a) en tracción; (b) em compresión. Tomado de *Proyecto de Estabilización Sismorresistente: Recomendaciones para el modelado avanzado de sitios históricos de tierra*, 2017.

El modelo CDP requiere la definición de cuatro parámetros adicionales: el ángulo de dilatación, la excentricidad de flujo potencial, la relación entre el esfuerzo de fluencia de compresión equi-biaxial inicial y el esfuerzo de fluencia de compresión uniaxial inicial, además del parámetro de viscosidad. Para estos parámetros, el manual del usuario de ABAQUS (ABAQUS, 2010) sugiere los valores indicados en la Tabla “1”.

Tabla 2

Parámetros mecánicos del Daño Plástico del Hormigón

Parámetro	Valor
Angulo de dilatación (ψ)	40°
Excentricidad (ϵ)	0.1
f_{bo}/f_{co}	1.16
K_c	0.667
Parámetro de viscosidad (μ)	0.0

Nota. Parámetros mecánicos sugeridos por el manual del usuario de ABAQUS para el Modelo de Daño Plástico del Hormigón: forma de superficie de falla (K_c), f_{bo}/f_{co} (relación entre el esfuerzo de fluencia de compresión biaxial inicial y el esfuerzo de fluencia de compresión uniaxial inicial). Tomado de *Proyecto de Estabilización Sismorresistente: Recomendaciones para el modelado avanzado de sitios históricos de tierra, 2017*.

2.3.4. Condiciones de Contorno

Las restricciones en los nodos pueden tener de uno a seis grados de libertad con los tres posibles movimientos de traslación y los tres rotacionales en el espacio. Restringir los seis grados de libertad representan un apoyo empotrado, restringir un grado de libertad significa que es un apoyo móvil y restringir las traslaciones y no las rotaciones significa que es un apoyo fijo (Pereira & Lourenço, 2017).

La disposición de las condiciones de contorno debe representar, en como sea posible, a las condiciones reales de la estructura. De igual manera, la aplicación de cargas puede darse en superficies y volúmenes, siendo fuerzas térmicas, inerciales, concentradas o

distribuidas en forma de desplazamiento nodal o fuerza nodal (Pereira & Lourenço, 2017).

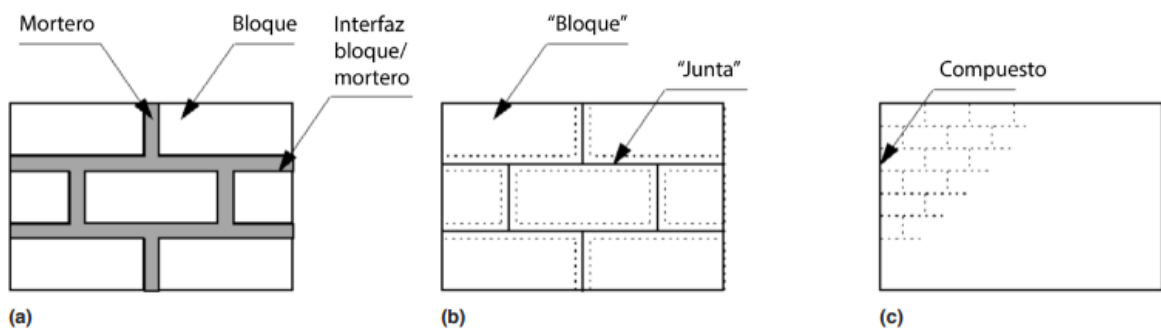
2.4. Modelos de Elementos Finitos: Micro modelación y Macro modelación

A lo largo del tiempo se ha consolidado el uso de elementos finitos como el método más eficiente para el análisis de estructuras de mampostería y el análisis de estructuras en general. Recientemente el código ACI la incorporó dentro del código 318-19.

En el marco de su modelización numérica mediante elementos finitos, se pueden considerar tres aproximaciones: la micro modelación, la micro modelación simplificada y la macro modelación. En términos generales, la micro modelación concibe la mampostería como un material heterogéneo siendo la aproximación más realista, mientras que la macro modelación la concibe como un material homogéneo (Pereira & Lourenço, 2017).

Figura 7

Alternativas para modelado de mamposterías



Nota. Representación de las alternativas de modelado para la mampostería: (a) micro modelación detallada, (b) micro modelación simplificada y (c) macro modelación. Tomado de *Proyecto de Estabilización Sismorresistente: Recomendaciones para el modelado avanzado de sitios históricos de tierra*, 2017.

El micro modelado es la mejor herramienta para describir el comportamiento real de la mampostería, particularmente en lo relativo a su respuesta local, ya que con ella se puede modelar la interfase unidad-mortero y la junta de mortero, responsable del agrietamiento

y del deslizamiento frente a condiciones externas de carga (Rots & Blaauwendraad, 1995).

El micro modelo simplificado considera como elementos de continuidad con criterios de falla específicos a los ladrillos, pero las juntas de mortero y los elementos de interfaz se redefinen como elementos individuales discontinuos para representar el área de contacto. Este enfoque mantiene la geometría general del muro; sin embargo, dado que los elementos individuales que representan juntas e interfaces no están representados, algunos tipos de mecanismos de falla no se pueden reproducir en este tipo de micro modelo (por ej., debido a la expansión transversal del mortero sobre los ladrillos, cuando se los comprime hasta la falla) (Pereira & Lourenço, 2017).

El macro modelo considera a la mampostería como un elemento homogéneo. A causa de estas características, este enfoque debería ser capaz de reproducir el comportamiento estructural general de un panel de mampostería, pero no puede reproducir todos los tipos de mecanismos de falla (Rots & Blaauwendraad, 1995).

En general, cuanto más detallado es el modelo, más difícil es implementarlo. Los micro modelos son más adecuados para el estudio de muros simples o problemas de localización específica como intersecciones de muros, vanos, arcos, etc. Por otra parte, los macro modelos son más rápidos y fáciles en caso de representaciones del comportamiento estructural de un edificio. Otro aspecto importante para considerar en la elección del tipo de modelo que se va a utilizar es que, en general, los micro modelos requieren información más detallada sobre las propiedades de los materiales (Pereira & Lourenço, 2017).

2.5. Macro Modelación De Mampostería No Confinada

El macro modelado considera la mampostería como un elemento homogéneo. A causa de estas características, este enfoque debería ser capaz de reproducir el comportamiento estructural general de un panel de mampostería, pero no puede reproducir todos los tipos de mecanismos de falla. En general, cuanto más detallado es el modelo, más difícil es implementarlo. Los macro modelos son rápidos y fáciles en caso de representaciones del comportamiento estructural de los componentes de un edificio (Pereira & Lourenço, 2017).

2.5.1. Modos de Falla en Mampostería

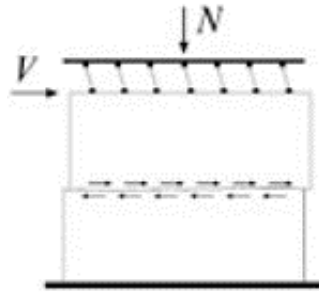
El método de macro modelación es ampliamente usado para evaluar el rendimiento sísmico de las estructuras de mampostería en tiempos cortos de procesamiento. Las irregularidades geométricas como aberturas en la fachada de los muros, pueden afectar significativamente el comportamiento sísmico de los elementos y por lo tanto de un edificio completo (Parisi & Augenti, 2012).

El modo de falla de un macro elemento flexible depende de la fuerza relativa entre los componentes de la mampostería, fuerza axial aplicada y las condiciones de borde. A continuación, se presentan los mecanismos de falla:

- **Falla por Cortante:** Se produce por un deslizamiento horizontal a lo largo de la junta de mortero, presentando una falla por adherencia. La falla también puede producirse siguiendo las juntas tanto horizontales como verticales (Parisi & Augenti, 2012).

Figura 8

Representación gráfica de falla por cortante.

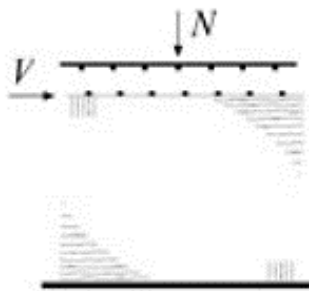


Nota. Modo de falla por aplastamiento en muros de mampostería no reforzada. Tomado de *Seismic capacity of irregular unreinforced masonry walls with openings*, 2012.

- **Falla por Aplastamiento:** A medida que aumenta la carga lateral o desplazamiento, el panel de mampostería sufre agrietamiento por tracción en las esquinas (grietas horizontales) y experimenta una rotación de cuerpo rígido hasta que se alcanza el aplastamiento en las esquinas comprimidas (grietas verticales) (Parisi & Augenti, 2012).

Figura 9

Representación gráfica de falla por flexión.

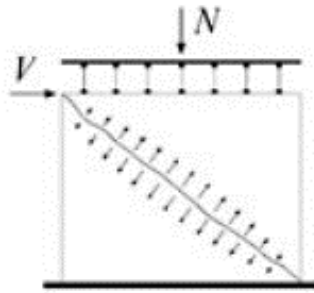


Nota. Modo de falla por aplastamiento en muros de mampostería no reforzada. Tomado de *Seismic capacity of irregular unreinforced masonry walls with openings*, 2012.

- **Falla por Tensión Diagonal:** Se caracteriza por la aparición de grietas a lo largo de la diagonal en compresión y comúnmente ocurre junto a una falla por deslizamiento (Parisi & Augenti, 2012).

Figura 10

Representación gráfica de falla por tensión diagonal.



Nota. Modo de falla por tensión diagonal en muros de mampostería no reforzada. Tomado de *Seismic capacity of irregular unreinforced masonry walls with openings, 2012.*

2.6. Estudios Realizados sobre Modelación de Mamposterías con Elementos

Finitos

(Anecchiarico, Portioli, & Landolfo, 2010) plantearon un análisis de sensibilidad en base al tamaño del mallado usando el método de macro modelación y toman como prototipo de ensayo un muro de corte de mampostería de ladrillo. El muro se sometió a una carga vertical de 0.30 MPa y desplazamiento horizontal de 20 mm aplicado en la viga superior de amarre. El análisis se realizó tomando un intervalo de 10 a 100 mm para el tamaño de la malla. El prototipo fue calibrado usando el modelo constitutivo de Daño Plástico del Hormigón o CDP (Concrete Damage Plasticity) para materiales cuasi frágiles. Los resultados indicaron problemas de convergencia en los prototipos con valores pequeños de mallado, y se enfatizó que la predicción del comportamiento estructural es más precisa al contar con tamaños grandes de mallado.

(Calderón & Jiménez, 2021) realizaron un estudio en base a cuatro tipologías de estructuras de mampostería no reforzada ubicadas en el Centro Histórico de Cuenca, dos tradicionales y dos modernas: mampostería no reforzada de adobe, mampostería no confinada de ladrillo, mampostería no confinada de ladrillo con vigas de amarre y mampostería confinada de ladrillo. Realizaron un análisis estático mediante macro modelación y los parámetros mecánicos de entrada para la generación de los modelos se determinó a partir de pruebas experimentales y directrices disponibles en la literatura. Los resultados indicaron que el parámetro más influyente en la capacidad de corte en los ensayos es el espesor de la pared al usar macro elementos.

(Pereira & Lourenço, 2017) plantearon un análisis comparativo para determinar la precisión de los resultados usando prototipos generados mediante softwares comerciales tales como Diana y Abaqus. Las muestras se calibraron en base al modelo constitutivo CDP para un macro modelo de paredes de mampostería de ladrillo usando un tamaño máximo de 150 mm en el mallado. Los resultados mostraron que ambos modelos pudieron reproducir el mismo modo de falla, con grietas de corte en las esquinas de las aberturas de puertas y ventanas, lo que demuestra la confiabilidad de estas herramientas para análisis de elementos estructurales.

(Parisi & Augenti, 2012) determinaron en su investigación que las irregularidades geométricas como aberturas en las fachadas de los muros de mampostería sin confinar, afectan significativamente la respuesta sísmica debido a que el daño es potenciado por influencia de dichos espacios huecos. Para este fin, usaron una metodología basada en el método de macro modelación numérica y validaron los resultados en base a ensayos experimentales de muros de mampostería con geometrías irregulares.

(Grant, Dennis, & Sturt, 2020) en su investigación usaron funciones de fragilidad y vulnerabilidad para realizar un análisis de riesgo sísmico que permita evaluar la

probabilidad de daño y colapso en edificios de mampostería. Los prototipos se ensayaron considerando aberturas en las fachadas, siendo estos unos indicadores de vulnerabilidad potencial en el análisis. Los resultados indicaron la influencia directa de las aberturas en el colapso prematuro de los prototipos.

(Hossein & Saeed, 2016) plantearon el uso de la técnica de modelación numérica para realizar una comparativa del comportamiento estructural de dos tipos de muros de mampostería; un muro macizo sin aberturas y sin confinar y, un muro con una abertura con forma de arco en el centro del muro, siendo una geometría usada en el antiguo Imperio Sasánida. La simulación se realizó usando la técnica de macro modelación y se usó el Modelo de Daño Plástico del Hormigón o CDP para caracterizar el material de la mampostería de ladrillo. Los resultados mostraron que en promedio los dos modelos comparten ductilidades aproximadas pero el muro con abertura en forma de arco es más resistente a las deformaciones en comparación con el muro de mampostería rectangular.

(De Villiers & Boshoff, 2021) analizaron dos configuraciones de muros de mampostería, en el contexto de viviendas de bajos ingresos subsidiadas por el gobierno de Sudáfrica, usando un enfoque simplificado de micro modelado bajo acciones sísmicas y eólicas para un estado límite último. Usaron un amplio espectro de materiales de mampostería como geo polímero, tierra comprimida estabilizada, adobe y hormigón convencional. El resultado mostró que los cuatro materiales replicaron los mecanismos de falla y ninguno resistió la carga de diseño requerida. Las fallas apuntaron a problemas subyacentes relacionados con la compatibilidad del Reglamento Nacional de Construcción de Sudáfrica, que se considera satisface las disposiciones de diseño de muros y códigos de carga considerados en los ensayos.

(Rindwan, Yoshitake, & Nassif, 2017) realizaron un estudio enfocado en estructuras de mampostería de ladrillos de baja calidad, donde el módulo de elasticidad del mortero es

mayor al del ladrillo. Esto debido a que algunas zonas como India o Indonesia no existe un control de calidad en la elaboración de los ladrillos. El análisis se realizó mediante modelación numérica usando la técnica de macro modelado de elementos para caracterizar las estructuras de mampostería de ladrillo.

(Meillyta, 2012) planteó una investigación para determinar el comportamiento del muro de mampostería no reforzada con aberturas cuando dos cargas, horizontal y vertical, actúan sobre él. El ensayo se realizó usando el software de elementos finitos Abaqus con un análisis explícito. El resultado mostró que el aumento del área de las aberturas disminuye la capacidad del muro para resistir la carga horizontal, por otro lado, se observó que la capacidad del muro aumenta con el aumento de la carga de precompresión aplicada en la parte superior del muro. Además, resalta la precisión que tiene el uso de elementos finitos en la modelación de muros de mampostería sin reforzar.

3. CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

La metodología a seguir para la construcción de los modelos numéricos mediante ABAQUS consistió en; primero, realizar una recopilación de información acerca de los parámetros mecánicos, sujetos a ensayos experimentales, usados para modelar estructuras de mampostería de ladrillo sin confinar mediante la técnica de macro modelación; segundo, usando estadística descriptiva se procesa la información recopilada de la literatura y se obtienen valores promedios de los parámetros mecánicos necesarios para calibrar y ajustar el modelo constitutivo del material; tercero, se construyen los 6 prototipos de paredes de mampostería previamente calibrados en base al modelo constitutivo. Por último, se analiza cómo influyen las aberturas de las fachas de los muros en el comportamiento estructural del conjunto en base a curvas de fuerza – desplazamiento.

3.1. Propiedades Mecánicas de la Mampostería de Ladrillo

Las características mecánicas necesarias para el macro modelado de los prototipos son: densidad, módulo de elasticidad, resistencia a compresión y resistencia a tensión. Los valores se obtuvieron mediante la revisión de diferentes fuentes bibliográficas y se presentan como resumen en la Tabla 2. Una vez plasmados los valores en la tabla resumen se procede a usar la herramienta Excel para procesar los datos, mediante estadística descriptiva, del módulo de elasticidad (Figura 11), resistencia a compresión (Figura 12) y su resistencia a tensión (Figura 13).

Tabla 3*Parámetros mecánicos de comportamiento global de la mampostería.*

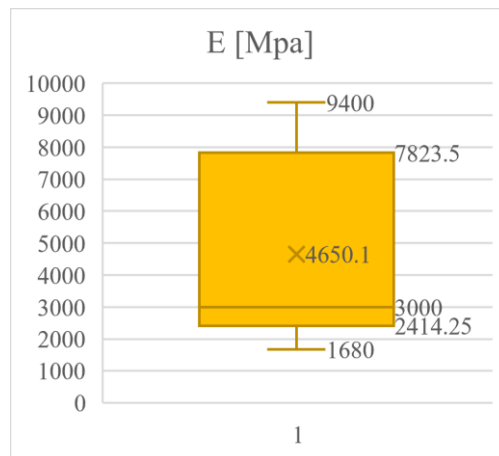
Densidad [kg/m ³]	Módulo de Elasticidad [MPa]	fc [MPa]			ft [MPa]			Referencia
		Min	Med	Max	Min	Med	Max	
	3000		7			0.35		(Anecchiarico, Portioli, & Landolfo, 2010)
1835.5	2650		2.65					(Gonzalez, Avila, Pujades, & Barbat, 2017)
1200	2277	2.07	4.14	6.21				(Pereira & Lourenço, 2017)
1427.6	1680		3					(Calderón & Jiménez, 2021)
	3000		4.3					(Parisi & Augenti, 2012)
	9400		13.4			0.15		(Griffith, Lam, & Wilson, 2004)
	2460		1.87			0.28		(Rots, Lourenço, & Blaauwendraad, 1998)
	6000		10			0.2		(Grant, Dennis, & Sturt, 2020)
1822	7630		6.6			1.2		(De Villiers & Boshoff, 2021)
	8404							(Hossein & Saeed, 2016)

Nota. Elaborado por el autor.

Los valores recopilados del módulo de elasticidad no presentan similitudes entre sí. Por esta razón, se determina una media de 4650.1 MPa como se indica en la Figura 11. Se tomará el valor promedio para idealizar el módulo de elasticidad para el material de la mampostería.

Figura 11

Módulo de elasticidad promedio.

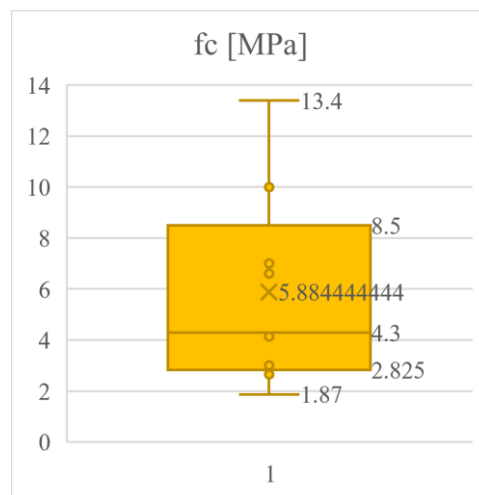


Nota. Elaborado por el autor.

La resistencia media a compresión entre los valores procesados es de 5.88 MPa como se indica en la Figura 12. Se tomará el valor promedio al considerar todos los valores de la resistencia a compresión de la mampostería de ladrillo, como resultado de los ensayos experimentales, expuestos en la revisión de la literatura.

Figura 12

Resistencia promedio a compresión.

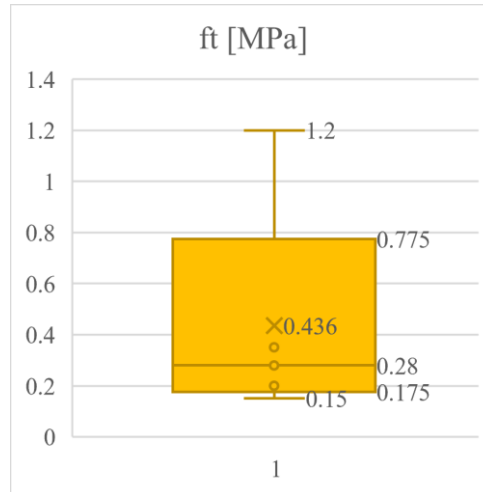


Nota. Elaborado por el autor.

El valor medio de la resistencia a tensión de la mampostería es de 0.436 MPa. Se tomará dicho valor para definir la propiedad de resistencia a tensión del material de mampostería.

Figura 13

Resistencia promedio a tensión.



Nota. Elaborado por el autor.

Los datos procesados se utilizarán para calibrar el modelo constitutivo del material en base a Kent y Park. Los valores finales a tomar son de 4650.1 MPa, 5.88 MPa y 0.436 MPa para el módulo de elasticidad, esfuerzo a compresión y esfuerzo a tracción, respectivamente.

3.2. Calibración y Ajuste del Modelo Constitutivo de Kent y Park

Una vez determinados los valores promedios de la resistencia a compresión (f'_c), resistencia a tensión (f_t) y módulo de elasticidad (E), se procede a realizar el ajuste de las propiedades del material mediante el uso del modelo constitutivo de Kent y Park.

El proceso del ajuste y calibrado resulta ser iterativo, hasta cumplir con los valores mecánicos determinados previamente.

El ajuste parte considerando la relación esfuerzo-deformación del hormigón como lineal, hasta aproximadamente el 50% de su resistencia f'_c . El modelo Kent y Park (Kent & Park,

1971) asume que la máxima capacidad de esfuerzo para el hormigón confinado y no confinado es la misma, cuando alcanza una deformación unitaria de 0.002.

Una vez concluido el proceso iterativo, se verifica que los valores de f'_c , f_t y E sean lo más aproximados a los determinados previamente. Además, se introduce un modelo de esfuerzo-deformación en la resistencia a compresión, con el 50% de daño.

En la resistencia a compresión se introduce un modelo de esfuerzo-deformación con daño.

Tabla 4

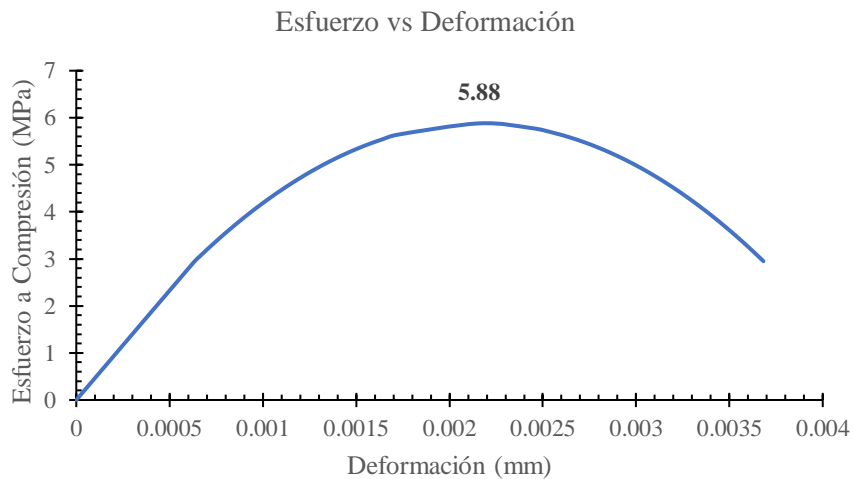
Parámetros mecánicos de ajuste para el modelo constitutivo de Kent y Park.

f'_c	5.88 MPa
50% f'_c	2.94 MPa
30% f'_c	1.764 MPa
ξ'_c	0.002159
E	4650.4 MPa
% daño	50%

Nota. Los parámetros a ajustar al modelo constitutivo son la resistencia a compresión (f'_c), resistencia a tensión (f_t) y el módulo de elasticidad (E) y la deformación unitaria (ξ'_c). Elaborado por el autor.

Figura 14

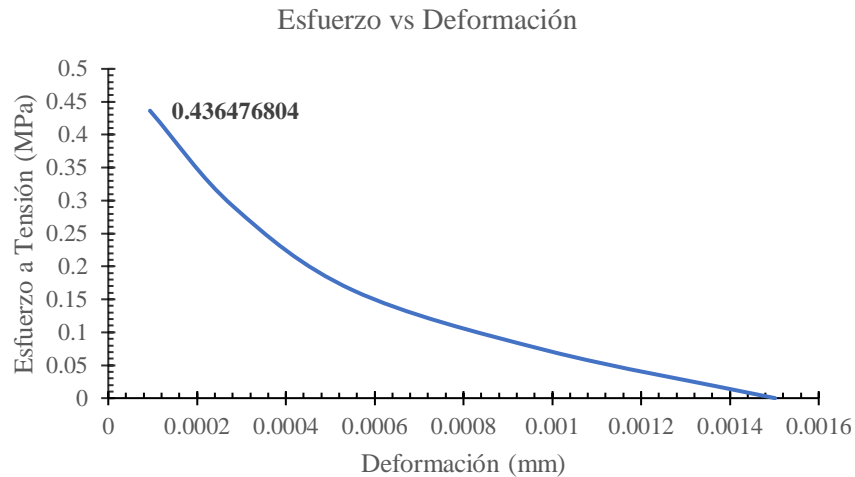
Curva de esfuerzo a compresión de la mampostería de ladrillo.



Nota. La curva parabólica muestra el esfuerzo a compresión del material de 5.88 MPa, calculado previamente y ajustado en base al modelo constitutivo de Kent y Park. Elaborado por el autor.

Figura 15

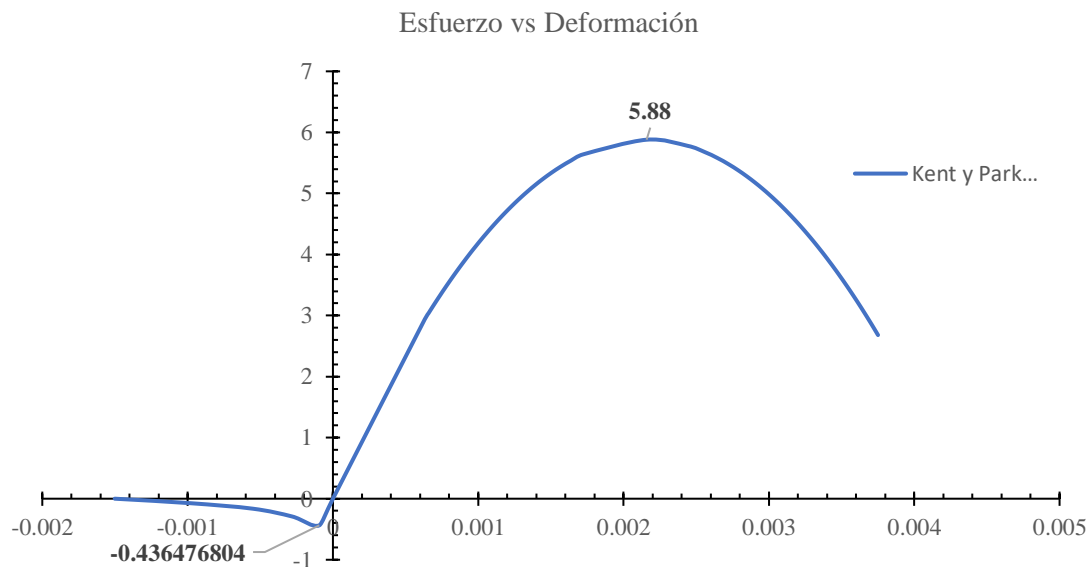
Curva de esfuerzo a tensión de la mampostería de ladrillo.



Nota. La curva parabólica muestra el esfuerzo a tensión del material de 0.43 MPa, calculado previamente y ajustado en base al modelo constitutivo de Kent y Park. Elaborado por el autor.

Figura 16

Modelo Constitutivo de Kent y Park.



Nota. Se muestra la curva esfuerzo-deformación para compresión y tensión del material de mampostería de ladrillo, ajustado en base los criterios del modelo constitutivo de Kent y Park. Elaborado por el autor.

3.3. Pasos para Modelar Mampostería sin Confinar mediante el software ABAQUS

Con el propósito de tener una herramienta con la capacidad de predecir correctamente el comportamiento de muros de mampostería no confinado se procedió a calibrar cada muro en el programa de elementos finitos, ayudando a verificar los resultados respecto a la bibliografía base.

Se procedió al uso del software Abaqus (ABAQUS, 2010) a fin de poder generar una representación tridimensional del problema y poder analizar a detalle el comportamiento del elemento estructural a nivel macro, mediante el análisis de las deformaciones unitarias a compresión y a tracción.

3.3.1. Material

Se define un material sólido homogéneo con densidad de 1400 kg/m³ y un módulo de elasticidad de 4650 MPa, y los parámetros mecánicos de la Tabla 4 necesarios para la construcción del Modelo de Daño Plástico (CDP) del material.

Tabla 5

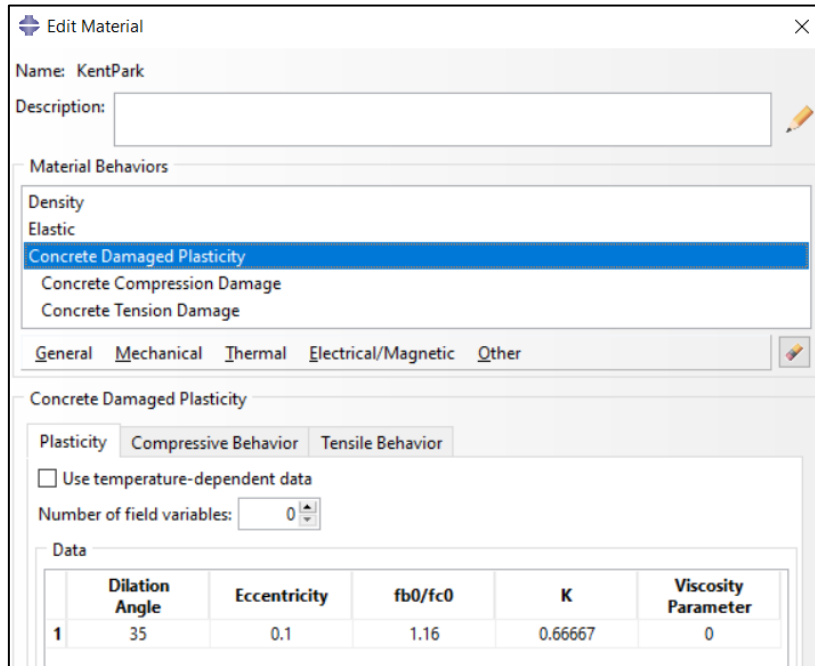
Parámetros mecánicos para caracterizar el Modelo de Daño Plástico

Parámetro	Valor
<i>Ángulo de dilatación</i>	35
<i>Excentricidad</i>	0.1
<i>f_{bo}/f_{co}</i>	1.16
<i>K_c</i>	0.667
<i>Viscosidad</i>	0

Nota. Elaborado por el autor.

Figura 17

Parámetros de modelación del daño plástico en Abaqus.



Nota. Definición del material de mampostería de ladrillo para el modelo CDP.

3.3.2. Geometría del Modelo

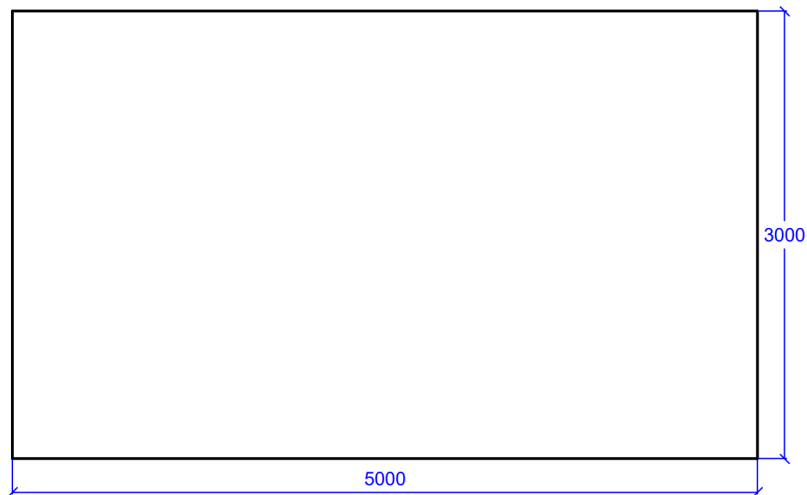
Se define la geometría (longitud y altura) de cada uno de los 6 prototipos de paredes sin reforzar y sin confinar, mediante el uso del software AutoCAD. Además, se definen las dimensiones de los espacios huecos, destinados para ubicar puertas y ventanas, en base a la disposición de aberturas de la NEC (NEC-SE-VIVIENDA, 2015).

A continuación, se presentan las características geométricas de cada uno de los prototipos generados:

- **Prototipo M01**

Se trata de una pared convencional sólida de mampostería de ladrillo sin reforzar y sin confinar, sin aberturas, con dimensiones de 5 m de largo y 3 m de altura.

Figura 18
Geometría de prototipo M01

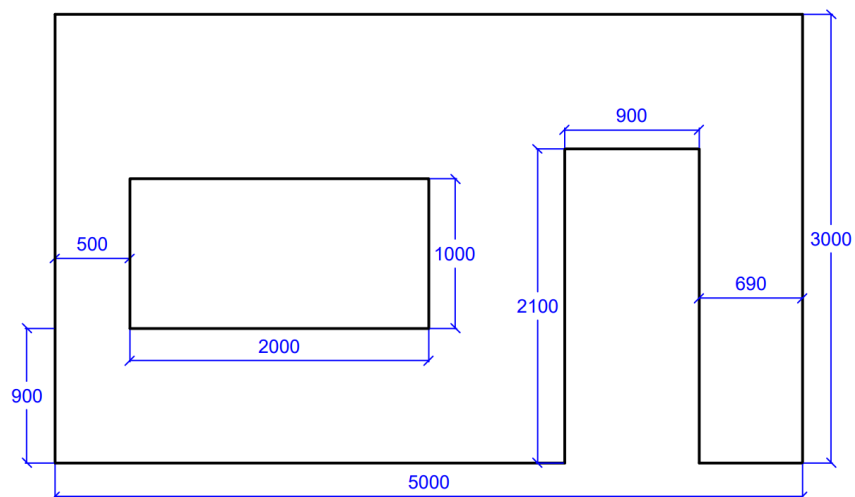


Nota. Elaborado por el autor.

- **Prototipo M02**

Presenta una geometría con dos aberturas destinadas a: una puerta de 0.9 m de largo y 2.1 m de altura, y una ventana de 2 m de largo y 1 m de altura. La ubicación de la ventana toma en cuenta el antepecho de 0.9 m desde la base del muro.

Figura 19
Geometría de prototipo M02

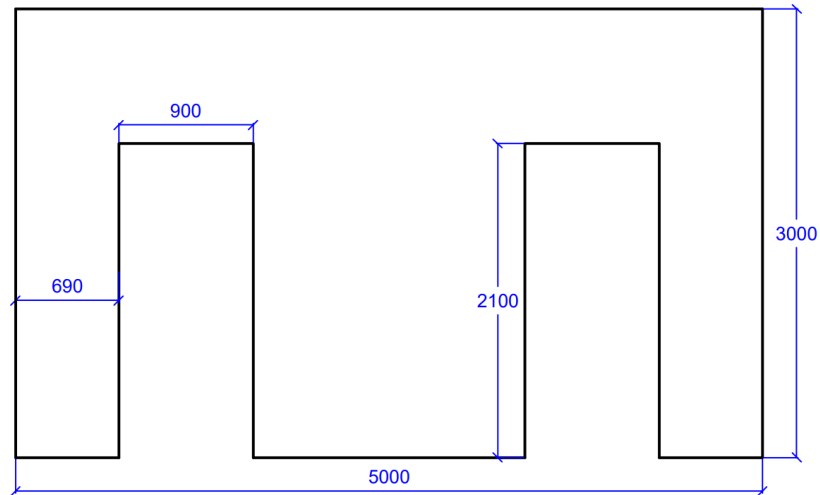


Nota. Elaborado por el autor.

- **Prototipo M03**

El modelo posee unas aberturas destinadas a la ubicación de dos puertas de dimensiones, 0.9 m de largo y 2.1 m de altura, cada una.

Figura 20
Geometría de prototipo M03

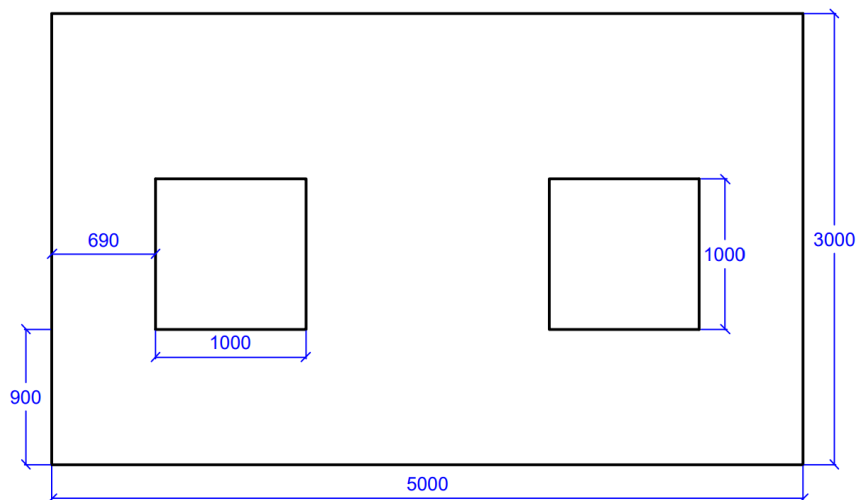


Nota. Elaborado por el autor.

- **Prototipo M04**

Posee aberturas destinadas a dos ventanas con dimensiones de 1 m de largo y 1 m de altura, cada una. Se toma en cuenta el valor de 0.9 m para el antepecho.

Figura 21
Geometría de prototipo M04

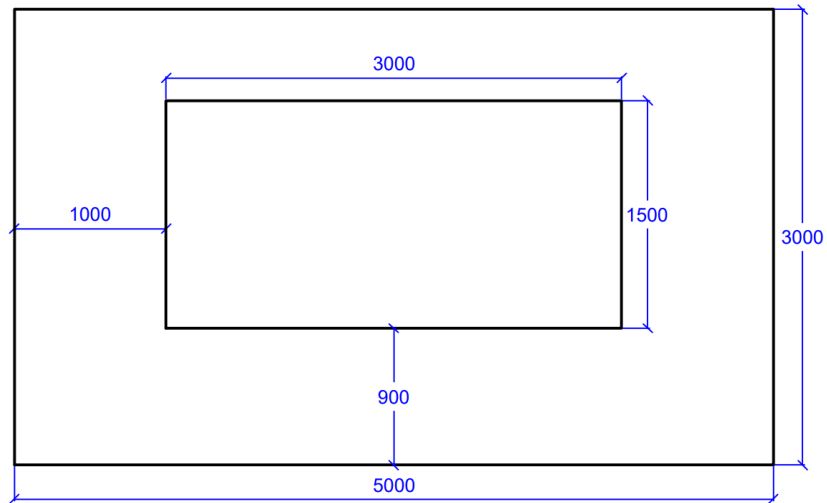


Nota. Elaborado por el autor.

- **Prototipo M05**

Presenta una única abertura destinada a la ubicación de una ventana de grandes dimensiones, 3 m de largo y 1.5 m de altura.

Figura 22
Geometría de prototipo M05

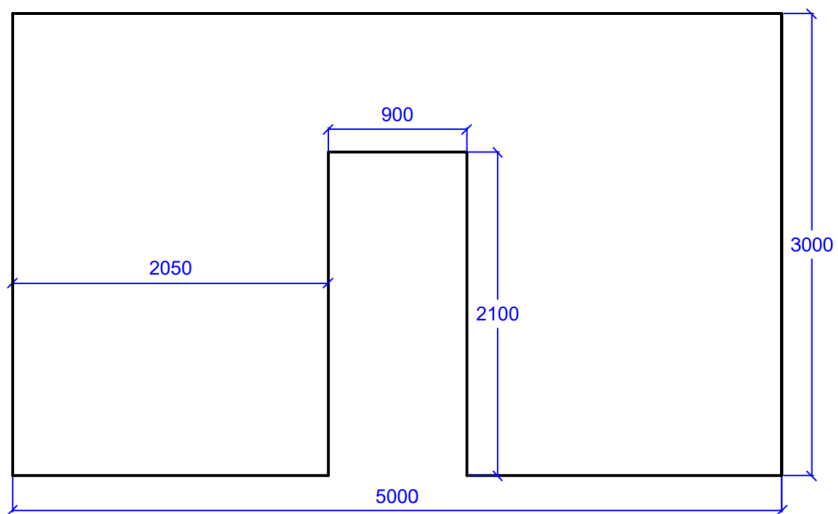


Nota. Elaborado por el autor.

- **Prototipo M06**

Presenta una abertura destinada a una puerta en el centro del muro con una dimensión de 0.9 m de largo y 2.1 m de altura.

Figura 23
Geometría de prototipo M06



Nota. Elaborado por el autor.

Una vez definidas las geometrías de los muros se procede a verificar que las dimensiones de las aberturas cumplan con las solicitudes dispuestas anteriormente en la Tabla 1.

Tabla 6

Verificación de dimensiones de aberturas en muros.

Prototipo	Área Total	Área Abertura	65% AT	35% AT	Cumple
<i>M01</i>	15	0	0	0	-
<i>M02</i>	15	3.89	9.75	5.25	Si
<i>M03</i>	15	3.78	9.75	5.25	Si
<i>M04</i>	15	2	9.75	5.25	Si
<i>M05</i>	15	4.5	9.75	5.25	Si
<i>M06</i>	15	1.89	9.75	5.25	Si

Nota. Elaborado por el autor.

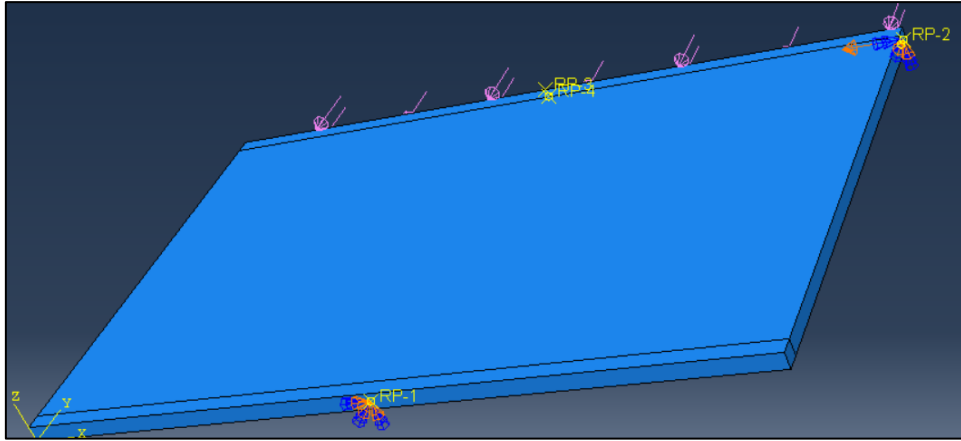
El área total de las aberturas dispuestas en cada una de las configuraciones de los muros, destinadas a la colocación de puertas y ventanas, no sobrepasan el 35% del área total del muro (Tabla 6).

3.3.3. Condiciones de Contorno

Para simular las condiciones de borde del ensayo, se modelaron 2 elementos rígidos con una sección transversal de 110x100 mm ubicados en la parte superior e inferior del muro, restringiendo desplazamientos (U1, U2, U3) y rotaciones (R1, R2, R3) al asumir un empotramiento en la base y liberando el desplazamiento horizontal (U1) para asignar la carga horizontal.

Figura 24

Representación de las condiciones de contorno asignadas al modelo.

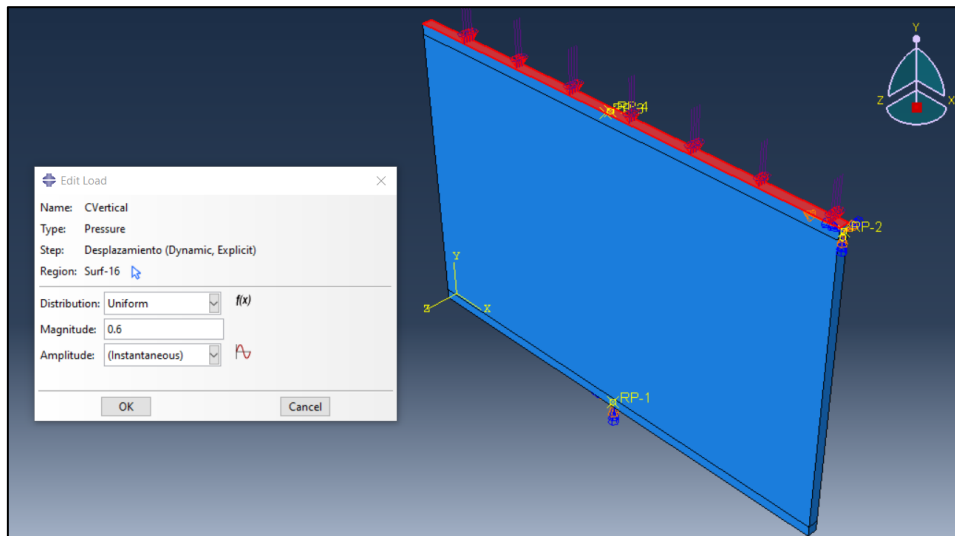


Nota. Elaborado por el autor.

- **Carga Vertical.** Se definió una pre carga de 0.6 MPa al considerar un edificio de 2 plantas.

Figura 25

Esquema de aplicación de pre carga vertical.



Nota. Elaborado por el autor.

- **Carga Horizontal.** Se añade una fuerza horizontal en términos de desplazamiento de 5 mm y los resultados de desplazamiento de cada modelo se comparan respecto a la deriva máxima permitida en la NEC (Normativa Ecuatoriana de Construcción), en el caso de la mampostería es de 0.01. Según la (NEC-SE-VIVIENDA, 2015) indica que la deriva máxima para cualquier piso no excederá

los límites de deriva inelástica establecidos en la Tabla 7, en la cual la deriva máxima se expresa como un porcentaje de la altura de piso.

Tabla 7

Valores de deriva máximos, expresados como fracción de la altura de piso.

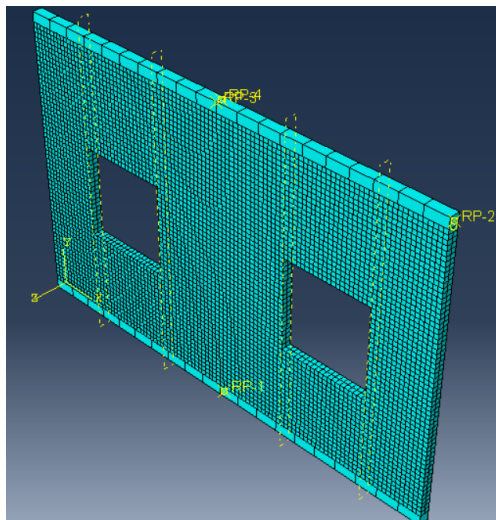
Estructuras de:	Δ_M máxima (sin unidad)
Hormigón armado, estructuras metálicas y de madera	0.02
De mampostería	0.01

Nota. Tomado de *NEC-SE-SD-Peligro Sísmico- Parte 1, pág. 40, 2015.*

- **Mallado.** A fines de lograr mejores resultados se realizaron varias pruebas de mallado hasta llegar al modelo más conveniente para medir los parámetros que interesan en el estudio del problema descrito. Se determinó usar tres tamaños de mallado: malla pequeña de 50mm, malla intermedia de 75 mm y malla grande de 100 mm y analizar la precisión de los resultados.

Figura 26

Prototipo discretizado de muro de mampostería en Abaqus.



Nota. Prototipo M04 discretizado con un tamaño de malla de 50 mm. Elaborado por el autor.

4. CAPÍTULO III. RESULTADOS

4.1. Curva Carga – Desplazamiento

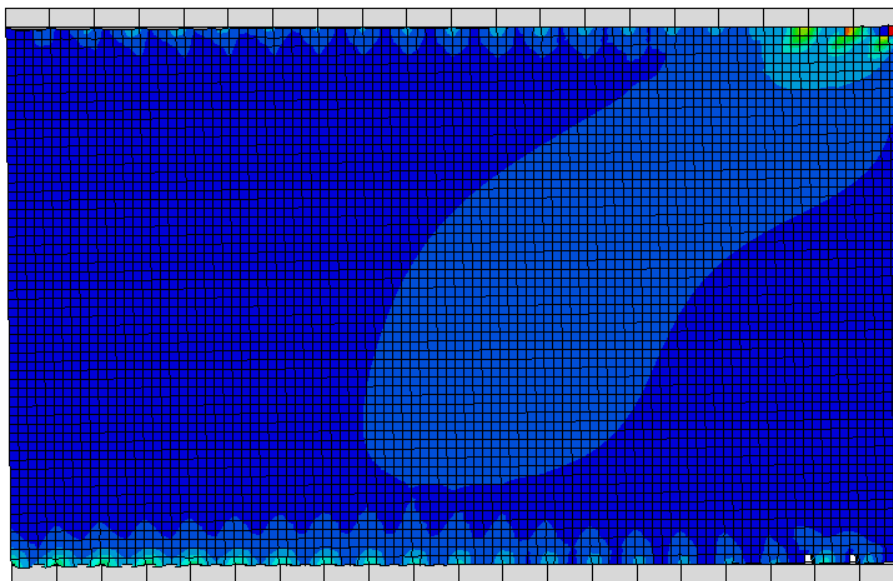
Un método eficaz para determinar la capacidad de una estructura o sus elementos, es mediante el uso de curvas fuerza vs desplazamiento. Se realiza una comparativa de los resultados en base al tamaño del mallado del material homogéneo usando tamaños de 50, 75 y 100 mm. A continuación, se presenta el análisis de los 6 prototipos de muros:

4.1.1. Prototipo M01

El M01 presenta falla por tensión diagonal. Las curvas de capacidad muestran que el muro con tamaños de malla intermedia (75 mm, ver Figura 28) y malla grande (100 mm, ver Figura 29) fallan con una carga horizontal de 224777.6 N y un desplazamiento de 1.58 mm. En cambio, el muro con tamaño pequeño de malla (50 mm, ver Figura 27) disminuye su capacidad de carga a 78103.2 N con un desplazamiento mayor de 2.5 mm.

Figura 27

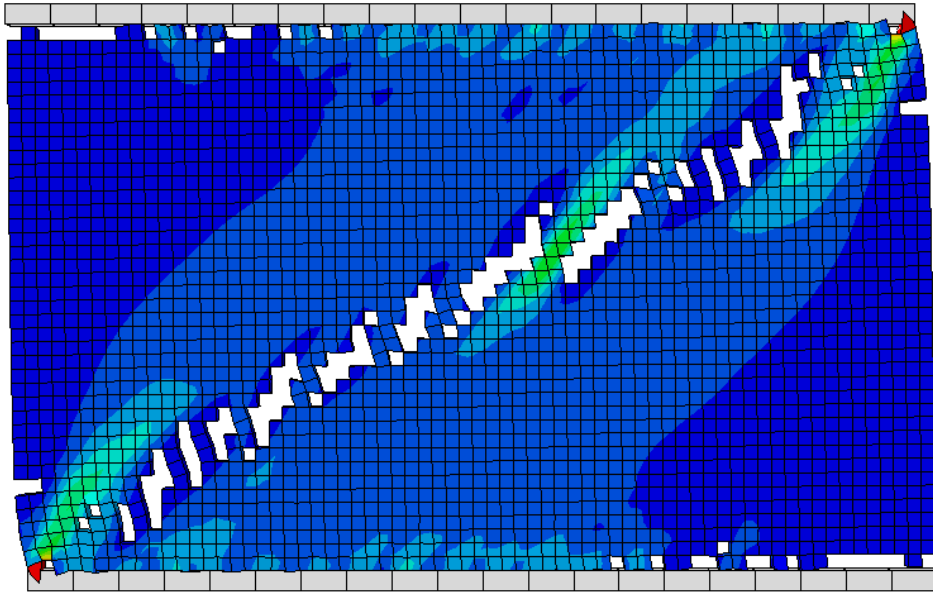
Representación de daño para el prototipo M01 con tamaño de malla de 50 mm.



Nota. Elaborado por el autor.

Figura 28

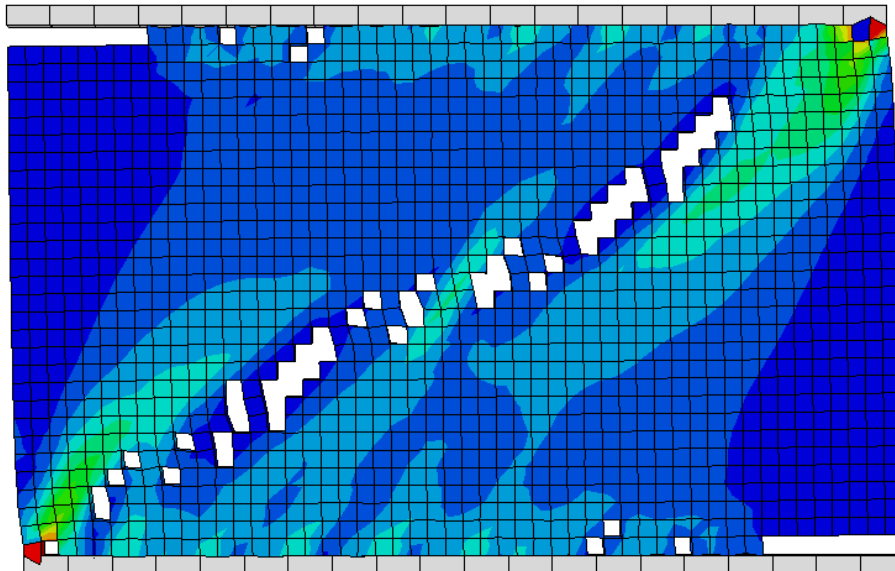
Representación de daño para el prototipo M01 con tamaño de malla de 75 mm.



Nota. Elaborado por el autor.

Figura 29

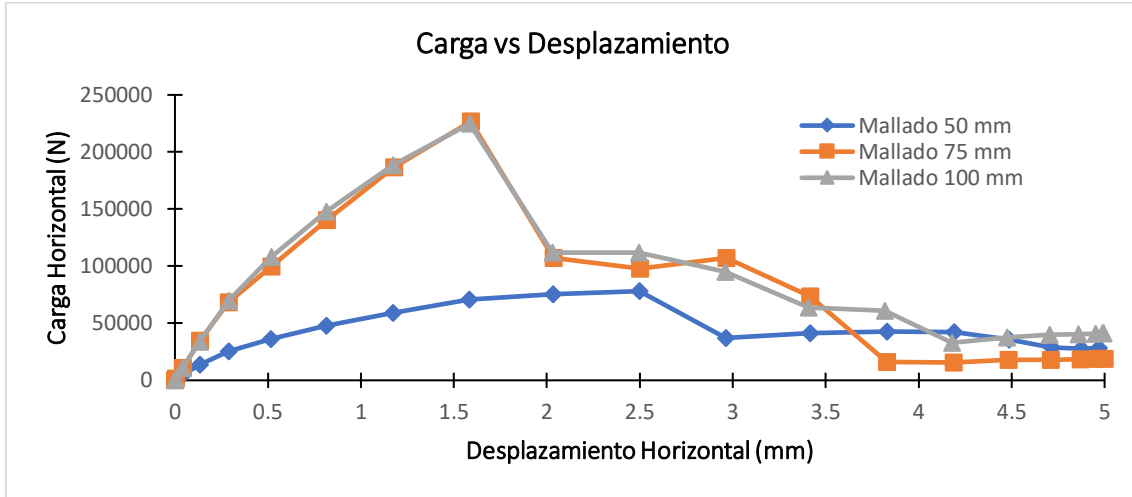
Representación de daño para el prototipo M01 con tamaño de malla de 100 mm.



Nota. Elaborado por el autor.

Figura 30

Curva fuerza – desplazamiento para tamaños de mallado de 50, 75 y 100 mm asignado al prototipo M01.



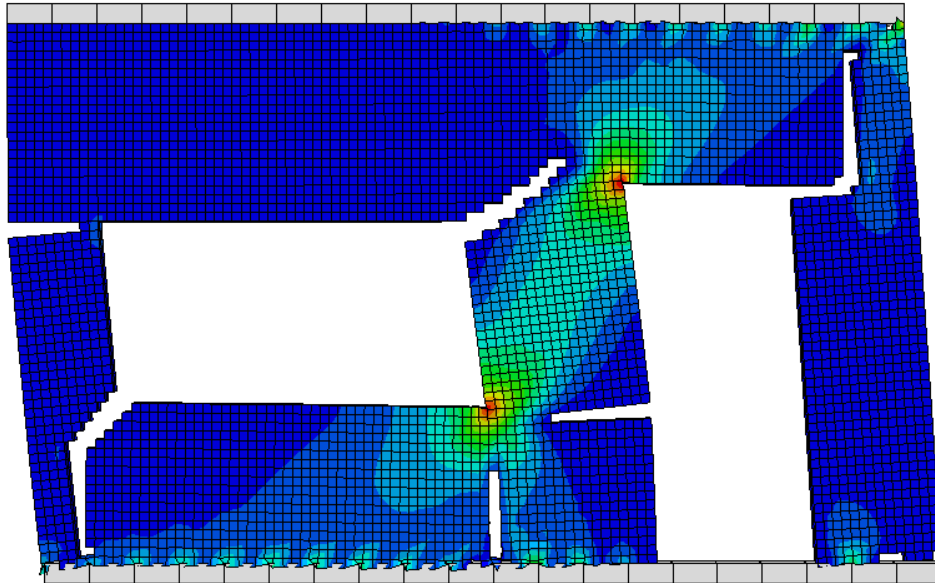
Nota. Elaborado por el autor.

4.1.2. Prototipo M02

El M02 presenta una falla por tensión diagonal y falla por desplazamiento, concentrando los esfuerzos en las esquinas de las aberturas de puerta y venta. Las curvas de capacidad para el muro con tamaños de malla intermedia (75 mm, ver Figura 32) y malla grande (100 mm, ver Figura 33) presentan grietas con una carga de 48879.9 N y un desplazamiento de 2.49 mm, esto frente a la curva para un tamaño de malla pequeña (50 mm, ver Figura 31) con una capacidad de 46882.26 N y 4.19 mm de desplazamiento.

Figura 31

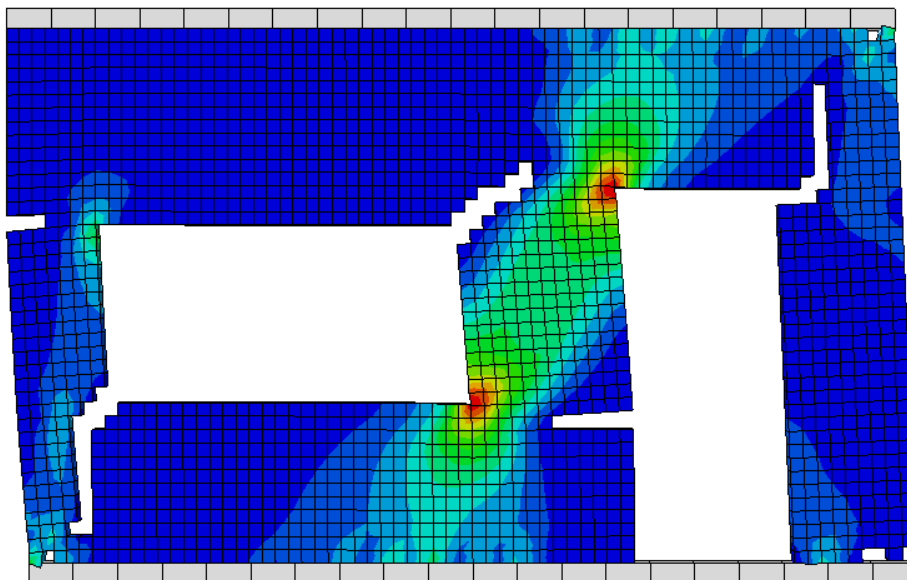
Representación de daño para el prototipo M02 con tamaño de malla de 50 mm.



Nota. Elaborado por el autor.

Figura 32

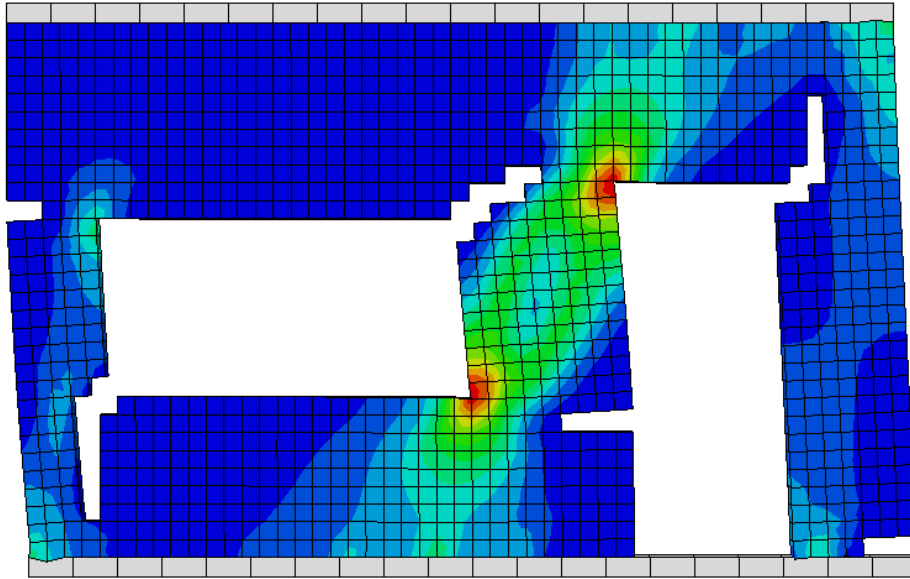
Representación de daño para el prototipo M02 con tamaño de malla de 75 mm.



Nota. Elaborado por el autor.

Figura 33

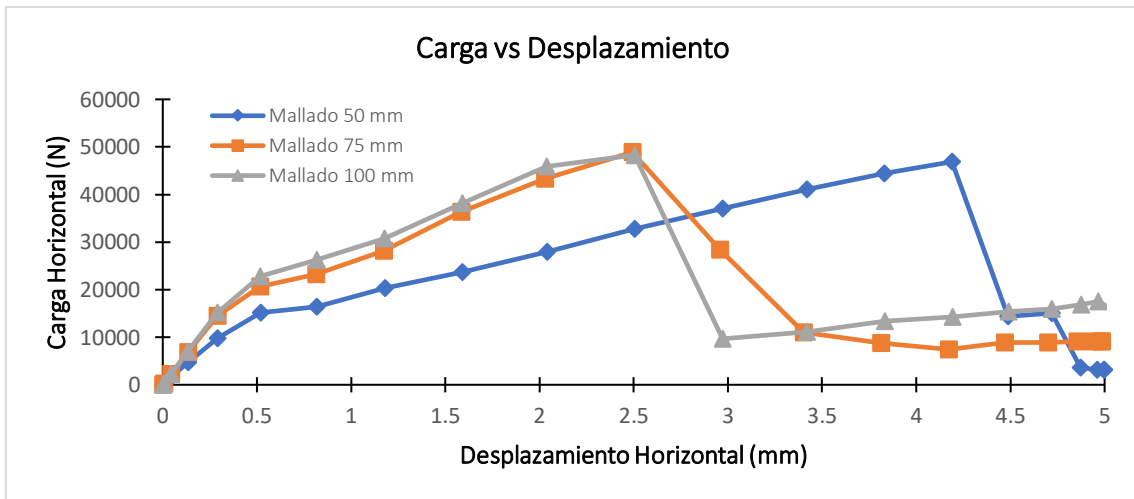
Representación de daño para el prototipo M02 con tamaño de malla de 100 mm.



Nota. Elaborado por el autor.

Figura 34

Curva fuerza – desplazamiento para tamaños de mallado de 50, 75 y 100 mm asignado al prototipo M02.



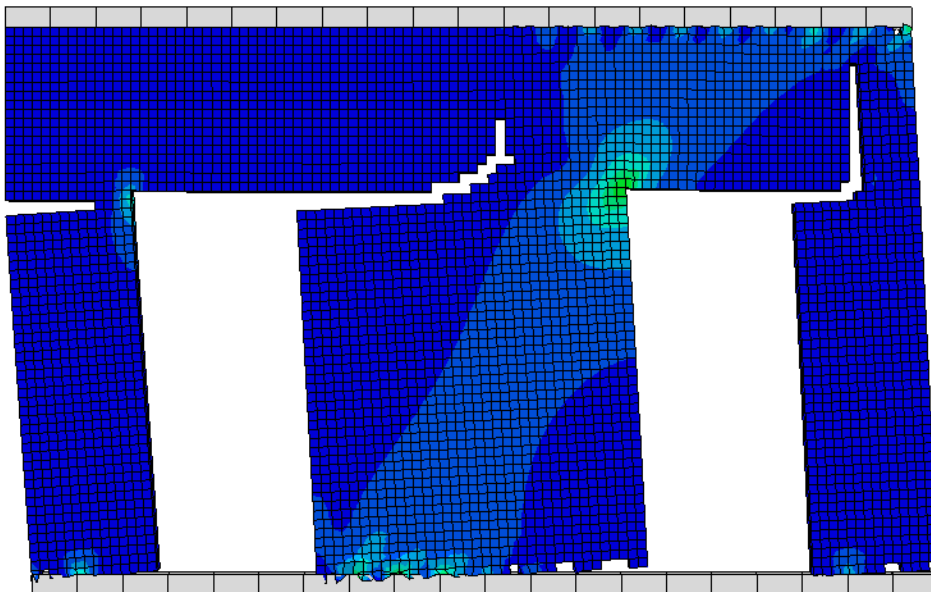
Nota. Elaborado por el autor.

4.1.3. Prototipo M03

El M03 presenta una falla por tensión diagonal y aplastamiento, concentrando los esfuerzos en las esquinas superior de las aberturas de las puertas. Las curvas de capacidad para el muro con tamaños de malla intermedia (75 mm, ver Figura 36) y malla grande (100 mm, ver Figura 37), replican una capacidad similar con una carga de 82155.25 N para un desplazamiento de 2.49 mm. En cambio, la capacidad para un mallado pequeño (50 mm, ver Figura 35) es de 52544.39 N con un desplazamiento de 3.41 mm.

Figura 35

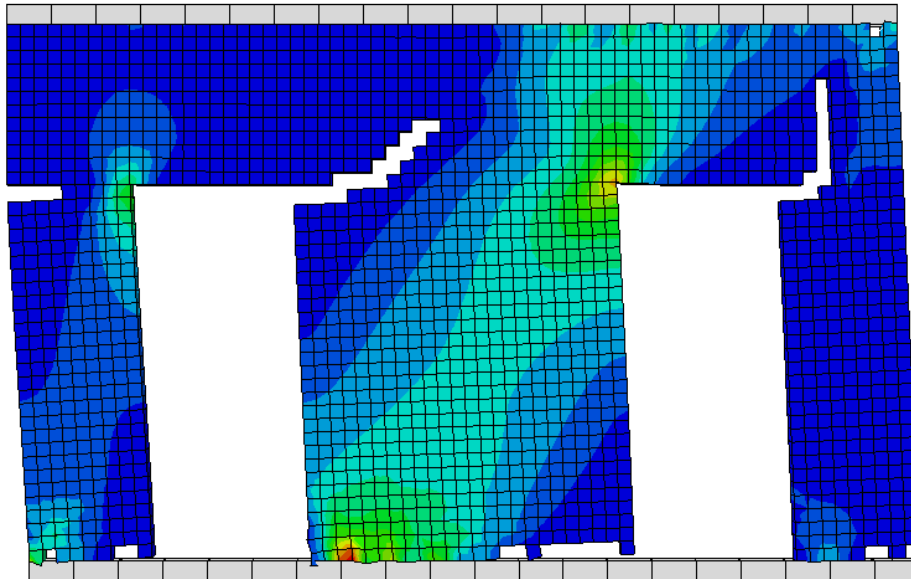
Representación de daño para el prototipo M03 con tamaño de malla de 50 mm.



Nota. Elaborado por el autor.

Figura 36

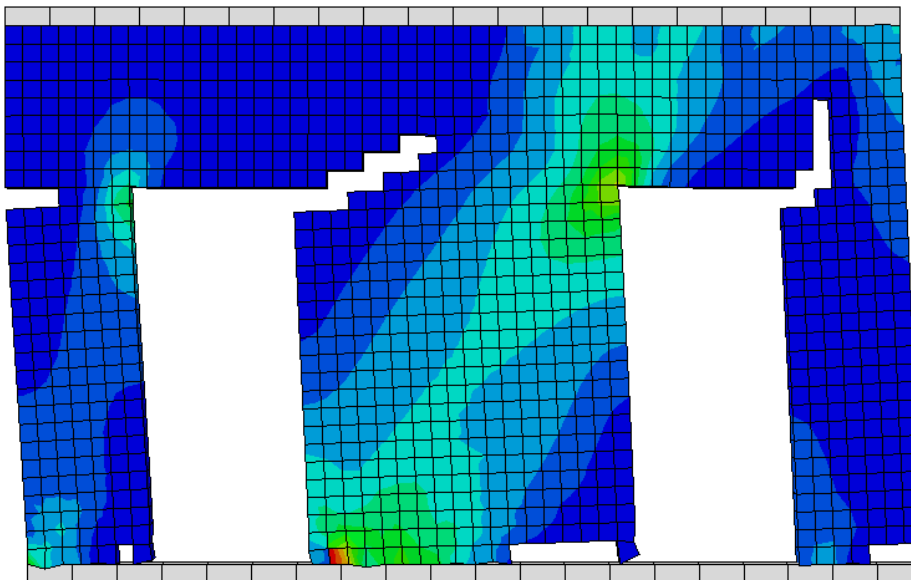
Representación de daño para el prototipo M03 con tamaño de malla de 75 mm.



Nota. Elaborado por el autor.

Figura 37

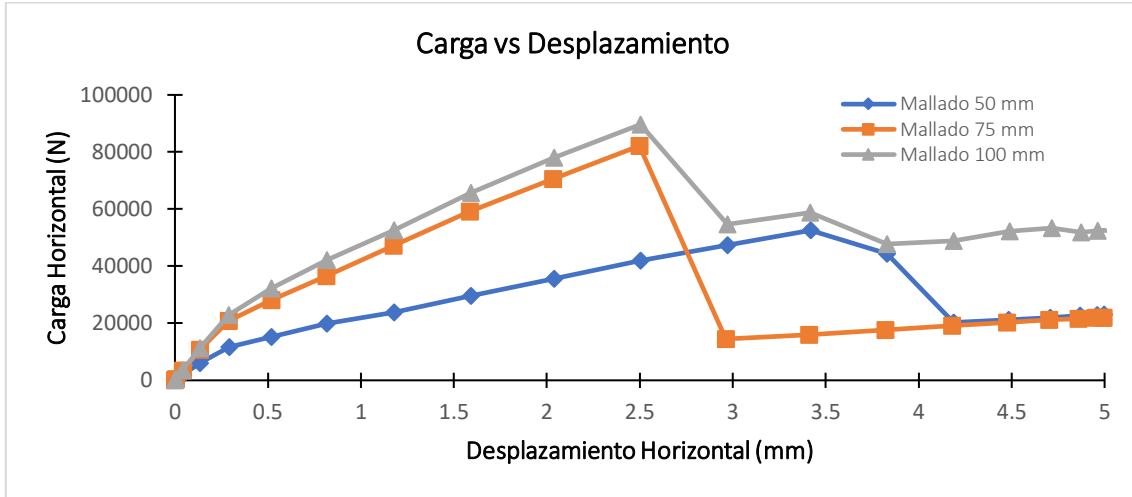
Representación de daño para el prototipo M03 con tamaño de malla de 100 mm.



Nota. Elaborado por el autor.

Figura 38

Curva fuerza – desplazamiento para tamaños de mallado de 50, 75 y 100 mm asignado al prototipo M03.



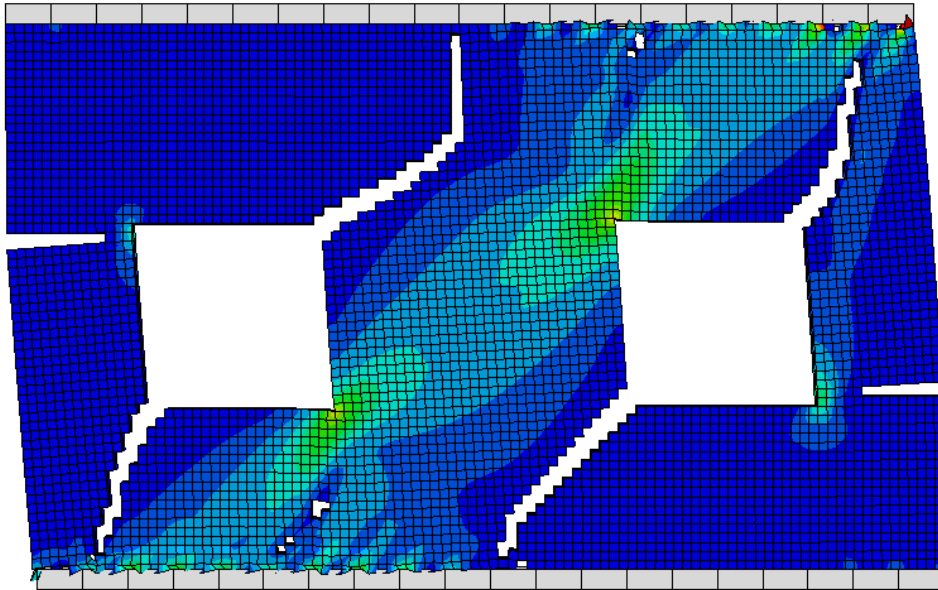
Nota. Elaborado por el autor.

4.1.4. Prototipo M04

El M04 presenta una falla por tensión diagonal y corte. El daño se concentra en las esquinas las esquinas de las ventanas. Las curvas de capacidad indican que los muros con tamaños de malla intermedia (75 mm, ver Figura 40) y malla grande (100 mm, ver Figura 41) resisten una carga de hasta 100259.7 N con un desplazamiento de 1.59 mm, mientras que la curva para el tamaño de malla pequeña (50 mm, ver Figura 39) presenta una capacidad de 70427.39 N y un desplazamiento de 3.42 mm.

Figura 39

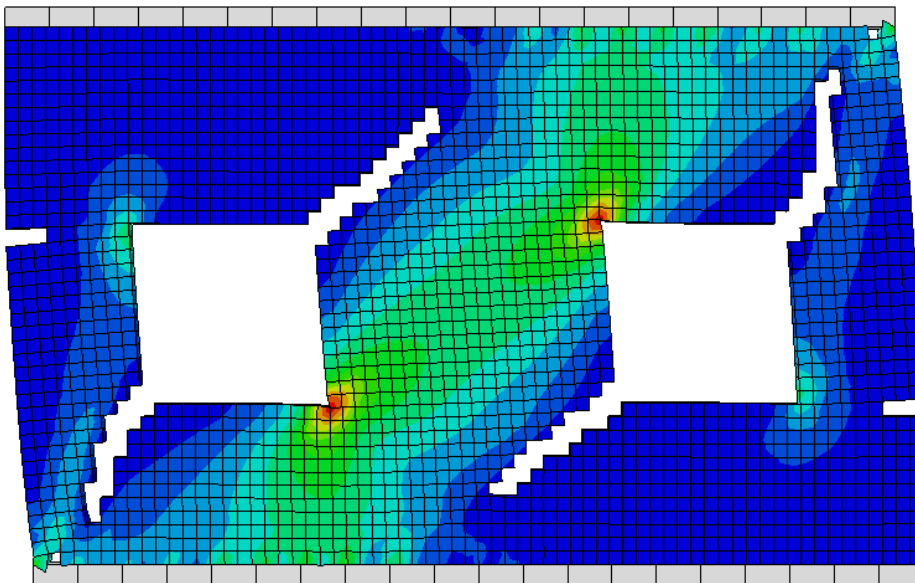
Representación de daño para el prototipo M04 con tamaño de malla de 50 mm.



Nota. Elaborado por el autor.

Figura 40

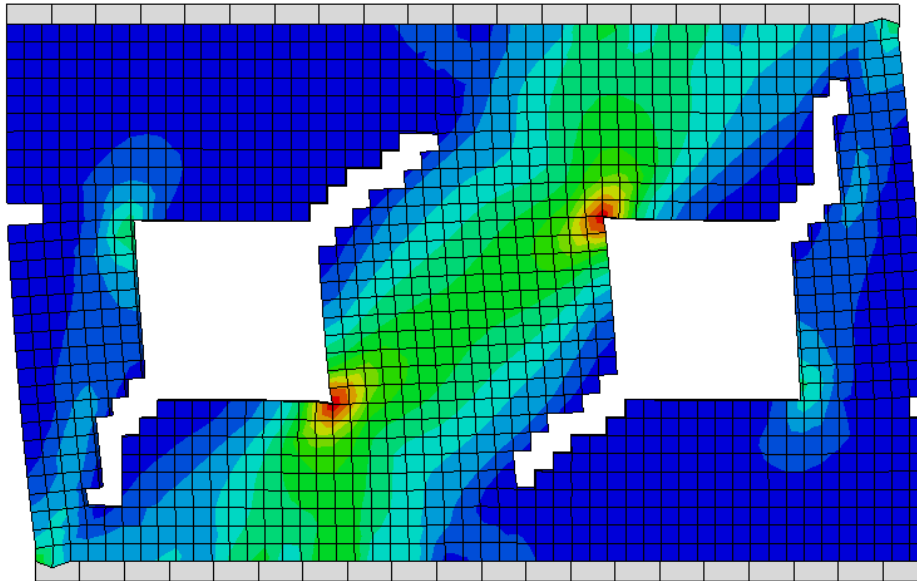
Representación de daño para el prototipo M04 con tamaño de malla de 75 mm.



Nota. Elaborado por el autor.

Figura 41

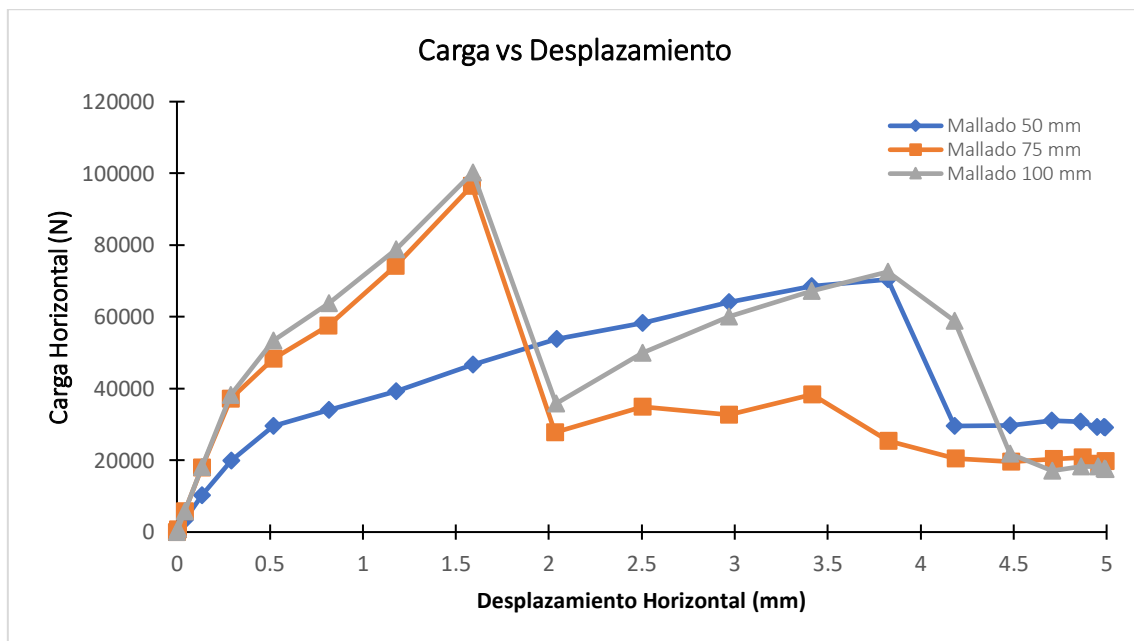
Representación de daño para el prototipo M04 con tamaño de malla de 100 mm.



Nota. Elaborado por el autor.

Figura 42

Curva fuerza – desplazamiento para tamaños de mallado de 50, 75 y 100 mm asignado al prototipo M04.



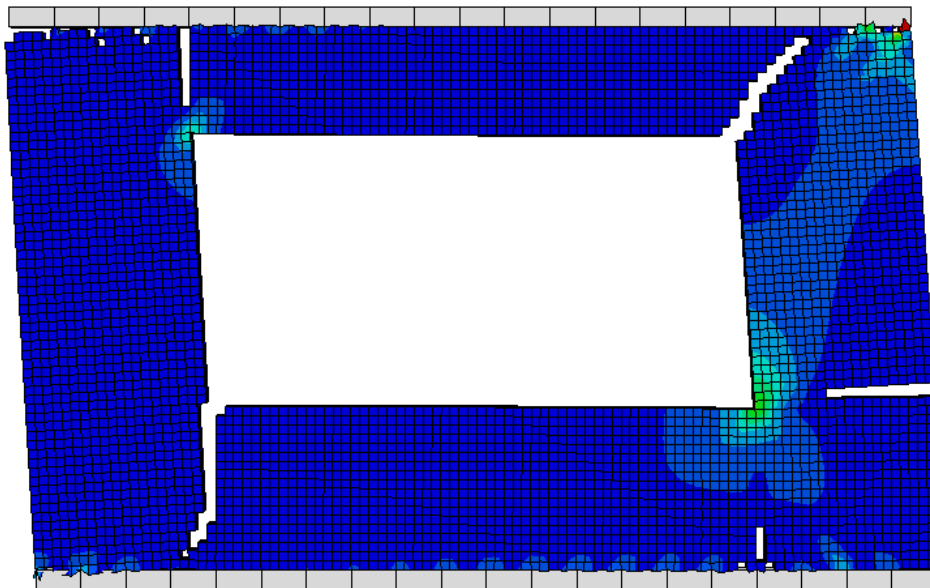
Nota. Elaborado por el autor.

4.1.5. Prototipo M05

El M05 presenta una falla por aplastamiento con grandes esfuerzos en las esquinas de la abertura. La capacidad del muro se reduce, soportando 19884 N de carga y un desplazamiento de 0.51 mm con tamaños de malla intermedia (75 mm, ver Figura 44) y malla grande (100 mm, ver Figura 45). En cambio, el muro con tamaño de mallado pequeño (50 mm, ver Figura 43) resiste 11205 N de carga y un desplazamiento de 0.51 mm.

Figura 43

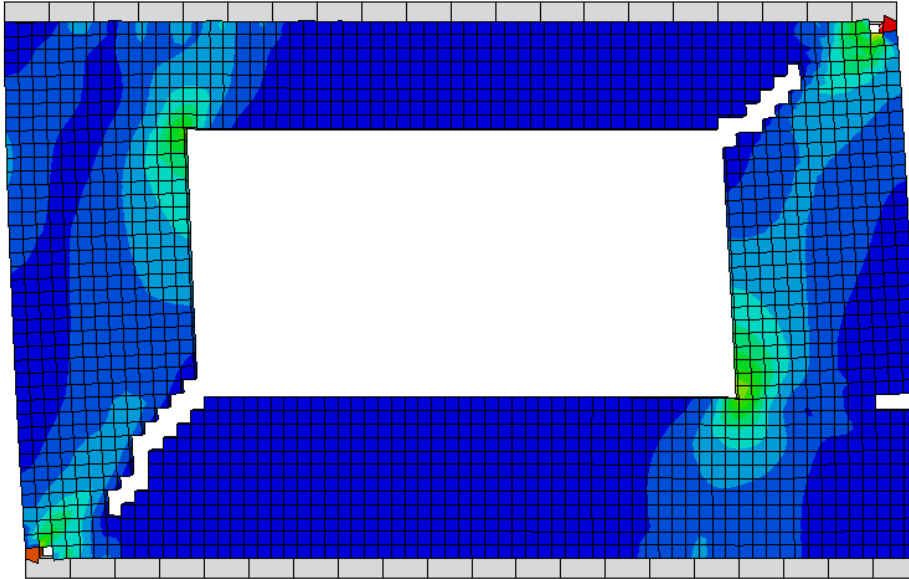
Representación de daño para el prototipo M05 con tamaño de malla de 50 mm.



Nota. Elaborado por el autor.

Figura 44

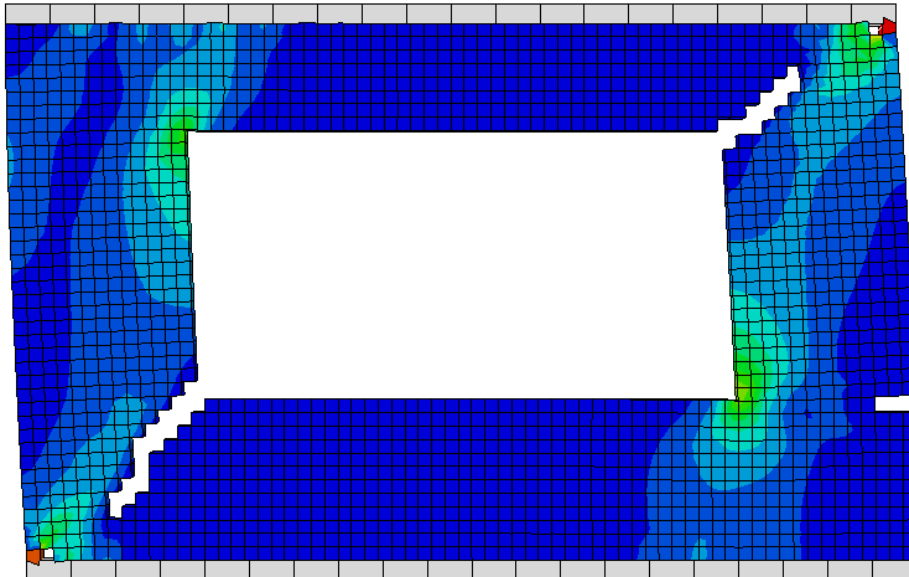
Representación de daño para el prototipo M05 con tamaño de malla de 75 mm.



Nota. Elaborado por el autor.

Figura 45

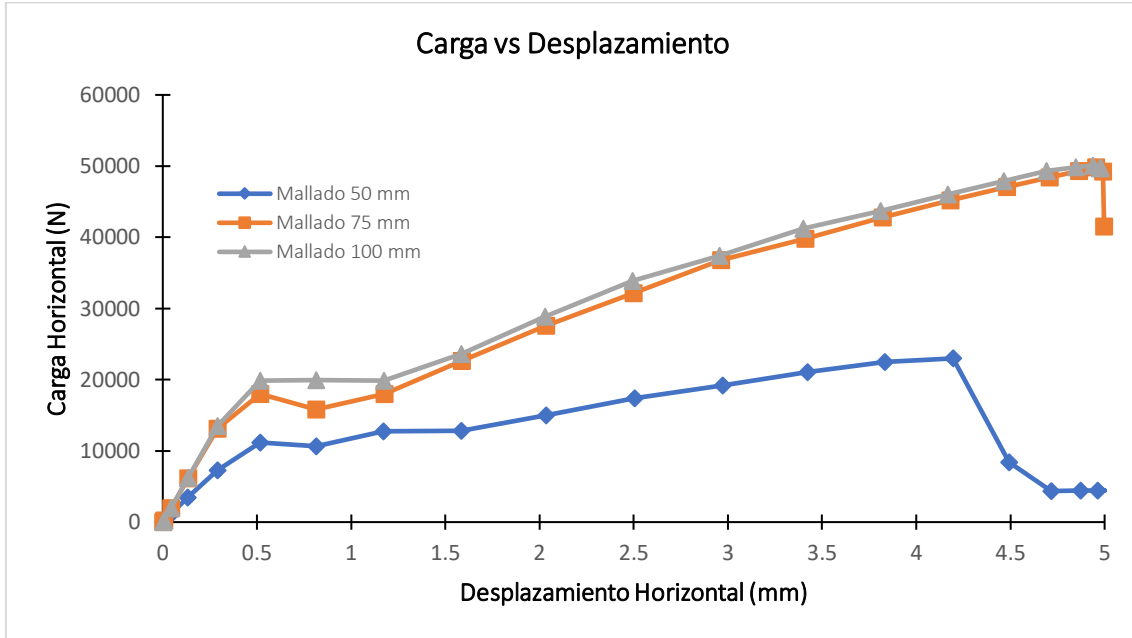
Representación de daño para el prototipo M05 con tamaño de malla de 75 mm



Nota. Elaborado por el autor.

Figura 46

Curva fuerza – desplazamiento para tamaños de mallado de 50, 75 y 100 mm asignado al prototipo M05.



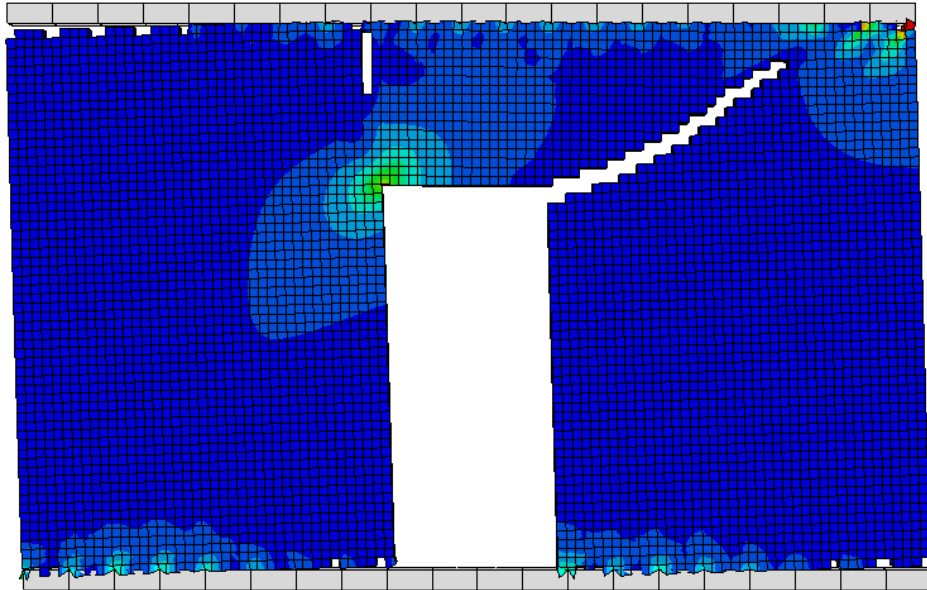
Nota. Elaborado por el autor.

4.1.6. Prototipo M06

El M06 replica la falla por tensión diagonal. Los esfuerzos se concentran en las esquinas superiores de la abertura de la puerta. El muro con tamaños de malla intermedia (75 mm, ver Figura 48) y malla grande (100 mm, ver Figura 49) tiene una capacidad similar de carga de 157327.6 N y 2.49 mm de desplazamiento. El muro con tamaño pequeño de malla (50 mm, ver Figura 47) resiste una carga de 33354 N y un desplazamiento de 2 mm.

Figura 47

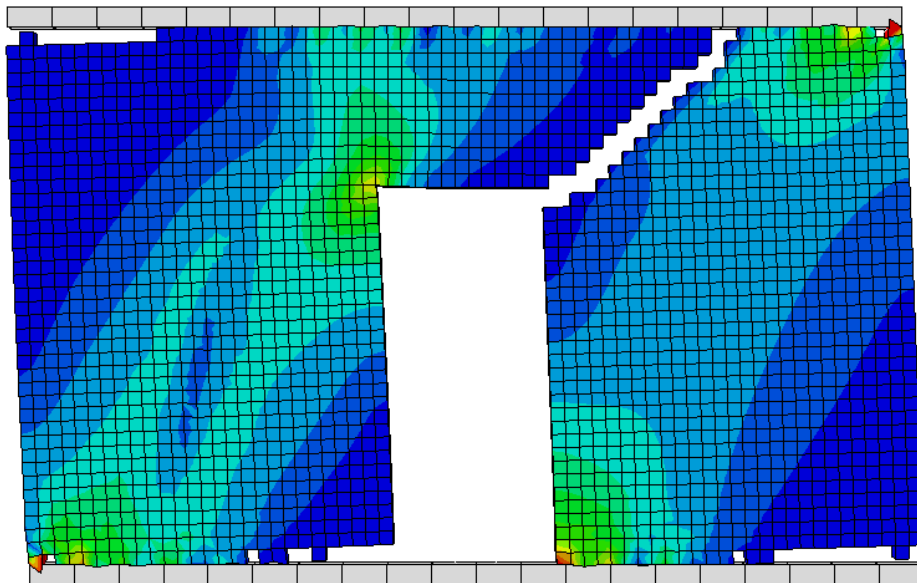
Representación de daño para el prototipo M06 con tamaño de malla de 50 mm.



Nota. Elaborado por el autor.

Figura 48

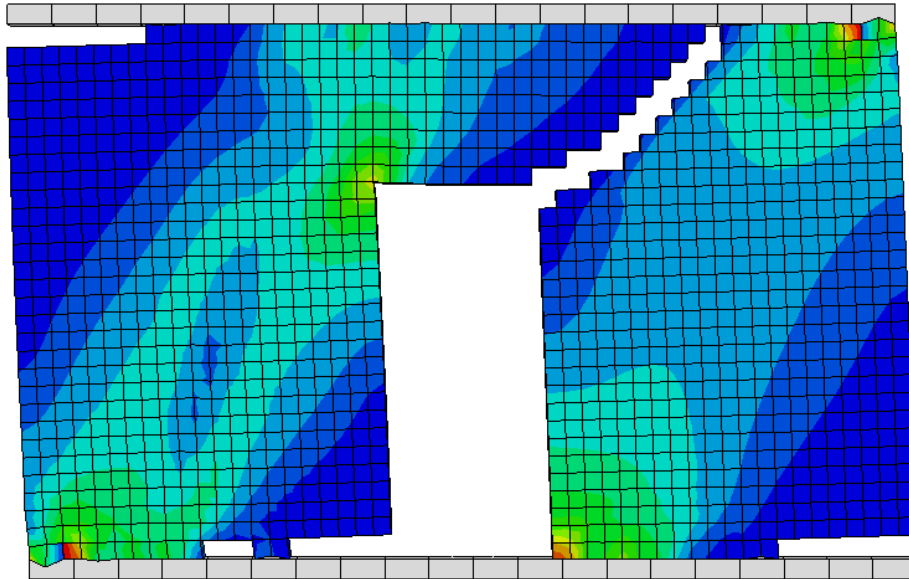
Representación de daño para el prototipo M06 con tamaño de malla de 75 mm.



Nota. Elaborado por el autor.

Figura 27

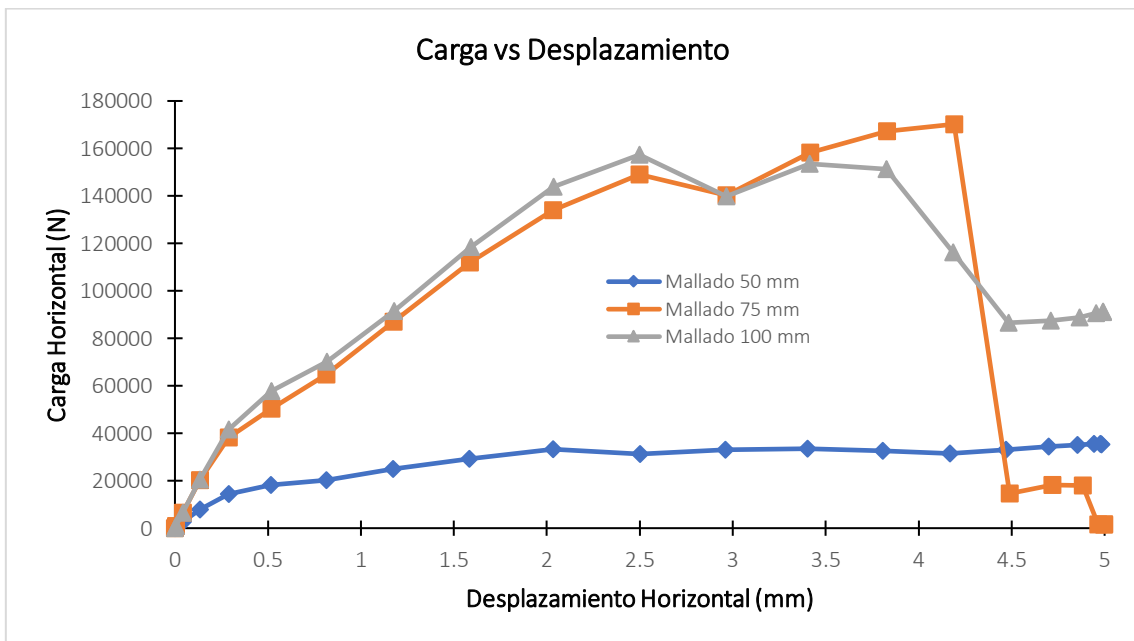
Representación de daño para el prototipo M06 con tamaño de malla de 100 mm.



Nota. Elaborado por el autor.

Figura 49

Curva fuerza – desplazamiento para tamaños de mallado de 50, 75 y 100 mm asignado al prototipo M06.



Nota. Elaborado por el autor.

4.2. Comparativa entre las 6 configuraciones

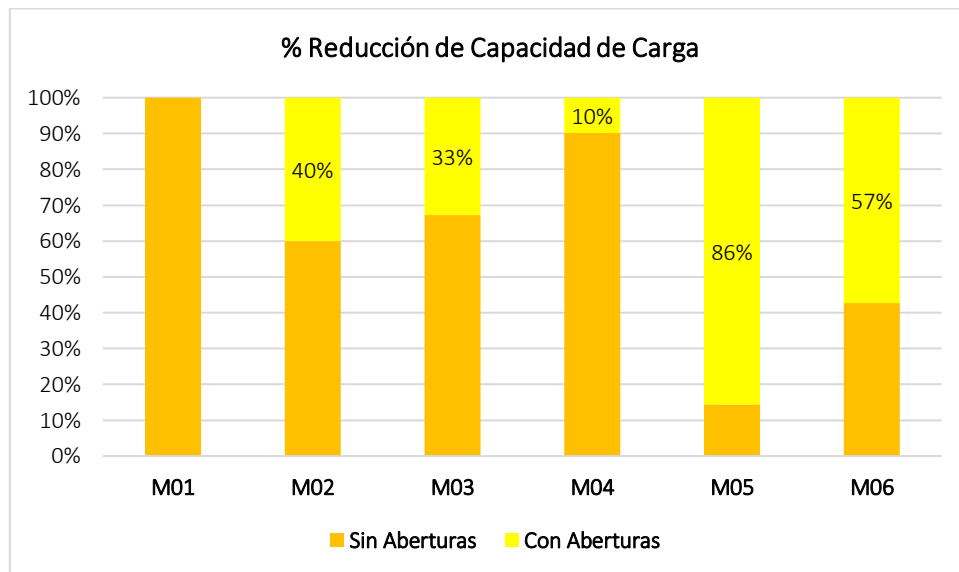
4.2.1. Reducción de Capacidad de Carga por Influencia de las Aberturas

La Figura 50 muestra cómo influye el tamaño de las aberturas y la cantidad de aberturas en la capacidad de resistencia de los muros de mampostería no reforzada. El prototipo M01 (sin aberturas) se toma como referencia para comparar las capacidades de carga entre los prototipos con aberturas.

Mientras el M01 mantiene su capacidad de carga al no presentar aberturas en su fachada, el M05 indica una reducción en su resistencia del 86% debido a la abertura de gran dimensión que se encuentra ubicada en el centro del muro. El M06 presenta una reducción del 57% en su resistencia debido a la abertura de una puerta ubicada en el centro del muro, reduciendo la ductilidad y volviéndolo frágil. El M04 presenta una reducción de solo el 10% en su resistencia al presentar dos aberturas de pequeñas dimensiones (ventanas) en su fachada.

Figura 50

Comparativa de curvas fuerza – desplazamiento entre los 6 prototipos de paredes.



Nota. Elaborado por el autor.

4.2.2. Aumento de Capacidad de Carga por Influencia en el Tamaño del Mallado

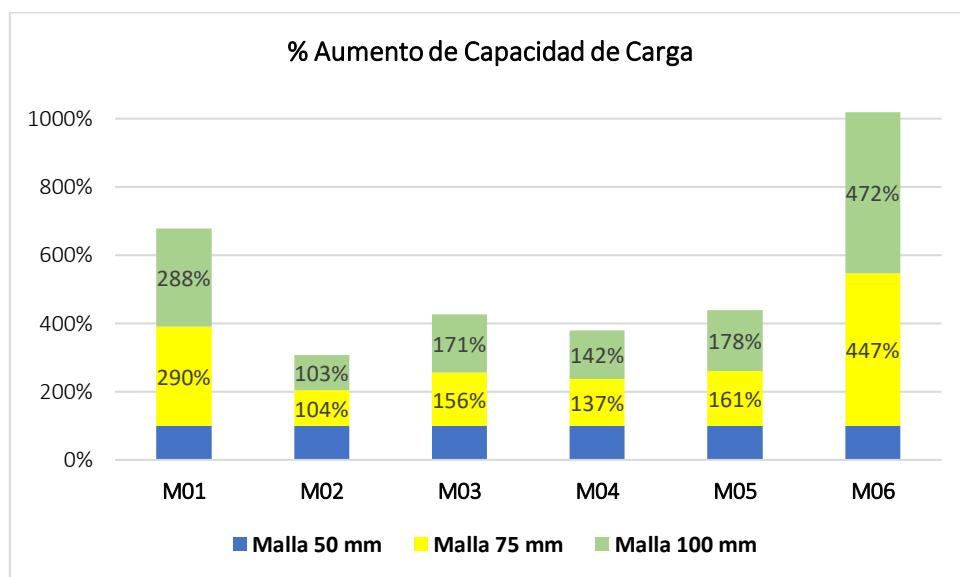
La Figura 51 muestra el porcentaje en el aumento de la resistencia del muro, al aumentar el tamaño del mallado. Se realiza esta comparativa tomando en cuenta la precisión de los resultados dentro del análisis.

Se determina que las variaciones en los porcentajes de aumento son mayores en los prototipos M06 Y M01. El prototipo M06 con tamaños de malla intermedio (75 mm) y malla grande (100 mm), presenta un aumento en su capacidad de resistencia de aproximadamente 5 veces más en comparación con el prototipo con mallado de 50 mm. De igual manera, el prototipo M01 con tamaños de malla intermedio (75 mm) y grande (100 mm), muestra una capacidad de resistencia de aproximadamente 3 veces más comparado con el prototipo con mallado de 50 mm.

La diferencia en los aumentos se debe a que los prototipos con tamaños grandes de mallado no capturan el daño en cada punto de la estructura, desarrollando mayor resistencia hasta que los elementos se dañen por completo y se produzca la falla.

Figura 51

Comparativa de curvas fuerza – desplazamiento entre los 6 prototipos de paredes.



Nota. Elaborado por el autor.

5. CONCLUSIONES

- Bajo las recomendaciones de modelación que nos presenta la recopilación de información respecto al modelado de muros de mampostería sin reforzar, se planteó asignar una carga horizontal en términos desplazamiento de 5 y 10 mm en cada prototipo. Tomando en cuenta dicha condición, se aprecia la aparición de daño en la estructura al usar un desplazamiento de 5 mm, frente a la deriva máxima admitida de 30 mm establecido por la NEC para estructuras de mampostería. Los resultados se validan en base a los ensayos experimentales expuestos en la literatura, considerando la influencia de las aberturas en el desempeño sísmico de los muros mampostería sin reforzar.
- Los modelos de muros de mampostería con aberturas a los que se les asignó tamaños de malla intermedio (75 mm) y grande (100 mm), no reflejan correctamente el tipo de falla por tensión diagonal que presenta el muro base sin aberturas (M01). Por tal motivo, se determina que el tamaño pequeño de malla (50 mm) es el más óptimo para modelar los muros de mampostería. Lo que permite validar este tipo de falla en base a la revisión bibliográfica analizada.
- Al comparar las curvas fuerza-desplazamiento de todos los prototipos de muros evaluados, se concluye que los prototipos M05 y M06 son las que presentan menor capacidad de carga. A pesar de que los prototipos cumplen con los valores de disposición de aberturas determinadas por la NEC, el problema se puede relacionar a dos factores: ubicación y dimensión de la abertura. Al ubicar espacios huecos en el centro de gravedad del muro y añadirle dimensiones exageradamente grandes, dan como resultado que el muro se vuelva frágil; lo que compromete al buen desempeño de la estructura y falle rápidamente frente a las condiciones impuestas de carga en base a la bibliografía consultada.

- Las curvas fuerza-desplazamiento permiten identificar cómo influye el tamaño del mallado en la capacidad del muro, esto al realizar un análisis con la técnica de macro modelación. La base bibliográfica demuestra que existen problemas en la convergencia de las soluciones numéricas con tamaños de malla intermedios (75 mm) y grandes (100 mm). Si contamos con tamaños pequeños de mallado, los modelos presentan una mayor sensibilidad en la precisión de los resultados para determinar los tipos de falla siendo lo opuesto a usar tamaños grandes en el mallado.
- La presente investigación logra replicar los resultados expuestos en la bibliografía base. La macro modelación provee de resultados muy aproximados, en un tiempo reducido, que resultan ser de mucha utilidad para el estudio y rehabilitación de estructuras de mampostería y estructuras en general. El alcance del análisis estructural mediante elementos finitos determinará si se necesita una micro modelación detallada o una macro modelación que represente el comportamiento global de la estructura.

6. Referencias

- ABAQUS. (2010). ABAQUS User's Manual. *Dassault Systemes*.
- Anecchiarico, M., Portioli, F., & Landolfo, R. (2010). *Micro and macro-finite element modeling of brick masonry panels subject to lateral panels*. University of Naples.
- Calderón, J., & Jiménez, J. (2021). *Modelling and Evaluation of the Seismic Capacity of Typical Brick URM Buildings of the Historical Center of Cuenca-Ecuador*. Cuenca: Material Science and Engineering.
- De Villiers, W., & Boshoff, W. (2021). *Finite Element Analysis of Single-Storey Unreinforced Alternative Masonry Walls*. SAGE.
- Gonzalez, R., Avila, J., Pujades, L., & Barbat, A. (2017). *Non-linear static procedures applied to high-rise residential URM buildings*. Barcelona: UPC Barcelona Tech.
- Grant, D., Dennis, J., & Sturt, R. (2020). *Explicit modelling of collapse for Dutch unreinforced masonry building typology fragility functions*. Bulletin of Earthquake Engineering.
- Griffith, M., Lam, N., & Wilson, J. (2004). *Experimental Investigation of Unreinforced Brick Masonry Walls In Flexure*. Journal of Structural Engineering .
- Hossein, A., & Saeed, M. (2016). *Experimental and Numerical Study on Seismic Behavior of An Infilled Masonry Wall Compared to An Arched Masonry Wall*. Structures.
- Kent, C., & Park, R. (1971). Flexural Members With Confined Concrete. *Journal of the Structural Division*.
- Kowalewski, L., & Gajewski, M. (2015). *Determination of failure modes in brick walls using cohesive elements approach*. Procedia Engineering.
- Llano, A. (2015). Diseño estructural de una edificación de seis pisos, mediante un análisis lineal controlado por derivas inelásticas y una comprobación con un análisis estático no lineal, aplicando la técnica Pushover. *Quito: Escuela Politécnica Nacional*, 67-74.
- Lubliner, J., & Oliver, J. (1989). *A Plastic Damage Model for Concrete*. Pergamon Press.
- Meillyta. (2012). *Finite Element Modelling of Unreinforced Masonry (URM) Wall with Openings: Studies in Australia*.
- NEC. (2015). *Peligro Sísmico Diseño Sismo Resistente*. MIDUVI.
- NEC-SE-VIVIENDA. (2015). *Vivienda de hasta dos pisos con luces de hasta 5 m*. MIDUVI.
- Parisi, F., & Augenti, N. (2012). Seismic capacity of irregular unreinforced masonry walls with openings. *EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS*.

- Pereira, J., & Lourenço, P. (2017). *Proyecto de Estabilización Sismorresistente*. The Getty Conservation Institute.
- Rindwan, M., Yoshitake, I., & Nassif, A. (2017). *Proposal of Design Formulae for Equivalent Elasticity of Masonry Structures Made with Bricks of Low Modulus*. Hindawi.
- Rots, J., Lourenço, P., & Blaauwendraad, J. (1998). *Continuum Model For Masonry: Parameter Stimation and Validation*. Journal of Structural Engineering.
- Rots, Y., & Blaauwendraad, J. (1995). *Two approaches for the analysis of masonry structures: micro and macro-modeling*. HERON.
- Vargas, J. (2010). *Cálculo de Estructuras Utilizando Elementos Finitos con Cómputo en Paralelo*. Guanajuato: CIMAT.

José Michael Mendieta Yunga portador(a) de la cédula de ciudadanía N.º **0706568425**. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del proyecto de titulación **“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE MUROS DE MAMPOSTERÍA SIN REFORZAR MEDIANTE MEF: ADAPTADO A NORMATIVA Y CONDICIONES LOCALES”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos y no comerciales. Autorizo además a la Universidad Católica de Cuenca, para que realice la publicación de éste proyecto de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 17 de marzo de 2023



F:

José Michael Mendieta Yunga

C.I. 0706568425