



## Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

**Aplicación de Elementos de Volumen Representativos (RVE) en el análisis estructural de fachadas de adobe influenciadas por variaciones paramétricas**

Trabajo de titulación previo a la  
obtención del título de Ingeniero  
Civil

**Autores:**

Jordy Emanuel Cedillo Mendoza

Alvaro Andres Mejia Paredes

**Director:**

Ángel Julver Pino Velázquez

ORCID:  0000-0003-3614-1465

Tutor:

Xavier Ricardo Cárdenas Haro

ORCID:  0000-0001-5063-7366

**Cuenca, Ecuador**

2024-09-18

## Resumen

El presente trabajo de titulación se enfoca en la variación de las propiedades mecánicas homogenizadas de los RVE para el modelamiento de las fachadas de adobe. El estudio se centra en cómo las características paramétricas, como el aparejo de bloques de adobe y mortero, así como el espesor de los muros, influyen en su comportamiento estructural. Para realizar esta investigación, se realizaron modelos en elementos finitos en el software de STKO de aparejos de bloques de adobe y mortero, obteniendo las propiedades mecánicas esenciales. Estas propiedades fueron utilizadas para modelar el comportamiento estructural de dos fachadas típicas de adobe: una de un nivel y otra de dos niveles, utilizando el método de homogenización computacional. El trabajo se estructura en cinco capítulos. Inicialmente se subraya la importancia de comprender y mejorar la resistencia estructural de las edificaciones de adobe. Posteriormente se ofrece un contexto histórico de las construcciones de adobe en Cuenca y se describe los conceptos relacionados a la técnica de homogeneización computacional. Más adelante, se detalla la micro modelación de Elementos de Volumen Representativo (RVE) para los materiales de las fachadas, definiendo los parámetros de variación y analizando los resultados obtenidos. Inmediatamente se presenta la implementación de las propiedades mecánicas obtenidas en los macro modelos de las fachadas, realizando análisis modales y no lineales pushover para evaluar el comportamiento estructural bajo cargas sísmicas. Finalmente se presentan los resultados sobre cómo los parámetros de variación tienen impacto significativo en la respuesta estructural de las fachadas de adobe y en el potencial daño presentado para las fachadas analizadas. Este estudio proporciona una base crucial para el diseño y rehabilitación de edificaciones históricas, siendo una herramienta que permita optimizar su resistencia estructural y su desempeño ante eventos sísmicos.

*Palabras clave del autor:* adobe, análisis multiescala, homogenización computacional, elementos finitos.



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

The present degree work focuses on the variation of the homogenized mechanical properties of the RVE for the modeling of adobe facades. This study focuses on how parametric characteristics, such as the arrangement of adobe blocks and mortar, as well as the thickness of the walls, influence their structural behavior. To carry out this research, finite element models of adobe block and mortar arrangements were modeled in STKO software, obtaining the essential mechanical properties. These properties were used to model the structural behavior of two typical adobe facades: one of one level and the other of two levels, using the computational homogenization method. The paper is structured in five chapters. Initially, the importance of understanding and improving the structural strength of adobe buildings is emphasized. Subsequently, a historical context of adobe constructions in Cuenca is given and the concepts related to the computational homogenization technique are described. Later, the micro modeling of Representative Volume Elements (RVE) for the facade materials is detailed, defining the variation parameters, and analyzing the results obtained. Immediately, the implementation of the mechanical properties obtained in the macro models of the facades is presented, performing modal analysis and pushover nonlinear analyses to evaluate the structural behavior under seismic loads. Finally, results are presented on how the variation parameters have significant impact on the structural response of the adobe façades and on the potential damage presented for the analyzed façades. This study provides a crucial basis for the design and rehabilitation of historic buildings, being a tool to optimize their structural resistance and performance under seismic events.

*Autor Keywords: adobe, multiscale analysis, computational homogenization, finite elements*



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

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Capítulo 1. Introducción y objetivos.....                                                       | 11 |
| 1.1. Antecedentes .....                                                                            | 11 |
| 1.2. Planteamiento del problema .....                                                              | 13 |
| 1.3. Objetivo general .....                                                                        | 13 |
| 1.4. Objetivos específicos.....                                                                    | 14 |
| 2. Capítulo 2: Estado del arte.....                                                                | 15 |
| 2.1. Introducción.....                                                                             | 15 |
| 2.2. Historia e importancia de las edificaciones de adobe de Cuenca .....                          | 15 |
| 2.3. Propiedades físicas y geométricas de los materiales utilizados en las fachadas de Cuenca..... | 16 |
| 2.4. Técnicas multi-escala de homogeneización computacional.....                                   | 17 |
| 2.5. Teoría de Modelado.....                                                                       | 18 |
| 2.5.1. Modelo basado en daño.....                                                                  | 18 |
| 2.5.2. Criterio de falla.....                                                                      | 19 |
| 2.5.3. Leyes evolutivas para variables de daño .....                                               | 22 |
| 2.5.4. Comportamiento a corte.....                                                                 | 23 |
| 2.5.5. Homogeneización .....                                                                       | 24 |
| 2.5.6. Macro modelo .....                                                                          | 25 |
| 2.6. Herramientas de modelación disponibles .....                                                  | 26 |
| 2.7. Conclusiones.....                                                                             | 26 |
| 3. Capítulo 3: Modelación de elementos de volumen representativo.....                              | 28 |
| 3.1. Introducción.....                                                                             | 28 |
| 3.2. Determinación de los parámetros de variación de los modelos .....                             | 28 |
| 3.3. Generación de los modelos RVE de las combinaciones propuestas para cada parámetro.....        | 29 |
| 3.3.1. Modelado de los Elementos de Volumen Representativo (RVE's) .....                           | 29 |
| 3.3.2. Definición de las propiedades físicas del RVE. ....                                         | 32 |
| 3.3.3. Definición de las condiciones a las cuales estarán sometidos los RVE's. ....                | 35 |
| 3.4. Recopilación y análisis de los resultados obtenidos de cada RVE.....                          | 38 |
| 3.4.1. Resultados de RVE's para muros de 400 a 460 mm de espesor .....                             | 40 |
| 3.4.2. Resultados de RVE's para muros de 820 a 860 mm de espesor .....                             | 52 |
| 3.5. Conclusiones.....                                                                             | 63 |

|      |                                                                                                                                  |    |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.   | Capítulo 4: Implementación de las propiedades obtenidas dentro de la fachada modelo                                              | 67 |
| 4.1. | Introducción.....                                                                                                                | 67 |
| 4.2. | Modelamiento de la fachada a partir de las propiedades mecánicas obtenidas de los RVE's e incorporación de cargas actuantes..... | 71 |
| 4.3. | Análisis Modal de los casos de estudio.....                                                                                      | 75 |
| 4.4. | Análisis no lineal pushover de los casos de estudio .....                                                                        | 78 |
| 4.5. | Recopilación y análisis de los resultados obtenidos de cada fachada de estudio                                                   | 81 |
| 4.6. | Conclusiones.....                                                                                                                | 86 |
| 5.   | Capítulo 5: Conclusiones, recomendaciones y líneas de investigación .....                                                        | 87 |
| 5.1. | Conclusiones.....                                                                                                                | 87 |
| 5.2. | Recomendaciones.....                                                                                                             | 87 |
| 5.3. | Líneas de investigación futura .....                                                                                             | 88 |

## Índice de figuras

|                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 Superficies propuestas de falla a compresión de modelos continuos. Influencia del parámetro $k_1$ (Petracca et al., 2017) .....                                | 20 |
| Figura 2 Superficies iniciales de daño (Esfuerzos en plano 2D) (Petracca et al., 2017) .....                                                                            | 21 |
| Figura 3 Superficies iniciales de daño (3D). Superficie inactiva representada de forma sombreada (Petracca et al., 2017) .....                                          | 21 |
| Figura 4 (a) Tracción Uniaxial (b) Compresión Uniaxial (Petracca et al., 2017) .....                                                                                    | 23 |
| Figura 5 Leyes de evolución para los modelos de daño (a) isotrópico y (b) ortotrópico ( $d'/d$ ) en los cuadrantes de tensión/ compresión (Petracca et al., 2017) ..... | 24 |
| Figura 6 Definición de ejes globales de modelación .....                                                                                                                | 30 |
| Figura 7 Discretización del aparejo "Tizón" .....                                                                                                                       | 30 |
| Figura 8 Curva de ajuste para ensayos de módulos de elasticidad (Quiroz et al., 2019) .....                                                                             | 33 |
| Figura 9 Curvas compresión vs. deformación aparejo Panderete (460 mm) .....                                                                                             | 40 |
| Figura 10 Curvas tracción vs. deformación aparejo Panderete (460 mm) .....                                                                                              | 40 |
| Figura 11 Curvas cortante vs. desplazamiento lateral aparejo Panderete (460 mm) .....                                                                                   | 41 |
| Figura 12 Curvas compresión vs. deformación aparejo Soga (420 mm) .....                                                                                                 | 44 |
| Figura 13 Curvas tracción vs. deformación aparejo Soga (420 mm) .....                                                                                                   | 44 |
| Figura 14 Curvas cortante vs. desplazamiento lateral aparejo Soga (420 mm) .....                                                                                        | 45 |
| Figura 15 Curvas compresión vs. deformación aparejo Tizón (400 mm) .....                                                                                                | 48 |
| Figura 16 Curvas tracción vs. deformación aparejo Tizón (400 mm) .....                                                                                                  | 48 |
| Figura 17 Curvas cortante vs. desplazamiento lateral aparejo Tizón (400 mm) .....                                                                                       | 49 |
| Figura 18 Curvas compresión vs. deformación aparejo Panderete (820 mm) .....                                                                                            | 52 |
| Figura 19 Curvas tracción vs. deformación aparejo Panderete (820 mm) .....                                                                                              | 52 |
| Figura 20 Curvas cortante vs. desplazamiento lateral aparejo Panderete (820 mm) .....                                                                                   | 53 |
| Figura 21 Curvas compresión vs. deformación aparejo Soga (860 mm) .....                                                                                                 | 56 |
| Figura 22 Curvas tracción vs. deformación aparejo Soga (860 mm) .....                                                                                                   | 56 |
| Figura 23 Curvas cortante vs. desplazamiento lateral aparejo Soga (860 mm) .....                                                                                        | 57 |
| Figura 24 Curvas compresión vs. deformación aparejo Tizón (820 mm) .....                                                                                                | 60 |
| Figura 25 Curvas tracción vs. deformación aparejo Tizón (820 mm) .....                                                                                                  | 60 |
| Figura 26 Curvas cortante vs. desplazamiento lateral aparejo Tizón (820 mm) .....                                                                                       | 61 |
| Figura 27 Dimensiones de la fachada de estudio de una planta D8 .....                                                                                                   | 67 |
| Figura 28 Vista frontal del modelo de STKO para la fachada D8 .....                                                                                                     | 68 |
| Figura 29 Dimensiones de la fachada de estudio de dos plantas O32 .....                                                                                                 | 68 |
| Figura 30 Vista frontal de la fachada O32 modelada en STKO .....                                                                                                        | 69 |
| Figura 31 Detalle de interfaz entre dintel de madera (a) modelada en STKO y (b) fotografía de viga dintel en edificación típica de adobe (Arellano, 2018) .....         | 69 |
| Figura 32 Representación en STKO para fachada (a) O32 y (b) fotografía de esta en la ciudad de Cuenca (Cárdenas-Haro et al., 2021) .....                                | 70 |
| Figura 33 Representación en STKO para fachada (a) D8 y (b) fotografía de esta en la ciudad de Cuenca .....                                                              | 70 |
| Figura 34 Vista posterior fachada O32 con incorporación de interacción en el entrepiso ....                                                                             | 71 |
| Figura 35 Representación de vigas collar en fachadas de adobe utilizando (a) vigas, (b) tabloncillos y (c) escalera de madera (Arcentález & Pizarro, 2023) .....        | 71 |
| Figura 36 Esquema de materiales empleados en una cubierta tradicional de edificación de adobe (Arcentález & Pizarro, 2023) .....                                        | 74 |

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 37 Vista lateral de fachada D8 y detalle de las capas de material modeladas con sección Layered Shell ..... | 74 |
| Figura 38 Resultados del análisis modal de la fachada D8 .....                                                     | 76 |
| Figura 39 Resultados del análisis modal de la fachada O32 .....                                                    | 77 |
| Figura 40 Resultados del análisis no Lineal pushover para las fachadas D8 y O32 .....                              | 79 |
| Figura 41 Mecanismos de falla adoptados para fachas de un nivel y dos niveles .....                                | 80 |
| Figura 42 Curvas pushover para fachada de una planta (D8) .....                                                    | 81 |
| Figura 43 Curvas pushover para fachada de dos plantas (O32) .....                                                  | 81 |

## Índice de tablas

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1 Definición geométrica - áreas y vistas de los planos ortogonales de los RVE's modelados ..... | 31 |
| Tabla 2 Longitudes de arista de los RVE's modelados.....                                              | 32 |
| Tabla 3 Propiedades necesarias para la definición de los materiales en los RVE's .....                | 32 |
| Tabla 4 Propiedades elásticas del adobe y mortero de adobe (Arcentález & Pizarro, 2023)33             |    |
| Tabla 5 Propiedades mecánicas del adobe inelástico (Saguay, 2023).....                                | 34 |
| Tabla 6 Parámetros de resolución del método de elementos finitos (Saguay, 2023).....                  | 35 |
| Tabla 7 Restricciones (Azul) y desplazamientos (Rojo) aplicados sobre los RVE's.....                  | 36 |
| Tabla 8 Vectores de dirección de desplazamiento para ensayos de compresión y tracción 37              |    |
| Tabla 9 Dirección del desplazamiento para ensayos de corte.....                                       | 38 |
| Tabla 10 Propiedades mecánicas obtenidas aparejo Panderete (460 mm).....                              | 41 |
| Tabla 11 Daño y desplazamiento al ensayar el aparejo Panderete (460 mm) a compresión42                |    |
| Tabla 12 Daño y desplazamiento al ensayar el aparejo Panderete (460 mm) a tracción.....               | 43 |
| Tabla 13 Propiedades mecánicas obtenidas aparejo Soga (420 mm).....                                   | 45 |
| Tabla 14 Daño y desplazamiento al ensayar el aparejo Soga (420 mm) a compresión.....                  | 46 |
| Tabla 15 Daño y desplazamiento al ensayar el aparejo Soga (420 mm) a tracción.....                    | 47 |
| Tabla 16 Propiedades mecánicas obtenidas aparejo Tizón (400 mm) .....                                 | 49 |
| Tabla 17 Daño y desplazamiento al ensayar el aparejo Tizón (400 mm) a compresión .....                | 50 |
| Tabla 18 Daño y desplazamiento al ensayar el aparejo Tizón (400 mm) a tracción .....                  | 51 |
| Tabla 19 Propiedades mecánicas obtenidas aparejo Panderete (820 mm).....                              | 53 |
| Tabla 20 Daño y desplazamiento al ensayar el aparejo Panderete (820 mm) a compresión54                |    |
| Tabla 21 Daño y desplazamiento al ensayar el aparejo Panderete (820 mm) a tracción.....               | 55 |
| Tabla 22 Propiedades mecánicas obtenidas aparejo Soga (860 mm).....                                   | 57 |
| Tabla 23 Daño y desplazamiento al ensayar el aparejo Soga (860 mm) a compresión.....                  | 58 |
| Tabla 24 Daño y desplazamiento al ensayar el aparejo Soga (860 mm) a tracción.....                    | 59 |
| Tabla 25 Propiedades mecánicas obtenidas aparejo Tizón (820 mm) .....                                 | 61 |
| Tabla 26 Daño y desplazamiento al ensayar el aparejo Tizón (820 mm) a compresión .....                | 62 |
| Tabla 27 Daño y desplazamiento al ensayar el aparejo Tizón (820 mm) a tracción .....                  | 63 |
| Tabla 28 Resumen de resultados obtenidos para RVE's entre 400 y 460 mm .....                          | 66 |
| Tabla 29 Resumen de resultados obtenidos para RVE's entre 820 y 860 mm .....                          | 66 |
| Tabla 30 Resumen de materiales y secciones empleadas en STKO .....                                    | 72 |
| Tabla 31 Masa y peso propios de las fachadas asignados a los modelos en STKO .....                    | 75 |
| Tabla 32 Resumen de resultados pushover de resistencia y desplazamiento máximo.....                   | 78 |
| Tabla 33 Daño registrado en la fachada D8 para los aparejos de estudio.....                           | 84 |
| Tabla 34 Daño registrado en la fachada O32 para los aparejos de estudio.....                          | 85 |



### Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a las personas que han sido fundamentales en el desarrollo de este proyecto:

A mis directores, Ing. Xavier Cárdenas e Ing. Julver Pino, quienes supieron brindarnos valiosas oportunidades y cuyo apoyo y paciencia fueron clave para cumplir nuestros objetivos.

Al ingeniero Hernán García, quien generosamente nos enseñó y guió a lo largo de todo este proceso, compartiendo su conocimiento y experiencia de manera desinteresada.

A mi papá, Alvaro, quien siempre me ha aconsejado y respaldado en mis proyectos, brindándome su amor y apoyo incondicional.

A mis abuelitos, Raúl y María, quienes me han brindado consejos llenos de cariño y sabiduría.

A Eliana, cuyo apoyo fue fundamental en la realización de este proyecto, brindándome su ayuda y aliento en todo momento.

A Jordy, mi amigo y compañero de trabajo de titulación, le agradezco por su amistad, colaboración y apoyo mutuo durante todo el trayecto de este proyecto.

A Omar, un amigo incondicional, brindándome su amistad sincera y su apoyo constante.

Alvaro

### Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento a las personas que han sido un pilar fundamental en el desarrollo de este proyecto y mi carrera universitaria en general:

A los directores de este proyecto, Ing. Xavier Cárdenas e Ing. Julver Pino, quienes fueron parte fundamental en el desarrollo de este proyecto con su guía, apoyo y disponibilidad sin las cuales este proyecto no hubiera sido posible.

Agradecemos al Ing. Hernán García por su invaluable guía, paciencia y conocimiento, que nos permitieron desarrollar el proyecto de la mejor manera posible. Su apoyo y dedicación fueron fundamentales para nuestro éxito.

A mis padres, Rosario y Segundo, que siempre han sido un pilar fundamental en mi desarrollo y siempre me han apoyado en cada proyecto y etapa de mi vida. Sin los cuales nada hubiera sido posible.

A Álvaro mi compañero y amigo a lo largo de la carrera y en este trabajo de titulación, le agradezco por su amistad, disponibilidad y colaboración a lo largo de nuestra etapa universitaria y en especial en la elaboración de este trabajo.

A Eliana quien su apoyo no hubiera sido posible la realización de este proyecto.

A mis compañeros Omar, David, Denisse quienes siempre me han brindado su amistad y apoyo.

Jordy

## 1. Capítulo 1. Introducción y objetivos

### 1.1. Antecedentes

El adobe es uno de los materiales de construcción que se ha logrado extender por alrededor de todo el mundo, teniendo una mayor presencia en lugares donde la materia prima para su fabricación se encuentra con facilidad, esto se debe a la facilidad y simpleza que supone su elaboración y la posterior construcción con el mismo. Gracias a esto un 30 % de la población mundial cuenta con edificaciones fabricadas con materiales térreos e incluso en varios países se puede constatar que continúa siendo el principal proceso de construcción para la elaboración de viviendas (Costa et al., 2019).

En el Ecuador este tipo de construcción tiene gran relevancia ya que el país cuenta con 9.23 % de edificaciones construidas en adobe tapia o bahareque según el censo INCEV 2010-Ecuador, de las cuales solo un 16.97% de los propietarios considera que la edificación se encuentra en buen estado (INEC, 2010). Si nos centramos en el caso de la ciudad de Cuenca un número elevado de estas edificaciones están consideradas como patrimonio de la humanidad debido a que existen registros en los cuales se puede constatar que muchas de las construcciones existen desde el año 1970 y representan un parte importante de la arquitectura colonial de la ciudad. El mayor porcentaje de estas edificaciones fueron elaboradas entre los años 1809 y 1903, un problema de estas estructuras es que no son aptas para resistir cargas laterales debido a la baja resistencia de los materiales de construcción (Cárdenas-Haro, Todisco, et al., 2022).

Esto cobra una mayor relevancia si tenemos en cuenta el porcentaje total de las edificaciones patrimoniales que se encuentran inventariadas el 43.2% corresponde a fachadas de adobe y el 18.2% cuenta con una estructura de muros de adobe. Esto debido a que gran una parte de las antiguas edificaciones se produjo únicamente una arquitectura de fachadas, conservándose los muros de adobe como estructura y cambiando únicamente la fachada (Achig et al., 2013). Otro aspecto que se debe considerar en la debilidad de las estructuras es el abandono de muchas de estas ya que por su naturaleza son más afectadas por el paso del tiempo por lo que necesitan un mantenimiento adecuado y constante para su adecuada conservación. El 16.1% de estos inmuebles están catalogados en estados regular, mientras que un 2.5% se encuentran en mal estado y 0.6% se encuentran en ruina. Estas cifras nos muestran que un 19.2% de las edificaciones en el centro histórico deben ser evaluadas e intervenidas antes posibles catástrofes para evitar desastres que puedan afectar el patrimonio de la ciudad y generar daños materiales y de vidas humanas (Orellana, 2017).

Un aspecto que reduce la seguridad de las estructuras del centro histórico es la modificación de estas edificaciones con el fin de aumentar los ingresos de los propietarios, ya que lo mismo prefirieron buscar otros lugares para vivir y conseguir ingresos arrendando sus propiedades en el centro histórico. Para maximizar las ganancias se realizaron modificaciones que afectaron las estructuras con: divisiones internas, construcción de pisos intermedios y ampliaciones. Con el objetivo de tener un mayor número de habitaciones de las cuales conseguir ingresos (Cárdenas-Haro, Todisco, et al., 2022). Por otro lado, muchas de estas modificaciones fueron realizadas de manera clandestina y sin ningún tipo de control lo que puede generar aún más problemas en las edificaciones (Orellana, 2017).

Debido a que el Ecuador se encuentra ubicado en una región geográfica con alto riesgo sísmico, ya que el país se encuentra ubicado en el denominado Cinturón de Fuego del Pacífico lo cual lo hace susceptible a sufrir eventos de magnitudes elevadas como los sufridos en Manta en el año 2016 y el evento suscitado en el año 1906 el cual alcanzó una magnitud de 8.8 en la escala de Richter siendo uno de los eventos sísmicos más grandes de la historia. Una parte del territorio ecuatoriano se encuentran en la microplaca conocida como “Bloque Andino”, la misma que se encuentra dentro de la placa sudamericana. El “Bloque Andino” tiene interacción tanto con la placa Nazca como la Cocos y Caribe, en esta zona se ha logrado medir un movimiento aproximado de 50-60 mm/año lo cual es un valor elevado comparado con el movimiento de entre 2-5 mm/año presentado en la placa continental. Existen dos fuentes principales de eventos sísmicos en el país: subducción y de tipo cortical, en ambas fuentes se produce una acumulación de energía la misma que tiene que liberarse y la cual es independiente de las demás fuentes (Martínez & Angulo, 2016).

Bajo estas características los sismos pueden producir una gran afección al patrimonio de Cuenca debido a que la mayor parte de pérdidas que se pueden producir en un evento sísmico se generan en viviendas construidas con tierra. Ya que estas sufren daños significativos que pueden incluso provocar el colapso de las edificaciones generando las pérdidas tanto materiales como de patrimonio. Estos daños son causados por las características propias del material como su peso elevado otorgando más carga a la estructura, su baja resistencia y comportamiento frágil (Chuya & Ayala, 2018).

El estudio del comportamiento de adobe de acuerdo a las variaciones en su geometría y bajo cargas sísmicas no ha sido estudiado en profundidad ya que este material ha sido sustituido con otros materiales como el acero o el hormigón debido a sus mejores propiedades y características ya definidas lo que permite generar un mejor entorno para el diseño con el uso de

estos materiales, además de esto existe ya normativa muy desarrollada la cual ayuda a que estas edificaciones estén preparadas ante eventos sísmicos (Alvarado & Puma, 2020).

Existen trabajos en los cuales se ha realizado pruebas de cortante en el plano en muros de adobe reforzados y no reforzados (Hračov et al., 2016). También se puede encontrar estudios en los cuales han realizado simulaciones para poder mejorar el desempeño sísmico de edificaciones de adobe y dar alternativas para edificios históricos, estos estudios han realizado simulaciones mediante elementos finitos para aproximarse a las condiciones necesitadas (Blondet & Garcia, 2003). Existen estudios en los cuales se analizan el comportamiento de paredes de adobe ante sismos en el plano (Alvarado & Puma, 2020).

### **1.2. Planteamiento del problema**

El presente informe se centrará en obtener la influencia de la variación de los parámetros geométricos en el comportamiento de muros de las fachadas del Centro Histórico de Cuenca, Ecuador, las mismas que son clasificadas como Patrimonio de la Humanidad por su reconocido valor histórico y cultura. Por lo cual su conservación y estudio tiene gran importancia para la ciudad. La investigación se enfocará en parámetros geométricos encontrados en fachadas de adobe del centro histórico de la ciudad, considerando edificaciones de una planta ubicadas en la parroquia Gil Ramírez Dávalos. Además, con el propósito de determinar el comportamiento ante cargas sísmicas se considerará una carga aplicada fuera del plano de la fachada para poder determinar cómo actúa la estructura ante la misma.

Para lograr dicho objetivo, se realizará un análisis utilizando tanto un micro modelo como un macro modelo en el Software OpenSees, el cual se centra en la simulación del comportamiento de estructuras y sistemas geotécnicos sometidos a sismos. Con el objetivo de tener una interfaz que nos permita visualizar datos complejos por medio de imágenes y que nos permita una mejor interacción con la herramienta se utilizará la interfaz Scientific ToolKit for OpenSees (STKO). Por medio de estos softwares se espera obtener resultados que nos permitan determinar el comportamiento de las fachadas de adobe con geometrías específicas antes cargas sísmicas.

### **1.3. Objetivo general**

Comparar la influencia de parámetros geométricos específicos en un modelo de elemento de volumen representativo de un muro de adobe, con el fin de comprender y cuantificar su impacto en el comportamiento estructural de las fachadas patrimoniales del Centro Histórico de Cuenca.

**1.4. Objetivos específicos**

- Identificar y documentar los parámetros geométricos del RVE que serán objeto de variación.
- Desarrollar modelos RVE que permitan generar y analizar las diferentes combinaciones posibles de los parámetros geométricos identificados.
- Desarrollar modelos de simulación para representar y evaluar el comportamiento mecánico de un tipo de fachada de adobe bajo cargas sísmicas.

## **2. Capítulo 2: Estado del arte**

### **2.1. Introducción**

La ciudad de Cuenca, arraigada en la región sur de Ecuador, se erige como un tesoro histórico y arquitectónico, donde las edificaciones de adobe han dejado una impronta perdurable en su evolución. Este capítulo se adentra en diversos aspectos que definen la importancia de estas estructuras, desde su contexto histórico hasta su valor cultural, arquitectónico y su contribución a la sostenibilidad ambiental. Desde las épocas preincaicas e incas hasta la llegada de los españoles, las edificaciones de adobe representan no solo testigos históricos, sino expresiones artísticas transmitidas de generación en generación por los maestros artesanos locales.

En el marco de la conciencia ambiental contemporánea, las edificaciones de adobe se destacan por su eco-amigabilidad y su capacidad para proporcionar ambientes internos frescos. A pesar de su relevancia, estas estructuras enfrentan desafíos como el deterioro natural y eventos sísmicos, haciendo imperativa su preservación para salvaguardar la herencia cultural y arquitectónica de Cuenca. Además, la investigación se sumerge en las técnicas multi-escala de homogeneización computacional y las herramientas de modelación, como ANSYS y STKO, explorando su aplicación en el estudio detallado de las características mecánicas de estas edificaciones, destacando su papel vital en la ingeniería estructural y la comprensión avanzada de materiales en el campo de la investigación y desarrollo.

### **2.2. Historia e importancia de las edificaciones de adobe de Cuenca**

La ciudad de Cuenca, ubicada en la región sur de Ecuador, es reconocida por su rica historia, arquitectura colonial y valioso patrimonio cultural. Entre las diversas manifestaciones arquitectónicas que definen la identidad de Cuenca, las edificaciones de adobe emergen como elementos destacados que han dejado una huella significativa en la historia y el desarrollo urbano de la ciudad.

#### *Contexto Histórico*

En el territorio actual de Ecuador, el empleo de la tierra como material de construcción se remonta a épocas preincaicas e incas. En el contexto de la ciudad de Cuenca, con la llegada de los españoles, se inició la construcción de modestas viviendas coloniales que se asemejaban, según se describe, a las edificaciones de España, erigidas con piedra, barro y adobe elaborados a partir de tierra (Jaramillo Paredes, 2004). Este período marca un punto de inflexión en la historia arquitectónica de Cuenca, fusionando las técnicas constructivas autóctonas con las influencias europeas introducidas por los colonizadores.

### *Valor Cultural y Arquitectónico*

Las edificaciones de adobe no solo son testigos históricos, sino también portadores de un valor cultural y arquitectónico inigualable. La técnica de construcción de adobe en Cuenca refleja la maestría de los artesanos locales, quienes han transmitido sus conocimientos de generación en generación. Estas estructuras no solo son ejemplos de ingeniería vernácula, sino también expresiones artísticas que narran historias a través de sus diseños, relieves y detalles arquitectónicos.

### *Sostenibilidad Ambiental*

En un contexto contemporáneo de conciencia ambiental, las edificaciones de adobe en Cuenca también destacan por su contribución a la sostenibilidad. El adobe, como material de construcción, es conocido por su bajo impacto ambiental y su capacidad para proporcionar un ambiente interior naturalmente fresco. En una ciudad donde la preservación del entorno es crucial, las edificaciones de adobe se presentan como una opción eco amigable, contribuyendo a la reducción de la huella de carbono urbana.

### *Desafíos y Preservación*

A pesar de su importancia, las edificaciones de adobe en Cuenca enfrentan desafíos, como el deterioro natural, eventos sísmicos y presiones urbanísticas. La preservación de estas estructuras se vuelve esencial para mantener viva la herencia cultural y arquitectónica de la ciudad. Este capítulo también abordará las estrategias y esfuerzos actuales para la conservación de las edificaciones de adobe en Cuenca.

En resumen, las edificaciones de adobe desempeñan un papel crucial en la identidad de Cuenca, aportando tanto a su rica historia como a la sostenibilidad ambiental. Este capítulo ha proporcionado una visión general de la importancia de estas estructuras, destacando su relevancia histórica, cultural, arquitectónica y ambiental en el contexto urbano de la ciudad. La comprensión y preservación de las edificaciones de adobe no solo enriquecen la experiencia de Cuenca, sino que también contribuyen a la narrativa global de la arquitectura vernácula y sostenible.

### **2.3. Propiedades físicas y geométricas de los materiales utilizados en las fachadas de Cuenca**

En aras de la calibración de métodos de evaluación para estructuras de tierra existentes, el presente trabajo se fundamenta en la recopilación de (Cárdenas-Haro, Todisco, et al., 2022) quien han conformado una base de datos que incorpora ensayos de compresión y flexión en especímenes de tierra cruda no cocida. Esta base de datos abarca 2670 pruebas con



especímenes de cuatro materiales distintos: adobe no estabilizado y estabilizado, bloque de tierra comprimida (CEB) y bloque de tierra comprimida estabilizado (SCEB). Es importante subrayar que este trabajo de investigación no es el objetivo principal, sino que actúa como la fuente primaria de la cual se extraerán los datos necesarios para la realización del trabajo de titulación.

Este dicho documento se presenta en primer lugar la información contenida en la base de datos de recopilación. Posteriormente, con el fin de comparar estos resultados con las disposiciones de códigos internacionales, se han aplicado diversos criterios de control y filtrado, resultando en una base de evaluación conformada por 2631 pruebas. A través de este análisis, se compara la resistencia a la compresión obtenida de los ensayos experimentales con los valores propuestos por códigos internacionales, destacando que los ensayos generalmente reflejan una resistencia a la compresión inferior al mínimo requerido por códigos internacionales, tales como los códigos peruano y español para adobe y CEB, respectivamente.

La relevancia de este estudio reside en su función de suministrar datos sólidos y confiables que se extraerán y utilizarán como la base fundamental para la realización del trabajo de titulación. Los resultados provenientes de la base de datos creada se convierten en un recurso valioso que permitirá analizar y comprender mejor el comportamiento de estructuras de tierra, específicamente en relación con la resistencia a la compresión y flexión de diferentes materiales, incluyendo adobe y bloques de tierra comprimida.

#### **2.4. Técnicas multi-escala de homogeneización computacional**

En el contexto del modelado macroscópico, la formulación de leyes constitutivas fenomenológicas de forma cerrada para el análisis de materiales heterogéneos y cuasi-frágiles, como la mampostería, sigue siendo un desafío considerable (Pelà et al., 2011). La evolución de las propiedades macroscópicas se ve fuertemente influenciada por el comportamiento complejo de fenómenos microestructurales, tales como la anisotropía inducida por daños, la redistribución de tensiones entre constituyentes microestructurales o la localización de deformaciones. En este contexto, resulta difícil tener en cuenta la influencia de la microestructura en evolución sobre las propiedades macroscópicas, especialmente cuando se producen localizaciones de deformaciones en la microestructura que llevan a mecanismos complejos de disipación a nivel estructural. (Petracca, 2016)

Las técnicas multi-escala de homogeneización computacional se vuelven aplicables y esenciales en el estudio de planos de falla y características mecánicas en muros de

mampostería de adobe, abordando este desafío de manera efectiva. En el caso de la mampostería de adobe, caracterizada por su naturaleza heterogénea y propiedades mecánicas anisotrópicas, estas técnicas permiten capturar las complejidades de la interacción entre las unidades individuales de adobe y los morteros (Pelà et al., 2011). Al considerar la estructura a nivel microscópico, estas técnicas ofrecen la capacidad de evaluar con mayor precisión los planos de falla y predecir comportamientos mecánicos específicos a nivel macroscópico.

La metodología de homogeneización computacional, específicamente el enfoque conocido como el Método de Homogeneización Computacional (CHM), se presenta como una herramienta fundamental para este propósito. Al establecer un acoplamiento débil entre las escalas macro y micro, el CHM utiliza un Volumen de Elemento Representativo (RVE) para modelar las características microestructurales sin insertarlas físicamente en el modelo estructural macroscópico (Miehe et al., 1999). Esta flexibilidad ha permitido la modelación de materiales con microestructuras complejas y comportamientos tanto lineales como no lineales. En el contexto de la investigación actual, se optará por la aplicación del CHM debido a su capacidad para abordar la complejidad de la mampostería de adobe y su comportamiento mecánico como lo realizado bajo condiciones específicas en fachadas tipo. (Saguay, 2023)

## **2.5. Teoría de Modelado**

### **2.5.1. Modelo basado en daño**

Petracca et al. (2017) propone un micro modelo continuo para caracterizar materiales compuestos, este modelo se diferencia de los modelos isotrópicos al ofrecer la capacidad de presentar un efecto unilateral, con esto permite un modelo de cierre de fisuras. Esto lo realiza mediante el cálculo del esfuerzo efectivo García (2023).

Para el modelo se emplea dos parámetros de daño, uno para la parte positiva como uno para la parte negativa del tensor de esfuerzo efectivo. Este tensor viene definido por la siguiente ecuación:

$$\bar{\sigma} = (a + d^+) \cdot \bar{\sigma}^+ + (1 - d^-) \bar{\sigma}^-$$

Donde:

$d^+$  y  $d^-$ : Escalares de daño, varían entre 0 y 1.

$\bar{\sigma}^+$  y  $\bar{\sigma}^-$ : Parte positiva y negativa del tensor de esfuerzo efectivo.

Que viene definido por la relación elástica lineal:

$$\bar{\sigma} = \mathbb{C} : \varepsilon$$

Donde:

$\mathbb{C}$ : Tensor de rigidez isotrópica que describe las propiedades del material.

$\varepsilon$ : Tensor de deformación.

Las partes positivas y negativas de  $\bar{\sigma}$  viene dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\bar{\sigma}^+ = \sum_{i=1}^3 \langle \bar{\sigma}_i \rangle p_i \otimes p_i$$

$$\bar{\sigma}^- = \bar{\sigma} - \bar{\sigma}^+$$

Donde:

$\bar{\sigma}_i$ : i-ésimo esfuerzo principal de  $\bar{\sigma}$ .

$p_i$ : Vector unitario correspondiente a la dirección asociada.

$\langle \cdot \rangle$ : Corchetes de McAuley, regresan un valor positivo o cero.

### 2.5.2. Criterio de falla

Para lograr determinar los diferentes estados como los son: carga, descarga o recarga. Se emplean escalares conocidos como esfuerzos equivalentes  $\tau^-$  y  $\tau^+$ . La superficie de compresión utilizada es determinada por lo propuesto por Lubliner et al. (1989). El esfuerzo con signo negativo se determina mediante:

$$\tau^- = H(-\bar{\sigma}_{min}) \left[ \frac{1}{1-\alpha} \left( \alpha \bar{I}_1 + \sqrt{3 \bar{J}_2} + k_1 \beta \langle \bar{\sigma}_{max} \rangle + \gamma \langle -\bar{\sigma}_{max} \rangle \right) \right]$$

Donde:

$$\alpha = \frac{k_b - 1}{2k_b - 1}$$

$$\beta = \frac{f_{cp}}{f_t} (1 - \alpha) - (1 - \alpha)$$

$\bar{I}_1$ : Primer variante del tensor de esfuerzo efectivo.

$\bar{J}_2$ : Segundo variante del tensor de esfuerzo desviador efectivo.

$\bar{\sigma}_{max}$ : Esfuerzo principal efectivo.

$k_1$ : Escalar constante, controla la superficie de compresión en el comportamiento de dilatación. Varía entre 0 y 1.

$k_b$ : Relación entre resistencia de compresión biaxial y uniaxial.

$f_{cp}$ : Esfuerzo máximo de compresión.

$f_t$ : Resistencia a la tracción.

En la Figura 1 se puede observar la influencia que tiene el valor  $k_1$  en las superficies de fallo.

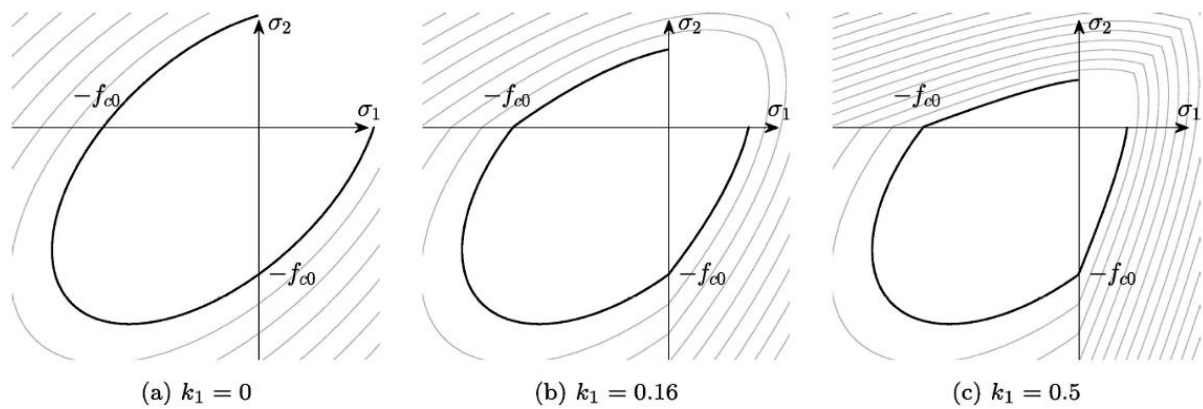


Figura 1 Superficies propuestas de falla a compresión de modelos continuos. Influencia del parámetro  $k_1$  (Petracca et al., 2017)

Por otro lado, se define la superficie de tracción como:

$$\tau^+ = H(\bar{\sigma}_{max}) \frac{1}{1-\alpha} \left( \alpha \bar{I}_1 + \sqrt{3} \bar{J}_2 + \beta \langle \bar{\sigma}_{max} \rangle \right) \frac{f_t}{f_{cp}}$$

Donde:

$\frac{f_t}{f_{cp}}$  : Relación de superficie a tracción con la resistencia a la tracción.

En la Figura 2 se puede observar las dos superficies de daño en los esfuerzos principales, si se considera el esfuerzo en un plano bidimensional. En la Figura 3 se lo puede observar en el espacio tridimensional.

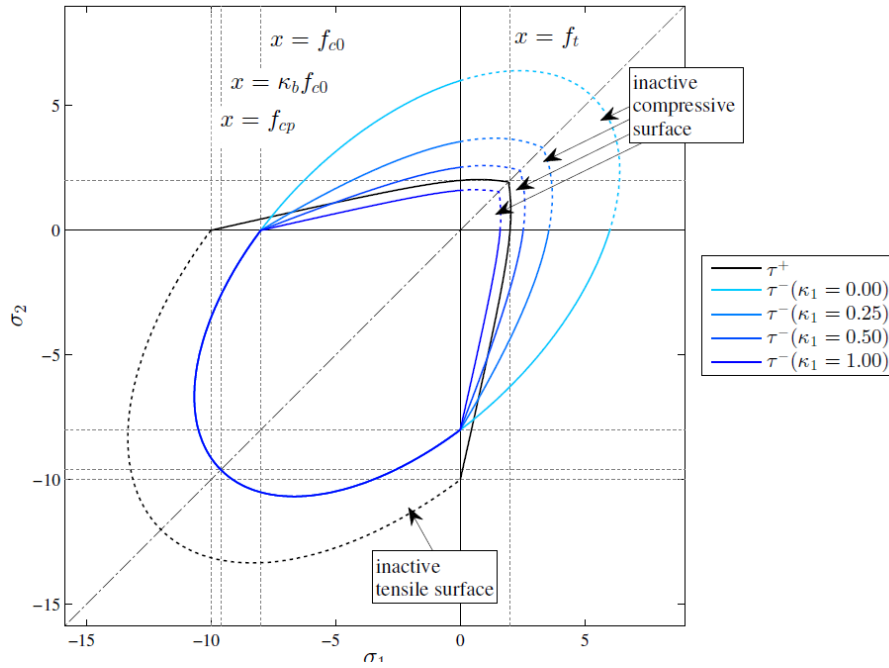


Figura 2 Superficies iniciales de daño (Esfuerzos en plano 2D) (Petracca et al., 2017)

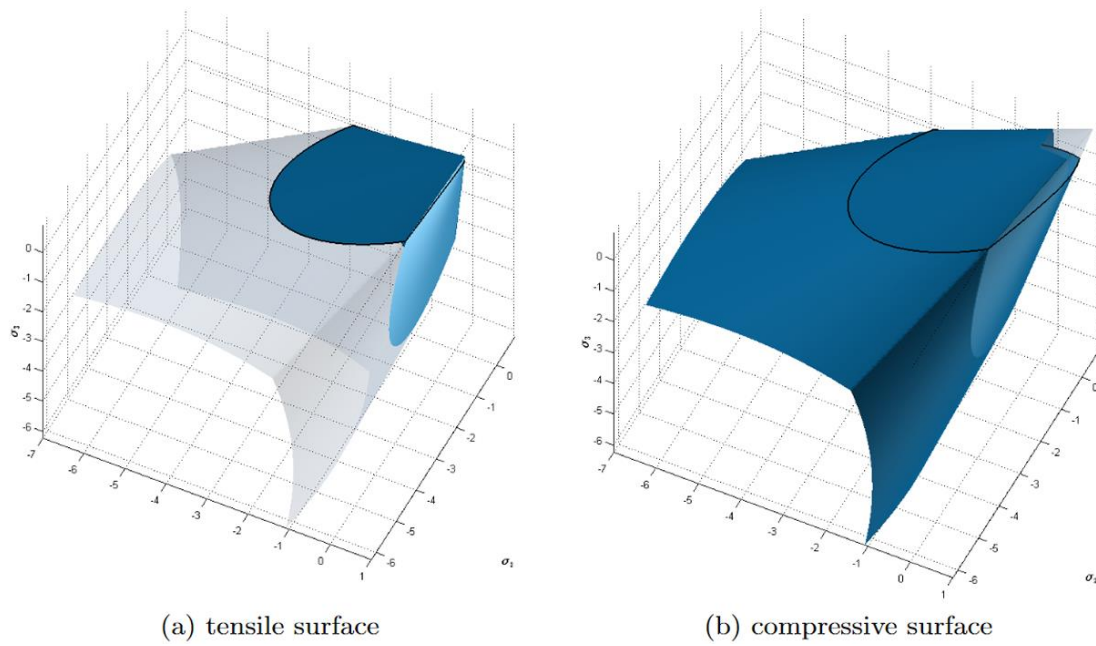


Figura 3 Superficies iniciales de daño (3D). Superficie inactiva representada de forma sombreada (Petracca et al., 2017)

En el modelo si al menos uno de los esfuerzos principales es negativo se desarrolla la superficie de compresión, para la superficie a tracción tenemos un caso análogo, pero con signo positivo. Esto es tomado en cuenta con las siguientes consideraciones:

$$\tau^- = H(-\bar{\sigma}_{min}) \left[ \frac{1}{1-\alpha} \left( \alpha \bar{I}_1 + \sqrt{3 \bar{J}_2} + k_1 \beta \langle \bar{\sigma}_{max} \rangle \right) \right]$$

$$\tau^+ = H(\bar{\sigma}_{max}) \left[ \frac{1}{1-\alpha} \left( \alpha \bar{l}_1 + \sqrt{3 \bar{j}_2} + \beta \langle \bar{\sigma}_{max} \rangle \right) \frac{f_t}{f_{cp}} \right]$$

Donde  $H(x)$  es la función de Heaviside definida por:

$$H(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases}$$

### 2.5.3. Leyes evolutivas para variables de daño

Podemos calcular el índice de daño a tracción con la siguiente ecuación:

$$d^+(r^+) = 1 - \frac{r_o^+}{r^+} \exp \left\{ 2H_{dis} \left( \frac{r_o^+ r^+}{r_o^+} \right) \right\}$$

Donde:

$r^\pm$ : Umbrales de daño, es decir los valores de esfuerzo equivalente  $\tau^\pm$  más altos alcanzados.

$H_{dis}$ : Parámetro de ablandamiento discreto

Si queremos considerar el ablandamiento con características de un problema discreto, debemos considerar la zona de disipación (Bažant & Oh, 1983), además de cumplir con las siguientes condiciones:

$$g_f l_{dis} = G_f$$

Donde  $G_f$  es la energía de fractura y  $g_f$  es la energía específica disipada que viene dada por:

$$g_f = \left( 1 + \frac{1}{H_{dis}} \right) \frac{f_t^2}{2E}$$

Donde:

$$H_{dis} = \frac{l_{dis}}{l_{mat} - l_{dis}}$$

El valor de  $l_{dis}$  es igual a la longitud característica del elemento finito  $l_{mat}$ . Que se obtiene con la siguiente ecuación.

$$l_{mat} = l_{dis} = \frac{2EG_f}{f_t^2}$$

En la Figura 4 (a) se presenta la ley de tracción uniaxial con ablandamiento exponencial basada en la energía de fractura (Petracca et al., 2017). En la Figura 4 (b) se muestra la evolución del daño en compresión, regido una ley de endurecimiento/ablandamiento que consta de una sección lineal, una sección de endurecimiento, una de ablandamiento y una fase residual final.

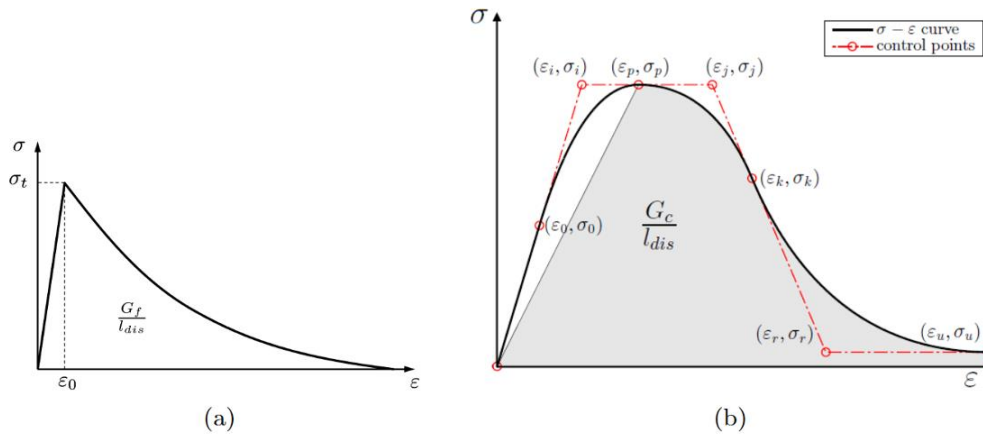


Figura 4 (a) Tracción Uniaxial (b) Compresión Uniaxial (Petracca et al., 2017)

Podemos ajustar los puntos de control de la Figura 4 para que coincidan con las respuestas de pruebas experimentales de compresión uniaxial por medio de la ley de evolución.

#### 2.5.4. Comportamiento a corte

Podemos representar de manera indirecta el comportamiento de dilatación del material bajo esfuerzos de corte de manera diferente a una formulación plástica mediante el enfoque de daño. Las superficies de compresión y tracción se activan cuando los esfuerzos principales tienen signo diferente. El esfuerzo principal positivo viene afectado por el daño a tracción, mientras que el daño a compresión afecta al negativo. El tensor se obtiene mediante una escala anisotrópica del tenso efectivo (Pelà et al., 2011).

En la Figura 5 (a) se representa el daño isotrópico y en la Figura 5 (b) el modelo de daño anisotrópico  $\frac{d^+}{d^-}$ , estas figuras se muestran en un sistema de referencia de esfuerzos principales para una distorsión de corte puro. El modelo define dos superficies de falla con índices de daño tanto a tracción como a compresión con diferentes leyes de evolución que arrojan diferentes valores. No obtenemos una escala isotrópica del esfuerzo efectivo con el esfuerzo de daño resultante. También se tiene una superficie de tracción más pequeña y se reduce al alcanzar el ablandamiento exponencial, lo que implica que la variable de daño a tracción crece más rápido que la de compresión. Esto provoca que no siga la misma dirección

que el esfuerzo elástico dino que tendrá un aumento de compresión en el otro lado. Esto define una fuente de dilatación para modelos no confinados.  $k_1$  determina el comportamiento de la cara a compresión en el rango no lineal de la respuesta a corte.  $k_1$  determina implícitamente la dilatación del modelo.

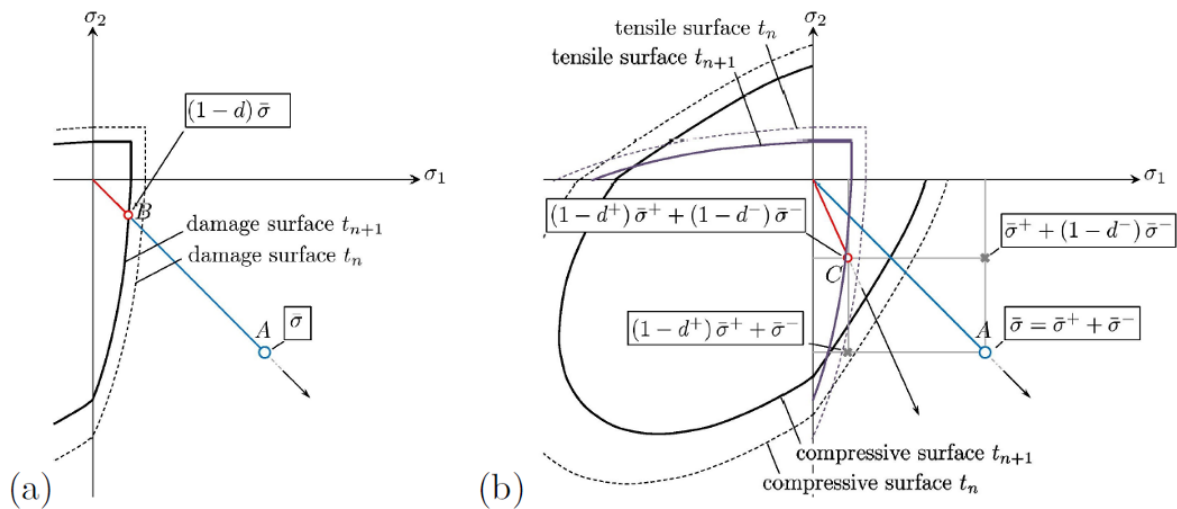


Figura 5 Leyes de evolución para los modelos de daño (a) isotrópico y (b) ortotrópico ( $d^+/d^-$ ) en los cuadrantes de tensión/ compresión (Petracca et al., 2017)

Al usar este enfoque podemos encontrar convergencia con menor costo computacional que con un método de plasticidad, esto se debe a la posibilidad de estimar los esfuerzos fuera de la superficie de daño mediante la escala de esfuerzos con el valor del daño. Además, en este enfoque no se impone dilatación. No obstante, se debe tener en cuenta que no se alcanza una retroproyección real ya que no se modifica la dirección del vector solo se escala los esfuerzos alrededor de la misma dirección. Una desventaja del enfoque es que no es posible ingresar un valor para un ángulo de dilatación, solo haciéndose presente si las dos superficies de compresión y tracción actúan juntas en un estado de corte.

### 2.5.5. Homogeneización

La mampostería de adobe y cualquier tipo de mampostería está constituida principalmente por dos componentes, los bloques de adobe y el mortero. La homogeneización de primer orden consiste en aproximar el comportamiento de un material compuesto en un solo material homogeneizado equivalente. Con el objetivo de dividir al sistema complejo en partes pequeñas recurrimos a los Elementos de Volumen Representativo, gracias a esto podemos calcular propiedades promedio de cada RVE, las cuales representarán el comportamiento de todo el sistema compuesto.



Según Petracca et al. (2016) la homogeneización de los RVE's es posible mediante la homogenización computacional de primer orden que sigue tres pasos. El primer paso es transferir las deformaciones macroscópicas desde la malla macroscópica a la microescala. El segundo paso consiste en resolver el volumen de frontera micro a pequeñas escalas mediante el uso de elementos finitos. El último paso es la transición de microescala a macro escala, donde se obtiene el tensor de esfuerzos homogeneizados obtenido como el promedio volumétrico del campo de esfuerzos microscópicos del RVE.

Creando un micro modelo de un elemento de volumen representativo se puede alcanzar resultados aproximados a un micro modelo de toda la estructura, con este micro modelo se puede obtener los coeficientes de rigidez y la resistencia en dos direcciones. Con estas propiedades se puede definir un modelo orto trópico que posteriormente se pueda resolver utilizando el modelo basado en daño. El RVE debe ser analizado tanto en compresión, tracción y corte. Lo que arrojará valores que nos permitan caracterizar el comportamiento orto trópico del material. Los esfuerzos y deformaciones son usados para definir el módulo de Young, el módulo de corte y la resistencia del material tanto a tracción como en compresión. Si calculamos las áreas bajo la curva del diagrama fuerza-deformación obtenemos los valores de energía de fractura (P. Lourenço et al., 2005).

#### **2.5.6. Macro modelo**

Ma et al. (2001) hace referencia a que, si seguimos un enfoque basado en micro modelos al momento de modelar edificaciones de mampostería en tres dimensiones tendremos dificultades debido al tamaño y la complejidad de estas estructuras, necesitando una gran capacidad computacional. Aporta, que debido a esto se representa a nivel macro ya que tenemos elementos más sencillos y definidos por su comportamiento utilizando un modelo basado en daño. Llegando a mencionar que la veracidad de los datos obtenidos depende de las propiedades elásticas y no elásticas definidas. Aquí es donde cobra relevancia el modelado de Elementos Volumétricos Representativos ya que a partir de estos podemos obtener dichas propiedades.

De esto se llega a la conclusión de que se deben formular leyes constitutivas adecuadas para poder modelar eficazmente la resistencia y el comportamiento no lineal de la fachada. Para capturar la ortotropía elástica, de resistencia y de ablandamiento el modelo orto trópico debe representar de manera precisa estas características. Para el caso de este trabajo de titulación, estas leyes constitutivas se encuentran contempladas en los materiales empleados en STKO que permiten registrar el daño.

## 2.6. Herramientas de modelación disponibles

En el vasto campo de la modelación por elementos finitos (FEA), diversas herramientas se han consolidado como pilares fundamentales para la simulación y análisis de estructuras y materiales. Si bien existen múltiples opciones en este ámbito, dos destacan de manera significativa por su versatilidad y especialización: ANSYS y STKO. Estas herramientas no solo han alcanzado una posición prominente, sino que también han establecido estándares en la industria en términos de capacidad y eficacia. Aunque otras opciones pueden estar disponibles, la relevancia y la reputación de ANSYS y STKO como principales recursos para la modelación de elementos finitos orientados a estructuras y materiales son innegables. Su presencia destacada en el campo subraya su papel esencial en la investigación, desarrollo y optimización de diseños en ingeniería estructural y mecánica de materiales.

ANSYS es un software líder en el campo de la simulación por elementos finitos y ha demostrado ser una herramienta invaluable para la modelación y análisis de estructuras y materiales. Su versatilidad permite a los ingenieros y científicos realizar simulaciones precisas y detalladas, proporcionando una comprensión profunda del comportamiento estructural y de los materiales en diversas condiciones. ANSYS aborda una amplia gama de aplicaciones, desde análisis estáticos y dinámicos hasta simulaciones térmicas y de flujo de fluidos. Con una interfaz intuitiva y potentes capacidades de modelado, ANSYS facilita la representación virtual precisa de estructuras y materiales, permitiendo a los usuarios evaluar el rendimiento y la resistencia de sus diseños con precisión.

STKO (Scientific Toolkit for OpenSees) se destaca como una herramienta especializada en la modelación de elementos finitos orientados específicamente a estructuras y materiales. Diseñado para brindar soluciones avanzadas en análisis estructural y mecánico, STKO ofrece una interfaz amigable y potentes capacidades de modelado que se centran en la eficiencia y la precisión. Este software permite a los ingenieros explorar de manera detallada el comportamiento de estructuras y materiales bajo diversas cargas y condiciones, incluyendo análisis no lineales y dinámicos. STKO se ha convertido en una opción preferida para aquellos que buscan herramientas especializadas en elementos finitos que ofrezcan un enfoque centrado en la mecánica de estructuras y materiales, proporcionando así resultados más específicos y detallados.

## 2.7. Conclusiones

En resumen, la rica historia y la valiosa herencia cultural de las edificaciones de adobe en Cuenca demandan una atención cuidadosa y una comprensión profunda. Para preservar y entender mejor estas estructuras, se propone la realización de un estudio detallado de las

fachadas de adobe en el centro histórico de Cuenca. Este estudio se hará mediante el programa especializado STKO, aplicando el método de homogeneización computacional. Este enfoque permitirá no solo evaluar las propiedades físicas y geométricas de los materiales utilizados en estas fachadas, sino también comprender en detalle los planos de falla y las características mecánicas específicas. Al adoptar esta metodología avanzada, se espera obtener resultados valiosos que contribuirán a la preservación y al conocimiento más preciso de las edificaciones de adobe en el corazón histórico de Cuenca. Este estudio no solo enriquecerá la comprensión de la arquitectura vernácula, sino que también proporcionará información esencial para enfrentar los desafíos contemporáneos y garantizar la continuidad de este patrimonio único en el tiempo.

### **3. Capítulo 3: Modelación de elementos de volumen representativo**

#### **3.1. Introducción**

Debido a los grandes beneficios tanto en disponibilidad como en costo, el adobe ha sido usado ampliamente al rededor del mundo. No obstante, la variabilidad y la falta de estudios exhaustivo acerca del comportamiento estructural del mismo plantea un problema al momento de realizar evaluaciones e intentar determinar el estado de la estructura. En vista de lo mencionado, este capítulo pretende abordar la variabilidad de las propiedades del adobe mediante la modelación de Elementos de Volumen Representativo (RVE's), en los que se pretende homogeneizar las propiedades del adobe para posteriormente modelarlo como un solo material. Un RVE es una forma de representar un componente de la estructura de la mampostería, la cual está compuesta por bloques de adobe unidos por capas de mortero. Con el objetivo de lograr definir las propiedades de este elemento, se han realizado modelos en STKO ensayados a compresión, tracción y corte. Estos se han realizado en un arreglo de tres direcciones ortogonales entre sí. Para esto se ha utilizado el método de homogenización computacional, la cual utiliza micro modelación basada en daño propuesta por Petracca et al. (2017) lo cual nos permitirá determinar características ortotrópicas del modelo de mampostería. Después, estos valores conformarán los datos de ingreso a los modelos de fachadas para comparar los resultados de distintos RVE's y evaluar si existe variación en las características obtenidas con los distintos aparejos de mampostería.

En este capítulo se determina los parámetros que serán el objeto de variación en los elementos de volumen representativo. Además, se presenta una explicación de la teoría del modelado para después proceder a realizarlo para los seis (RVE) que serán objeto de estudio, donde se definirán sus geometrías, propiedades físicas y los desplazamientos a los cuales estarán sometidos. Para finalizar presentando los resultados obtenidos y realizando un análisis de estos con el fin de obtener otras propiedades las cuales podrán ser introducidas a los modelos de fachas; para posteriormente determinar el grado de influencia de las características que van a ser objeto de variación en el comportamiento de las fachadas.

#### **3.2. Determinación de los parámetros de variación de los modelos**

Para determinar los parámetros a variar, se recopiló información que considera las características típicas de construcción en adobe y vernácula. Centrándose en el caso ecuatoriano, el cual es nuestro objeto de interés debido a su tradición constructiva en estas características. En primer lugar, se determinó el bloque de adobe que será usado en la modelación de las fachadas. El bloque escogido tiene unas dimensiones de 400 x 200 x 100 mm, el cual es típico en la zona andina de acuerdo con lo indicado por Viñuales (1944) y

Jurado & Vergara (2019). Estas dimensiones concuerdan con las medidas típicas de bloques de adobe usados en la construcción vernácula del Ecuador (Moscoso-Cordero, 2007).

Una vez determinada la geometría del bloque se escogió un espesor de mortero el cual sea representativo, para esto se tomó la media de los espesores de mortero típicas de las fachas del centro histórico de la ciudad de Cuenca, estos espesores varían en un rango de 10 y 30 mm por lo cual se determinó tomar un valor medio de 20 mm (Cárdenas-Haro, Todisco, et al., 2022). Determinados estos valores se debe determinar el espesor de la fachada de adobe, este se encuentra determinado tanto por el aparejo de los bloques de adobe como por el espesor de mortero escogido. Además, para escoger el número de bloques colocados en hileras para conformar la fachada se tomó en cuenta valores típicos de las fachadas del centro histórico de cuenca (Cárdenas-Haro, Todisco, et al., 2022). A partir de esto, se determinaron dos espesores de muro referenciales. Esto son muros de aproximadamente 400 mm y 800 mm, los cuales variarán según la disposición de los bloques y el número de hileras que se colocarán en las fachadas.

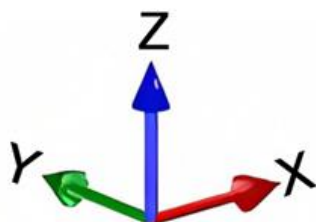
La siguiente característica será el aparejo de los bloques de adobe, la disposición que tendrán en la fachada. Para el estudio se usarán tres aparejos, el aparejo Panderete, que consiste en colocar los adobes verticalmente y de su cara más fina logrando una gran superposición de capas de adobe. Este es un aparejo típico en la construcción con mampostería (Jaramillo, 2019), además de usado comúnmente en estructuras de adobe (Reyes, 2004). El segundo aparejo por modelar será el conocido como Soga, el cual consiste en disponer los adobes de manera longitudinal en el muro este tipo de aparejo es uno de los más comunes al momento de construir muros de mampostería (Jaramillo, 2019). Este tipo de aparejo se usa en paredes de adobe en paredes con aparejos simples y con aparejos (Reyes, 2004). Para finalizar se analizará el aparejo tipo Tizón el cual consiste en pegar el bloque por la base, pero no en forma longitudinal si no atravesado al muro (Jaramillo, 2019). Es un material muy difundido en la construcción con adobe (Reyes, 2004). Como se puede observar, se emplearon alternativas ampliamente utilizadas en la construcción con adobe para garantizar que los resultados sean útiles en dicho ámbito.

### **3.3. Generación de los modelos RVE de las combinaciones propuestas para cada parámetro**

#### **3.3.1. Modelado de los Elementos de Volumen Representativo (RVE's)**

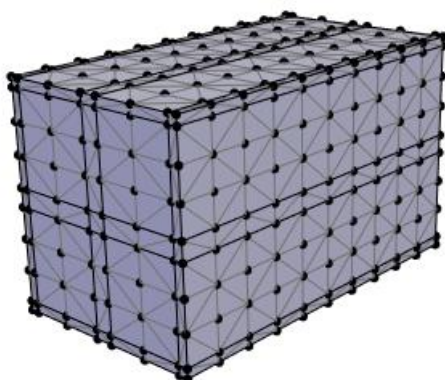
Como se mencionó en el subcapítulo 2.6 tanto la micro modelación como la macro modelación se realizará en OpenSees usando la herramienta STKO. Para iniciar se debe establecer los ejes de referencia global y los ejes de referencia de referencia local. El sistema

de coordenadas fijo que describe la posición y la orientación de del modelo o estructura a un punto de referencia común denominado origen es el eje referencia global, estos no dependen de la estructura son independientes y son usados como referencia uniforme en todo el análisis. En cambio, los ejes locales se refieren al sistema de coordenadas dentro de un elemento individual de la estructura. En la Figura 6 se observa los ejes globales los cuales vienen definidos en el programa STKO siendo, el color rojo representa el eje X, el color verde representa el eje Y, y el color azul el eje Z.



*Figura 6 Definición de ejes globales de modelación*

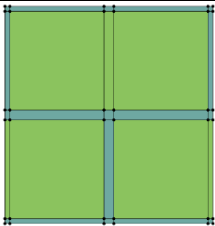
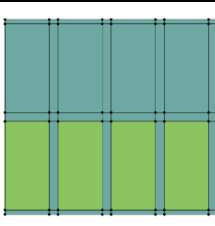
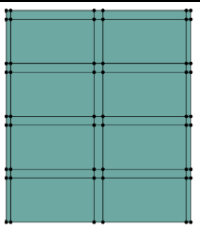
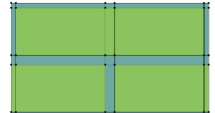
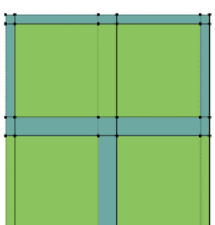
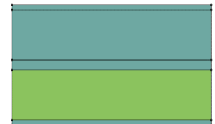
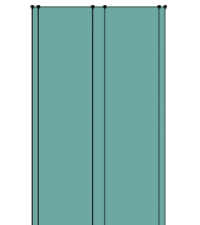
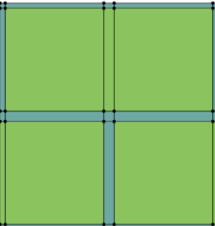
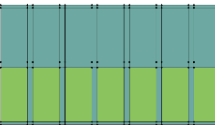
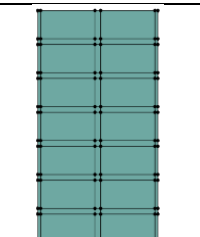
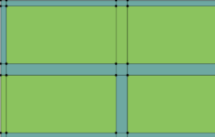
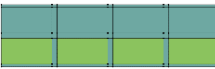
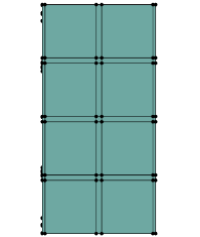
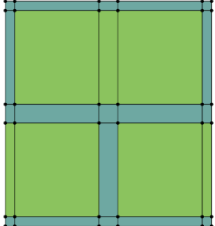
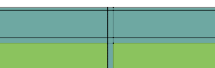
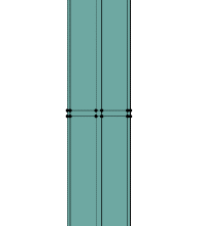
Una vez definidos los ejes de referencia, se procede a definir los RVE que representan las características geométricas de los armados de adobe y mortero escogidos y explicados en el subcapítulo 3.2. Para realizar la discretización se realizó un mallado de 40 mm, como se puede observar en la Figura 7 para el aparejo Panderete de 400 mm. El número de nodos y elementos de cada RVE varía según la geometría definida según cada aparejo.



*Figura 7 Discretización del aparejo "Tizón"*

Con el fin de replicar de manera fidedigna el patrón de la pared se definieron las características geométricas del RVE para que permitan la unión en las direcciones tanto X, Y e Z para formar así un muro de mampostería de adobe que cumpla con los espesores determinados. En la Tabla 1 se presenta las vistas frontales, planta y lateral. El color verde representa al adobe mientras que el color azul representa el mortero.

Tabla 1 Definición geométrica - áreas y vistas de los planos ortogonales de los RVE's modelados

| Aparejo             | Descripción             | Plano XZ                                                                            | Plano YZ                                                                             | Plano XY                                                                              |
|---------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Panderete<br>460 mm | Vista                   |    |    |    |
|                     | Área (mm <sup>2</sup> ) | 184800                                                                              | 211200                                                                               | 201600                                                                                |
| Soga<br>420 mm      | Vista                   |    |    |    |
|                     | Área (mm <sup>2</sup> ) | 52800                                                                               | 96000                                                                                | 88000                                                                                 |
| Tizón<br>400 mm     | Vista                   |   |    |   |
|                     | Área (mm <sup>2</sup> ) | 52800                                                                               | 96000                                                                                | 88000                                                                                 |
| Panderete<br>820 mm | Vista                   |  |  |  |
|                     | Área (mm <sup>2</sup> ) | 184800                                                                              | 360800                                                                               | 344400                                                                                |
| Soga<br>860 mm      | Vista                   |  |  |  |
|                     | Área (mm <sup>2</sup> ) | 100800                                                                              | 206400                                                                               | 361200                                                                                |
| Tizón<br>820 mm     | Vista                   |  |  |  |
|                     | Área (mm <sup>2</sup> ) | 52800                                                                               | 196800                                                                               | 180400                                                                                |

Además, a continuación, se presenta la Tabla 2 con todas las medidas de las aristas para los distintos RVE's que fueron modelados.

*Tabla 2 Longitudes de arista de los RVE's modelados*

| Aparejo   | Espesor de muro (mm) | Arista XZ (mm) | Arista YZ (mm) | Arista XY (mm) |
|-----------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| Panderete | 460                  | 440            | 460            | 420            |
|           | 820                  | 440            | 820            | 420            |
| Soga      | 420                  | 240            | 420            | 420            |
|           | 860                  | 240            | 860            | 420            |
| Tizón     | 400                  | 240            | 400            | 220            |
|           | 820                  | 240            | 820            | 220            |

El objetivo de un RVE es acoplar y generar un modelo que represente la estructura a modelar en este caso una fachada de adobe. El ensamblaje de RVE's permite tener un modelo que captura características y propiedades del sistema estructural de la fachada.

### 3.3.2. Definición de las propiedades físicas del RVE.

Para poder modelar el aparejo en el programa STKO se deben definir las propiedades del material tanto del mortero como del bloque del adobe, esto se realiza como un material de tipo DamageTC3D, el cual está basado en la teoría de daño propuesto por Petracca (2016). Para esto necesitamos ingresar propiedades del adobe las cuales deben ser obtenidas de literatura previo, en la Tabla 3 se muestran las propiedades necesarias.

*Tabla 3 Propiedades necesarias para la definición de los materiales en los RVE's*

| Elasticidad |                                                 |
|-------------|-------------------------------------------------|
| E           | Módulo de Young                                 |
| $\nu$       | Coefficiente de Poisson                         |
| Tensión     |                                                 |
| $f_t$       | Resistencia a la tracción                       |
| $G_t$       | Energía de fractura a tracción                  |
| Compresión  |                                                 |
| $f_{c0}$    | Límite elástico a compresión                    |
| $f_{cp}$    | Resistencia máxima a compresión                 |
| $f_{cr}$    | Resistencia residual a compresión               |
| $e_p$       | Deformación a compresión en resistencia máxima. |
| $G_c$       | Energía de fractura a compresión                |

Para obtener los valores de módulo de elasticidad se recurrió a estudios realizados en México por Quiroz et al. (2019). Donde se realizaron ensayos de compresión a muretes de adobe



para obtener su resistencia y poder calcular el módulo de elasticidad. El ensayo se realizó sobre 9 especímenes y se logró determinar una curva de ajuste tipo sinusoidal para el módulo de elasticidad regido por la siguiente ecuación:

$$y = 340.04 \cdot \sin(12.55 \cdot x + 2.55) + 221.27 \cdot \sin(17.20x + 12.32) + 601.30 \sin(2.06x + 0.02)$$

En la Figura 8 se puede observar la curva de ajuste para dicha ecuación:

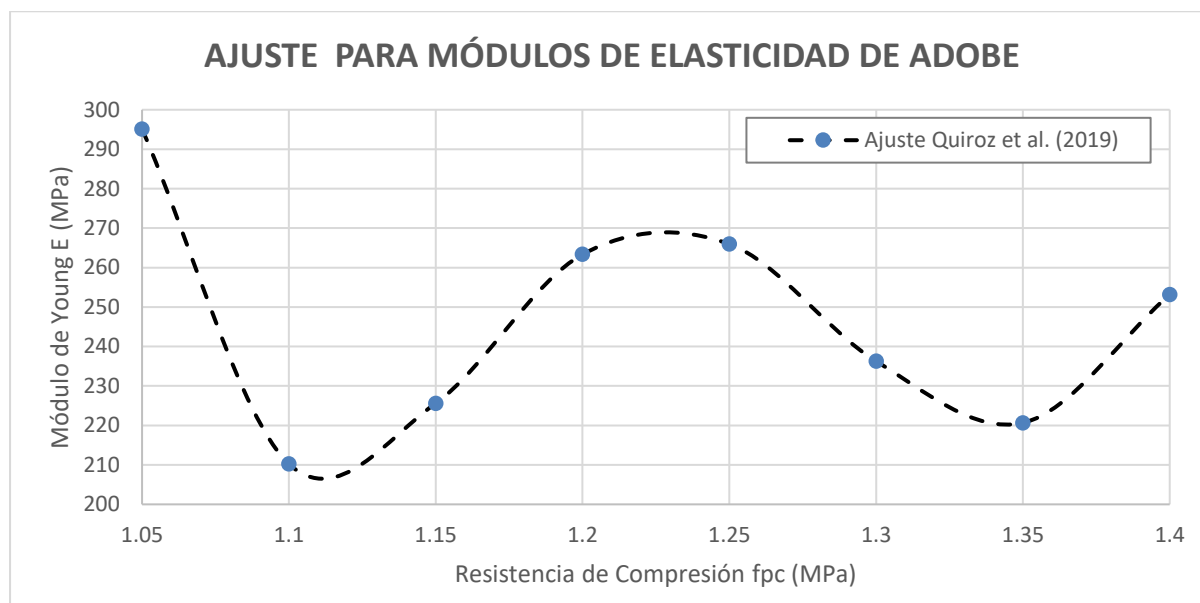


Figura 8 Curva de ajuste para ensayos de módulos de elasticidad (Quiroz et al., 2019)

Con esta curva de ajuste y con valores obtenidos en el laboratorio de la Universidad de Cuenca (Arcentález & Pizarro, 2023), con muestras del cantón Sigsig en la provincia del Azuay, se determinó una resistencia máxima a compresión  $f_{cp}$  para los bloques de adobe y para el mortero de adobe de 1.15 N/mm<sup>2</sup> y de 3.53 N/mm<sup>2</sup>, respectivamente.

Además, se determinan las siguientes propiedades:

Tabla 4 Propiedades elásticas del adobe y mortero de adobe (Arcentález & Pizarro, 2023)

| Propiedad                            | Adobe  | Mortero |
|--------------------------------------|--------|---------|
| Módulo de Poisson                    | 0.15   | 0.35    |
| Módulo de Young (N/mm <sup>2</sup> ) | 221.67 | 442.10  |

Las expresiones para el comportamiento elástico, esfuerzo a tensión, esfuerzo residual y deformación unitaria son tomadas el trabajo de Petracca et al. (2017) y se muestran a continuación:

$$f_{co} = \frac{f_{cp}}{5}$$

$$f_{cr} = \frac{f_{cp}}{10}$$

$$f_t = \frac{f_{cp}}{10}$$

$$e_p = 2 \cdot \frac{f_{cp}}{E}$$

Por otro lado para obtener las energía de fractura a tracción ( $G_c$ ) y compresión ( $G_t$ ), se toman las expresiones propuestas por P. B. Lourenço et al. (2007):

$$G_c = \left( \frac{f_{co}}{f_t} \right)^2 \cdot G_t$$

$$G_t = 0.073 \cdot f_t^{0.18}$$

Gracias a estas expresiones podemos obtener los valores necesarios para realizar el análisis de daño. En la Tabla 5 Propiedades mecánicas del adobe inelástico se muestran las propiedades adoptadas para modelar los bloques de adobe como para el mortero de adobe en la interfaz utilizando valores adoptados por Saguay (2023).

*Tabla 5 Propiedades mecánicas del adobe inelástico (Saguay, 2023)*

| Propiedad                       | Adobe (Bloques) | Mortero (Interfaz) | Descripción                                       |
|---------------------------------|-----------------|--------------------|---------------------------------------------------|
| <b>Masa</b>                     |                 |                    |                                                   |
| rho (kg/mm3)                    | 0               | 0                  | Densidad                                          |
| <b>Propiedades elásticas</b>    |                 |                    |                                                   |
| E (N/mm2)                       | 221.70          | 442.10             | Módulo elástico                                   |
| v                               | 0.15            | 0.30               | Módulo de Poisson                                 |
| <b>Propiedades a tensión</b>    |                 |                    |                                                   |
| $F_t$ (N/mm3)                   | 0.115           | 0.353              | Resistencia a tensión                             |
| $G_t$ (N/mm)                    | 0.003335        | 0.01024            | Energía de fractura a tensión                     |
| <b>Propiedades a compresión</b> |                 |                    |                                                   |
| $f_{co}$ (N/mm2)                | 0.23            | 1.177              | Límite elástico a compresión                      |
| $f_{cp}$ (N/mm2)                | 1.15            | 3.53               | Resistencia máxima a compresión                   |
| $f_{cr}$ (N/mm2)                | 0.115           | 0.353              | Resistencia residual a compresión                 |
| ep                              | 0.01038         | 0.01597            | Deformación a compresión en la resistencia máxima |
| $G_c$ (N/mm)                    | 1.84            | 5.648              | Energía de fractura a compresión                  |

El software STKO obtiene resultados aplicando el método de los elementos finitos, por lo que

los datos presentados en la Tabla 6 Parámetros de resolución del método de elementos finitos son necesarios para la resolución del método.

*Tabla 6 Parámetros de resolución del método de elementos finitos (Saguay, 2023)*

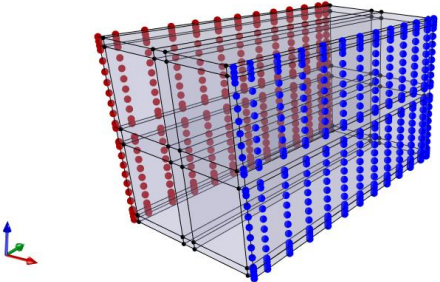
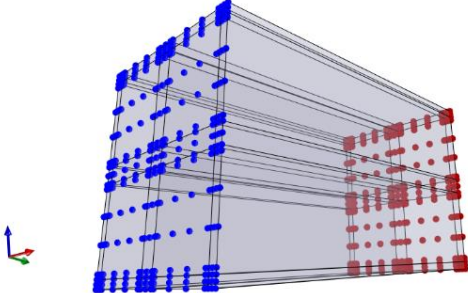
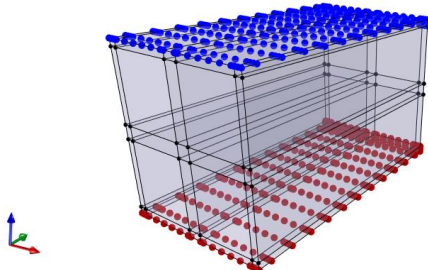
| Simbología                    | Valor   | Descripción                                                                                                                                                                               |
|-------------------------------|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| c1                            | 0.65    | Parámetro de forma de la ley de compresión                                                                                                                                                |
| c2                            | 0.5     | Parámetro de forma de la ley de compresión                                                                                                                                                |
| c3                            | 1.5     | Parámetro de forma de la ley de compresión                                                                                                                                                |
| <b>Misc</b>                   |         |                                                                                                                                                                                           |
| Surf_t                        | Rankine | Superficie a tracción: Rankine o Lubliner                                                                                                                                                 |
| Bm                            | 1.16    | Factor de resistencia compresión biaxial                                                                                                                                                  |
| m1                            | 0.16    | Factor de reducción de cortante-compresión en el rango [0, 1]                                                                                                                             |
| Kc                            | 0.66667 | Factor de forma de compresión triaxial                                                                                                                                                    |
| eta                           | 0       | Parámetro de viscosidad                                                                                                                                                                   |
| pdf_t                         | 0       | Factor de daño plástico para respuesta a tracción en el rango [0 (daño completo) ... (mixto) ... 1 (plasticidad completa)]                                                                |
| pdf_c                         | 0       | Factor de daño plástico para respuesta a compresión en el rango [0 (daño completo) ... (mixto) ... 1 (plasticidad completa)]                                                              |
| integration                   | IMPL-EX | Tipo de integración                                                                                                                                                                       |
| implexCheckError              | No      | Verificar el error IMPL-EX asegurándose de que se mantenga bajo una tolerancia definida por el usuario                                                                                    |
| implexErrorTolerance          | 0.05    | El error IMPL-EX relativo máximo permitido                                                                                                                                                |
| implexErrorTimeReductionlimit | 0.01    | El límite de reducción del paso de pseudo-tiempo bajo el cual no se realiza la verificación del error implex                                                                              |
| autoRegularization            | Si      | Las energías de fractura de entrada (Gt y Gc) se dividirán por la longitud característica del elemento, con el fin de obtener una respuesta que sea independiente del tamaño de la malla. |

### 3.3.3. Definición de las condiciones a las cuales estarán sometidos los RVE's.

Una vez definidas las propiedades indicadas en la sección anterior, se procederá a someter los modelos a desplazamientos que proporcionarán las propiedades físicas homogeneizadas necesarias para el modelo general de las fachadas de adobe. Con este objetivo, se realizarán análisis de compresión, tracción y corte. Para estos análisis, el modelo estará restringido en las tres direcciones en una de las caras del elemento. Para los ensayos de tracción y compresión, se aplicará un desplazamiento unidireccional en una de las caras del elemento, mientras que las otras caras permanecerán libres.

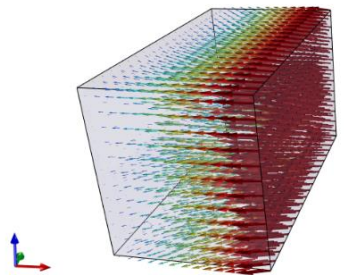
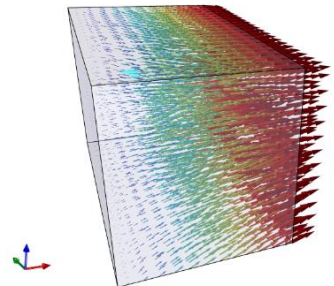
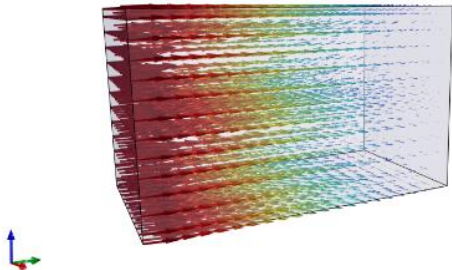
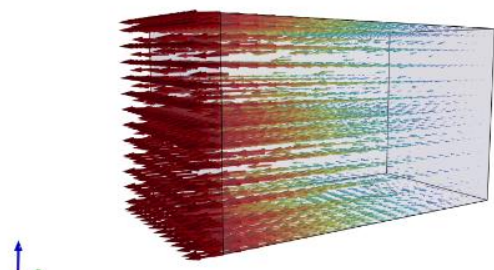
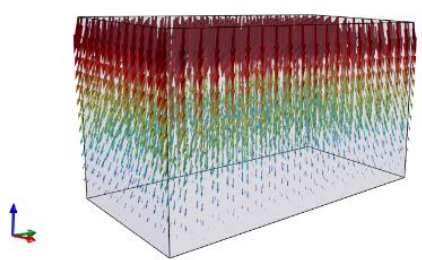
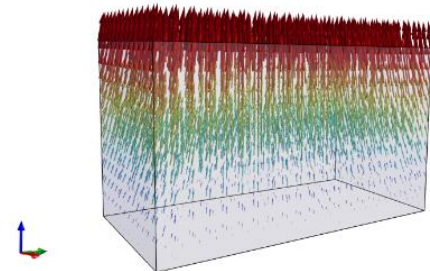
Por lo tanto, si se analiza la compresión en la dirección X se debe dejar libre el movimiento tanto en Y como en Z. Para así lograr resultados que representen tanto compresión y tracción pura. En la Tabla 7 se muestra las caras restringidas (Azul) y la cara que tendrá desplazamiento (Rojo) para el RVE del aparejo Tizón, siendo estas propiedades análogas en los demás aparejos. La cara restringida tendrá color rojo mientras la cara que se desplazará será de color azul.

*Tabla 7 Restricciones (Azul) y desplazamientos (Rojo) aplicados sobre los RVE's.*

| Dirección de análisis | Caras restringidas y con desplazamientos                                             |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| X                     |    |
| Y                     |   |
| Z                     |  |

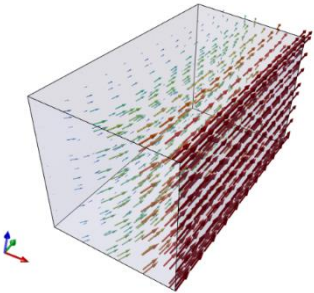
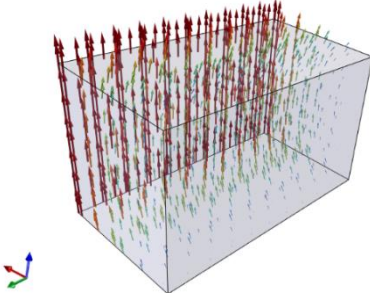
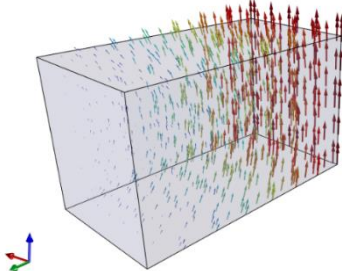
La aplicación de la carga es de tipo lineal, generando un desplazamiento en la cara opuesta de donde existe la restricción, el desplazamiento se define en milímetros y se lo coloca hasta que el modelo alcance la fluencia. Para obtener resultados óptimos se necesita aplicar una carga uniforme en una cara del modelo para esto en STKO se define que una cara tenga el mismo comportamiento de un nodo llamado “nodo maestro” en la Tabla 8 se ejemplifica el desplazamiento mediante vectores para el RVE del aparejo Tizón.

Tabla 8 Vectores de dirección de desplazamiento para ensayos de compresión y tracción

| Eje | Compresión                                                                         | Tracción                                                                            |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| X   |   |   |
| Y   |   |   |
| Z   |  |  |

De igual manera para el modelo de corte, se debe establecer restricciones en una cara y se debe liberar el movimiento en otro, pero para cortante debemos restringir el movimiento en las dos caras restantes en las que no se aplica el movimiento. La aplicación de carga y las interacciones en el modelo son las mismas lo único que cambia es la dirección del movimiento de la carga no restringida la cual se mueve en dirección del cortante que se necesite. En la Tabla 9 se puede observar de igual manera mediante vectores el desplazamiento para el RVE tipo Tizón.

Tabla 9 Dirección del desplazamiento para ensayos de corte

| Plano | Dirección del desplazamiento                                                        |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| XY    |   |
| XZ    |   |
| YZ    |  |

### 3.4. Recopilación y análisis de los resultados obtenidos de cada RVE

A continuación, se presentan los resultados de los modelos de compresión, tracción y corte realizados sobre los RVE (Elementos de Volumen Representativo) para diferentes espesores de muro de acuerdo con el eje ensayado. Las propiedades mecánicas derivadas de estos modelos son fundamentales para la comprensión y posterior modelación de las fachadas de adobe típicas de Cuenca.

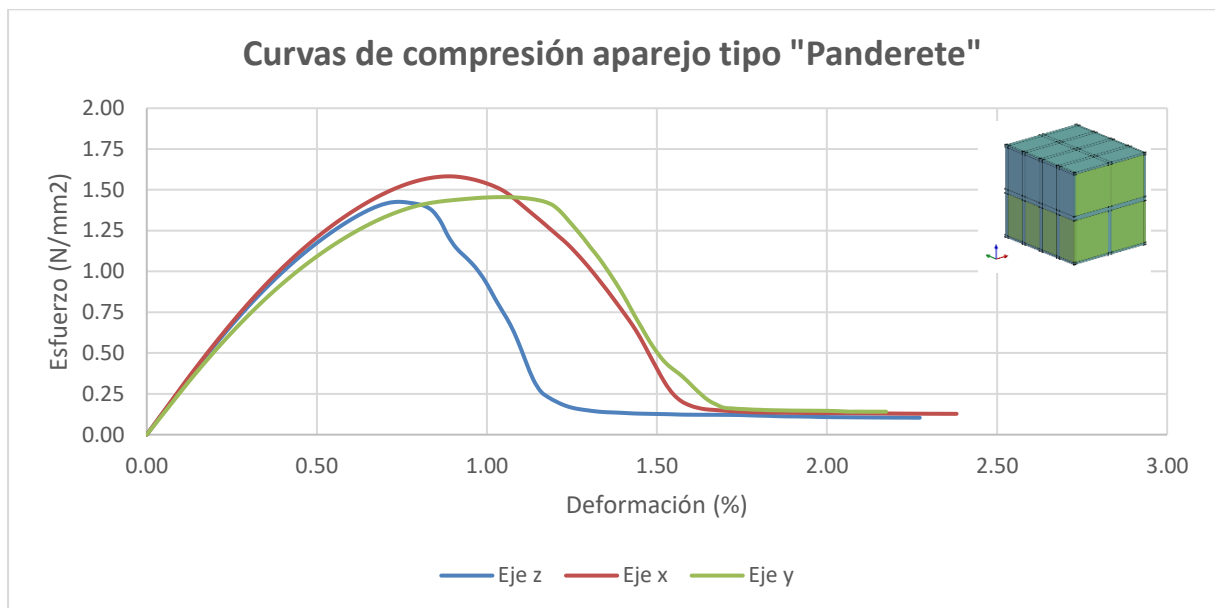
De la Figura 9 a la Figura 17 se presentan las curvas esfuerzo - deformación obtenidas para espesores de muro de 400, 420 y 460 mm, de acuerdo con la geometría permitida por la disposición de adobe y mortero. En la Figura 18 a la Figura 26 se presentan las mismas curvas para espesores de muro de 820 y 860 mm, asimismo de acuerdo con la geometría permitida por su disposición. El resumen de las propiedades mecánicas obtenidas para cada RVE se presenta de acuerdo con su aparejo en la Tabla 10 a la Tabla 27, esto corresponde a las propiedades mecánicas, desplazamiento y daño generado al momento del fallo.

Estos gráficos ilustran el comportamiento de los modelos bajo las mismas condiciones de carga, permitiendo comparar propiedades mecánicas en cada dirección de análisis. Los resultados muestran cuatro etapas: elasticidad, inelasticidad, resistencia máxima y ablandamiento. Los esfuerzos  $\sigma$  y módulos de elasticidad  $E$  se calculan de acuerdo con la expresión  $\sigma = \frac{F}{A} = E\varepsilon$ , siendo  $F$  la fuerza de reacción,  $A$  el área del plano a compresión o tracción. Los módulos de corte se calculan de acuerdo con  $G = \frac{VH}{\delta A}$ ; siendo  $V$  la fuerza cortante generada,  $H$  la altura respecto al plano ensayado,  $\delta$  la deformación en el sentido del desplazamiento y  $A$  el área del plano sometido a corte.

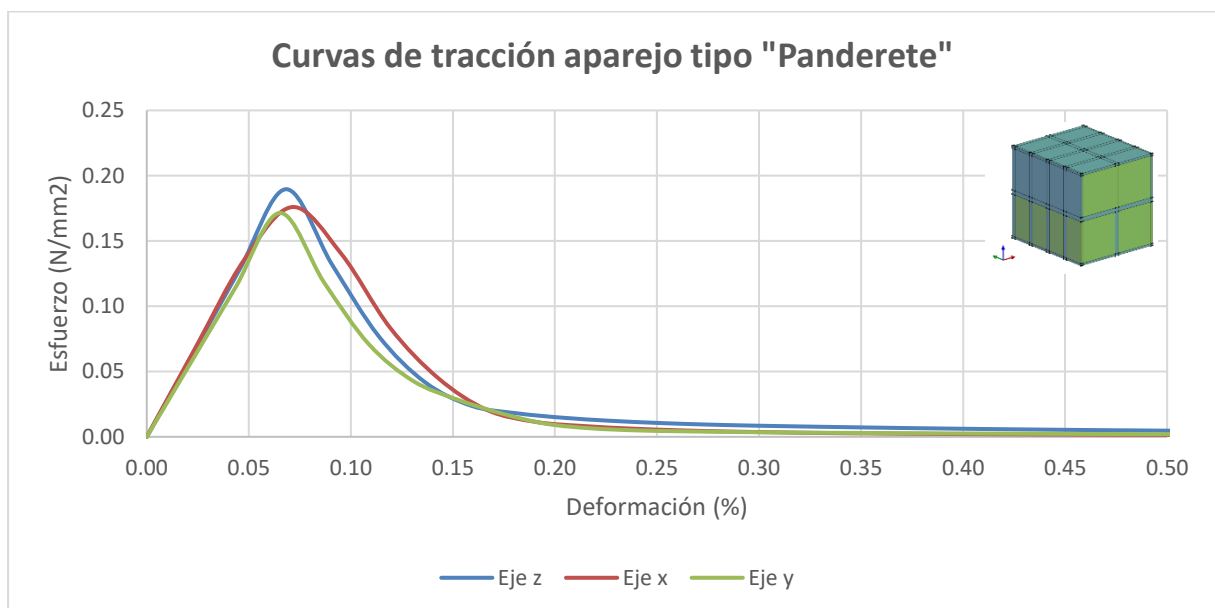


### 3.4.1. Resultados de RVE's para muros de 400 a 460 mm de espesor

- Aparejo tipo "Panderete"

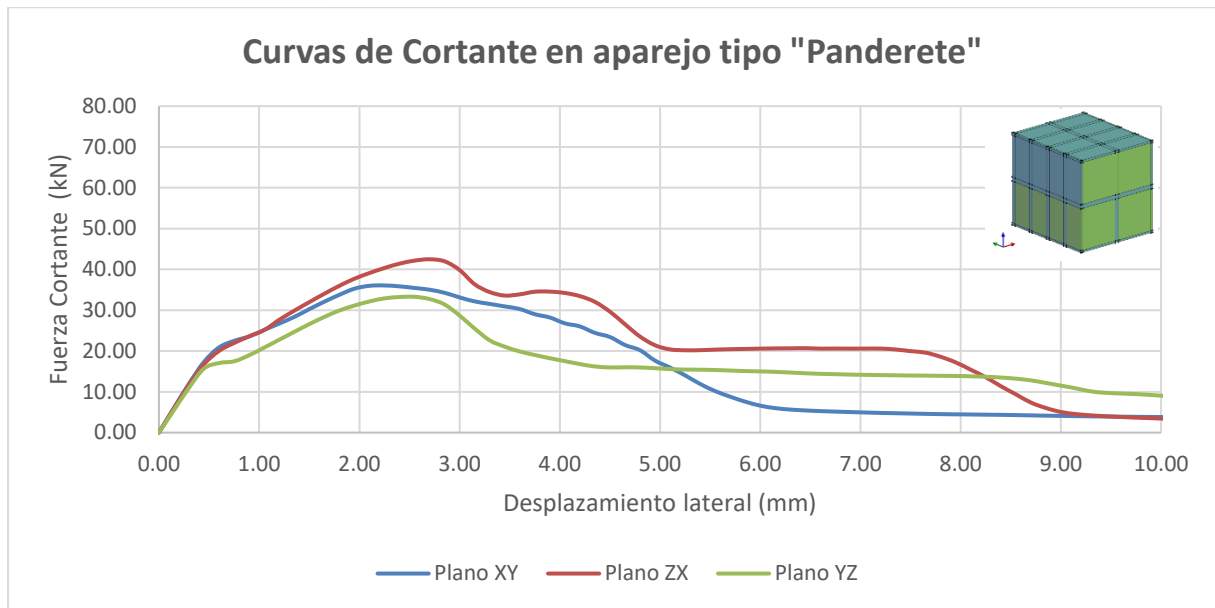


*Figura 9 Curvas compresión vs. deformación aparejo Panderete (460 mm)*



*Figura 10 Curvas tracción vs. deformación aparejo Panderete (460 mm)*





*Figura 11 Curvas cortante vs. desplazamiento lateral aparejo Panderete (460 mm)*

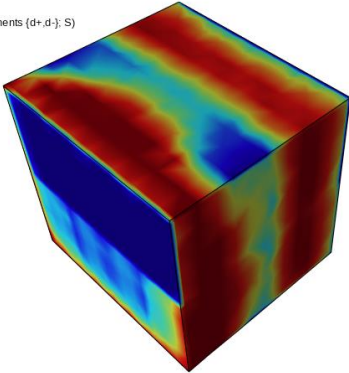
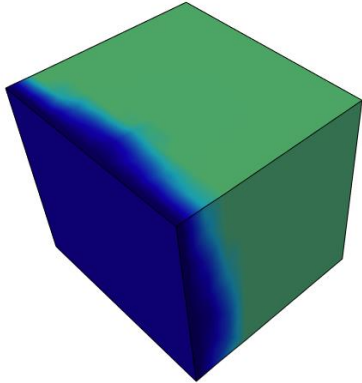
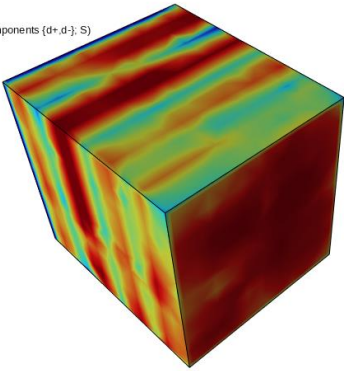
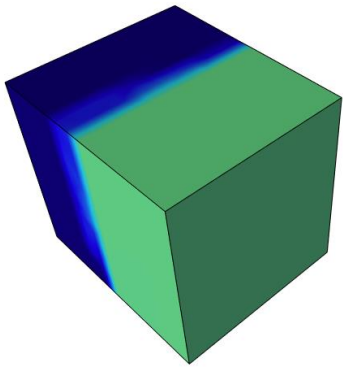
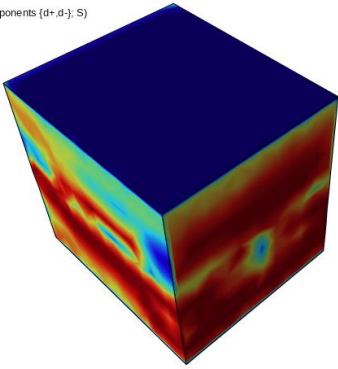
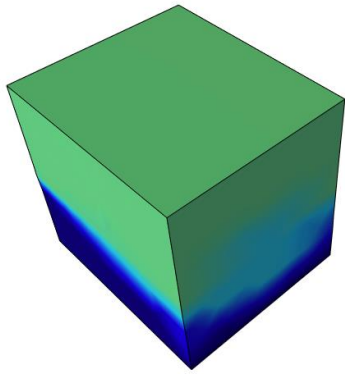
*Tabla 10 Propiedades mecánicas obtenidas aparejo Panderete (460 mm)*

| Propiedad                     | Valor  | Descripción                  |
|-------------------------------|--------|------------------------------|
| $h$ (mm)                      | 460    | Espesor de muro              |
| $E_x$ (N/mm <sup>2</sup> )    | 285.99 | Módulos de elasticidad       |
| $E_y$ (N/mm <sup>2</sup> )    | 263.07 |                              |
| $E_z$ (N/mm <sup>2</sup> )    | 281.71 |                              |
| $G_{xy}$ (N/mm)               | 80.43  | Módulos de corte             |
| $G_{zx}$ (N/mm)               | 79.01  |                              |
| $G_{yz}$ (N/mm)               | 68.68  |                              |
| $f_{cx}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 1.58   | Esfuerzo máximo a compresión |
| $f_{cy}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 1.46   |                              |
| $f_{cz}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 1.43   |                              |
| $f_{tx}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.18   | Esfuerzo máximo a tracción   |
| $f_{ty}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.17   |                              |
| $f_{tz}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.19   |                              |

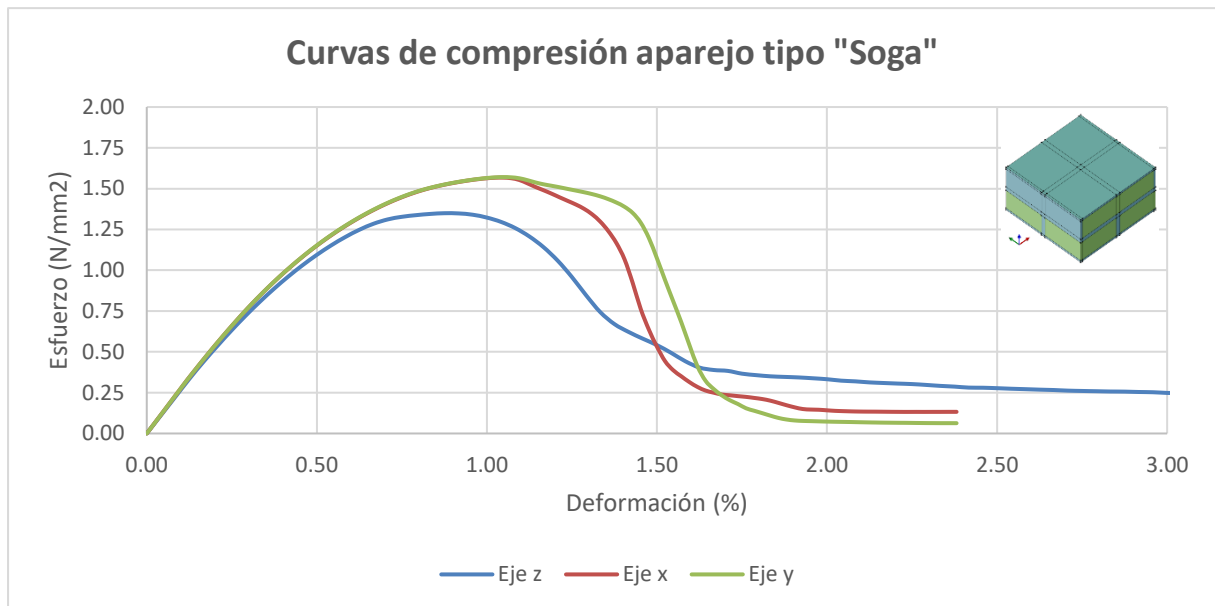
*Tabla 11 Daño y desplazamiento al ensayar el aparejo Panderete (460 mm) a compresión*

| Resultados de compresión del aparato tipo “Panderete 460 mm” |                   |                             |
|--------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------|
| Eje                                                          | Daño del Material | Desplazamiento del material |
| X                                                            |                   |                             |
| Y                                                            |                   |                             |
| Z                                                            |                   |                             |

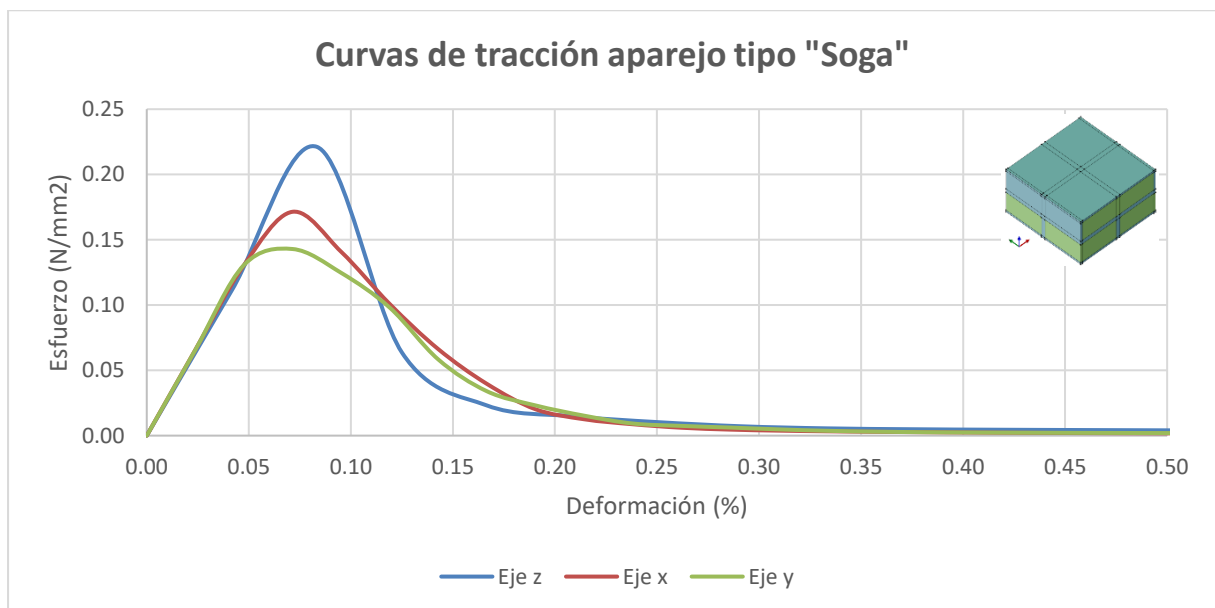
Tabla 12 Daño y desplazamiento al ensayar el aparejo Panderete (460 mm) a tracción

| Resultados de tracción del aparejo tipo “Panderete 460 mm” |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Eje                                                        | Daño del Material                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Desplazamiento del material                                                                                                                                                                                                                                           |
| X                                                          | <div><div>material damage (2 Components {d+, d-}; S)</div><div>d+</div><div><div>1</div><div>0.875</div><div>0.75</div><div>0.625</div><div>0.5</div><div>0.375</div><div>0.25</div><div>0.125</div><div>0</div></div></div>   | <div><div>Displacement Magnitude</div><div><div>20</div><div>17.5</div><div>15</div><div>12.5</div><div>10</div><div>7.5</div><div>5</div><div>2.5</div><div>0</div></div></div>   |
| Y                                                          | <div><div>material damage (2 Components {d+, d-}; S)</div><div>d+</div><div><div>1</div><div>0.875</div><div>0.75</div><div>0.625</div><div>0.5</div><div>0.375</div><div>0.25</div><div>0.125</div><div>0</div></div></div>  | <div><div>Displacement Magnitude</div><div><div>20</div><div>17.5</div><div>15</div><div>12.5</div><div>10</div><div>7.5</div><div>5</div><div>2.5</div><div>0</div></div></div>  |
| Z                                                          | <div><div>material damage (2 Components {d+, d-}; S)</div><div>d+</div><div><div>1</div><div>0.875</div><div>0.75</div><div>0.625</div><div>0.5</div><div>0.375</div><div>0.25</div><div>0.125</div><div>0</div></div></div> | <div><div>Displacement Magnitude</div><div><div>20</div><div>17.5</div><div>15</div><div>12.5</div><div>10</div><div>7.5</div><div>5</div><div>2.5</div><div>0</div></div></div> |

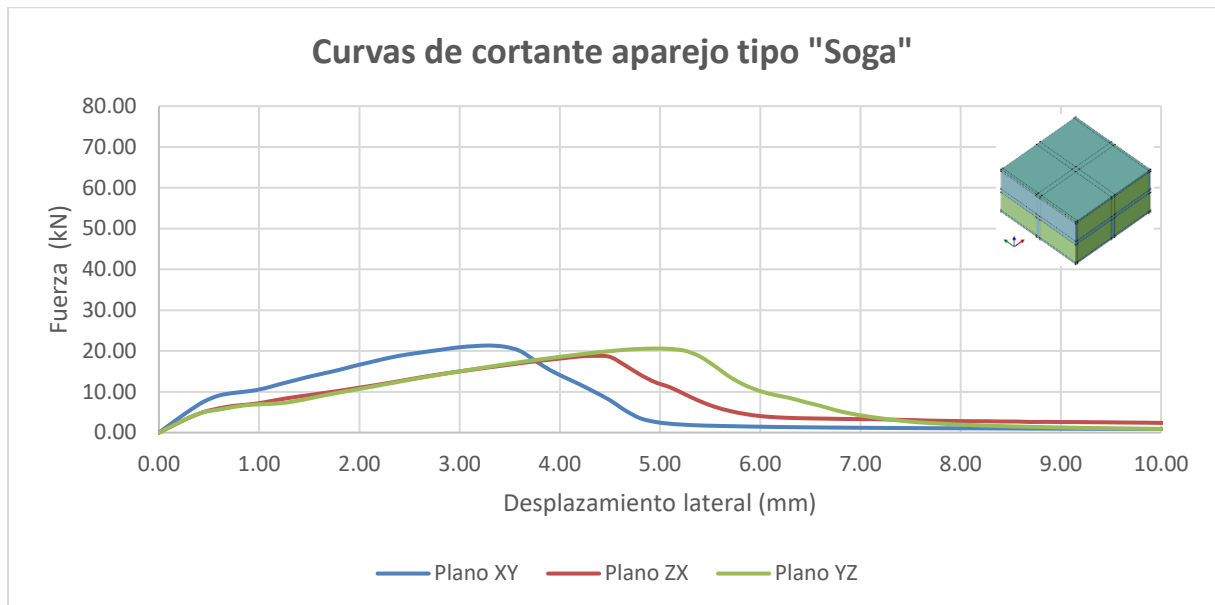
- Aparejo tipo "Soga"



*Figura 12 Curvas compresión vs. deformación aparejo Soga (420 mm)*



*Figura 13 Curvas tracción vs. deformación aparejo Soga (420 mm)*



*Figura 14 Curvas cortante vs. desplazamiento lateral aparejo Soga (420 mm)*

*Tabla 13 Propiedades mecánicas obtenidas aparejo Soga (420 mm)*

| Propiedad                     | Valor  | Descripción                  |
|-------------------------------|--------|------------------------------|
| h (mm)                        | 420    | Espesor de muro              |
| $E_x$ (N/mm <sup>2</sup> )    | 276.26 | Módulos de elasticidad       |
| $E_y$ (N/mm <sup>2</sup> )    | 276.01 |                              |
| $E_z$ (N/mm <sup>2</sup> )    | 267.09 |                              |
| $G_{xy}$ (N/mm)               | 78.59  | Módulos de corte             |
| $G_{zx}$ (N/mm)               | 53.76  |                              |
| $G_{yz}$ (N/mm)               | 98.30  |                              |
| $f_{cx}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 1.57   | Esfuerzo máximo a compresión |
| $f_{cy}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 1.57   |                              |
| $f_{cz}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 1.35   |                              |
| $f_{tx}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.17   | Esfuerzo máximo a tracción   |
| $f_{ty}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.14   |                              |
| $f_{tz}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.22   |                              |

Tabla 14 Daño y desplazamiento al ensayar el aparejo Soga (420 mm) a compresión

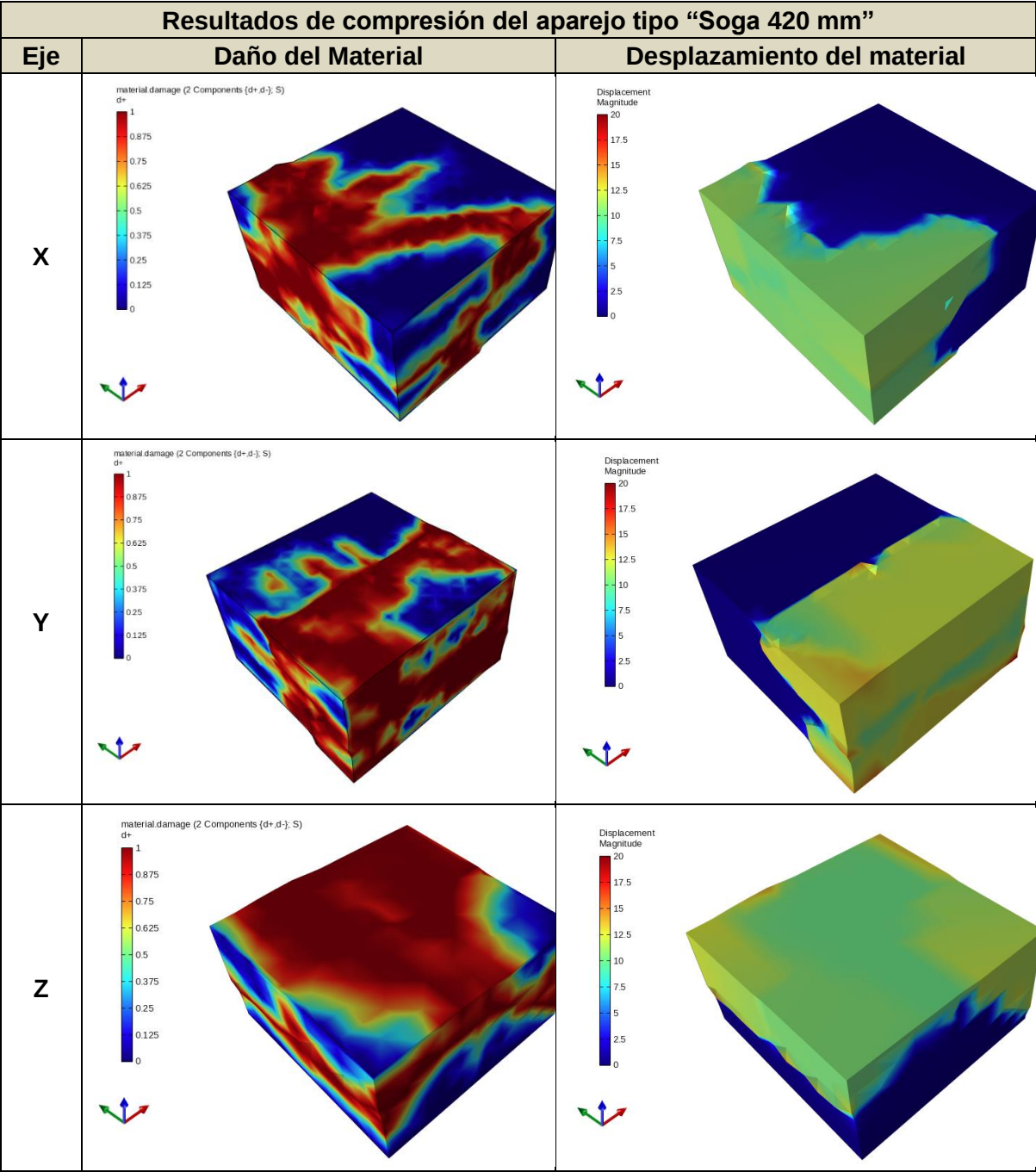
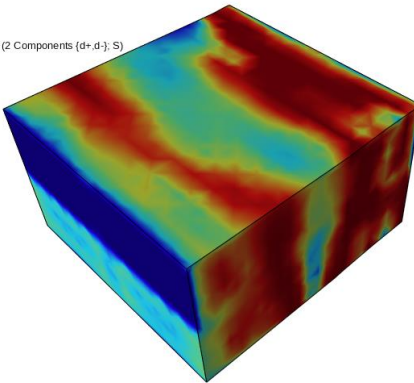
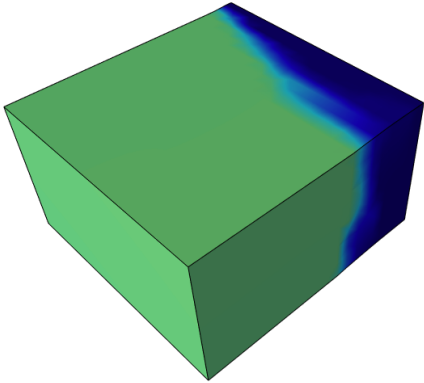
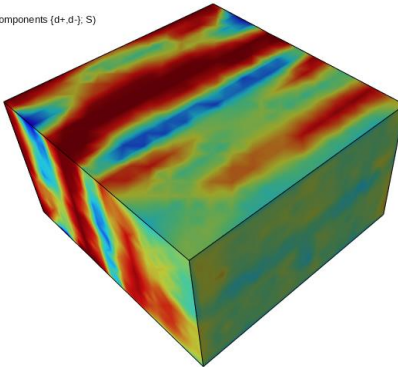
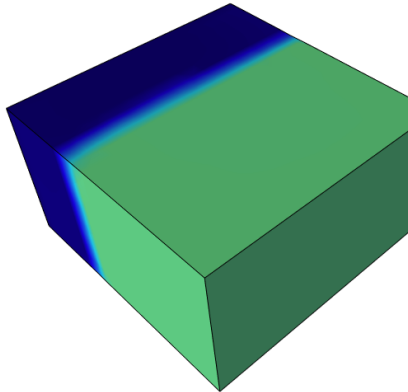
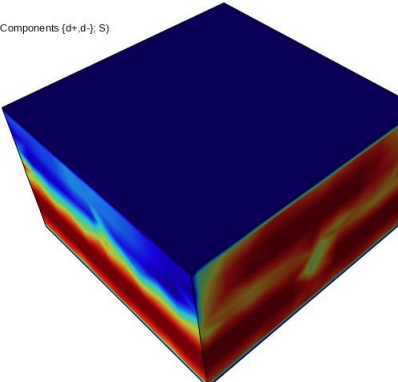
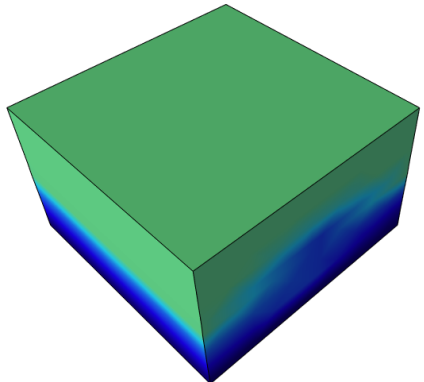


Tabla 15 Daño y desplazamiento al ensayar el aparejo Soga (420 mm) a tracción

| Resultados de tracción del aparejo tipo “Soga 420 mm” |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Eje                                                   | Daño del Material                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Desplazamiento del material                                                                                                                                                                                                                                          |
| X                                                     | <div><div>material damage (2 Components {d+,d-}; S)</div><div>d+</div><div><div>1</div><div>0.875</div><div>0.75</div><div>0.625</div><div>0.5</div><div>0.375</div><div>0.25</div><div>0.125</div><div>0</div></div></div>   | <div><div>Displacement Magnitude</div><div><div>20</div><div>17.5</div><div>15</div><div>12.5</div><div>10</div><div>7.5</div><div>5</div><div>2.5</div><div>0</div></div></div>   |
| Y                                                     | <div><div>material damage (2 Components {d+,d-}; S)</div><div>d+</div><div><div>1</div><div>0.875</div><div>0.75</div><div>0.625</div><div>0.5</div><div>0.375</div><div>0.25</div><div>0.125</div><div>0</div></div></div>  | <div><div>Displacement Magnitude</div><div><div>20</div><div>17.5</div><div>15</div><div>12.5</div><div>10</div><div>7.5</div><div>5</div><div>2.5</div><div>0</div></div></div>  |
| Z                                                     | <div><div>material damage (2 Components {d+,d-}; S)</div><div>d+</div><div><div>1</div><div>0.875</div><div>0.75</div><div>0.625</div><div>0.5</div><div>0.375</div><div>0.25</div><div>0.125</div><div>0</div></div></div> | <div><div>Displacement Magnitude</div><div><div>20</div><div>17.5</div><div>15</div><div>12.5</div><div>10</div><div>7.5</div><div>5</div><div>2.5</div><div>0</div></div></div> |



- Aparejo tipo "Tizón"

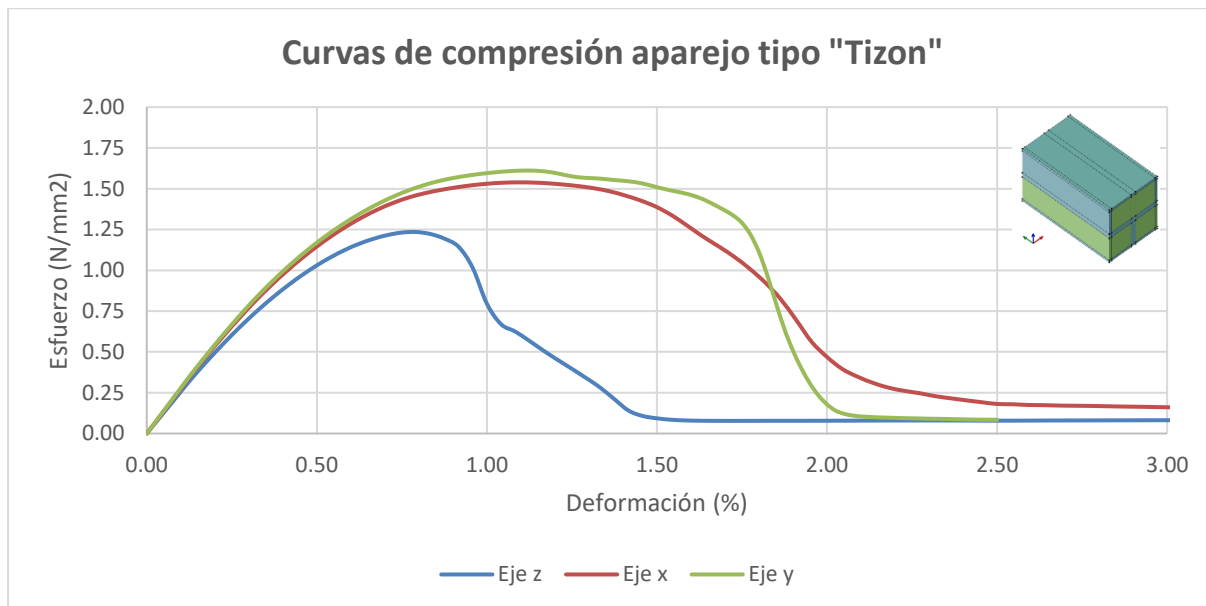


Figura 15 Curvas compresión vs. deformación aparejo Tizón (400 mm)

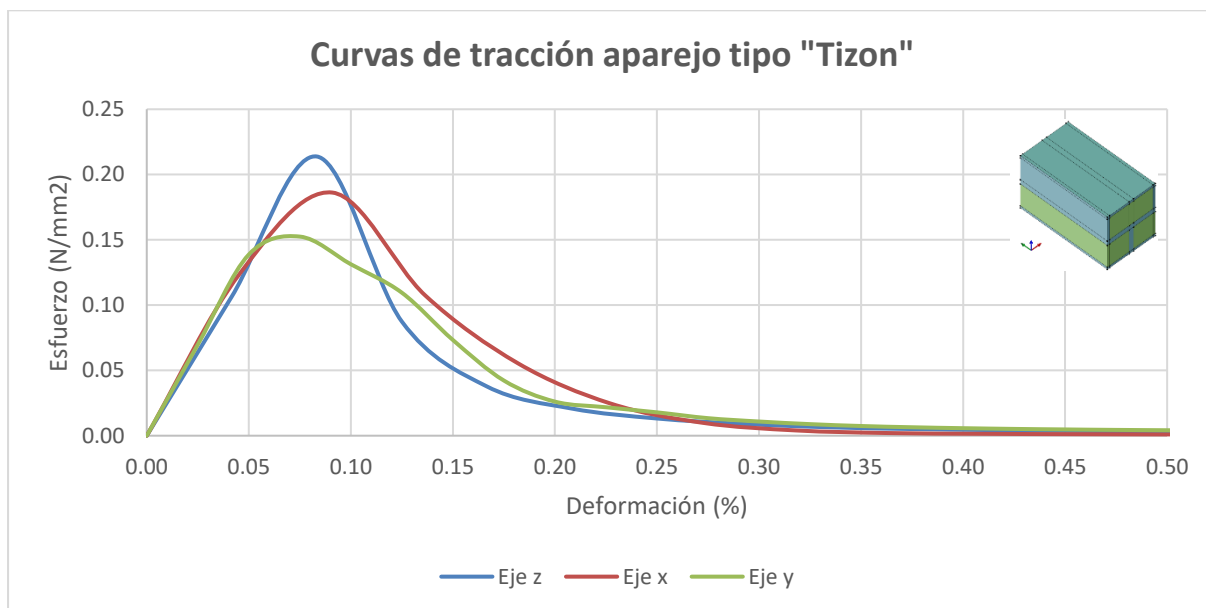
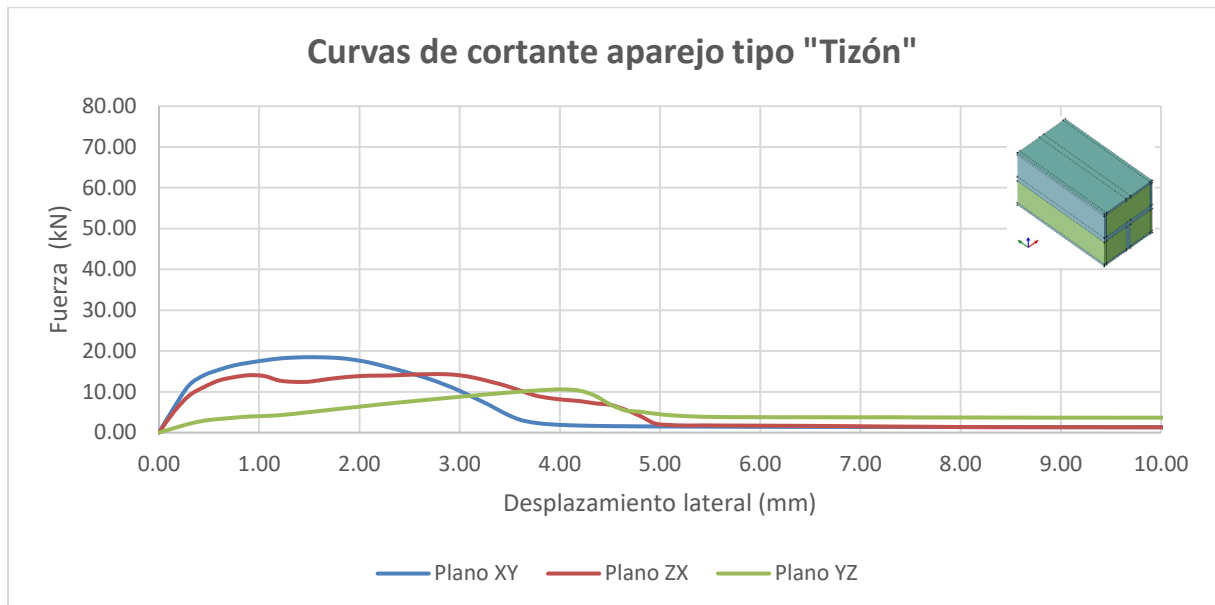


Figura 16 Curvas tracción vs. deformación aparejo Tizón (400 mm)





*Figura 17 Curvas cortante vs. desplazamiento lateral aparejo Tizón (400 mm)*

*Tabla 16 Propiedades mecánicas obtenidas aparejo Tizón (400 mm)*

| Propiedad                     | Valor  | Descripción                  |
|-------------------------------|--------|------------------------------|
| h (mm)                        | 400    | Espesor de muro              |
| $E_x$ (N/mm <sup>2</sup> )    | 274.26 | Módulos de elasticidad       |
| $E_y$ (N/mm <sup>2</sup> )    | 278.97 |                              |
| $E_z$ (N/mm <sup>2</sup> )    | 255.83 |                              |
| $G_{xy}$ (N/mm)               | 93.54  | Módulos de corte             |
| $G_{zx}$ (N/mm)               | 78.06  |                              |
| $G_{yz}$ (N/mm)               | 54.63  |                              |
| $f_{cx}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 1.54   | Esfuerzo máximo a compresión |
| $f_{cy}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 1.61   |                              |
| $f_{cz}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 1.23   |                              |
| $f_{tx}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.19   | Esfuerzo máximo a tracción   |
| $f_{ty}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.15   |                              |
| $f_{tz}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.21   |                              |

Tabla 17 Daño y desplazamiento al ensayar el aparejo Tizón (400 mm) a compresión

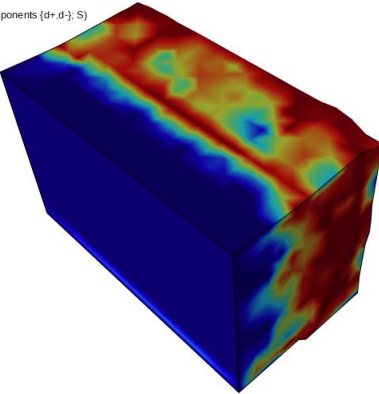
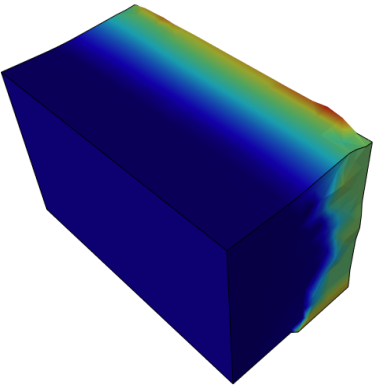
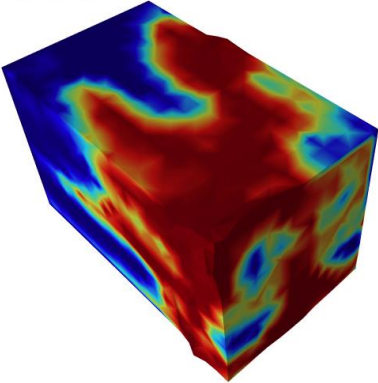
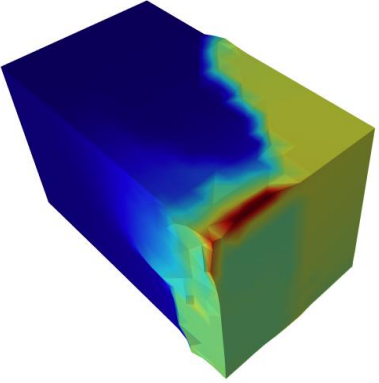
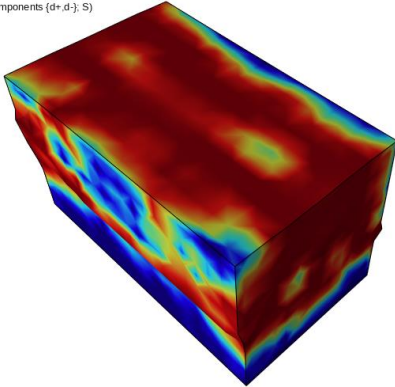
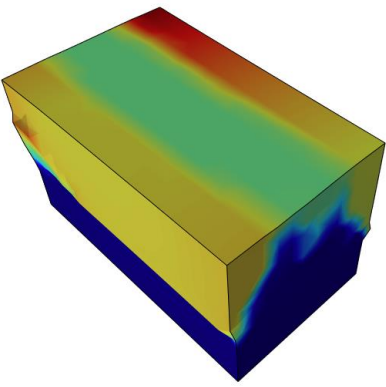
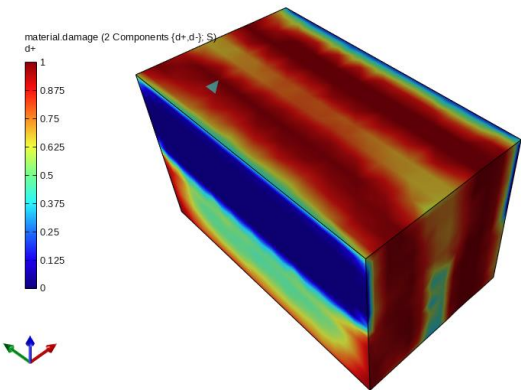
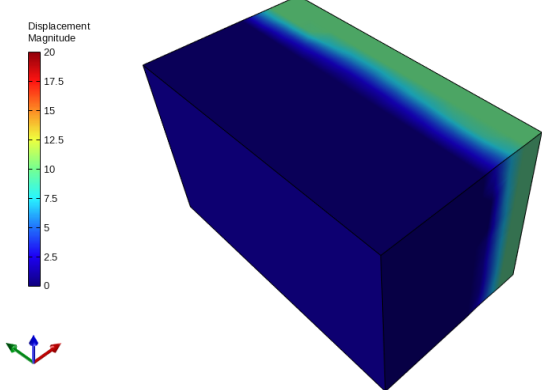
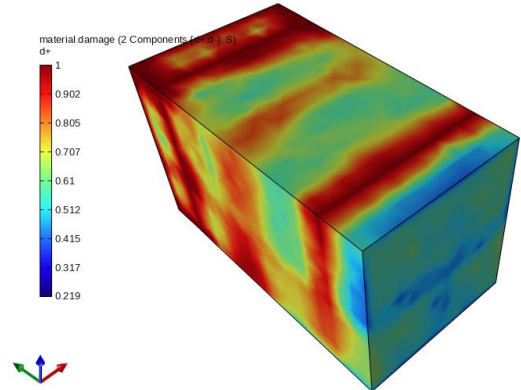
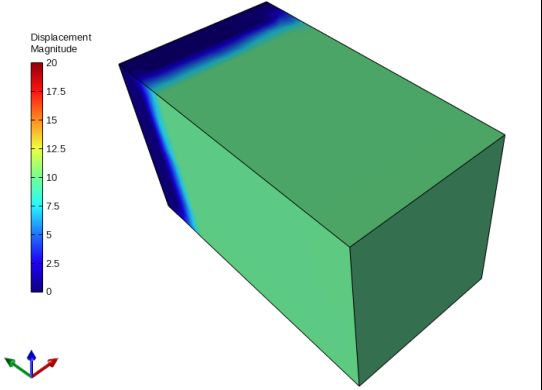
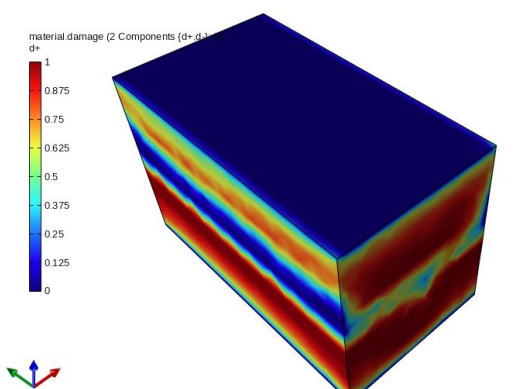
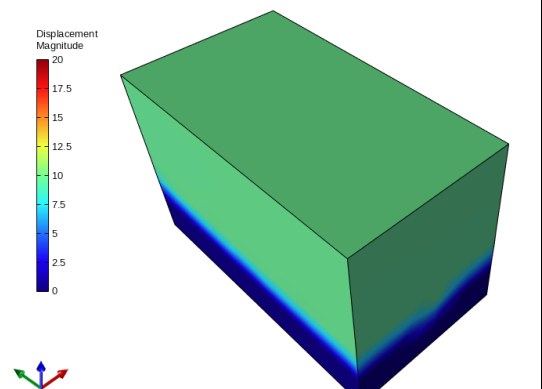
| Resultados de compresión del aparejo tipo “Tizón 400 mm” |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Eje                                                      | Daño del Material                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Desplazamiento del material                                                                                                                                                                                                                                           |
| X                                                        | <div><div>material damage (2 Components {d+, d-}; S)</div><div>d+</div><div><div>1</div><div>0.875</div><div>0.75</div><div>0.625</div><div>0.5</div><div>0.375</div><div>0.25</div><div>0.125</div><div>0</div></div></div>   | <div><div>Displacement Magnitude</div><div>20</div><div><div>17.5</div><div>15</div><div>12.5</div><div>10</div><div>7.5</div><div>5</div><div>2.5</div><div>0</div></div></div>   |
| Y                                                        | <div><div>material damage (2 Components {d+, d-}; S)</div><div>d+</div><div><div>1</div><div>0.875</div><div>0.75</div><div>0.625</div><div>0.5</div><div>0.375</div><div>0.25</div><div>0.125</div><div>0</div></div></div>  | <div><div>Displacement Magnitude</div><div>20</div><div><div>17.5</div><div>15</div><div>12.5</div><div>10</div><div>7.5</div><div>5</div><div>2.5</div><div>0</div></div></div>   |
| Z                                                        | <div><div>material damage (2 Components {d+, d-}; S)</div><div>d+</div><div><div>1</div><div>0.875</div><div>0.75</div><div>0.625</div><div>0.5</div><div>0.375</div><div>0.25</div><div>0.125</div><div>0</div></div></div> | <div><div>Displacement Magnitude</div><div>20</div><div><div>17.5</div><div>15</div><div>12.5</div><div>10</div><div>7.5</div><div>5</div><div>2.5</div><div>0</div></div></div> |

Tabla 18 Daño y desplazamiento al ensayar el aparejo Tizón (400 mm) a tracción

| Resultados de tracción del aparejo tipo “Tizón 400 mm” |                                                                                     |                                                                                      |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Eje                                                    | Daño del Material                                                                   | Desplazamiento del material                                                          |
| X                                                      |    |    |
| Y                                                      |   |   |
| Z                                                      |  |  |

### 3.4.2. Resultados de RVE's para muros de 820 a 860 mm de espesor

- Aparejo tipo "Panderete"

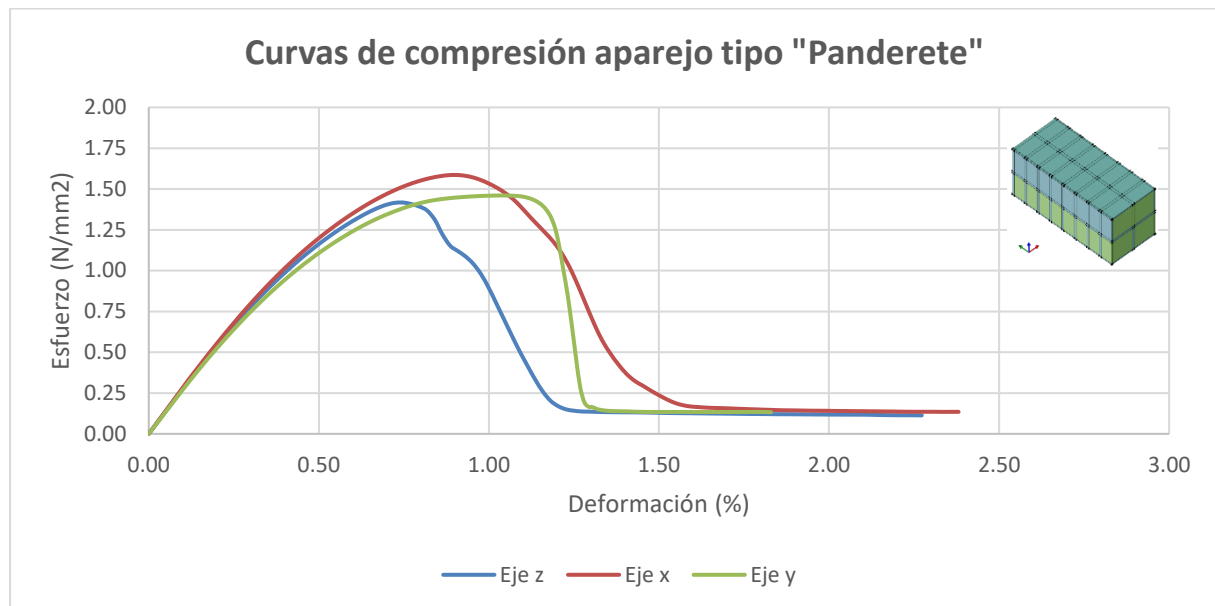


Figura 18 Curvas compresión vs. deformación aparejo Panderete (820 mm)

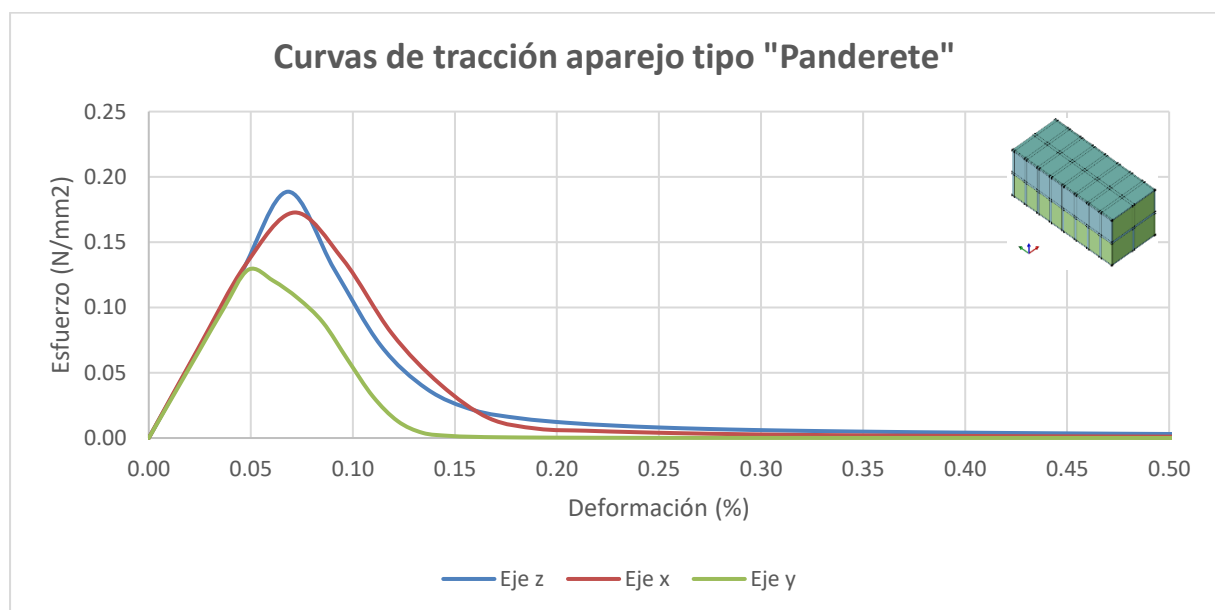
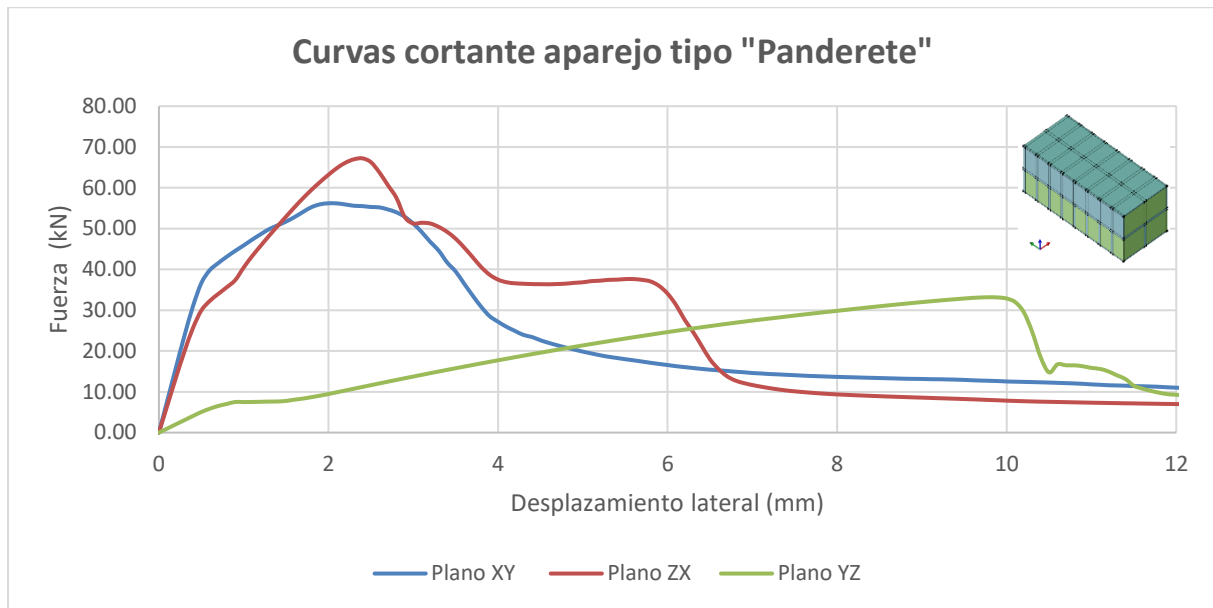


Figura 19 Curvas tracción vs. deformación aparejo Panderete (820 mm)



*Figura 20 Curvas cortante vs. desplazamiento lateral aparejo Panderete (820 mm)*

*Tabla 19 Propiedades mecánicas obtenidas aparejo Panderete (820 mm)*

| Propiedad                     | Valor  | Descripción                  |
|-------------------------------|--------|------------------------------|
| h (mm)                        | 820    | Espesor de muro              |
| $E_x$ (N/mm <sup>2</sup> )    | 283.25 | Módulos de elasticidad       |
| $E_y$ (N/mm <sup>2</sup> )    | 270.34 |                              |
| $E_z$ (N/mm <sup>2</sup> )    | 278.76 |                              |
| $G_{xy}$ (N/mm)               | 92.63  | Módulos de corte             |
| $G_{zx}$ (N/mm)               | 78.13  |                              |
| $G_{yz}$ (N/mm)               | 45.05  |                              |
| $f_{cx}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 1.59   | Esfuerzo máximo a compresión |
| $f_{cy}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 1.46   |                              |
| $f_{cz}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 1.42   |                              |
| $f_{tx}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.17   | Esfuerzo máximo a tracción   |
| $f_{ty}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.13   |                              |
| $f_{tz}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.19   |                              |

Tabla 20 Daño y desplazamiento al ensayar el aparejo Panderete (820 mm) a compresión

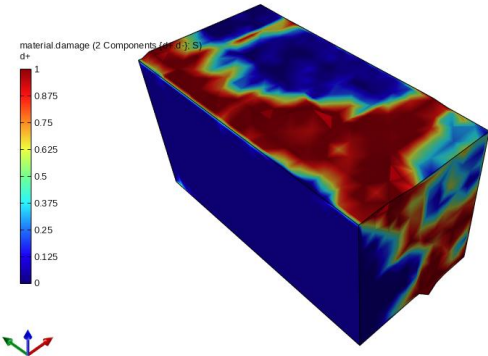
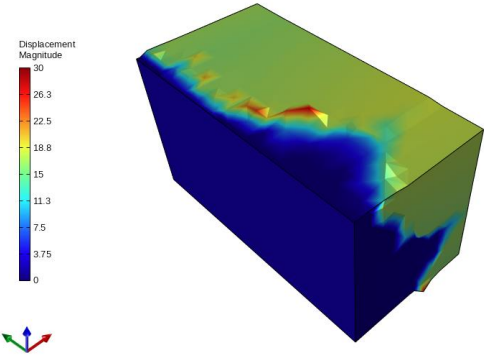
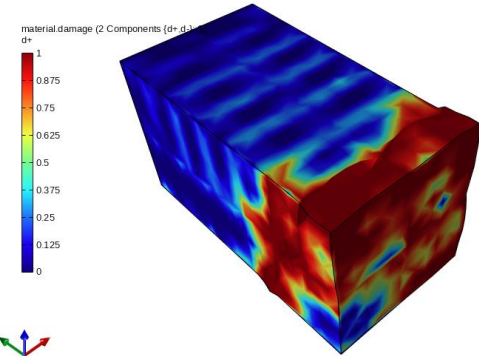
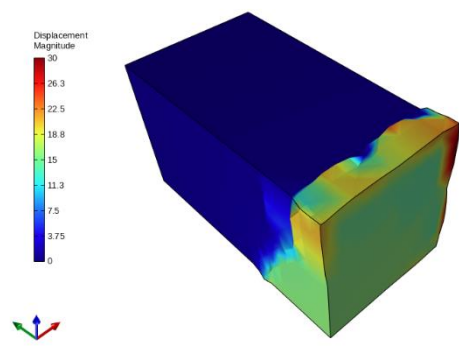
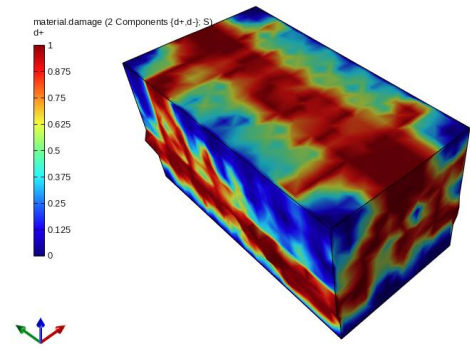
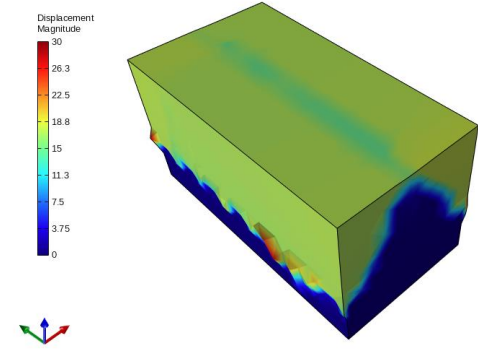
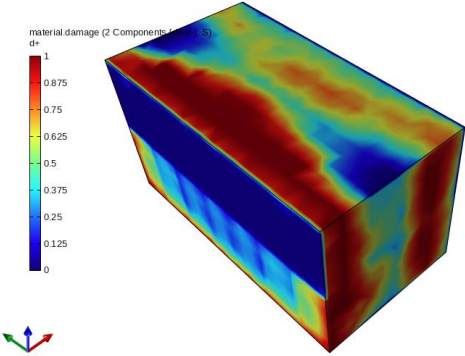
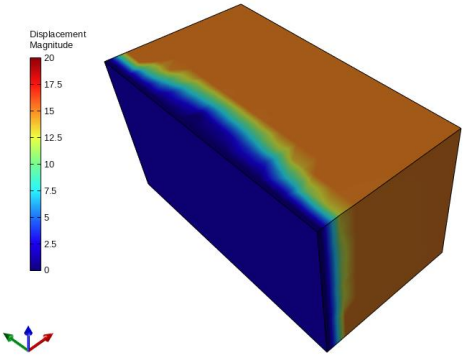
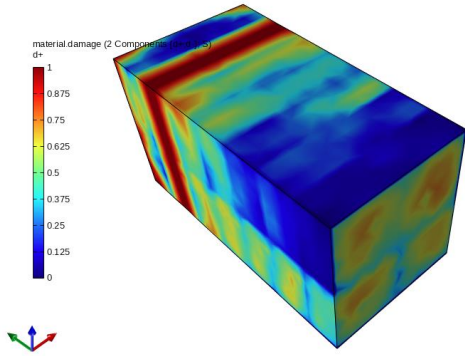
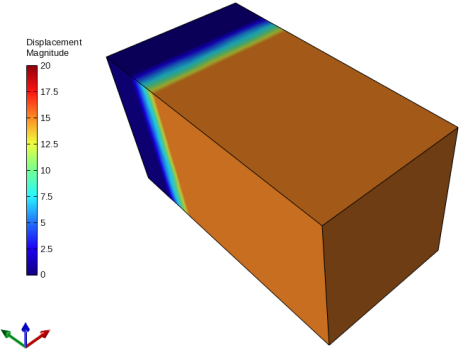
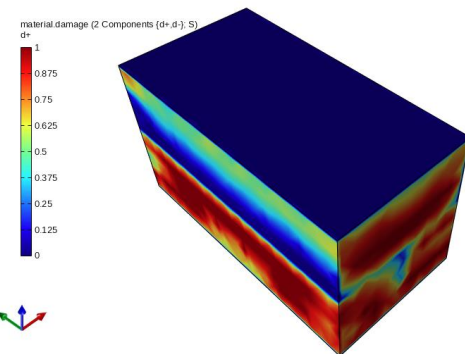
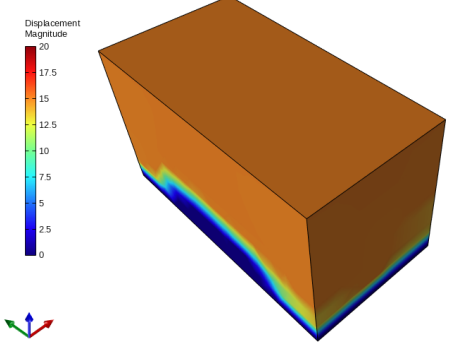
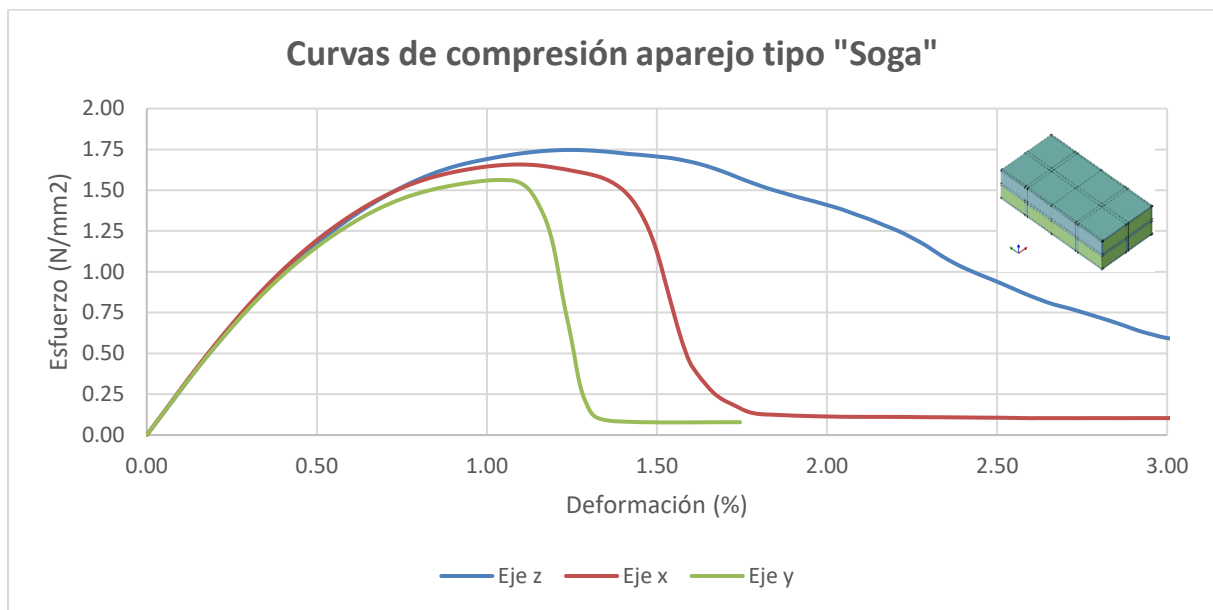
| Resultados de compresión del aparejo tipo “Panderete 820 mm” |                                                                                     |                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Eje                                                          | Daño del Material                                                                   | Desplazamiento del material                                                          |
| X                                                            |    |    |
| Y                                                            |   |   |
| Z                                                            |  |  |

Tabla 21 Daño y desplazamiento al ensayar el aparejo Panderete (820 mm) a tracción

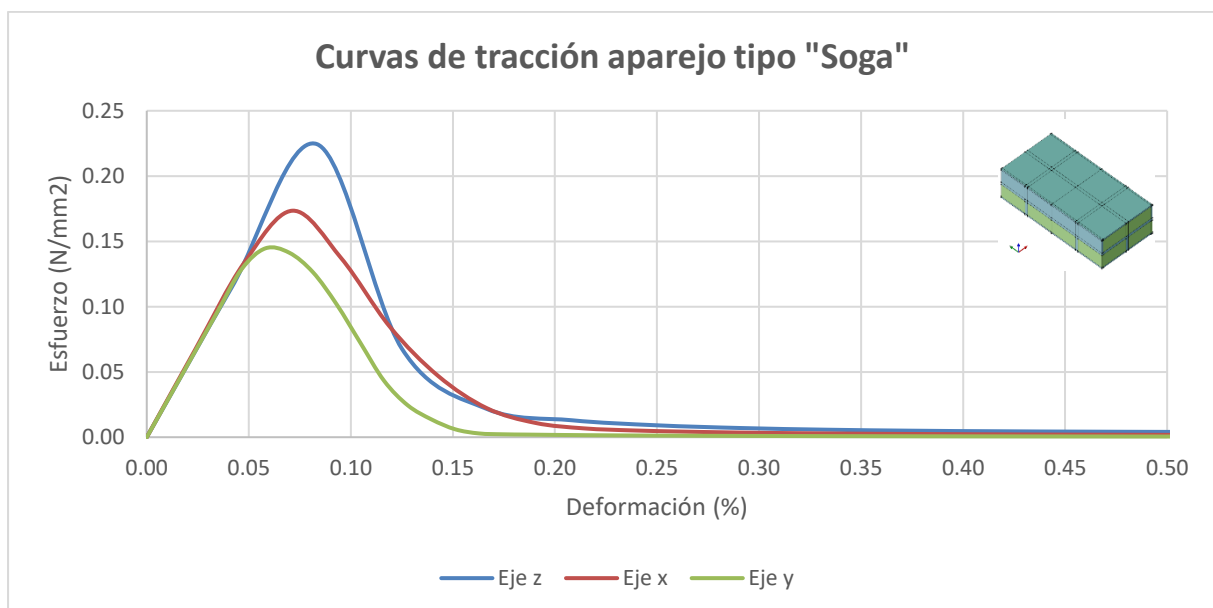
| Resultados de tracción del aparejo tipo “Panderete 820 mm” |                                                                                     |                                                                                      |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Eje                                                        | Daño del Material                                                                   | Desplazamiento del material                                                          |
| X                                                          |    |    |
| Y                                                          |   |   |
| Z                                                          |  |  |



- Aparejo tipo "Soga"

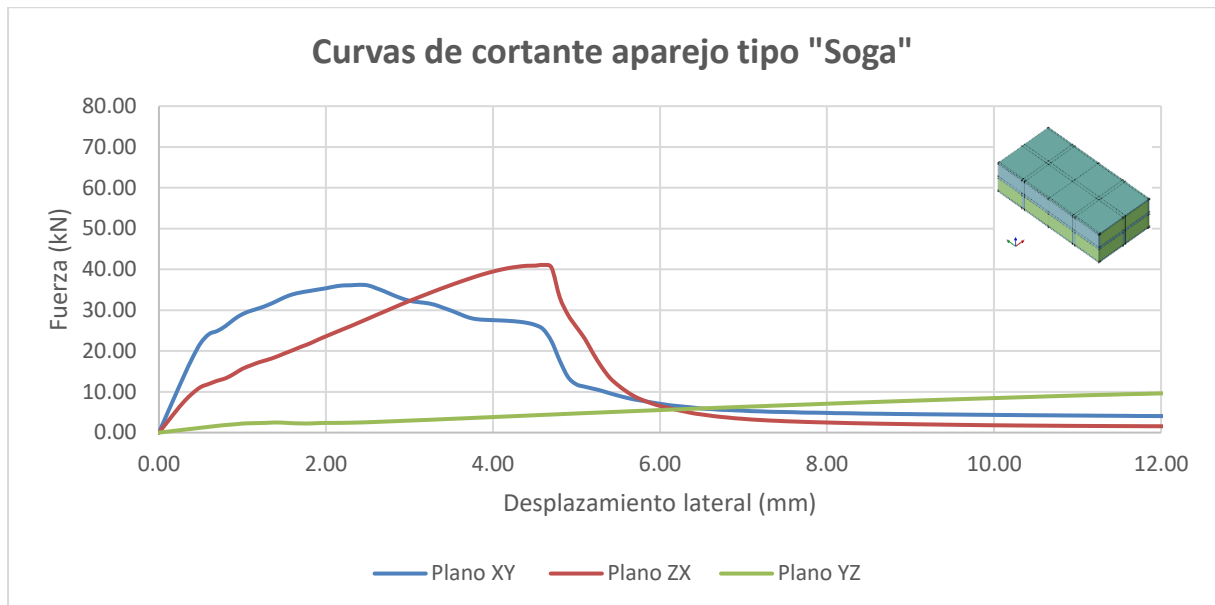


*Figura 21 Curvas compresión vs. deformación aparejo Soga (860 mm)*



*Figura 22 Curvas tracción vs. deformación aparejo Soga (860 mm)*





*Figura 23 Curvas cortante vs. desplazamiento lateral aparejo Soga (860 mm)*

*Tabla 22 Propiedades mecánicas obtenidas aparejo Soga (860 mm)*

| Propiedad                     | Valor  | Descripción                  |
|-------------------------------|--------|------------------------------|
| $h$ (mm)                      | 860    | Espesor de muro              |
| $E_x$ (N/mm <sup>2</sup> )    | 282.82 | Módulos de elasticidad       |
| $E_y$ (N/mm <sup>2</sup> )    | 277.49 |                              |
| $E_z$ (N/mm <sup>2</sup> )    | 275.67 |                              |
| $G_{xy}$ (N/mm)               | 95.14  | Módulos de corte             |
| $G_{zx}$ (N/mm)               | 52.49  |                              |
| $G_{yz}$ (N/mm)               | 20.18  |                              |
| $f_{cx}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 1.66   | Esfuerzo máximo a compresión |
| $f_{cy}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 1.56   |                              |
| $f_{cz}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 1.75   |                              |
| $f_{tx}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.17   | Esfuerzo máximo a tracción   |
| $f_{ty}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.14   |                              |
| $f_{tz}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.22   |                              |

Tabla 23 Daño y desplazamiento al ensayar el aparejo Soga (860 mm) a compresión

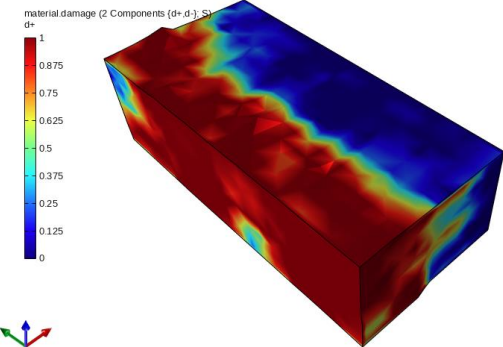
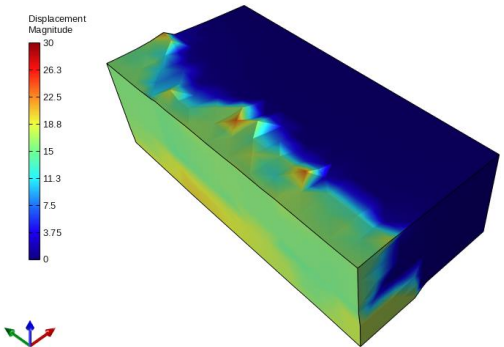
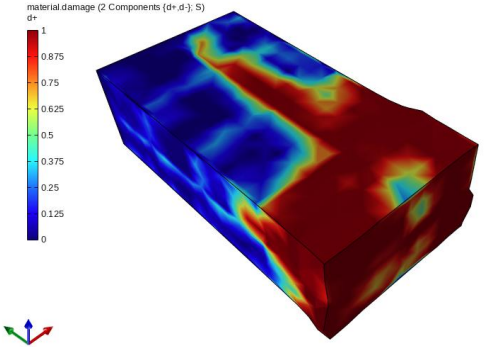
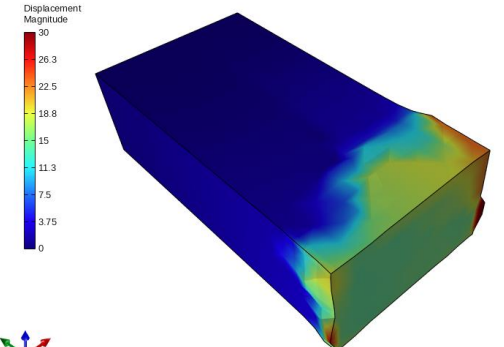
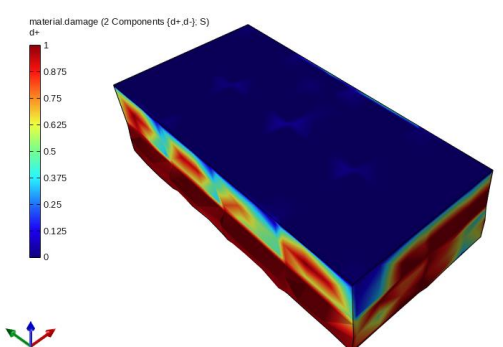
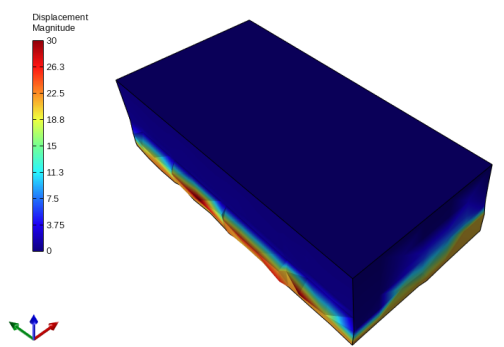
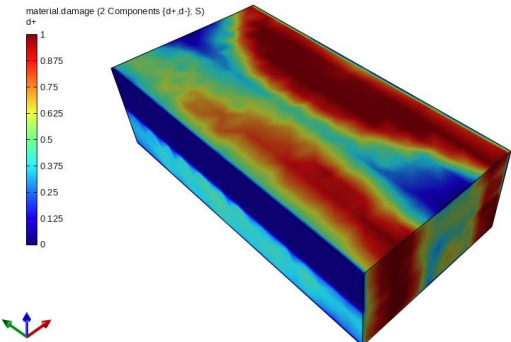
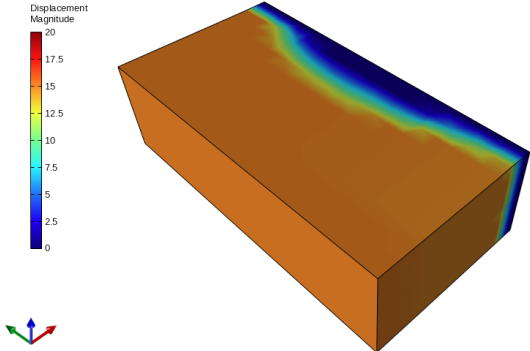
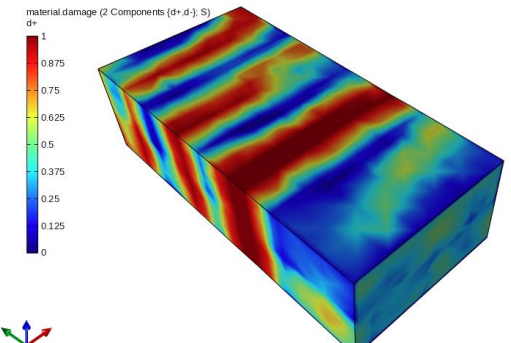
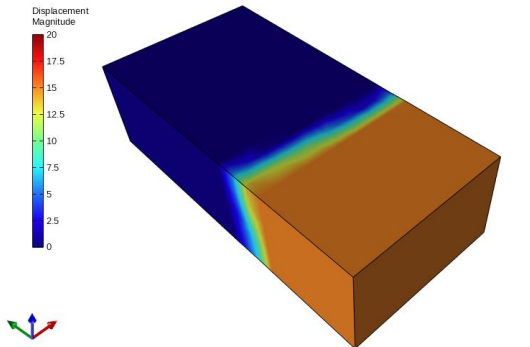
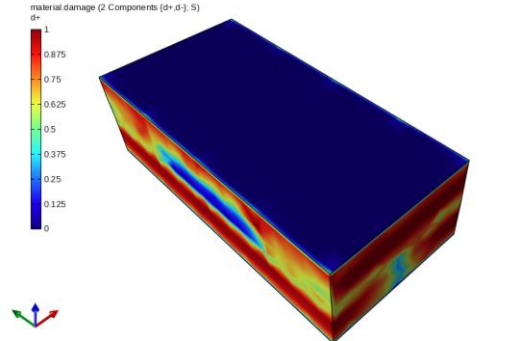
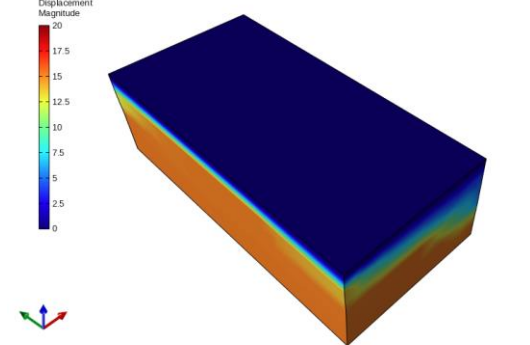
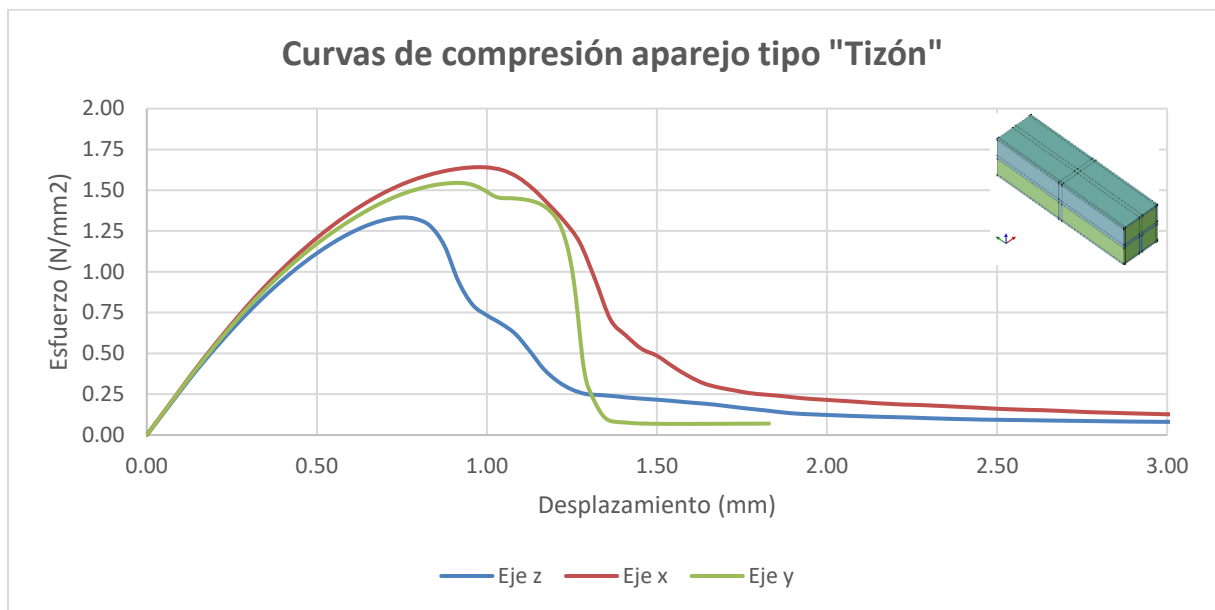
| Resultados de compresión del aparejo tipo “Soga 860 mm” |                                                                                     |                                                                                      |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Eje                                                     | Daño del Material                                                                   | Desplazamiento del material                                                          |
| X                                                       |    |    |
| Y                                                       |   |   |
| Z                                                       |  |  |

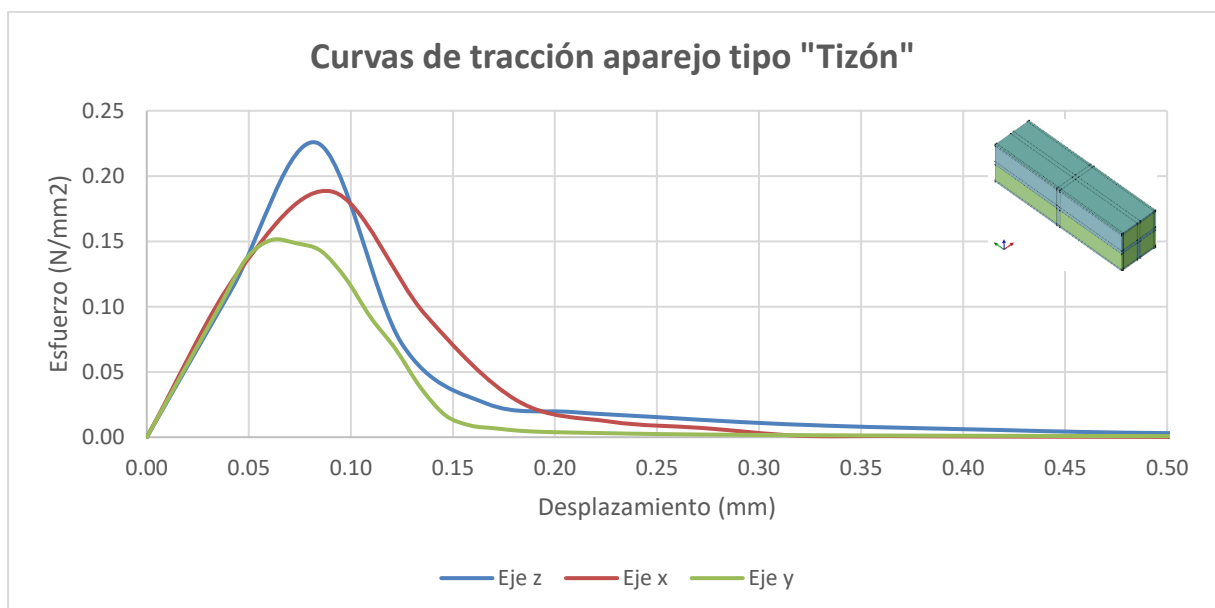
Tabla 24 Daño y desplazamiento al ensayar el aparejo Soga (860 mm) a tracción

| Resultados de tracción del aparejo tipo “Soga 860 mm” |                                                                                     |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Eje                                                   | Daño del Material                                                                   | Desplazamiento del material                                                          |
| X                                                     |    |    |
| Y                                                     |   |   |
| Z                                                     |  |  |

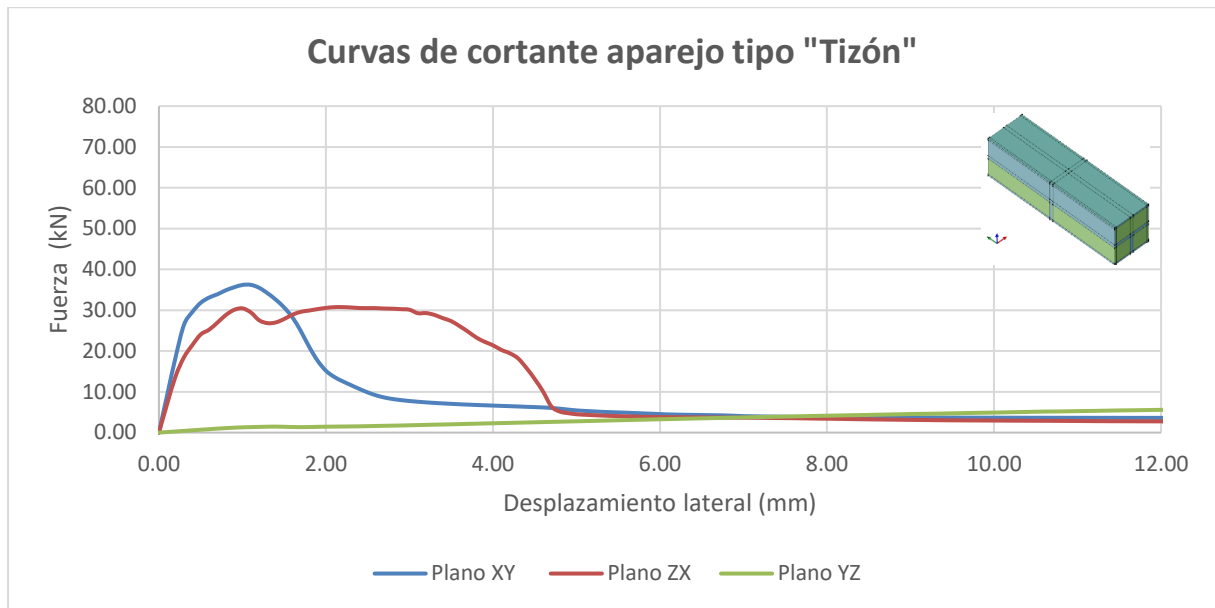
- Aparejo tipo "Tizón"



*Figura 24 Curvas compresión vs. deformación aparejo Tizón (820 mm)*



*Figura 25 Curvas tracción vs. deformación aparejo Tizón (820 mm)*



*Figura 26 Curvas cortante vs. desplazamiento lateral aparejo Tizón (820 mm)*

*Tabla 25 Propiedades mecánicas obtenidas aparejo Tizón (820 mm)*

| Propiedad                     | Valor  | Descripción                  |
|-------------------------------|--------|------------------------------|
| $h$ (mm)                      | 820    | Espesor de muro              |
| $E_x$ (N/mm <sup>2</sup> )    | 282.76 | Módulos de elasticidad       |
| $E_y$ (N/mm <sup>2</sup> )    | 280.64 |                              |
| $E_z$ (N/mm <sup>2</sup> )    | 272.55 |                              |
| $G_{xy}$ (N/mm)               | 104.49 | Módulos de corte             |
| $G_{zx}$ (N/mm)               | 79.77  |                              |
| $G_{yz}$ (N/mm)               | 21.71  |                              |
| $f_{cx}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 1.64   | Esfuerzo máximo a compresión |
| $f_{cy}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 1.55   |                              |
| $f_{cz}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 1.33   |                              |
| $f_{tx}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.19   | Esfuerzo máximo a tracción   |
| $f_{ty}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.15   |                              |
| $f_{tz}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.23   |                              |

Tabla 26 Daño y desplazamiento al ensayar el aparejo Tizón (820 mm) a compresión

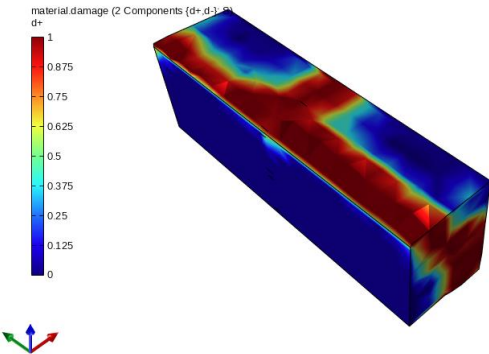
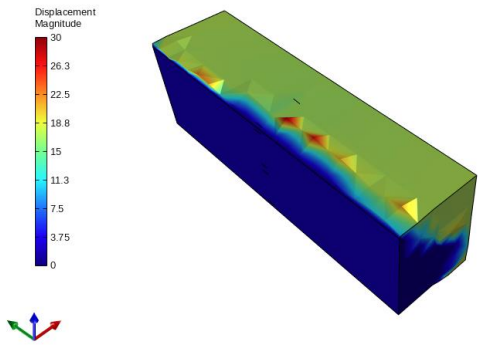
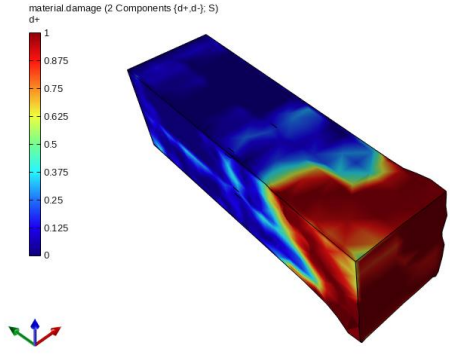
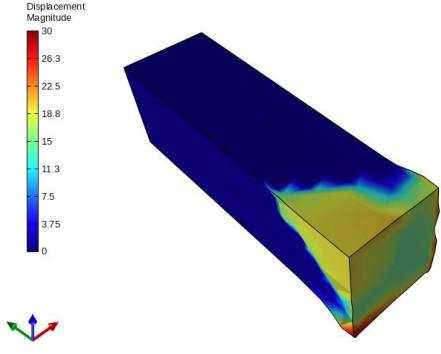
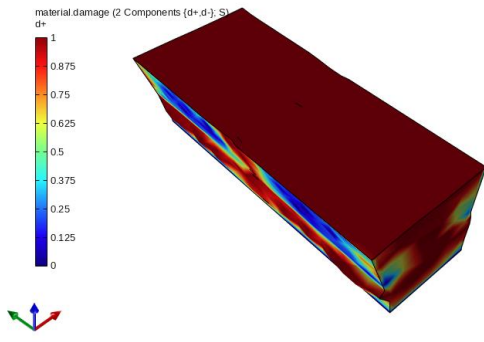
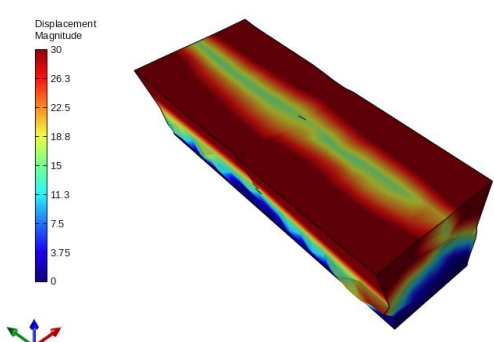
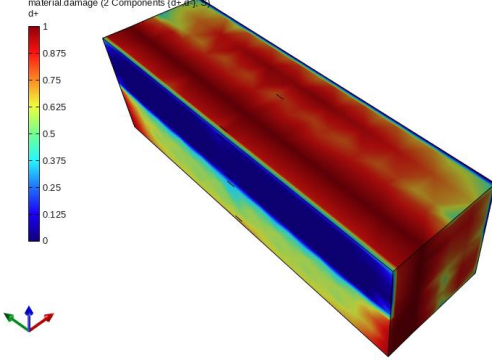
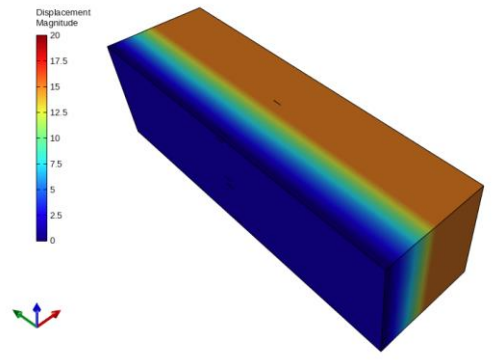
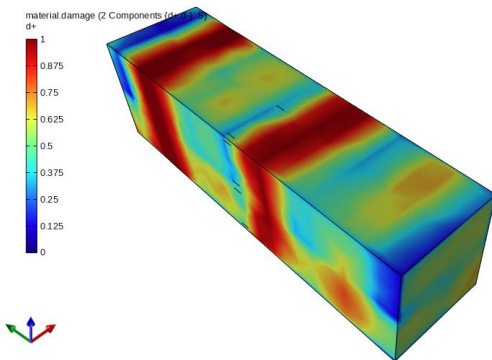
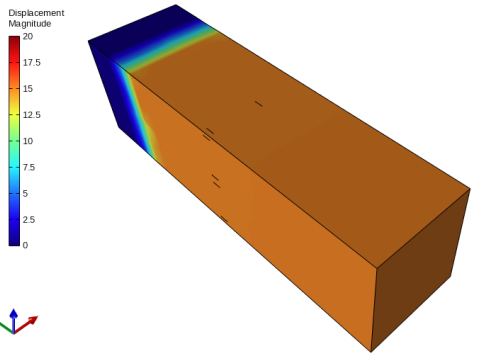
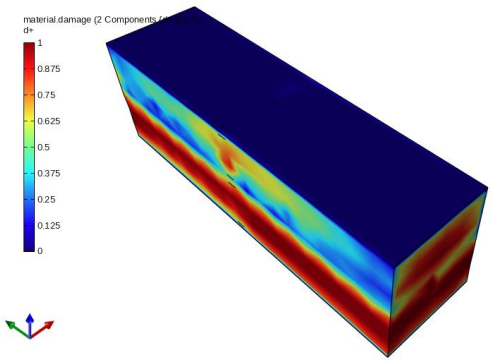
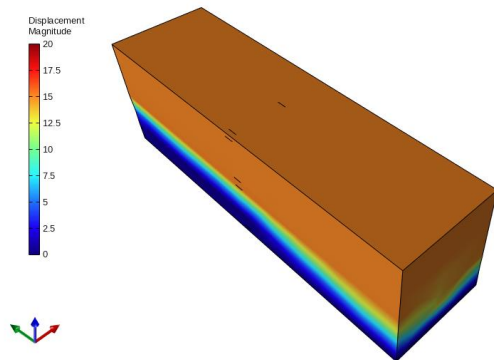
| Resultados de compresión del aparejo tipo “Tizón 820 mm” |                                                                                     |                                                                                      |
|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Eje                                                      | Daño del Material                                                                   | Desplazamiento del material                                                          |
| X                                                        |    |    |
| Y                                                        |   |   |
| Z                                                        |  |  |

Tabla 27 Daño y desplazamiento al ensayar el aparejo Tizón (820 mm) a tracción

| Resultados de tracción del aparejo tipo “Tizón 820 mm” |                                                                                     |                                                                                      |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Eje                                                    | Daño del Material                                                                   | Desplazamiento del material                                                          |
| X                                                      |    |    |
| Y                                                      |   |   |
| Z                                                      |  |  |

3.5. Conclusiones

El capítulo 3 ha presentado un análisis detallado de la modelación de Elementos de Volumen Representativo (RVE) para las fachadas de adobe estudiadas, con el objetivo de determinar las propiedades mecánicas homogenizadas que servirán como base para el análisis estructural completo de las fachadas.



A partir de la determinación de los parámetros de variación de los modelos RVE y la generación de estos modelos con diversas combinaciones de materiales y configuraciones geométricas, se han obtenido resultados significativos que destacan las siguientes conclusiones:

- **Variabilidad de Propiedades Mecánicas:** Los modelos RVE han mostrado una considerable variabilidad en las propiedades mecánicas, como el módulo de elasticidad, la resistencia a la compresión y módulo de corte, dependiendo de las combinaciones específicas de bloques de adobe y mortero. Esta variabilidad es crucial para entender el comportamiento real de las fachadas de adobe bajo cargas estructurales.
- **Influencia de los Parámetros Geométricos:** Los resultados indican que las variaciones en la geometría de los bloques y el espesor de los muros tienen un impacto significativo en las propiedades mecánicas. Observaciones puntuales sobre los resultados de los modelos se presentan a continuación:

Para el caso de los RVE's de espesor entre 400 mm y 460 mm se tiene las siguientes observaciones:

- En el caso del aparejo Panderete, se puede observar que la máxima resistencia a compresión, tracción y corte se obtiene en los ejes X, Z y en el plano XZ, respectivamente. Asimismo, se puede observar que entre sí tienen módulos elásticos que varían en menos de un 9% entre los valores máximos y mínimos registrados.
- En el caso del aparejo Soga, se puede observar que la máxima resistencia a compresión, tracción y corte se obtiene en los ejes X-Y, Z y en el plano XY, respectivamente. En el caso de la resistencia a compresión se tiene que la diferencia entre los esfuerzos máximos de los ejes X e Y es inferior al 0.2% por lo que se podría decir que tienen la misma resistencia en esas direcciones. Además, se puede observar que el eje Z presenta una mayor rigidez en el caso de compresión y tracción, mientras que en los ejes X e Y se evidencia rangos de elasticidad y rangos de falla similares (Figura 12 y Figura 13) además de ser el plano que contiene dichos ejes el de mayor rigidez y resistencia al corte (Figura 14).
- En el caso del aparejo Tizón, se observa una mayor resistencia a compresión en el eje Y, en el eje Z una mayor resistencia a tracción y una mayor rigidez y resistencia en el plano XY, respecto a los otros ejes y planos evaluados. En el caso de los ensayos a compresión, existe un mayor rango de ductilidad en el caso de los ejes X e Y, sin embargo, en el caso de tracción los rangos de elasticidad y punto de fallo se



encuentran en rangos similares. Adicionalmente en el caso de los planos XY y ZX se puede observar una mayor rigidez posiblemente atribuida a la distribución de mortero en la dirección de dichos planos.

Para el caso de los RVE's de espesor entre 800 mm y 860 mm se tiene las siguientes observaciones:

- El aparejo Panderete exhibe una mayor resistencia a la compresión, tracción y corte en los ejes X, Z y en el plano ZX. En los ensayos de compresión y tracción, los módulos elásticos son comparables, con variaciones inferiores al 5% entre los valores mínimos y máximos obtenidos. En términos de esfuerzo cortante, se observa una menor rigidez en el plano YZ, aunque con un rango elástico más amplio.
- Para el aparejo Soga, los módulos elásticos son similares en todas las direcciones de análisis. Sin embargo, tanto en tracción como en compresión, se registra un esfuerzo máximo mayor en el eje Z. Además, la mayor resistencia en compresión y tracción se presenta al ensayar primero el eje Z, seguido del eje X y finalmente el eje Y. El módulo de corte presenta una particularidad en el caso del plano del YZ donde se tiene una rigidez menor, similar a lo visto en el cortante para el mismo plano analizado en el caso del aparejo panderete. Eso podría atribuirse a la distribución de bloques de adobe y mortero en dicha dirección.
- En el caso del aparejo Tizón, se observa una mayor resistencia a la compresión en el eje X y en el eje Z. Los módulos de elasticidad son comparables en todas las direcciones evaluadas, mostrando rangos de elasticidad y modos de falla similares tanto en compresión como en tracción. De manera similar, el comportamiento ante el esfuerzo cortante es consistente con los resultados de los aparejos Panderete y Soga (Figura 20 y Figura 24), donde la mayor rigidez al corte se presenta en el plano XY, seguida por el plano ZX. Aunque el plano YZ muestra una menor rigidez al corte, presenta un rango elástico mayor.

Tabla 28 Resumen de resultados obtenidos para RVE's entre 400 y 460 mm

| Propiedad                     | Aparejo Panderete | Aparejo Soga | Aparejo Tizón | Descripción                  |
|-------------------------------|-------------------|--------------|---------------|------------------------------|
| h (mm)                        | 460               | 420          | 400           | Espesor de muro              |
| $E_x$ (N/mm <sup>2</sup> )    | 285.99            | 276.26       | 274.26        | Módulos de elasticidad       |
| $E_y$ (N/mm <sup>2</sup> )    | 263.07            | 276.01       | 278.97        |                              |
| $E_z$ (N/mm <sup>2</sup> )    | 281.71            | 267.09       | 255.83        |                              |
| $G_{xy}$ (N/mm)               | 80.43             | 78.59        | 93.54         | Módulos de corte             |
| $G_{zx}$ (N/mm)               | 79.01             | 53.76        | 78.06         |                              |
| $G_{yz}$ (N/mm)               | 68.68             | 98.30        | 54.63         |                              |
| $f_{cx}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 1.58              | 1.57         | 1.54          | Esfuerzo máximo a compresión |
| $f_{cy}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 1.46              | 1.57         | 1.61          |                              |
| $f_{cz}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 1.43              | 1.35         | 1.23          |                              |
| $f_{tx}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.18              | 0.17         | 0.19          | Esfuerzo máximo a tracción   |
| $f_{ty}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.17              | 0.14         | 0.15          |                              |
| $f_{tz}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.19              | 0.22         | 0.21          |                              |

Tabla 29 Resumen de resultados obtenidos para RVE's entre 820 y 860 mm

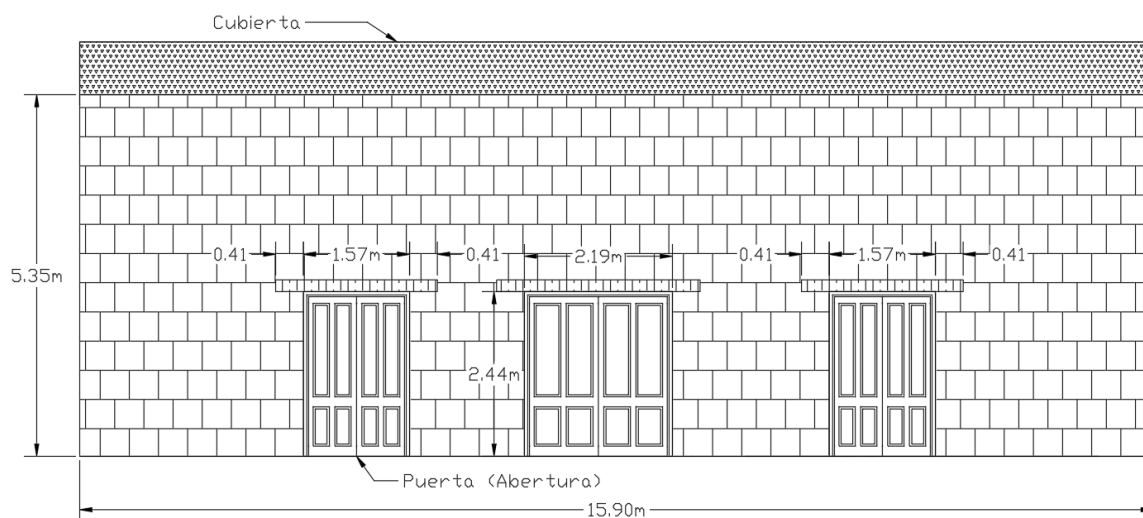
| Propiedad                     | Aparejo Panderete | Aparejo Soga | Aparejo Tizón | Descripción                  |
|-------------------------------|-------------------|--------------|---------------|------------------------------|
| h (mm)                        | 820               | 860          | 820           | Espesor de muro              |
| $E_x$ (N/mm <sup>2</sup> )    | 283.25            | 282.82       | 282.76        | Módulos de elasticidad       |
| $E_y$ (N/mm <sup>2</sup> )    | 270.34            | 277.49       | 280.64        |                              |
| $E_z$ (N/mm <sup>2</sup> )    | 278.76            | 275.67       | 272.55        |                              |
| $G_{xy}$ (N/mm)               | 92.63             | 95.14        | 104.49        | Módulos de corte             |
| $G_{zx}$ (N/mm)               | 78.13             | 52.49        | 79.77         |                              |
| $G_{yz}$ (N/mm)               | 45.05             | 20.18        | 21.71         |                              |
| $f_{cx}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 1.59              | 1.66         | 1.64          | Esfuerzo máximo a compresión |
| $f_{cy}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 1.46              | 1.56         | 1.55          |                              |
| $f_{cz}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 1.42              | 1.75         | 1.33          |                              |
| $f_{tx}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.17              | 0.17         | 0.19          | Esfuerzo máximo a tracción   |
| $f_{ty}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.13              | 0.14         | 0.15          |                              |
| $f_{tz}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.19              | 0.22         | 0.23          |                              |

#### 4. Capítulo 4: Implementación de las propiedades obtenidas dentro de la fachada modelo

##### 4.1. Introducción

En este capítulo se presenta la aplicación de las propiedades mecánicas obtenidas a partir de los Elementos de Volumen Representativo (RVE's) en la modelación de dos fachadas de edificaciones de adobe de Cuenca. Es así como esta metodología permite obtener características que permiten modelar macro modelos a partir de micro modelos buscando homogenizar las propiedades el micro modelo.

El objetivo principal es evaluar el comportamiento estructural de la fachada bajo diferentes condiciones de carga, empleando tanto análisis modal como análisis no lineal pushover. Para esto, se ha optado por tomar dos casos de estudio correspondientes a fachadas que tienen espesores de muro similares a los de los RVE's analizados en el Capítulo 3. La información de la geometría de estas fachadas ha sido obtenida a partir de la base de datos obtenida por Cárdenas-Haro et al. (2021) en donde se tienen las geometrías presentadas en la Figura 27 y la Figura 29.



*Figura 27 Dimensiones de la fachada de estudio de una planta D8*

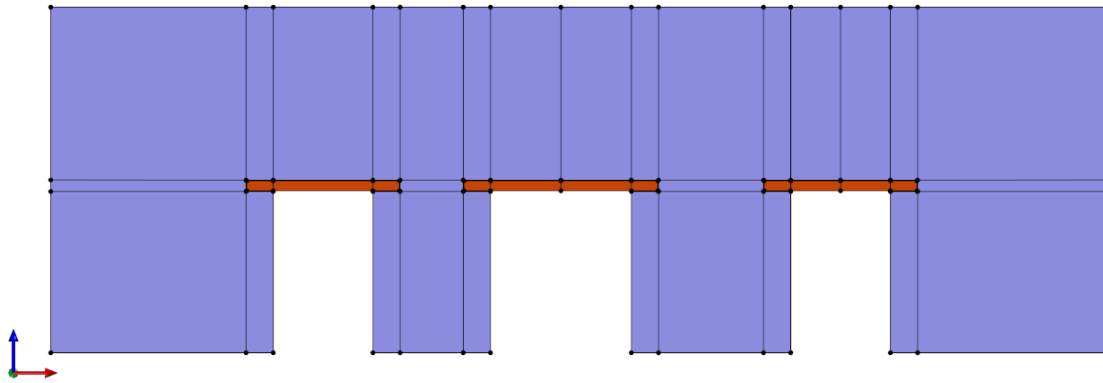


Figura 28 Vista frontal del modelo de STKO para la fachada D8

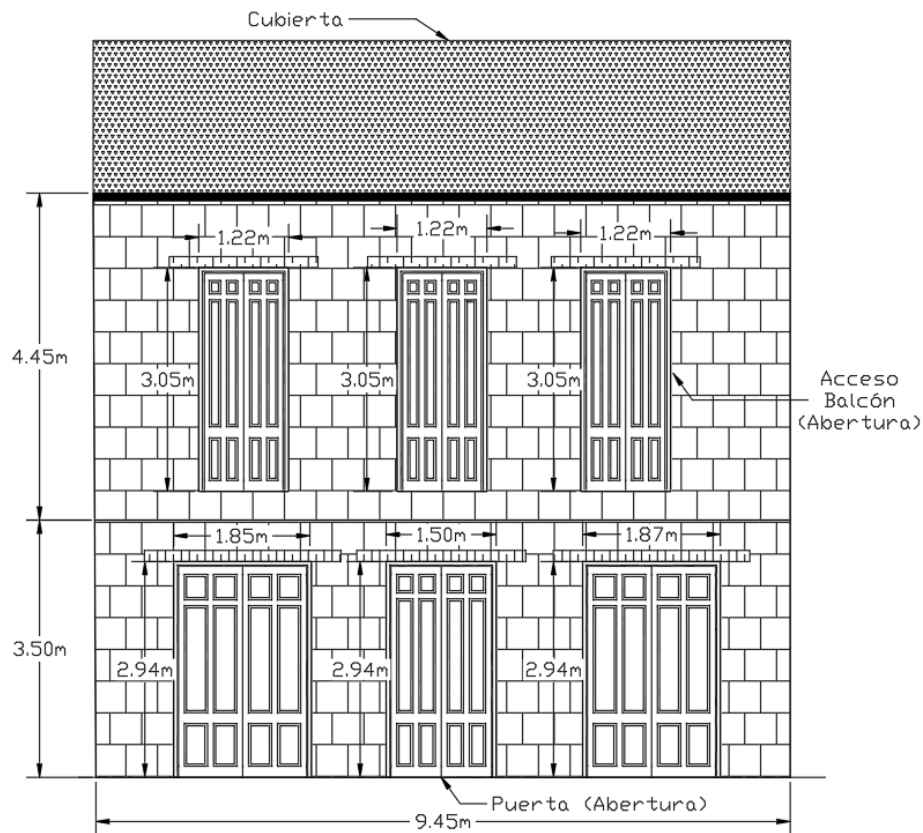


Figura 29 Dimensiones de la fachada de estudio de dos plantas O32

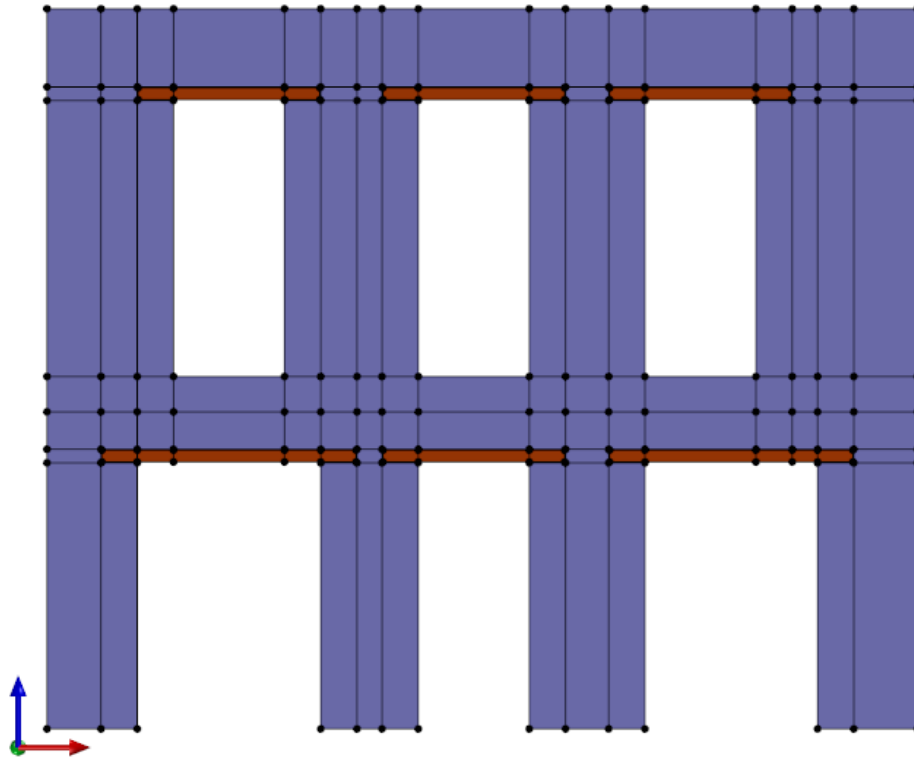


Figura 30 Vista frontal de la fachada O32 modelada en STKO

(a)



(b)



Figura 31 Detalle de interfaz entre dintel de madera (a) modelada en STKO y (b) fotografía de viga dintel en edificación típica de adobe (Arellano, 2018)

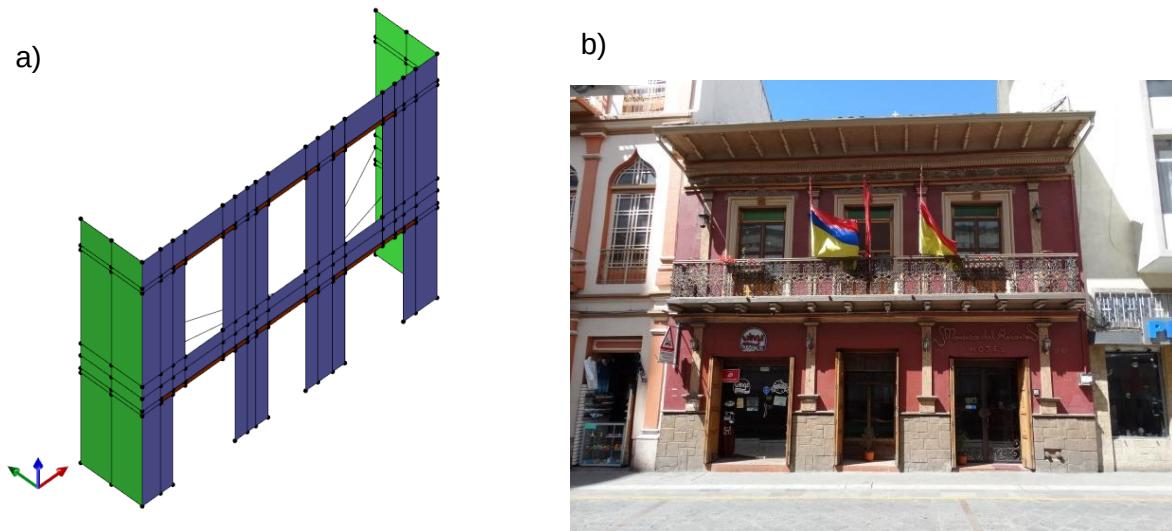


Figura 32 Representación en STKO para fachada (a) O32 y (b) fotografía de esta en la ciudad de Cuenca (Cárdenas-Haro et al., 2021)

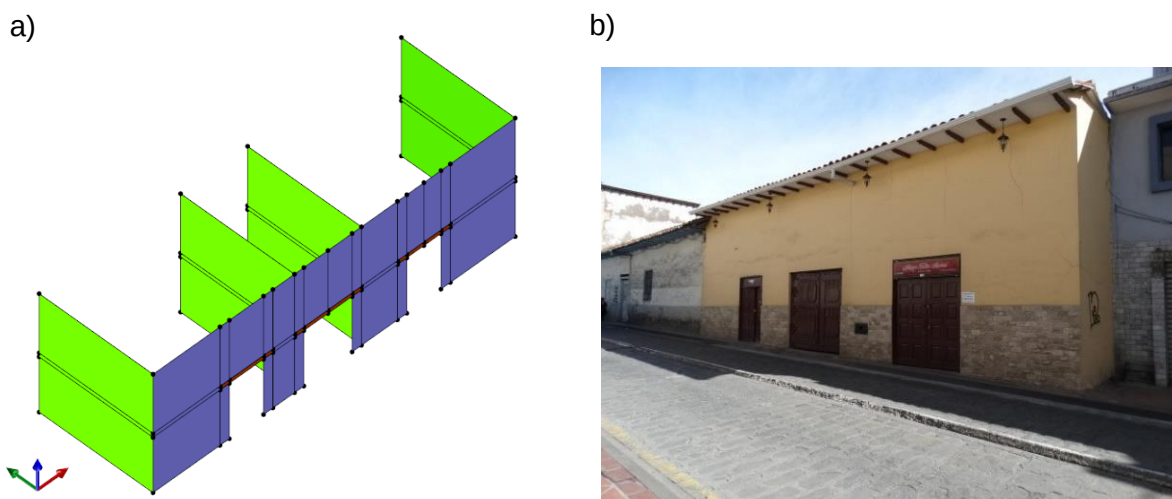
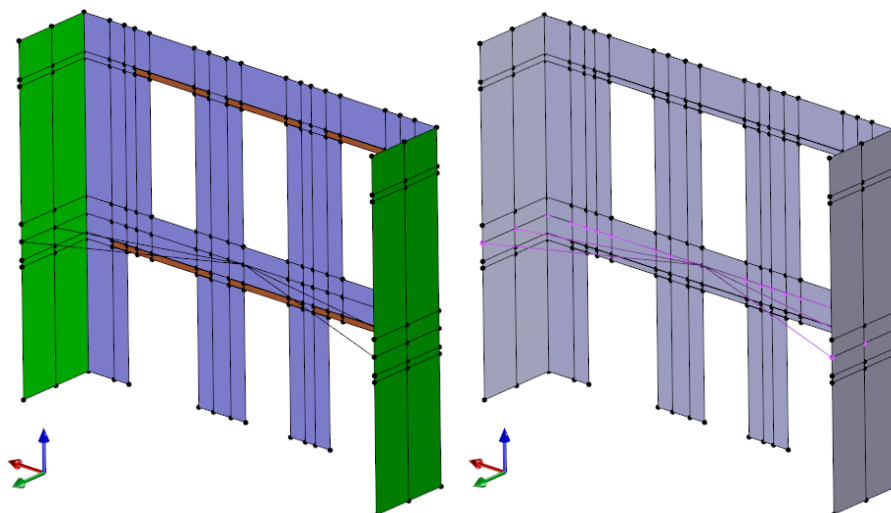
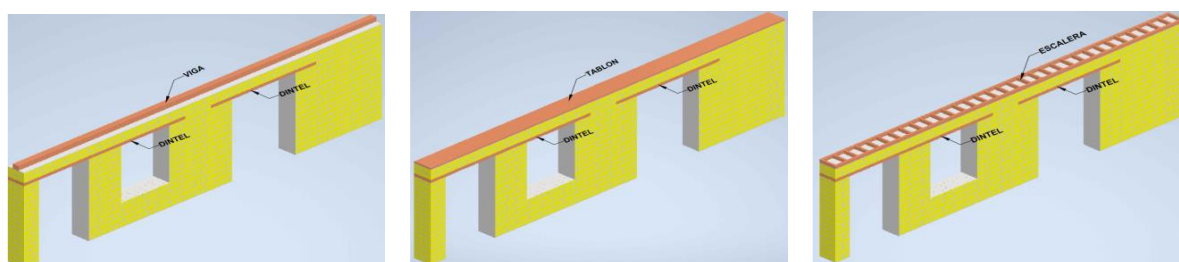


Figura 33 Representación en STKO para fachada (a) D8 y (b) fotografía de esta en la ciudad de Cuenca



*Figura 34 Vista posterior fachada O32 con incorporación de interacción en el entrepiso*

Finalmente, se recopilan y analizan los resultados obtenidos para cada uno de los casos de estudio, con el fin de validar la metodología empleada y obtener conclusiones sobre la influencia de los parámetros de espesor de muro y aparejo empleado en estas estructuras.



*Figura 35 Representación de vigas collar en fachadas de adobe utilizando (a) vigas, (b) tablon y (c) escalera de madera (Arcentález & Pizarro, 2023)*

#### **4.2. Modelamiento de la fachada a partir de las propiedades mecánicas obtenidas de los RVE's e incorporación de cargas actuantes**

El modelamiento de la fachada se realiza utilizando las propiedades mecánicas homogenizadas derivadas de los modelos RVE desarrollados en el subcapítulo anterior. Estas propiedades dependen del material empleado en el modelamiento; principalmente hacen referencia a parámetros como relaciones ortotrópicas de módulo de elasticidad, la resistencia a compresión, y los coeficientes de Poisson, entre otras descritas. El proceso de modelamiento sigue lo realizado previamente por Saguay (2023) con los parámetros obtenidos para los aparejos de estudio.

##### *Definición geométrica de las fachadas*

A partir de las dimensiones proporcionadas en la Figura 27 y la Figura 29, se generó la geometría en el software STKO. Las fachadas se modelaron en el plano XY para mantener



la coherencia con los ejes globales utilizados los modelos RVE, evitando así la necesidad de cambiar la dirección de los ejes durante el proceso de homogenización. Además, se modelaron muros perpendiculares a las fachadas para simular las paredes colaborantes presentes en las casas patrimoniales adyacentes o propias de las fachadas de estudio. Estos muros perpendiculares tienen una longitud de 2 y 4 metros para las fachadas D8 y O32, respectivamente. En la Figura 32 y Figura 33 se muestra la geometría modelada, donde se pueden visualizar tanto la fachada como los muros perpendiculares, así como el registro fotográfico de las mismas.

Adicionalmente, se modelaron dinteles de madera en las aberturas de las fachadas que en el caso de la fachada O32 corresponden a puertas o aberturas de acceso a balcones y en el caso de la D8 corresponden a entradas peatonales o vehiculares. Es posible que la entrada vehicular de la fachada D8 podría corresponder a una modificación de la geometría original de la fachada. Los dinteles de madera están conectados a la fachada a través de una interfaz de mortero de adobe, esta conexión se presenta en la Figura 31.

#### *Asignación de materiales y propiedades mecánicas*

En la modelación se han generado cuatro tipos de materiales: adobe elástico, adobe ortotrópico, madera e interfaz. En los modelos presentados de la Figura 32 (a) y Figura 33 (a), el color verde corresponde a adobe elástico ortotrópico, el color morado corresponde a adobe ortotrópico con capacidad de registro de daño, el color naranja a madera elástica y el amarillo a la interfaz de adobe elástico. Los tipos de secciones utilizadas en STKO fueron del tipo “PlateFiber” y “LayeredShell”, las cuales son elementos del tipo “Shell” que requieren solamente de las propiedades mecánicas del material y la característica del espesor de la sección. Los materiales empleados y la sección en STKO, así como el material que buscan representar se resumen en la Tabla 30.

*Tabla 30 Resumen de materiales y secciones empleadas en STKO*

| Material STKO       | Sección STKO  | Material representado                             |
|---------------------|---------------|---------------------------------------------------|
| ElasticOrthotropic  | PlateFiber    | Adobe elástico ortotrópico de muros laterales     |
| DamageTC3D          | Layered Shell | Adobe ortotrópico con registro de daño de fachada |
| OrthotropicMaterial |               |                                                   |
| PlateFiber          |               |                                                   |
| ElasticIsotropic    | PlateFiber    | Madera e interfaz de mortero de adobe             |



El adobe ortotrópico con comportamiento elástico se ha asignado a los muros perpendiculares, ya que el análisis se enfoca en observar fallas fuera del plano. El adobe con propiedades ortotrópicas y registro de daño, definidas según el RVE, se ha aplicado a los muros de la fachada. La madera se ha utilizado para representar las vigas dintel situadas sobre las puertas. La interfaz se ha colocado en las uniones entre la madera y el adobe, definiéndose con propiedades elásticas correspondientes al mortero de adobe.

Para el material correspondiente a la madera, se ha utilizado los valores de módulo elástico y coeficiente de Poisson de obtenido por Enriquez (2014). Esto dado que los valores propuestos corresponden a ensayos realizados en dinteles de una edificación del área de estudio (Centro histórico de Cuenca) correspondiente a Madera Antigua de 100 años, lo cual corresponde a un módulo elástico de  $4552.8 \text{ N/mm}^2$  y a un coeficiente de Poisson de 0.35, las propiedades suficientes para modelar un elemento del tipo elástico isotrópico.

Para cada fachada se definió el espesor de muro respectivo a su RVE y se utilizó una discretización de 100 mm para todos los casos. Nótese que en el material de la fachada se ha incluido un material que permite el registro de daño y al tener una sección en capas (*Layered Shell*) se puede observar el daño en cada una de ellas, esto se ve representado en la vista lateral de la Figura 37 en donde para las fachadas de estudio se ha dividido su espesor en un total de 6 capas.

#### *Aplicación de condiciones de contorno y cargas*

Se han incluido restricciones al movimiento en la base de la fachada y en los muros laterales. En el caso de las restricciones en la base, se ha definido una restricción al desplazamiento y giro en los ejes X, Y e Z. Por otro lado, en el caso de los muros laterales se ha impedido su desplazamiento en el eje X, esto para permitir estados de falla que involucren volteo o daño de las paredes laterales a modo de cuña. Estos son potenciales modos de falla de acuerdo con lo descrito por D'Ayala (2013) y categorizados por Cárdenas-Haro, Tarque, et al. (2022)

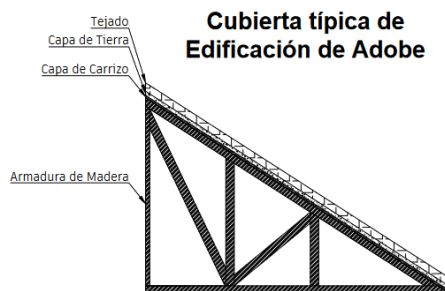


Figura 36 Esquema de materiales empleados en una cubierta tradicional de edificación de adobe (Arcentález & Pizarro, 2023)

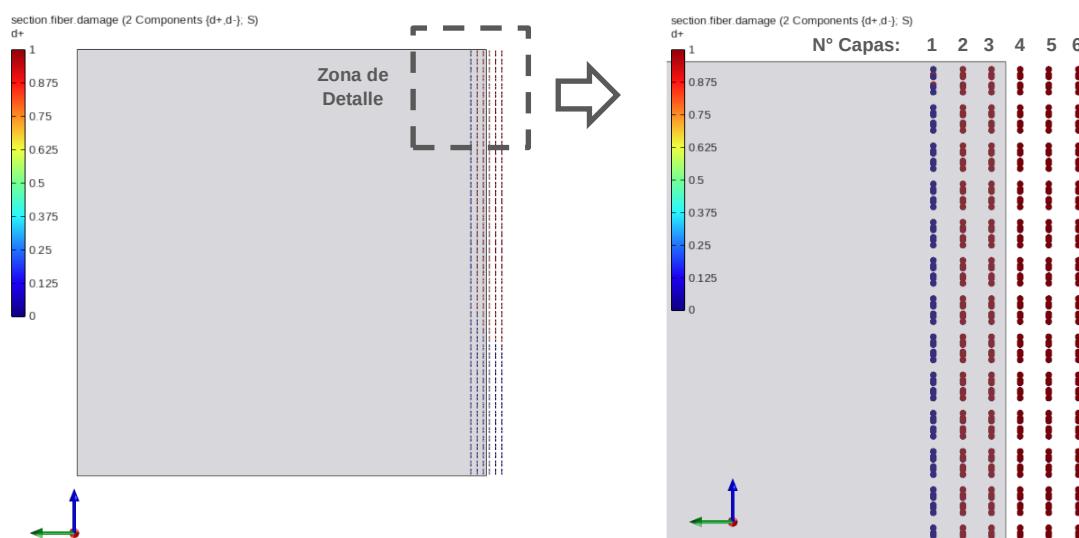


Figura 37 Vista lateral de fachada D8 y detalle de las capas de material modeladas con sección Layered Shell

Las cargas aplicadas sobre las fachadas corresponden principalmente a su peso propio y al peso impuesto de una cubierta. La masa de la fachada de adobe se ha distribuido en la sección de los muros mientras que la masa de la cubierta se ha colocado en el borde superior de la fachada. Asimismo, sobre estos elementos se han asignado las cargas correspondientes a peso de la fachada y peso de la cubierta, respectivamente.

Adicionalmente, en el caso de la fachada O32 se ha incluido una condición de contorno adicional para capturar el efecto del entrepiso al ser parte de una edificación de dos niveles. Este tipo de edificaciones generalmente tiene un elemento denominado “Viga collar” un ejemplo de micro modelación esta estructura se presenta en Figura 35, para este estudio se ha de utilizar una herramienta denominada “interacción” entre los nodos del entrepiso. Esta corresponde a una interacción del tipo nodo a enlace de nodos (Node - Node Links). Se ha utilizado este tipo de condición para definir un igual desplazamiento de todos los nodos del entrepiso. Esta asignación se ha realizado seleccionando un nodo maestro (Master Selection) ubicado dentro de la fachada el cual definirá el movimiento de los demás nodos relacionados (Slave Selection). Esto se ve representado en la Figura 34, en donde se puede apreciar una

vista posterior de la configuración de la fachada O32 y el enlace realizado del nodo maestro hacia los nodos de los elementos adyacentes.

De acuerdo con Saguay (2023), la aplicación de cargas por cubiertas típica en comparación con cubiertas de edificaciones modernas no presenta diferencias significativas. Por esta razón, se han tomado las propiedades de los materiales de (Arcentález & Pizarro, 2023) para aplicar la carga correspondiente al peso de una cubierta. Esta cubierta está compuesta por materiales como madera, carrizo, tierra y teja, siguiendo el esquema mostrado en la Figura 36 y a la cual se le atribuye un valor de 46.8 kN.

Adicionalmente, el peso de la fachada viene dado por la densidad del adobe y por el espesor del muro, el cual varía para los RVE es así como que cada fachada de estudio tiene un valor correspondiente a la masa asignada y al peso presentado en la

*Tabla 31 Masa y peso propios de las fachadas asignados a los modelos en STKO*

| Aparejo   | Espesor (mm) | Peso distribuido (N/mm <sup>2</sup> ) | Masa (Ns <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup> ) |
|-----------|--------------|---------------------------------------|------------------------------------------|
| Panderete | 460          | 0.00694                               | 7.074E-07                                |
|           | 820          | 0.01237                               | 1.266E-06                                |
| Soga      | 420          | 0.00634                               | 6.459E-07                                |
|           | 860          | 0.01298                               | 1.322E-06                                |
| Tizón     | 400          | 0.00603                               | 6.152E-07                                |
|           | 820          | 0.01237                               | 1.261E-06                                |

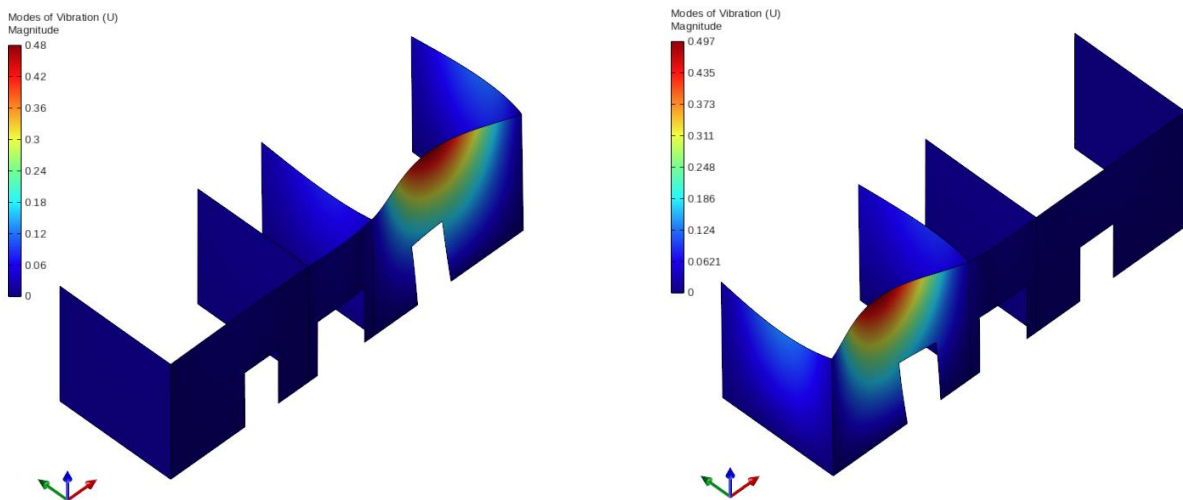
### 4.3. Análisis Modal de los casos de estudio

El análisis modal es una técnica fundamental en la ingeniería estructural que permite identificar las frecuencias naturales de vibración de una estructura y los modos de vibración asociados. En esta sección, se presenta el análisis modal realizado para dos fachadas de estudio, designadas con los códigos O32 y D8. Este análisis es esencial para entender cómo responden estas estructuras ante excitaciones dinámicas, tales como las provocadas por eventos sísmicos.

Una vez se ha llevado a cabo la definición de las propiedades ortotrópicas de los materiales, la geometría y secciones, la aplicación de las cargas y la definición de las condiciones de borde, se procede a realizar el análisis modal en STKO. Los resultados son presentados en la Figura 38 y la Figura 39, en donde se presentan los modos de vibración con mayor porcentaje de participación modal para las fachadas D8 y O32, respectivamente.

En el caso de la fachada D8, se puede observar que los dos primeros modos de vibración corresponden al desplazamiento vertical en la dirección Y de los vanos de mayor longitud.

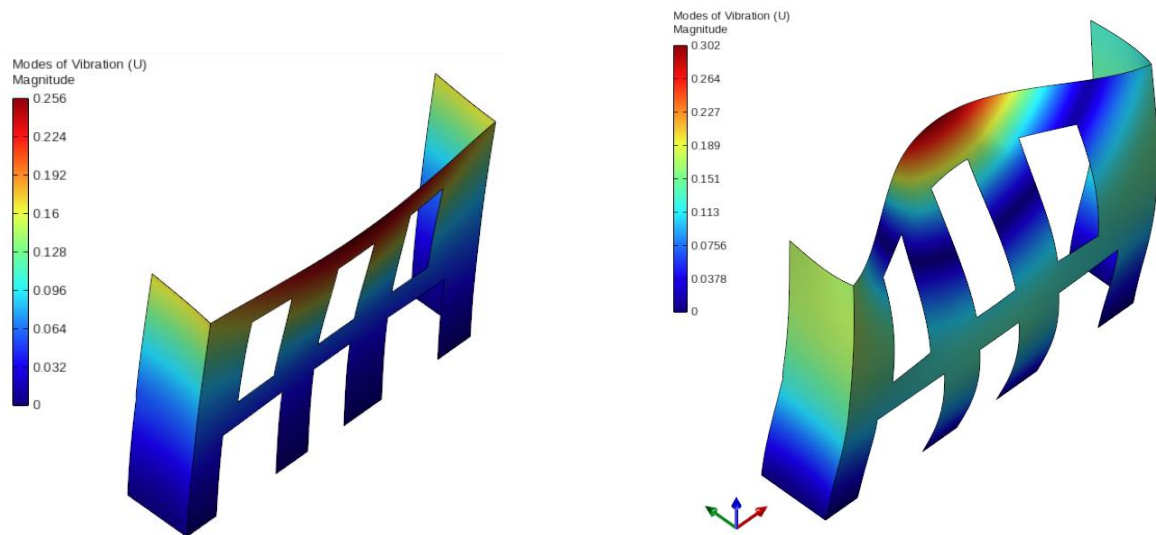
Esto se puede atribuir a la rigidez inducida por la presencia de los muros perpendiculares a la fachada los cuales actúan como elementos rígidos que restringen los desplazamientos horizontales de la fachada en la dirección X.



*Figura 38 Resultados del análisis modal de la fachada D8*

Por otro lado, en el caso de la fachada O32 se puede observar que los modos de vibración de mayor porcentaje de participación modal corresponden a los de desplazamiento lateral en la dirección Y de la parte superior de la fachada, incluyendo los muros laterales y al volteo en la dirección Y de la parte superior sin incluir los muros laterales en conjunto con un desplazamiento frontal del entrepiso.

Se considera que estos resultados son válidos debido a la similitud con modos de falla típicos en este tipo de estructuras de acuerdo con lo presentado por Saguay (2023) y por ser modos de falla similares a los desarrollados por D'Ayala (2013) de forma numérica pero obtenidos a partir de un modelo de elementos finitos.



*Figura 39 Resultados del análisis modal de la fachada O32*

#### 4.4. Análisis no lineal pushover de los casos de estudio

El análisis pushover es una técnica de análisis estático no lineal que se utiliza para evaluar el comportamiento estructural de edificaciones bajo cargas incrementales hasta el colapso. En esta sección, se presentan y discuten los resultados del análisis pushover realizado para las fachadas de adobe O32 y D8, empleando tres modelos de Elementos de Volumen Representativo (RVE) para cada fachada.

Una vez definido el modelo estructural, se procede a la aplicación de las cargas incrementales correspondiente a la combinación de los modos de vibración más representativos del comportamiento de la estructura desarrollado en el subcapítulo 4.3. Los resultados de los desplazamientos máximos generados en cada estructura se presentan en la Figura 40 y los resultados del cortante basal máximo transmitido en la base en la Figura 42 y en la Figura 43.

Adicionalmente, se resumen los valores de cortante basal y desplazamiento máximo registrado al momento de fallo de las fachadas y aparejos en la Tabla 32

*Tabla 32 Resumen de resultados pushover de resistencia y desplazamiento máximo*

| Fachada | Aparejo   | Espesor de muro (mm) | Resistencia máxima (kN) | Desplazamiento máximo (mm) |
|---------|-----------|----------------------|-------------------------|----------------------------|
| D8      | Panderete | 460                  | 46.67                   | 9.00                       |
|         | Soga      | 420                  | 38.80                   | 10.10                      |
|         | Tizón     | 400                  | 37.64                   | 10.70                      |
| O32     | Panderete | 820                  | 336.74                  | 33.20                      |
|         | Soga      | 860                  | 476.73                  | 40.00                      |
|         | Tizón     | 820                  | 363.71                  | 33.60                      |

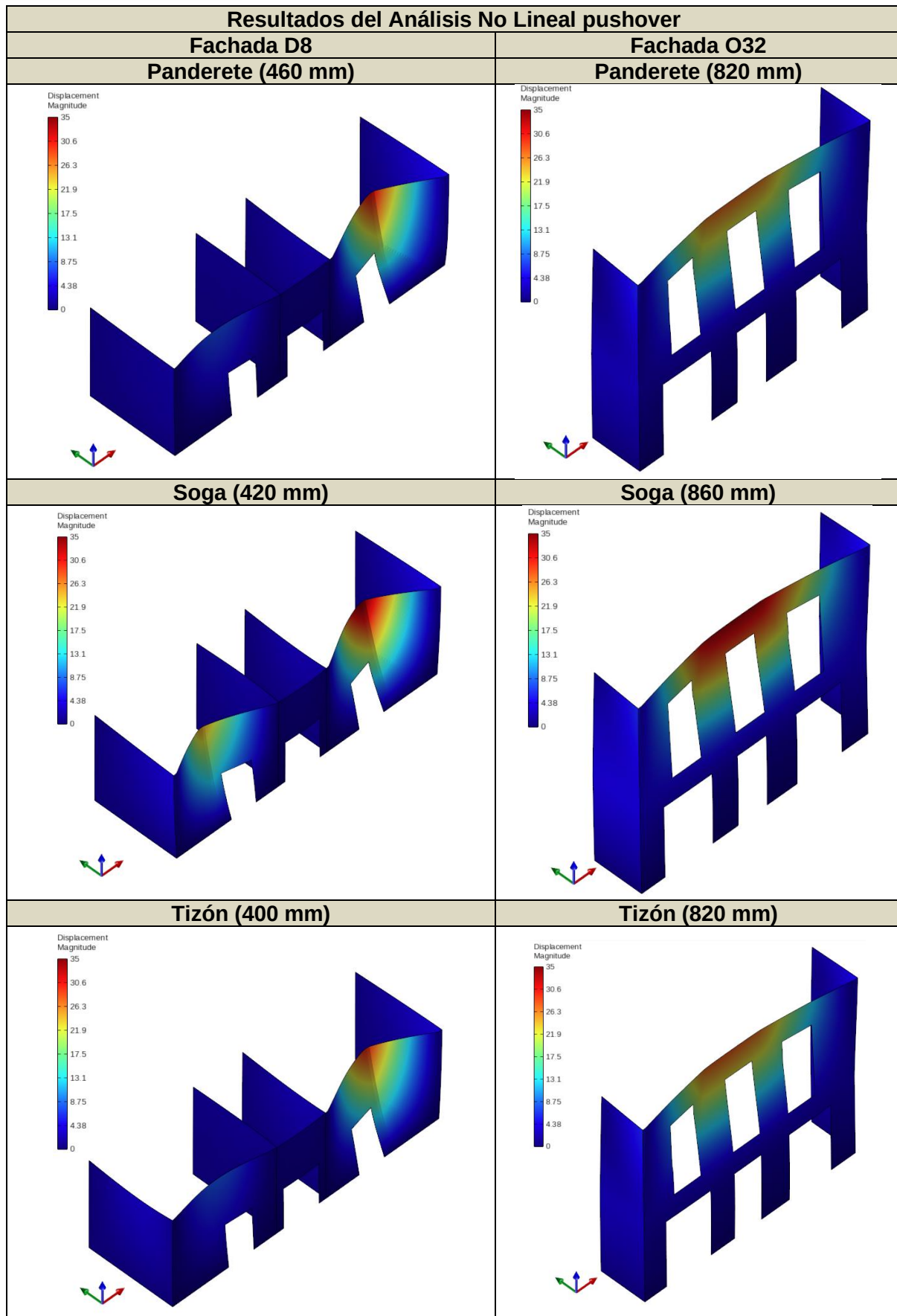
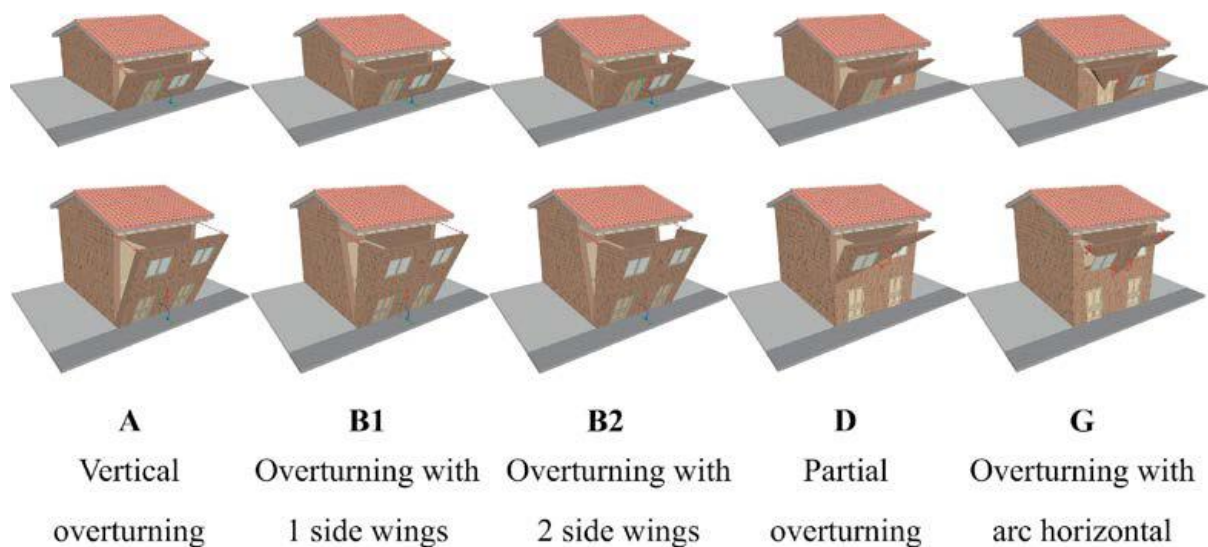


Figura 40 Resultados del análisis no lineal pushover para las fachadas D8 y O32



En los resultados presentados se puede observar modos de falla consistentes del tipo fuera del plano de la fachada. Esto es consistente con los mecanismos de falla presentados por Cárdenas-Haro, Tarque, et al. (2022) presentado en la Figura 41.

Para el caso de la fachada D8 todos los aparejos presentan una falla categorizada del tipo G (Overturning with arc horizontal) que implica el vuelco de la parte superior de la fachada que a su vez genera fallas diagonales en aberturas como puertas o ventanas. Nótese que esta falla solamente se da en los vanos de mayor longitud y del análisis modal se tiene que potencialmente debido a la geometría de la fachada el vano intermedio no experimentaría este tipo de falla. La fachada O32 presenta el mismo tipo de falla, esto es atribuible a la inclusión de la interacción en el entrepiso que rigidiza la primera planta. Asimismo, se generan planos de falla en el entrepiso y en las aberturas de forma diagonal.



*Figura 41 Mecanismos de falla adoptados para fachas de un nivel y dos niveles*



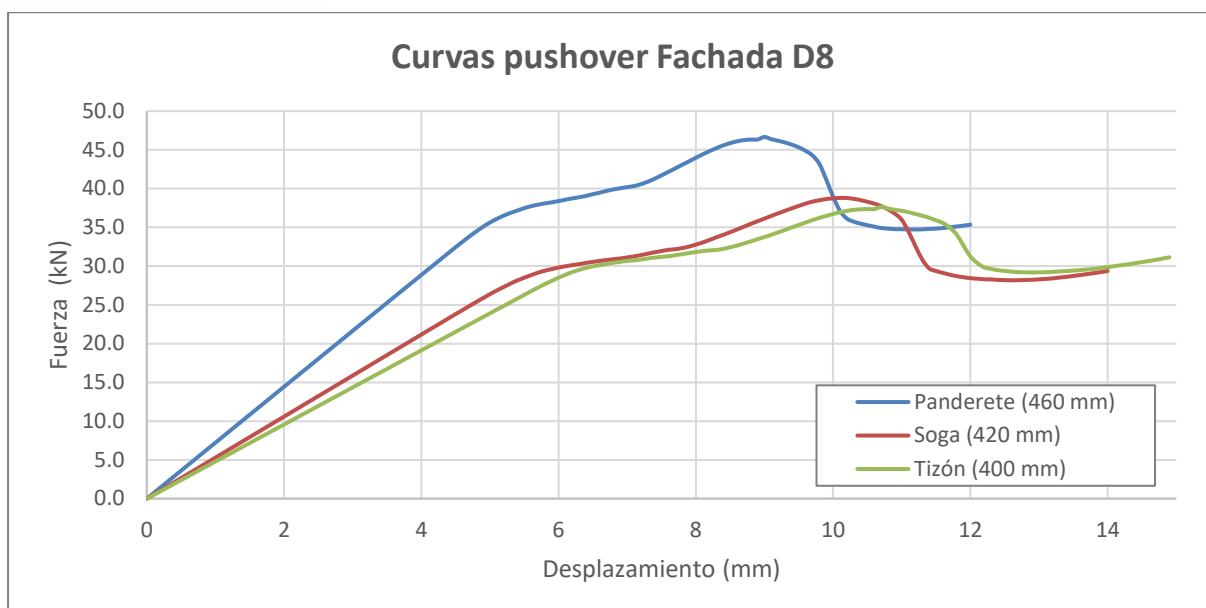


Figura 42 Curvas pushover para fachada de una planta (D8)

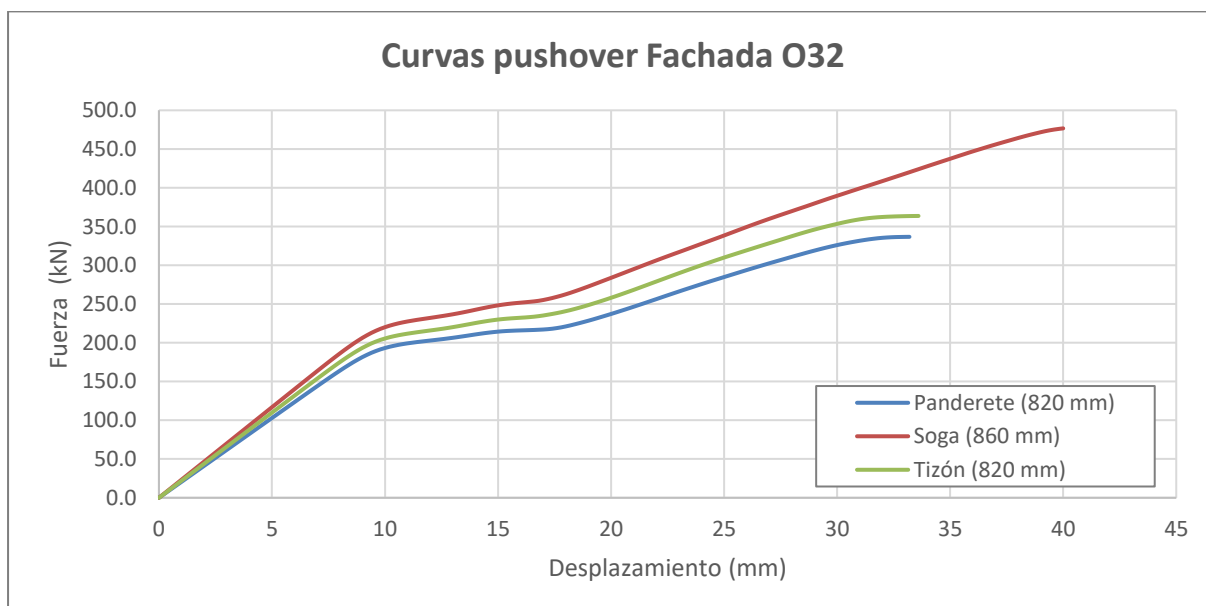


Figura 43 Curvas pushover para fachada de dos plantas (O32)

#### 4.5. Recopilación y análisis de los resultados obtenidos de cada fachada de estudio

En este apartado, se presentan los resultados obtenidos del análisis no lineal pushover para las fachadas de adobe O32 y D8. Además, se analizan los resultados de las curvas pushover y los parámetros de resistencia y desplazamiento máximo, se analizan las gráficas del daño generado y la localización de dicho daño en las fachadas de estudio (Tabla 33 - Tabla 34). Este análisis permite identificar las áreas críticas y los modos de fallo que pueden influir en la integridad estructural de las edificaciones.

Los resultados muestran la distribución del daño en la fachada D8 para cada uno de los RVE ensayados. En general, se observa que:

- El daño se concentra principalmente en la base de la fachada y en las conexiones con los muros perpendiculares internos, indicando una falla predominante por flexión y cizalladura.
- La distribución del daño genera diagonales que parten desde las esquinas inferiores hacia las aberturas de las puertas en los vanos de mayor longitud.
- El daño es significativo en la parte central interior de los vanos, esto es apreciable en las fibras interiores de la fachada.
- De los resultados de las curvas pushover se puede observar que, si bien el aparejo tipo panderete tiene un espesor de muro superior respecto a los de los demás aparejos ensayados, llega a la falla aproximadamente al mismo desplazamiento que el arreglo Soga y Tizón.
- De las curvas pushover, además, se tiene que el arreglo panderete presenta una mayor rigidez inicial que puede atribuirse asimismo al espesor de este.

En el caso de la fachada O32 se tienen las siguientes observaciones:

- Existe una mayor cantidad de zonas que presentan daño total ( $d^+/d^- = 1$ ), respecto a las fachadas de un nivel.
- El daño se concentra en la interconexión con los muros laterales y en la abertura media del vano, particularmente en las fibras frontales de la fachada. Esto es consistente con el tipo de falla (Overturning with arc horizontal) previsto del análisis modal.
- En todos los casos existe una generación de diagonales en las aberturas al igual que en el caso de la fachada D8, indicando una falla predominante por flexión y cizalladura.
- Se evidencia que el daño se focaliza más en el nivel superior, dado que esta es una edificación de dos niveles con un entrepiso.
- Del análisis de las curvas pushover se tiene que todas presentan modos de falla similares pero diferentes al de la fachada D8. En este caso se puede observar una rigidez superior, atribuido a que el muro de la fachada O32 se ha tomado como aproximadamente el doble de la fachada D8.
- Si bien el aparejo tipo Soga tiene un mayor espesor, el nivel de daño al momento del fallo es similar al de los demás aparejos ensayados en la misma fachada. No obstante, al analizar las curvas pushover se puede observar una mayor rigidez que los demás

aparejos ensayados, atribuible a su espesor superior. Adicionalmente, requiere de un mayor desplazamiento para llegar al fallo.

En general, el estudio del adobe modelado se ajusta a las características de este tipo de material (cuasi frágil). Se observó una pérdida gradual de resistencia tras alcanzar la carga máxima, acompañada de deformaciones localizadas en forma de fracturas y grietas. La curva pushover de las fachadas de adobe presentó una región inicial de comportamiento elástico lineal, seguida de una zona de endurecimiento por deformación plástica y finalmente una zona de reblandecimiento que condujo a la falla, mayormente apreciable en las fachada D8. La localización de la deformación se concentró en zonas de mayor esfuerzo, como las esquinas, aberturas y juntas de las fachadas.

*Tabla 33 Daño registrado en la fachada D8 para los aparejos de estudio*

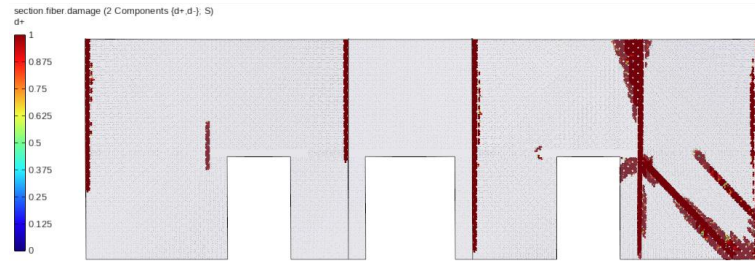
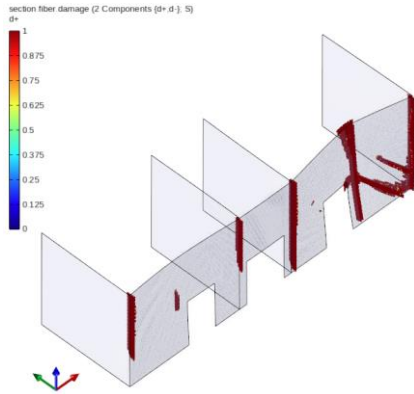
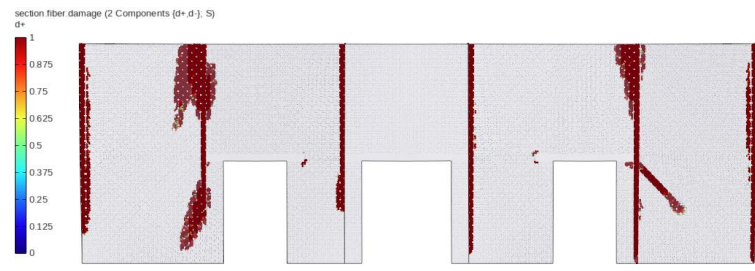
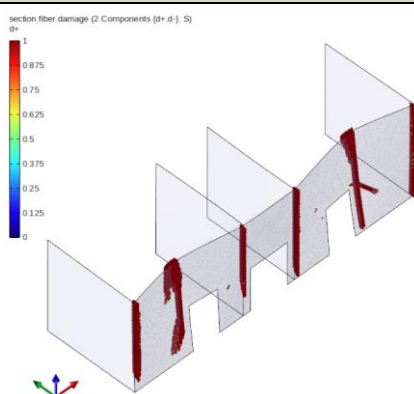
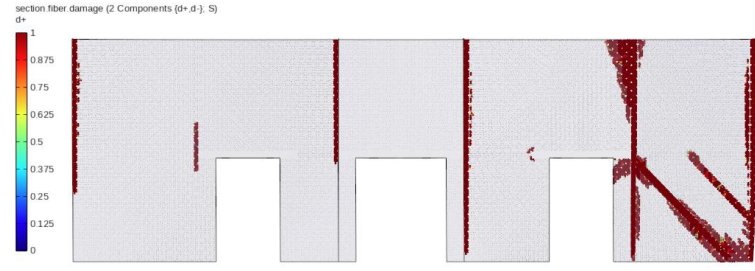
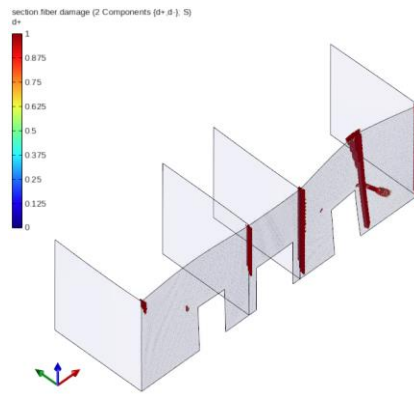
| Resultados de daño registrado durante análisis pushover fachada D8                  |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Vista frontal                                                                       | Vista en perspectiva                                                                 |
| Aparejo Panderete                                                                   |                                                                                      |
|    |    |
| Aparejo Soga                                                                        |                                                                                      |
|   |   |
| Aparejo Tizón                                                                       |                                                                                      |
|  |  |

Tabla 34 Daño registrado en la fachada O32 para los aparejos de estudio

| Resultados de daño registrado durante análisis pushover fachada O32 |                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Vista frontal                                                       | Vista en perspectiva                                             |
| Aparejo Panderete                                                   |                                                                  |
| <p>section fiber damage (2 Components {d+, d-}; S)</p> <p>d+</p>    | <p>section fiber damage (2 Components {d+, d-}; S)</p> <p>d+</p> |
| Aparejo Soga                                                        |                                                                  |
| <p>section fiber damage (2 Components {d+, d-}; S)</p> <p>d+</p>    | <p>section fiber damage (2 Components {d+, d-}; S)</p> <p>d+</p> |
| Aparejo Tizón                                                       |                                                                  |
| <p>section fiber damage (2 Components {d+, d-}; S)</p> <p>d+</p>    | <p>section fiber damage (2 Components {d+, d-}; S)</p> <p>d+</p> |

#### 4.6. Conclusiones

En este capítulo, se ha llevado a cabo la implementación de las propiedades mecánicas obtenidas de los Elementos de Volumen Representativo (RVE) en los modelos estructurales completos de las fachadas de adobe O32 y D8. A través de análisis modales y no lineales pushover, se ha evaluado el comportamiento estructural de las fachadas bajo cargas sísmicas, permitiendo extraer las siguientes conclusiones clave:

- Consistencia de los modelos RVE: La implementación de las propiedades mecánicas derivadas de los RVE en los modelos estructurales completos ha demostrado ser consistente. Los análisis realizados han permitido replicar comportamientos estructurales realistas, validando así la metodología de homogeneización y modelación multi-escala utilizada.
- Comportamiento estructural bajo cargas sísmicas: Los resultados del análisis pushover han revelado que las fachadas de adobe muestran diferentes capacidades de resistencia y deformación según los RVE utilizados. En particular, se ha podido evidenciar diferencias en el modo de falla de las fachadas. Esto sugiere que las configuraciones geométricas y las propiedades específicas de los materiales de cada fachada influyen significativamente en su comportamiento sísmico.
- Modos de falla identificados: El análisis de daño ha permitido identificar los modos de falla predominantes en ambas fachadas. Los modos de falla por flexión, cizalladura y combinados fueron observados, con una variación en la localización y la extensión del daño según los diferentes RVE (Aparejo Soga respecto a los demás). Esta información es relevante para comprender los puntos débiles de las estructuras y planificar intervenciones de refuerzo adecuadas.
- Importancia de las características paramétricas: La variabilidad en las propiedades mecánicas debida a diferentes aparejos y espesores de muro ha demostrado tener un impacto significativo en la respuesta estructural de las fachadas de adobe. Los resultados subrayan la importancia de considerar estas características paramétricas en el diseño y rehabilitación de edificaciones históricas de adobe para optimizar su resistencia y comportamiento sísmico.

En conclusión, la implementación de las propiedades mecánicas obtenidas de los RVE en los modelos estructurales completos ha proporcionado una comprensión detallada del comportamiento estructural de las fachadas de adobe bajo cargas sísmicas. Este estudio no solo valida la metodología utilizada, sino que también ofrece una base sólida para futuras



investigaciones y aplicaciones prácticas en el diseño y rehabilitación de edificaciones de adobe, contribuyendo así a la preservación y mejora de estas estructuras históricas.

## **5. Capítulo 5: Conclusiones, recomendaciones y líneas de investigación**

### **5.1. Conclusiones**

Este estudio ha demostrado la efectividad del uso de Elementos de Volumen Representativo (RVE) para analizar y modelar el comportamiento estructural de fachadas de adobe influenciadas por variaciones paramétricas. Las principales conclusiones obtenidas son:

- Los RVE han permitido capturar la variabilidad en las propiedades mecánicas de las combinaciones de adobe y mortero, proporcionando valores homogenizados los cuales permiten modelar el comportamiento de la estructura.
- Los análisis modales y pushover realizados en las fachadas O32 y D8 han revelado que la configuración geométrica y las propiedades específicas de los materiales influyen significativamente en su capacidad de resistencia y deformación.
- En los resultados obtenidos se ha evidenciado que existen aparejos que presentan diferencias significativas. Esto representado en modos de falla diferentes en las curvas pushover donde para el caso de edificaciones de una planta el modo de falla cuasi frágil es más notorio respecto al modo de falla de las fachadas de dos niveles donde se tiene un mayor rango de plasticidad y más rigidez.
- Los modos de falla por flexión y cizalladura, y sus combinaciones, han sido identificados y analizados. Estos presentan consistencia con análisis previos de posibles modos de falla en las fachadas de adobe.

Importancia de las características paramétricas: la variabilidad en los arreglos y espesores de muro afecta significativamente el comportamiento estructural, subrayando la necesidad de considerar estas características en el diseño y la rehabilitación de edificaciones históricas.

### **5.2. Recomendaciones**

En el desarrollo de la investigación se pudo constatar la poca información que existe sobre las propiedades físicas en materiales de tierra cruda y en específico de materiales usados en nuestro medio. Esto debido a la falta de investigaciones, de ensayos y a la variabilidad de la materia prima con la que se componen estos materiales. Por lo mencionado se recomienda realizar más investigación para contar con información fidedigna que nos permita tener una mayor fiabilidad en los resultados.

Otro aspecto es la información de las fachadas del centro histórico, que debe ampliarse con el tipo de aparejo específico de cada fachada, sus propiedades físicas y los sistemas

constructivos utilizados. Al tener una base de datos más amplia podemos obtener una mejor perspectiva de las características y la vulnerabilidad de estas fachadas, dando la oportunidad de estudiar soluciones para conservar las mismas.

### 5.3. Líneas de investigación futura

Esta investigación dio inicio al estudio de la influencia de las propiedades geométricas en el comportamiento de las fachadas de adobe. En estudios futuros pueden usar la misma metodología basada en análisis de daño para continuar esta línea de investigación. Los estudios subsecuentes podrán ampliar el análisis a otras propiedades que influyen en las fachadas y evaluar el comportamiento fuera del plano bajo cargas sísmicas, utilizando fachadas reales del centro histórico de Cuenca. A continuación, se plantean líneas de investigación futura que pueden arrojar resultados significativos tomando como punto de partida esta investigación.

- Realizar levantamientos reales de los aparejos del centro histórico de Cuenca y generar RVE's de los mismos: Sería de gran utilidad obtener parámetros reales de las fachadas que se encuentran en el centro histórico y analizarlos. Obtener información con respecto a las propiedades geométricas de las fachadas y de las cargas las cuales soportan las mismas. Esto permitiría obtener resultados específicos y con aplicaciones reales, lo que permitiría contribuir a la conservación de estos bienes patrimoniales.
- Realizar un estudio de vulnerabilidad sísmica: Es de vital importancia determinar el peligro que corren estos elementos, mediante un estudio de vulnerabilidad como lo pueden ser las curvas de fragilidad se puede tener una noción de las características con peor desempeño ante sismos y así clasificar fachadas más susceptibles a estos eventos.
- Estudiar soluciones a las fallas más comunes: Proponer soluciones a las fallas más comunes encontradas en este estudio puede proporcionar información valiosa para la conservación de estas fachadas. En este estudio se pudo observar que el principal mecanismo de falla es el volcamiento de las fachadas se debe estudiar los mecanismos óptimos para evitar este tipo de falla y evitar su colapso.



### Referencias

- Achig, M. C., Zúñiga, M. L., Balen, K. Van, & Abad, L. R. (2013). Revista semestral de la DIUC 71 Sistema de registro de daños para determinar el estado constructivo en muros de adobe. In *MASKANA* (Vol. 4, Issue 2).
- Alvarado, W. S. P., & Puma, J. D. P. (2020). *Comportamiento sísmico de paredes de adobe en el plano*. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/34881>
- Arcentález, C., & Pizarro, D. (2023). *Análisis paramétrico para determinar el comportamiento estructural de fachadas de adobe*.
- Arellano, M. (2018). *Después del 19S: Casa Rosales Milla / Israel Espín + Paola Domínguez (PienZa Sostenible)*.
- Bažant, Z. P., & Oh, B. H. (1983). Crack band theory for fracture of concrete. *Matériaux et Constructions*, 16(3), 155–177. <https://doi.org/10.1007/BF02486267>
- Blondet, M., & Garcia, G. M. V. (2003). *Earthquake-Resistant Construction of Adobe Buildings: A Tutorial*. [www.eeri.org](http://www.eeri.org)
- Cárdenas-Haro, X., Tarque, N., Todisco, L., León, J., & Pino, J. (2022). OUT-OF-PLANE FAILURE RESISTANCE OF ADOBE FACADES IN CUENCA - ECUADOR FOR DIFFERENT SEISMIC ACCELERATIONS. *Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management*, 1184–1192.
- Cárdenas-Haro, X., Todisco, L., & León, J. (2021). Database with compression and bending tests on unbaked earth specimens and comparisons with international code provisions. *Construction and Building Materials*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122232>
- Cárdenas-Haro, X., Todisco, L., León, J., Jurado, C., & Vergara, E. (2022). Geometry and Proportions of Adobe Vernacular Buildings in Cuenca, Ecuador. *International Journal of Architectural Heritage*, 16(8), 1270–1288. <https://doi.org/10.1080/15583058.2021.1879312>
- Chuya, E., & Ayala, M. (2018). *ADOBE TRADICIONAL CON ADOBE REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO*.
- Costa, C., Cerqueira, Â., Rocha, F., & Velosa, A. (2019). The sustainability of adobe

- construction: past to future. *International Journal of Architectural Heritage*, 13(5), 639–647. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1459954>
- D'Ayala, D. (2013). Assessing the seismic vulnerability of masonry buildings. *Handbook of Seismic Risk Analysis and Management of Civil Infrastructure Systems*, 334–365. <https://doi.org/10.1533/9780857098986.3.334>
- Enriquez, D. E. (2014). *Reforzamiento estructural para forjados de madera en edificaciones patrimoniales y contemporáneas* (Vol. 11, Issue 1).
- García, H. (2023). *Seismic vulnerability assessment of low-rise masonry buildings in Cuenca. April.*
- Hračov, S., Pospíšil, S., Garofano, A., & Urushadze, S. (2016). In-plane cyclic behaviour of unfired clay and earth brick walls in both unstrengthened and strengthened conditions. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 49(8), 3293–3308. <https://doi.org/10.1617/S11527-015-0720-5/METRICS>
- INEC. (2010). Base de Datos - Censo de Población y Vivienda 2010. In *Base de Datos-Censo de Población y Vivienda 2010*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/base-de-datos-censo-de-poblacion-y-vivienda-2010/>
- Jaramillo, G. (2019). *Manual de Materiales de construcción*.
- Jaramillo Paredes, D. (2004). Del plano de damero a la ciudad del migrante. In *Cuenca, Santa Ana de las Aguas*. Libri Mundi Quito.
- Jurado, C., & Vergara, E. (2019). *Estudio de la configuración geométrica y material de viviendas de construcción vernácula en un sector de Cuenca*.
- Lourenço, P., Almeida, J., & Barros, J. (2005). *Experimental investigation of bricks under uniaxial tensile testing*.
- Lourenço, P. B., Milani, G., Tralli, A., & Zucchini, A. (2007). Analysis of masonry structures: Review of and recent trends in homogenization techniques. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34(11), 1443–1457. <https://doi.org/10.1139/L07-097>
- Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., & Oñate, E. (1989). A plastic-damage model for concrete. *International Journal of Solids and Structures*, 25(3), 299–326. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(89\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0020-7683(89)90050-4)
- Ma, G., Hao, H., & Lu, Y. (2001). Homogenization of Masonry Using Numerical Simulations.

*Journal of Engineering Mechanics*, 127(5), 421–431.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2001\)127:5\(421\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2001)127:5(421))

Martínez, P. Q., & Angulo, E. R. (2016). *Estudio de peligro sísmico de Ecuador y propuesta de espectros de diseño para la Ciudad de Cuenca*.  
[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0185-092X2016000100001](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-092X2016000100001)

Miehe, C., Schröder, J., & Schotte, J. (1999). Computational homogenization analysis in finite plasticity simulation of texture development in polycrystalline materials. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 171(3–4), 387–418.  
[https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(98\)00218-7](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(98)00218-7)

MoscOSO-CORDERO, M. S. (2007). *I Congreso Internacional online Filosofía de la Sustentabilidad de Vivienda Tradicional “Transformando comunidades hacia el desarrollo local” EL ADOBE, SUS CARACTERÍSTICAS Y EL CONFORT TÉRMICO*.  
<http://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo->

Orellana, V. (2017). *Adobe, puesta en valor y estrategias para la conservación de una cultura constructiva*.

Pelà, L., Cervera, M., & Roca, P. (2011). Continuum damage model for orthotropic materials: Application to masonry. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 200(9–12), 917–930. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2010.11.010>

Petracca, M. (2016). Computational multiscale analysis of masonry structures. *TDX (Tesis Doctorals En Xarxa)*.

Petracca, M., Pelà, L., Rossi, R., Oller, S., Camata, G., & Spacone, E. (2016). Regularization of first order computational homogenization for multiscale analysis of masonry structures. *Computational Mechanics*, 57(2), 257–276. <https://doi.org/10.1007/s00466-015-1230-6>

Petracca, M., Pelà, L., Rossi, R., Zaghi, S., Camata, G., & Spacone, E. (2017). Micro-scale continuous and discrete numerical models for nonlinear analysis of masonry shear walls. *Construction and Building Materials*, 149, 296–314.  
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.05.130>

Quiroz, P. C., Moreno-Martínez, J. Y., Galván, A., & Matus, R. A. (2019). Obtención de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe mediante ensayos de laboratorio. *Acta Universitaria*, 29, 1–13. <https://doi.org/10.15174/au.2019.1861>

Reyes, J. C. (2004). *ALTERNATIVAS DE REHABILITACIÓN SÍSMICA PARA EDIFICACIONES EN ADOBE Y TAPIA PISADA EN EL BARRIO LA CANDELARIA DE BOGOTÁ*.

Saguay, E. (2023). *Modelación estática no lineal en fachadas de adobe con cargas sísmicas*.  
Universidad de Cuenca.

Viñuales, G. (1944). *Tecnología y construcción con tierra*.