



Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

Modelación estática no lineal en fachadas de adobe con cargas sísmicas

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

Autor:

Eliana Nicole Saguay Ortiz

Directores:

Angel Julver Pino Velázquez

ORCID:  0000-0003-3614-1465

Xavier Ricardo Cárdenas Haro

ORCID:  0000-0001-5063-7366

Cuenca, Ecuador

2023-09-05

Resumen

El Centro Histórico está conformado por aproximadamente un 43% de casas coloniales construidas con adobe, lo cual resalta la importancia y el significado histórico y cultural de este material. Sin embargo, también representan un potencial peligro frente a la actividad sísmica que puede afectar la región. La presente investigación se centra en el análisis del comportamiento de las fachadas de adobe del Centro Histórico de Cuenca ante cargas sísmicas como fallo fuera del plano. Para abordar la variabilidad de las propiedades del adobe, se utiliza un micromodelo basado en daño y se desarrolla una metodología para homogeneizar estas propiedades mediante Elementos Volumétricos Representativos (RVE). Estas propiedades se aplican en el análisis de fachadas tipo de una planta. Finalmente, se realizan análisis modal y no lineal para evaluar la respuesta estructural de las fachadas estudiadas. Los resultados obtenidos demuestran que la metodología propuesta proporciona una representación aceptable de las propiedades de la mampostería de adobe y que las mismas se pueden aplicar en situaciones reales. Se confirmó que el modo de vibración más significativo es el modo fuera del plano. Se concluye que las fachadas con dos luces exhiben una mayor resistencia sísmica y un comportamiento más rígido con deformaciones menores en comparación con aquellas que cuentan con tres luces. Los hallazgos contribuyen a una mejor comprensión de estas construcciones y enfatizan la importancia de futuras investigaciones en el campo para mejorar el desempeño sísmico y la preservación del patrimonio.

Palabras clave: adobe, fachadas de adobe, elementos finitos, análisis modal, análisis pushover



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 Historic Center consists of approximately 43% of colonial houses built with adobe, highlighting the historical and cultural significance of this material. However, they also represent a potential danger in the face of seismic activity that may affect the region. This research focuses on analyzing the behavior of adobe facades in the Historic Center of Cuenca under seismic loads, such as out-of-plane failure. To address the variability of adobe properties, a damage-based micromodel is employed, and a methodology for homogenizing these properties using Representative Volume Elements (RVEs) is developed. These properties are applied in the analysis of typical single-story facades. Finally, modal and nonlinear analyses are conducted to evaluate the structural response of the studied facades. The results obtained show that the proposed methodology provides an acceptable representation of adobe masonry properties and it can be applied in real-life situations. It is confirmed that the most significant vibration mode is the out-of-plane mode. It is concluded that two-opening facades exhibit greater seismic resistance and a more rigid behavior with minor deformations compared to three-opening facades. These findings contribute to a better understanding of these constructions and emphasize the importance of future research in the field to enhance seismic performance and heritage preservation.

Keywords: adobe, adobe facades, finite elements, modal analysis, pushover analysis



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

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

Índice de contenido

Capítulo 1: Introducción y Objetivos	13
1.1 Antecedentes	13
1.2 Planteamiento del problema	17
1.3 Objetivo General	17
1.4 Objetivos específicos	17
1.5 Organización de Capítulos	17
Capítulo 2: Estado de Arte	19
2.1 Introducción	19
2.2 Descripción de los métodos constructivos	19
2.2.1 Adobe	19
2.2.2 Tapial	19
2.2.3 Bahareque	20
2.3 Historia	20
2.4 Contexto de las construcciones de tierra en Ecuador	22
2.5 Importancia del patrimonio arquitectónico en la ciudad de Cuenca.	23
2.6 Normativa	26
2.7 Modelación	29
2.7.1 Micromodelación, homogenización y macromodelación.	29
2.7.2 Análisis Pushover	30
2.8 Software	31
Capítulo 3: Modelación mediante elementos finitos de fachadas de adobe	35
3.1 Introducción	35
3.2 Teoría del modelado	35
3.1.1 Modelo basado en daño	35
3.1.2 Criterio de Falla	36
3.1.3 Leyes evolutivas para variables de daño	39
3.1.4 Comportamiento a corte	40
3.1.5 Homogenización	42
3.1.6 Macromodelo	43
3.2 Definición de los ejes de referencia	44
3.3 Modelado del RVE	45
3.3.1 Definición de la geometría del RVE	45

3.3.2 Definición de las propiedades físicas del RVE	49
3.3.3 Definición de condiciones	54
3.4 Análisis y resultados del RVE	58
3.5 Selección de las fachadas de adobe	70
3.6 Modelado de las fachadas de adobe	80
3.6.1 Definición de la geometría de las fachadas de adobe	80
3.6.2 Definición de las propiedades físicas de las fachadas de adobe.	83
3.6.3 Definición de condiciones de las fachadas de adobe	85
3.7 Conclusiones	88
Capítulo 4: Evaluación estructural de fachadas	89
4.1 Introducción	89
4.2 Teoría del análisis modal	89
4.2.1 Valores de masa	89
4.2.2 Proceso computacional.	89
4.3 Teoría del análisis pushover.	90
4.3.1 Definición del patrón de carga	90
4.3.2 Solución numérica	91
4.4 Análisis de los casos modelados	92
4.4.1 Comparativa de la F1	92
4.4.2 Comparativas de fachadas con diferente carga de cubierta.	94
4.5 Conclusiones gráficas de los casos modelados	102
4.6 Conclusiones	105
Capítulo 5: Conclusiones, recomendaciones y líneas de investigación	107
5.1 Conclusiones	107
5.2 Recomendaciones	108
5.3 Líneas de investigación futura	108

Índice de figuras

Figura 1. Mapa con la ubicación epicentral del evento del 18 de marzo de 2023 (JGBL et al., 2023)	14
Figura 2. Localización de eventos en la zona del golfo. La escala de colores representa los días transcurridos desde el evento del 18 de marzo de 2023 (JGBL et al., 2023)	14
Figura 3. Fachadas de Adobe en la parroquia Gil Ramírez Dávalos (Jurado & Vergara, 2019)	16
Figura 4. Ciudad de Chan Chan, Perú. Construida de adobe (Jurado & Vergara, 2019).	21
Figura 5. Casa de las Posadas, Cuenca (Aguilar. Eddy et al., 2018).	23
Figura 6. Centro Histórico de Cuenca. Adaptado de https://viajalavida.com/que-hacer-en-cuenca-y-sus-alrededores/	24
Figura 7. Características geométricas según Norma E.080 (Norma E.080, 2017)	28
Figura 8. Representación esquemática del proceso de homogenización por el método RVE (García, 2023).	30
Figura 9. Software DIANA FEA (DIANA FEA, 2023)	32
Figura 10. Software Ansys (ANSYS Inc., 2022)	32
Figura 11. Software STKO (ASDEA, 2022)	33
Figura 12. Diagrama de flujo STKO (ASDEA, 2022)	34
Figura 13. Superficies de fallo a compresión para tres valores de k_1 . (a) $k_1 = 0$, (b) $k_1 = 0.16$ y (c) $k_1 = 0.5$ (Petracca, Pelà, Rossi, Zaghi, et al., 2017)	37
Figura 14. Superficies de daño inicial para esfuerzos en el plano (Petracca, Pelà, Rossi, Zaghi, et al., 2017)	38
Figura 15. Superficies de daño inicial para esfuerzos en el plano tridimensional (Petracca, Pelà, Rossi, Zaghi, et al., 2017)	38
Figura 16. Ley de esfuerzos uniaxiales. (a) ley de tracción uniaxial y (b) ley de compresión uniaxial (Petracca, Pelà, Rossi, Zaghi, et al., 2017)	40
Figura 17. Leyes de evolución para los modelos de daño (a) isotrópico y (b) ortótropico $d + d -$ en los cuadrantes de tensión/compresión.	41
Figura 18. Representación de ejes globales en STKO	45
Figura 19. Geometría del RVE en vista isométrica	45
Figura 20. Dimensiones del RVE en mm.	46
Figura 21. Dimensiones del bloque de adobe en mm.	47
Figura 22. Ensamblaje de RVEs en un muro de adobe (a) vista isométrica y (b) vista frontal.	48

Figura 23. Curva de ajuste para Ensayos de Catalán Quiroz (2019)	51
Figura 24. Esquema de la geometría que registra el desplazamiento y la fuerza de reacción.	58
Figura 25. Curvas de Fuerza-Deformación para compresión	59
Figura 26. Curvas de Fuerza-Deformación para tracción	59
Figura 27. Puntos de la curva σ - δ para compresión en X, Y y Z	60
Figura 28. Puntos de la curva σ - δ para tracción en X, Y y Z	60
Figura 29. Curva $\sigma - \varepsilon$ para compresión en (a)X, (b)Y y (c)Z	61
Figura 30. Curva σ - ε para tracción en (a)X, (b)Y y (c)Z	62
Figura 31. Proceso evolutivo del daño del material para compresión en Y.	64
Figura 32. Curva fuerza-deformación para corte en (a)XY, (b)ZY y (c)Z X	68
Figura 33. Frecuencia relativa de la longitud de la fachada	73
Figura 34. Frecuencia relativa de la altura de planta baja de la fachada	73
Figura 35. Frecuencia relativa de espesor de la fachada	74
Figura 36. Frecuencia relativa del número de puertas	74
Figura 37. Frecuencia relativa de la relación longitud de fachada longitud de profundidad	74
Figura 38. Geometría dibujada en STKO para la Fachada F2	80
Figura 39. Representación de los materiales en la geometría de la Fachada F2	81
Figura 40. Visualización de la interface (a) Ubicación del detalle y (b) detalle en donde se observa la interface entre el adobe y la madera.	81
Figura 41. Curva esfuerzo-deformación para el ensayo a la muestra A3 (Enríquez Morocho, 2014)	84
Figura 42. Esquema de una cubierta típica de edificación de adobe (Arcentález & Pizarro, 2023)	87
Figura 43. Esquema de una cubierta típica de edificación moderna (Arcentález & Pizarro, 2023)	87
Figura 44. Geometría F1 sin pared interior.	92
Figura 45. Primer modo de vibración para la fachada sin muro interior.	92
Figura 46. Primer modo de vibración para la fachada con muro interior.	93
Figura 47. Análisis pushover para F1 sin muro interior	93
Figura 48. Análisis pushover para F1 con muro interior	94
Figura 49. Curvas Pushover para F1	96
Figura 50. Análisis Pushover para F1_30 en t=30	96
Figura 51. Análisis Pushover para F1_46.8 en t=30	96
Figura 52. Curvas Pushover para F2	98

Figura 53. Análisis Pushover para F2_30 en t=30	98
Figura 54. Análisis Pushover para F2_46.8 en t=30	98
Figura 55. Curvas Pushover para F3	100
Figura 56. Análisis Pushover para F3_30 en t=30	100
Figura 57. Análisis Pushover para F3_46.8 en t=30	100
Figura 58 Curvas Pushover para F4	102
Figura 59. Análisis Pushover para F4_30 en t=30	102
Figura 60. Análisis Pushover para F4_46.8 en t=30	102
Figura 61. Curvas Pushover de todos los modelos	106

Índice de tablas

Tabla 1. Geometría del RVE en vistas frontal, planta y lateral.	46
Tabla 2. Espesores de los morteros.	47
Tabla 3. Comparativa de los tamaños de mallado	49
Tabla 4. Propiedades necesarias para el análisis de daño.	50
Tabla 5. Esfuerzos resistentes en compresión (f_m) y módulos de elasticidad (E_m) en pilas de adobe.(Catalán Quiroz et al., 2019)	50
Tabla 6. Valores de las propiedades físicas para el adobe	52
Tabla 7. Valores de las propiedades físicas para el adobe	52
Tabla 8. Parámetros a ingresar en STKO para la resolución por MEF.	53
Tabla 9. Ubicación de las restricciones en el análisis de compresión y tracción en X, Y y Z	54
Tabla 10. Representación de la dirección de aplicación de carga mediante vectores para compresión y tracción	56
Tabla 11. Representación de la dirección de aplicación de carga mediante vectores para corte	57
Tabla 12. Resultados de Energía (N/mm)	63
Tabla 13. Resultados de f_c y f_t	63
Tabla 14. Resultados de los módulos elásticos	63
Tabla 15. Resultados del daño del material a compresión.	65
Tabla 16. Resultados de desplazamiento a compresión.	66
Tabla 17. Resultados de módulos de corte	68
Tabla 18. Relaciones entre módulos elásticos y módulos de corte.	69
Tabla 19. Resultados de desplazamiento a corte.	69
Tabla 20. Resumen de dimensiones de fachadas de una planta	71
Tabla 21. Rangos para longitud de fachada	71
Tabla 22. Rangos para altura de fachada	72
Tabla 23. Rangos para espesor de fachada	72
Tabla 24. Rangos para número de puertas	72
Tabla 25. Rangos para relación longitud de fachada longitud de profundidad	73
Tabla 26. Ranking de fachadas	75
Tabla 27. Fotografías de fachadas de una planta analizadas. (Jurado & Vergara, 2019)	76
Tabla 28. Dimensiones de fachadas tipo.	78
Tabla 29. Esquema de dimensiones de las fachadas tipo	78
Tabla 30. Geometría dibujada en STKO	81

Tabla 31. Definición de la propiedad LayeredShell para las fachadas.	83
Tabla 32. Tabla de datos para el ensayo a la muestra A3 (Enríquez Morocho, 2014)	85
Tabla 33. Propiedades físicas de la madera y la interface.	85
Tabla 34. Resumen de pesos de los materiales para una cubierta típica de edificación de adobe. (Arcentález & Pizarro, 2023)	86
Tabla 35. Resumen de pesos de los materiales para una cubierta típica de edificación moderna (Arcentález & Pizarro, 2023)	86
Tabla 36. Modos de Vibración para F1 sin muro interno.	94
Tabla 37. Modos de Vibración para F1.	95
Tabla 38. Modos de Vibración para F2.	97
Tabla 39. Modos de Vibración para F3.	99
Tabla 40. Modos de Vibración para F4.	101
Tabla 41. Grietas en las Fachadas F1, F2, F3 y F4	103
Tabla 42. Daño en las Fachadas F1, F2, F3 y F4	104

Dedicatoria

Quiero reconocer tu determinación, valentía y perseverancia, demostraste una dedicación inquebrantable. Te felicito por tu esfuerzo y te animo a seguir persiguiendo tus metas con la misma pasión y compromiso.

Eres una inspiración para mí.

Agradecimiento

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 me brindaron valiosas oportunidades y cuyo apoyo y paciencia fueron clave para cumplir nuestros objetivos.

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

A mis padres, Flora y Walter, quienes siempre han respaldado mis decisiones y proyectos, brindándome su amor y apoyo incondicional.

A mi hermano Martín, cuyos comentarios y apoyo han sido de gran importancia en cada etapa de este proceso, motivándome a seguir adelante y alcanzar mis metas.

A mis abuelitos, Rosa y Juan, quienes me han brindado consejos llenos de cariño y sabiduría.

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

A Omar, un amigo incondicional que estuvo presente en cada paso de esta travesía, brindándome su amistad sincera y su apoyo constante.

A mi amiga de cuatro patas, quien ha sido mi compañera desde mi infancia, brindándome su amor incondicional y su lealtad en todo momento.

Eliana

Capítulo 1: Introducción y Objetivos

1.1 Antecedentes

En el ámbito global, Ecuador se encuentra ubicado en una región geográfica con alto riesgo sísmico, formando parte del conocido Cinturón de Fuego del Pacífico. Esta zona se caracteriza por ser un área donde convergen diversas placas tectónicas, lo que resulta en una intensa actividad sísmica y volcánica. De hecho, se considera una de las regiones más significativas en términos de actividad sísmica a nivel mundial (Tavera, 2020).

A nivel regional, en el océano Pacífico, se encuentran dos límites de placas divergentes: la Dorsal del Pacífico Oriental y el Centro de Expansión de Galápagos, donde se genera constantemente nueva corteza oceánica. Las placas del Pacífico y Cocos se separan, mientras que la placa de Nazca se desplaza hacia el este y colisiona con la costa sudamericana. Sin embargo, la presencia de las cordilleras de Carnegie y Grijalva impide que la placa de Nazca se sumerja completamente debajo del continente. Estas cordilleras han estado ingresando a la zona de subducción durante millones de años, penetrando a gran profundidad bajo el continente. Esta configuración indica que dos placas con densidades diferentes están unidas a lo largo de una zona débil y se están subduciendo debajo del territorio ecuatoriano. Como resultado, se esperan futuros terremotos en Ecuador a lo largo de la mega-falla Guayaquil-Caracas, debido a la colisión y subducción entre las placas oceánicas de Nazca y las placas continentales del Caribe y Sudamérica (Yepes et al., 2016).

En Sudamérica, se han realizado numerosos estudios sobre la resistencia sísmica de las construcciones de adobe, especialmente en países como Colombia, Chile, Argentina y, sobre todo, Perú, que ha sido un referente en esta área. Un ejemplo destacado es el terremoto ocurrido en Chile el 27 de febrero de 2010 de magnitud 8.8 en la escala MW, que resultó en la destrucción de más de 140,000 viviendas de adobe. La mayoría de estas construcciones no contaban con un refuerzo antisísmico, lo que pone en evidencia la vulnerabilidad de las edificaciones de adobe ante eventos sísmicos de gran magnitud (Pesántez Alvarado & Portugal Puma, 2020).

Desde la perspectiva de Ecuador, es fundamental reconocer las fuentes primarias de los terremotos en el país para comprender la probabilidad de eventos fuertes que puedan causar víctimas humanas y pérdidas en infraestructuras. Además, la evaluación de la amenaza sísmica de un sitio es un requisito previo para calcular la vulnerabilidad sísmica de las estructuras más comunes, como los edificios residenciales (García, 2023). Esta comprensión resulta esencial para mitigar los impactos de los terremotos y proteger a la población y las

edificaciones ante posibles eventos sísmicos en el país. La actividad sísmica más reciente en el país sucedió el 18 de marzo de 2023, a las 12:12 p.m., se produjo un sismo en la región del Golfo de Guayaquil, con epicentro en el extremo nororiental de la Isla Puná como se observa en la Figura 1. Este evento sísmico tuvo una magnitud momento (M_w) de 6.64 y ocurrió a una profundidad de 63.1 kilómetros y se registraron 30 réplicas en los siguientes 3 días como se observa en la Figura 2. (JGBL et al., 2023). El terremoto tuvo un impacto significativo en varias provincias del país, incluyendo Guayas, Manabí, Santa Elena y Los Ríos. Se registraron daños en edificios, infraestructuras y viviendas, así como pérdidas humanas y numerosos heridos. La población se vio afectada por el colapso de estructuras y la interrupción de servicios básicos como el suministro de agua y la electricidad.



Figura 1. Mapa con la ubicación epicentral del evento del 18 de marzo de 2023 (JGBL et al., 2023)



Figura 2. Localización de eventos en la zona del golfo. La escala de colores representa los días transcurridos desde el evento del 18 de marzo de 2023 (JGBL et al., 2023)

Como consecuencia, en la ciudad de Cuenca se reportaron incidentes que causaron daños a infraestructuras y personas. En las calles Sucre y Tarqui, se produjo el colapso de una estructura que cayó sobre un vehículo en el que viajaban tres personas, resultando en el fallecimiento de una persona y dejando a dos personas heridas (Redacción El Mercurio, 2023a). Además, se registraron otros daños en diferentes partes de la ciudad de Cuenca como resultado del sismo. En la zona de Barrial Blanco - Del Chorro, una vivienda sufrió daños en su fachada. En la zona de General Torres - Simón Bolívar, se reportó la caída de piedras y escombros de un edificio en la esquina. Asimismo, en la zona de Mariscal Lamar - Benigno Malo, una vivienda presentó daños estructurales (Redacción El Mercurio, 2023b)

La alta actividad sísmica en Ecuador ha puesto de manifiesto la importancia de evaluar la resistencia y vulnerabilidad de las construcciones frente a estos eventos. En este contexto, el uso extendido del adobe como material de construcción en el país plantea preocupaciones adicionales debido a su potencial fragilidad ante sismos de gran magnitud. Los terremotos mencionados han evidenciado los efectos devastadores que pueden tener en las edificaciones de adobe que carecen de refuerzos sismo resistentes adecuados. Por lo tanto, comprender los desafíos asociados con las construcciones de adobe y buscar soluciones para mejorar su resistencia sísmica se vuelve fundamental para mitigar los riesgos y proteger la seguridad de la población en zonas sísmicas como Ecuador.

Aproximadamente el 30% de la población mundial reside en viviendas construidas con materiales de tierra, utilizando diversas técnicas como la tapia, el bahareque o el adobe (Cárdenas-Haro et al., 2021) . Estas técnicas tradicionales de construcción fueron ampliamente utilizadas en diferentes regiones del mundo pues ofrecían una solución económica y sostenible.

La construcción con tierra tiene una larga historia en Iberoamérica, con más de cinco mil años de antigüedad, y en algunos países de la región todavía se mantiene vigente (Amaya et al., 2017). En el caso de Ecuador, el uso de la tierra como material de construcción se remonta a épocas pre incásicas e incásicas, y se fortaleció durante la época colonial y el periodo republicano, dejando registros físicos que aún perduran en la actualidad (Amaya et al., 2017). Según los datos del Instituto Nacional de Estadísticas Censos del Ecuador (INEC, 2010) la presencia de construcciones de tierra se ha mantenido predominantemente en la región interandina en los últimos veinte años. Es interesante destacar que, en provincias como Loja y Azuay, aproximadamente una de cada cuatro viviendas está construida con tierra. Asimismo, se estima que el 9.23% de las viviendas en Ecuador están construidas en adobe,

tapia o bahareque. Sin embargo, resulta preocupante que solo el 16.97% de los propietarios considere que su vivienda está en buen estado, mientras que el 54.52% la considera en estado regular y el 28.5% la considera en mal estado.

En el año 1993, en el área comprendida entre las calles Juan Montalvo, Benigno Malo, Mariscal Sucre y Calle Larga, aproximadamente el 67% de las construcciones eran edificaciones hechas de adobe y bahareque. Con el fin aumentar sus ingresos, los propietarios de estas viviendas buscaron lugares mejores para vivir y optaron por arrendar las edificaciones del centro histórico. Para maximizar su rentabilidad, llevaron a cabo diversas modificaciones, tales como divisiones internas, construcción de pisos intermedios y ampliaciones, con el objetivo de obtener un mayor número de habitaciones disponibles para atraer así a más inquilinos (Coronel & Paredes, 1993). Aunque estas edificaciones presentan diversas configuraciones geométricas y materiales, todas comparten una característica común: sus muros portantes están contruidos con adobe, y las fachadas están completamente realizadas con este mismo material como se ejemplifica en la Figura 3 (Cárdenas-Haro et al., 2022).



Figura 3. Fachadas de Adobe en la parroquia Gil Ramírez Dávalos (Jurado & Vergara, 2019)

A nivel mundial, se han llevado a cabo numerosos estudios en paredes de adobe (Hračov et al., 2016) y se han realizado simulaciones utilizando métodos de elementos finitos para aproximarse a las condiciones de carga y contorno de dichas construcciones (Blondet et al., 2011). Sin embargo, es importante destacar que existe una escasez notable de formulaciones que permitan evaluar los modos de falla específicos del adobe (Pesántez Alvarado & Portugal Puma, 2020). Arcentales y Pizarro (2023) de la Universidad de Cuenca trabajaron en una tesis para determinar propiedades físicas y mecánicas de los muros compuestos de mortero y adobe. Se utilizó el método experimental en laboratorio y luego su análisis en software computacional.

Petracca et al. (2017) presentan modelos de elementos finitos capaces de aproximar, los resultados experimentales de materiales que tienen una composición similar al adobe.

1.2 Planteamiento del problema

Este trabajo se centrará en el análisis del comportamiento de los muros de las fachadas de adobe en el Centro Histórico de Cuenca (Ecuador), un lugar reconocido como Patrimonio de la Humanidad desde 1999. La investigación se enfocará en configuraciones geométricas generalizadas y considerará una carga sísmica aplicada fuera del plano de la fachada. Para este propósito, se tomarán como referencia las fachadas de adobe de una planta ubicadas en la parroquia Gil Ramírez Dávalos.

Para llevar a cabo el análisis, se utilizará tanto un micro modelo como un macromodelo en el software OpenSees, una herramienta de desarrollo de aplicaciones para simular el comportamiento de sistemas estructurales sometidos a sismos. Para facilitar la visualización de los datos complejos y la interacción con el software, se empleará la interfaz gráfica Scientific ToolKit for OpenSees (STKO). Mediante esta combinación de herramientas, se busca obtener resultados precisos y detallados sobre el comportamiento de las fachadas de adobe en estas condiciones sísmicas específicas.

1.3 Objetivo General

Análisis de comportamiento de las fachadas de adobe del Centro Histórico de Cuenca ante cargas sísmicas como fallo fuera del plano de las fachadas.

1.4 Objetivos específicos

- Caracterización física y geométrica de las fachadas del centro histórico de Cuenca.
- Modelación y simulación de las fachadas
- Determinación del comportamiento estructural de las fachadas de adobe.

1.5 Organización de Capítulos

La investigación se estructurará en cinco capítulos.

Capítulo 1: Introducción y objetivos

En este primer capítulo, se abordará la identificación del problema planteado y se establecerán los objetivos de la investigación. Se describirá la sismicidad que envuelve al país y la consecuente importancia de estudiar las respuestas de las edificaciones de adobe.

Capítulo 2: Estado de Arte

El segundo capítulo estará dedicado a explorar la historia de las edificaciones de adobe, desde sus orígenes hasta ejemplos reconocidos a nivel mundial. Se analizan las características específicas de las fachadas de adobe de Cuenca, las normativas nacionales e internacionales aplicables y la vulnerabilidad estructural. Este capítulo sienta las bases para la investigación en curso, identificando áreas de mejora y posibles enfoques para mitigar los riesgos asociados a estas construcciones.

Capítulo 3: Modelación mediante elementos finitos de fachadas de adobe

En el tercer capítulo, se llevará a cabo la modelación de las fachadas de adobe utilizando la metodología de elementos finitos. Se desarrollarán modelos RVE (Representative Volume Elements) para representar de manera equivalente las características del material y las geometrías de estudio. Además, se aplicará la macromodelación mediante elementos finitos para simular las fachadas de adobe en condiciones sísmicas. Se describirán en detalle los procedimientos utilizados y se presentarán los resultados obtenidos a través de las simulaciones numéricas.

Capítulo 4: Evaluación estructural de fachadas

El cuarto capítulo se centrará en el análisis estructural de las fachadas de adobe. En este capítulo se presentarán los modos de vibración y las curvas del análisis no lineal (pushover) de las fachadas. Se realizarán los análisis mediante métodos de elementos finitos teniendo en cuenta la geometría y propiedades del adobe obtenidas por el RVE. En la primera sección se realizarán los análisis modales para identificar el comportamiento dominante y las propiedades modales. La segunda parte consiste en realizar los análisis pushover en los mismos modelos de los análisis modales.

Capítulo 5: Conclusiones, recomendaciones y líneas de investigación

En el último capítulo, se presentarán las conclusiones generales derivadas de la investigación. Se resumirán los hallazgos más importantes y se responderán a los objetivos planteados en el capítulo inicial. Además, se ofrecerán recomendaciones prácticas basadas en los resultados obtenidos y se propondrán posibles líneas de investigación futuras para seguir avanzando en el estudio de las edificaciones de tierra y las fachadas de adobe. Este capítulo cerrará la investigación proporcionando una visión integral y ofreciendo perspectivas para continuar enriqueciendo el campo de estudio.

Capítulo 2: Estado de Arte

2.1 Introducción

Las diversas regiones geográficas del territorio ecuatoriano juegan un papel crucial en el desarrollo y evolución de la construcción en tierra cruda. La arquitectura en tierra refleja un progreso gradual a lo largo del tiempo. Entre los métodos constructivos utilizados, se encuentran el adobe, que consiste en la elaboración de muros a mano y su posterior secado al sol (PNUD, 1987a). También se emplea el tapial, que implica la construcción de muros de tierra entre tablas mediante un cofre (PNUD, 1987b). Además, el bahareque es otra técnica utilizada, que consiste en la combinación de madera, carrizos o cañas entrelazados con tierra (Minke, 2006). Estos métodos han sido aplicados en una amplia gama de construcciones, desde viviendas unifamiliares hasta templos de gran complejidad formal, lo que demuestra su versatilidad y adaptabilidad en diferentes contextos arquitectónicos (L. Lara, 2017)

2.2 Descripción de los métodos constructivos

Se han analizado varios tipos de construcciones en tierra, entre los cuales se incluyen el tapial, el adobe, los adobones (que son de mayor tamaño que el adobe) y el bahareque. Estas definiciones brindan una comprensión más clara de los conceptos de adobe, tapial y bahareque dentro del contexto de la arquitectura en tierra cruda (L. Lara, 2017).

2.2.1 Adobe

Según la definición proporcionada por Darío Donoso, el adobe se refiere a una masa de barro mezclada con paja cortada, moldeada en forma de ladrillo utilizando un molde de madera y luego secada al aire. A diferencia de un ladrillo convencional, el adobe tiene un tamaño mucho mayor. Según la definición en el Glosario de arquitectura de la INPC, el adobe consiste en una masa rectangular de barro mezclada con paja cortada y secada al sol y al aire (INPC, 2010)

2.2.2 Tapial

De acuerdo con el Vocabulario básico de arquitectura de Paniagua Soto, el tapial se define como cada uno de los trozos de pared construidos de una sola vez utilizando tierra amasada y apisonada entre dos tapias. Los muros construidos con este método se llaman tapia.

En la definición de Ulloa, el tapial emplea tierra con una humedad adecuada como material constructivo fundamental, pero requiere de un encofrado donde se compacta la tierra en capas. Sin embargo, se ha observado que las construcciones realizadas con este método no han resistido bien el paso del tiempo (Ulloa, 2013).

2.2.3 Bahareque

En el Glosario de arquitectura del INPC, el bahareque se describe como una estructura compuesta por varas de carrizo, chonta o caña guadúa que se entrelazan y clavan, y posteriormente se recubren con barro o chocoto en ambas caras. Su apariencia se asemeja a la de un tabique con un espesor de 5 a 8 cm y una altura variable. (INPC, 2010).

El bahareque es un sistema constructivo que utiliza un entramado de madera, donde los espacios abiertos están formados por elementos verticales u horizontales, como cañas, que luego se rellenan y recubren con tierra. Incluso se ha utilizado conchas de coco (Henneberg de León, 2012) y gravaca de color gris pardo para rellenar los bahareques, que están conformados por horcones separados a distancias que varían entre 0.65 m y 2.40 m (M. L. Lara & Bustamante, 2022).

2.3 Historia

El material de tierra, conocido bajo distintos nombres como hormigón de tierra, barro seco, tapial, bahareque o adobe, ha sido utilizado desde el neolítico, hace aproximadamente once mil años (Dall'Orto, 2016). La utilización de la tierra cruda como material de construcción posee una rica historia que se extiende hasta las culturas antiguas y ha persistido particularmente en las zonas rurales. En diversas partes del mundo, las primeras construcciones de importancia se llevaron a cabo utilizando la tierra como material principal.

El adobe, cuyos orígenes se remontan a Mesopotamia alrededor del año 3000 a.C., ha experimentado una evolución en su forma a lo largo del tiempo. Inicialmente, los adobes tenían una forma cónica, pero con el paso del tiempo se comenzaron a producir ladrillos alargados y posteriormente se descubrieron las formas rectangular y cuadrada, que prevalecen en la actualidad (Reinoso, 2018). Los vestigios de uso de adobe se remontan al periodo Neolítico, aproximadamente entre 8000 y 6000 a.C., y han sido descubiertos en lugares como Turquistán. Además, se han hallado construcciones de adobe en Çatalhöyük, un destacado asentamiento urbano neolítico en el Oriente Medio, con una antigüedad de unos 9000 años. Otro ejemplo notable es Gonur Depe en Turkmenistán, una ciudad oasis que se desarrolló entre los años 2500 y 1600 a.C. y que cuenta con una extensa área urbana rodeada por una fortaleza (Aguilar. Eddy et al., 2018). Estos hallazgos arqueológicos son testigos de la antigua y continua tradición de utilizar la tierra cruda como material de construcción en diferentes épocas y regiones.

En América, existen numerosos ejemplos de construcciones en tierra que son testimonio de la valoración y conservación de este material a lo largo de la historia. Desde Norteamérica hasta Chile, se han encontrado evidencias de edificaciones construidas en tierra.

Con la llegada de los españoles a América en 1492, el uso del adobe se enriqueció. En Europa, la construcción en tierra estaba altamente desarrollada gracias a las influencias orientales que los árabes llevaron a España. Este intercambio de conocimientos generó una nueva tradición constructiva colonial que se adaptó de manera efectiva al medio ambiente. En América del Sur, se construyeron grandes centros coloniales como Cuzco, Lima, Quito, Potosí y La Paz, donde se desarrollaron técnicas y estilos constructivos en tierra que aún son evidentes en las iglesias y viviendas de estos lugares. En Perú, por ejemplo, se encuentran la Ciudad de Chan Chan (Figura 4), que data del año 600 d.C., y la Ciudad Sagrada de Caral, que existió entre los años 3000 y 1800 a.C. Estas ciudades, en su mayoría, fueron construidas utilizando adobes. Los Incas, uno de los grandes imperios de la región, también valoraron y conservaron la tierra como material de construcción. Durante su expansión territorial, respetaron los monumentos preexistentes construidos en adobe y añadieron sus propios templos construidos con el mismo material, pero utilizando técnicas y características propias (Fundación Altiplano, 2011). A pesar de la aparición de nuevos tratamientos decorativos basados en los órdenes clásicos durante la época republicana, la tierra siguió siendo un material de construcción importante en la edificación de muchos centros históricos, como es el caso de la ciudad de Cuenca.



Figura 4. Ciudad de Chan Chan, Perú. Construida de adobe (Jurado & Vergara, 2019).

2.4 Contexto de las construcciones de tierra en Ecuador

En Ecuador, la arquitectura vernácula o "arquitectura sin arquitectos" (Rudofsky, 2000) refleja la respuesta arquitectónica a las necesidades de las comunidades, basada en el material de construcción disponible en cada región geográfica y en las características meteorológicas propias de cada zona. La construcción en tierra cruda se desarrolla de manera espontánea por parte del pueblo, aprovechando una respuesta imaginaria ancestral a su necesidad fundamental de refugio. Las cuatro regiones geográficas del territorio ecuatoriano forman parte de este dinamismo constructivo evolutivo en tierra cruda, y los vestigios de arquitectura en tierra reflejan un crecimiento progresivo.

En el territorio ecuatoriano, se generan numerosas respuestas arquitectónicas con construcciones en tierra cruda, las cuales son influenciadas por la etnia, la cultura, la cosmovisión, el idioma, entre otros aspectos, que caracterizan la construcción en tierra como una respuesta a las necesidades particulares de hábitat en el espacio. A lo largo de la geografía ecuatoriana, la construcción en tierra se ha extendido dentro del imaginario colectivo popular en mayor o menor escala, siendo más predominante en las zonas de la sierra en comparación con la costa y el oriente. Por otro lado, en la región insular, la construcción en tierra no es trascendental, sino que se ha convertido en una respuesta moderna para lograr una arquitectura sustentable y sostenible (L. Lara, 2017).

En el contexto de la ciudad de Cuenca, se encuentran evidencias históricas del uso de la técnica del adobe desde antes de la época incaica. Durante el período colonial, esta práctica se mantuvo, y actualmente se conserva un ejemplo de ello en la Casa Patrimonial de las Posadas (Figura 5). Incluso en la época republicana, a pesar de la introducción de nuevos estilos arquitectónicos, el adobe continuó utilizándose en la construcción de nuevas edificaciones. Sin embargo, a principios del siglo XX, la falta de conocimiento sobre conservación y la introducción de nuevos materiales, como el hormigón y el acero, llevaron al desplazamiento del uso del adobe, lo que resultó en una pérdida del 34% del patrimonio edificado, según la Actualización del Inventario Patrimonial de 1998 realizada por el INEC. A pesar de estos cambios, las técnicas de adobe y tapial todavía se emplean en la construcción de nuevas edificaciones. El Instituto Nacional de Patrimonio Cultural (INPC) ha registrado 184 nuevas edificaciones construidas en tierra en todo el Ecuador en los últimos 10 años, con 54 de ellas ubicadas en la provincia del Azuay.



Figura 5. Casa de las Posadas, Cuenca (Aguilar. Eddy et al., 2018).

Estos datos demuestran que, a pesar de los desafíos y cambios en las preferencias constructivas a lo largo del tiempo, las técnicas de construcción en tierra, como el adobe y el tapial, siguen siendo valoradas y utilizadas en la actualidad debido a su tradición, estética y vínculo con el patrimonio cultural (Aguilar. Eddy et al., 2018).

2.5 Importancia del patrimonio arquitectónico en la ciudad de Cuenca.

Los datos proporcionados por el World Heritage Earthen Architecture Programme (WHEAP) y el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos del Ecuador (INEC) resaltan la importancia continua de las técnicas constructivas de adobe y tapial a nivel internacional y en América Latina y el Caribe. Según el WHEAP, aproximadamente el 50% de las 150 ciudades inscritas en la lista de Patrimonio Mundial tienen construcciones en adobe, mientras que el 20% tienen tapial. En el caso específico de América Latina y el Caribe, el 60% de las ciudades inscritas utilizan adobe y el 26% emplea tapial. Estos datos evidencian la vigencia y relevancia de estas técnicas constructivas hasta la actualidad (Aguilar. Eddy et al., 2018)

Un ejemplo destacado de la importancia de estas técnicas es la ciudad de Cuenca, cuyo Centro Histórico (Figura 6) fue declarado Patrimonio Cultural del Estado en 1982 y posteriormente inscrito en la lista de Bienes de Valor Universal Excepcional por la UNESCO en 1999. Esta distinción se otorgó en base a los criterios II, IV y V de la Convención de Patrimonio Mundial. El criterio II destaca el importante intercambio de valores humanos en arquitectura, tecnología, artes monumentales, planificación urbana y diseño de paisajes que

se encuentra en el Centro Histórico de Cuenca. El criterio IV resalta que el centro histórico es un ejemplo sobresaliente de un conjunto arquitectónico que ilustra etapas significativas en la historia de la humanidad y el criterio V reconoce que es un ejemplo destacado de un asentamiento humano tradicional y representa la interacción de la cultura con el medio ambiente. Estos reconocimientos por parte de la UNESCO subrayan la riqueza cultural, artística y arquitectónica, así como su importancia como patrimonio cultural de la humanidad (Jurado & Vergara, 2019).



Figura 6. Centro Histórico de Cuenca.

Adaptado de <https://viajalavida.com/que-hacer-en-cuenca-y-sus-alrededores/>

En la ciudad de Cuenca, el Centro Histórico se compone aproximadamente de un 43% de casas coloniales construidas con adobe (Barrera Zúñiga & Peñaloza Moran, 2018). Sin embargo, varios estudios han demostrado que estas viviendas presentan una alta vulnerabilidad sísmica debido a la fragilidad de este material (Tarque, 2008). Esto se debe a su elevado peso estructural y a su baja resistencia (Blondet et al., 2003). En caso de un evento sísmico, las edificaciones construidas con adobe podrían resultar dañadas parcial o totalmente, lo que tendría un impacto en términos sociales, económicos y en la afectación del patrimonio arquitectónico (Pesántez Alvarado & Portugal Puma, 2020)

Después del terremoto de Pedernales en 2016, la Red Sísmica del Austro (RSA) se reunió con el Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) de Cuenca para abordar la amenaza sísmica en la ciudad y la vulnerabilidad de su patrimonio edificado, especialmente en el Centro Histórico. El proyecto P-BID 400, titulado "Amenaza sísmica en el Austro,

vulnerabilidad y riesgo sísmico en la Ciudad de Cuenca", llevado a cabo por la RSA entre los años 1998 y 2001, identificó la falla geológica de Girón como la fuente sismogénica crítica para la ciudad de Cuenca, con un potencial sísmico estimado de 7.1 en magnitud de momento (Jiménez et al., 2018).

En este contexto, diversos estudios realizados en la ciudad de Cuenca, incluyendo el proyecto P-BID 400, han revelado que las edificaciones del centro histórico no solo están sujetas a procesos de deterioro causados por factores ambientales y humanos, sino que también presentan un alto nivel de amenaza sísmica. Este hallazgo ha sido corroborado por el estudio de la RSA antes mencionado (Jiménez et al., 2018)

Según datos de inventario, la mayoría de las edificaciones patrimoniales en Cuenca están construidas en tierra, ya sea adobe o bahareque. En específico, el 43.2% de las fachadas y el 18.2% de las estructuras de las edificaciones inventariadas corresponden a adobe (Achig et al., 2013).

A lo largo del tiempo, estas edificaciones han sufrido los efectos de desastres naturales, procesos de rehabilitación y adaptaciones para nuevos usos, lo cual ha generado cambios significativos en su estructura. Sin embargo, entre los años 1930 y 1940, se produjo un cambio en las corrientes de diseño que favoreció el uso de ladrillo y hormigón en lugar de la tierra, lo que provocó la disminución del uso de adobe y la pérdida de un importante patrimonio edificado. (Leroy et al., 2005).

En la ciudad de Cuenca, donde se encuentra un gran número de edificaciones de adobe que poseen valor patrimonial, se enfrenta el desafío de la vulnerabilidad ante posibles eventos sísmicos debido a la ubicación geográfica de la ciudad. Por lo tanto, es de vital importancia llevar a cabo estudios especializados que contribuyan a prevenir desastres en esta área (Pesántez Alvarado & Portugal Puma, 2020).

A través de la realización de estos estudios y la implementación de medidas adecuadas, es posible fortalecer las estructuras de adobe, reduciendo su vulnerabilidad sísmica y preservando al mismo tiempo el patrimonio cultural de la ciudad. Es fundamental lograr un equilibrio entre la preservación de la herencia arquitectónica y la seguridad de los habitantes, mediante la adopción de estrategias que permitan asegurar la integridad estructural de las construcciones de adobe en caso de eventos sísmicos.

Esto resalta la importancia de llevar a cabo investigaciones exhaustivas para comprender y preservar adecuadamente el patrimonio construido en tierra, así como valorar su significado cultural e histórico en el contexto específico de cada región.

2.6 Normativa

A nivel mundial, la mayoría de normas de construcción con tierra, se centran en el estudio de una única técnica constructiva, como adobe, BTC (Bloque de Tierra Comprimido) o tapial. Estos documentos contienen disposiciones específicas para cada una de estas técnicas. Por ejemplo, las normas SAZS 724 e IS 2110 son exclusivas para tapial, mientras que la norma peruana NTE E 080 se enfoca únicamente en el adobe. Además, se mencionan normas específicas para el adobe estabilizado con asfalto, como las NTP 331.201, NTP 331.202 y NTP 331.203. En cuanto al bloque de tierra comprimido, se mencionan normas como la francesa XP P13-901, la colombiana NTC 5324, la keniana KS 02-1070 y la norma española UNE 41410. Es importante destacar que estos son solo algunos ejemplos de normas específicas para cada técnica constructiva, y es probable que existan otras normas y regulaciones en diferentes países que aborden estas técnicas de construcción.

El trío de normas neozelandesas, es el más amplio y completo, ya que abarca desde requisitos de materiales y construcción hasta cuestiones de diseño estructural y durabilidad de las edificaciones de tierra, tanto para adobe como para bloque de tierra comprimido o tapial. En relación a la fabricación de las unidades, se menciona que las normas brasileñas y la ARS 680 abordan este tema específicamente para el bloque de tierra comprimido. Las disposiciones sobre construcción y ejecución se encuentran detalladas en la NMAC 14.7.4 de Nuevo México, la SAZS 724 de Zimbabue, la NTE E 0.80 de Perú, la NZS 4298 de Nueva Zelanda y la norma africana ARS 682.

En cuanto al ensayo de materiales utilizados en la construcción en tierra, se observa que el avance tecnológico se ha enfocado principalmente en la investigación de materiales de uso masivo, como unidades de arcilla cocida o bloques de concreto. Sin embargo, la normalización de los materiales básicos de este sistema constructivo no se ha profundizado lo suficiente. Esto se debe, en parte, al bajo uso que actualmente tiene el adobe como material estructural, así como a otras variables del sistema constructivo en tierra cruda.

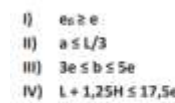
En el contexto ecuatoriano, el terremoto del 16 de abril de 2016 reveló deficiencias en la normativa de construcción y en su aplicación adecuada, especialmente en lo que respecta al diseño sismorresistente de edificaciones de adobe. Estos problemas fueron evidenciados por los graves daños causados por el sismo. La norma de construcción en Ecuador, NEC (Norma Ecuatoriana de la Construcción), en su sección NEC-SE-DS presentó falencias en su enfoque hacia el peligro sísmico y el diseño de estructuras que puedan resistir los efectos de un terremoto (Quinde Martínez & Reinoso Angulo, 2016)

Dentro de la normativa ecuatoriana de la construcción (NEC) no existe un apartado que desarrolle normativa para construcción en adobe. En su defecto, se hace referencia a la norma peruana E.80 en lo que respecta a la construcción con tierra. Sin embargo, se destaca la necesidad de contar con una norma propia que se ajuste a la sismicidad del Ecuador. Se hace hincapié en la importancia de mostrar las patologías constructivas y contrastarlas con las recomendaciones de la norma peruana, con el objetivo de concienciar a los usuarios sobre la necesidad de capacitarse en tecnología en tierra (Cevallos, 2015).

La norma peruana de Diseño y Construcción con Tierra establece una serie de criterios de configuración para las edificaciones. Estos criterios incluyen:

- Muros anchos: Los muros deben tener un espesor mínimo de 0.40 m para garantizar su resistencia y estabilidad ante cargas y esfuerzos.
- Arriostres horizontales y verticales: Los muros deben contar con arriostres horizontales (entrepisos y cubiertas) y arriostres verticales (contrafuertes o muros transversales) para mejorar su rigidez y resistencia.
- Densidad de muros: Los muros deben tener una densidad mínima en la dirección de los ejes principales. Se recomienda que todos los muros sean portantes y arriostrados.
- Simetría en planta: La planta de la edificación debe mantener simetría respecto a los ejes principales para lograr una distribución equilibrada de las cargas y esfuerzos.
- Continuidad y homogeneidad: El espesor, densidad, altura libre de muros, distancia entre arriostres verticales, ancho de los vanos, materiales y técnica constructiva deben aplicarse de manera continua y homogénea en la edificación.
- Ubicación y proporción de muros: Se recomienda que los muros sean pequeños y centrados, y su ubicación y proporción deben seguir las indicaciones establecidas en la norma.

En la Figura 7 se establecen criterios para los límites geométricos de muros y vanos según la Norma Peruana (Norma E.080, 2017).



La norma también menciona coeficientes generales de regularidad para las edificaciones, como la regularidad geométrica en planta, la distribución equilibrada de masa entre pisos y la rigidez lateral del piso. Además, se establece la necesidad de que los ejes estructurales sean paralelos y simétricos. Estos criterios buscan garantizar la resistencia y estabilidad de las construcciones de tierra, considerando factores como la simetría, la distribución equilibrada de cargas y esfuerzos, y la presencia de arriostres para contrarrestar fuerzas laterales (NEC-SE-VIVIENDA, 2014).

Por otro lado, en el COOTAD (Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización), si bien se establecen normas administrativas para la intervención de bienes declarados como patrimonio natural y cultural de la humanidad, no se incluyen disposiciones técnicas específicas para la conservación del patrimonio edificado ni se otorga la importancia adecuada a los sistemas constructivos en esta tarea (Orellana Calle, 2017).

Estos hallazgos señalan la necesidad de fortalecer las normativas de construcción en Ecuador, incluyendo disposiciones más sólidas en cuanto al diseño sismorresistente y la conservación del patrimonio edificado, con el objetivo de prevenir daños en futuros eventos sísmicos y proteger el invaluable legado cultural y arquitectónico del país. Además, se debe promover la concienciación y capacitación en tecnología en tierra para garantizar el adecuado uso y conservación de las construcciones en tierra cruda.

2.7 Modelación

2.7.1 Micromodelación, homogenización y macromodelación.

Para la modelación de estructuras de materiales compuestos, existen tres enfoques principales: micromodelos, macromodelos y elementos de marco equivalentes simplificados. En la micromodelación, se considera la representación detallada de los componentes individuales de la mampostería, como el bloque, el mortero y la interfaz entre ellos. El micromodelo es una herramienta utilizada en la homogeneización micromecánica de materiales compuestos en general. En el contexto de la mampostería, el micromodelo se utiliza para analizar el comportamiento del material a nivel microscópico y obtener propiedades efectivas del mismo. Esto se logra representando un Elemento de Volumen Representativo (RVE), que es una porción representativa de la microestructura de la mampostería. Es considerado la mejor alternativa cuando se requiere un estudio detallado de la mampostería (Lourenço, 2013).

Los Métodos de Homogeneización Computacional (CHM) es una herramienta que combina técnicas de macromodelación y micromodelación para analizar el comportamiento de materiales con microestructuras heterogéneas. En el CHM, se divide el problema en dos escalas: la escala estructural, donde se trata el material como un medio homogéneo equivalente, y la microescala, donde se considera el comportamiento complejo de la microestructura heterogénea.

En la escala estructural, se resuelve el problema como si el material fuera homogéneo, lo que simplifica el análisis a nivel macro (Figura 8). Por otro lado, en la microescala, se resuelve un problema en una muestra representativa de la microestructura (RVE) para capturar el comportamiento detallado de los componentes heterogéneos. Es importante destacar que el RVE, que se supone que es representativo de la microestructura, puede perder su representatividad cuando ocurre la localización de deformación. Esto significa que el comportamiento del material puede depender de la ubicación específica dentro de la microestructura, lo cual no es capturado adecuadamente por el CHM clásico (Petracca, Pelà, Rossi, Oller, et al., 2017).

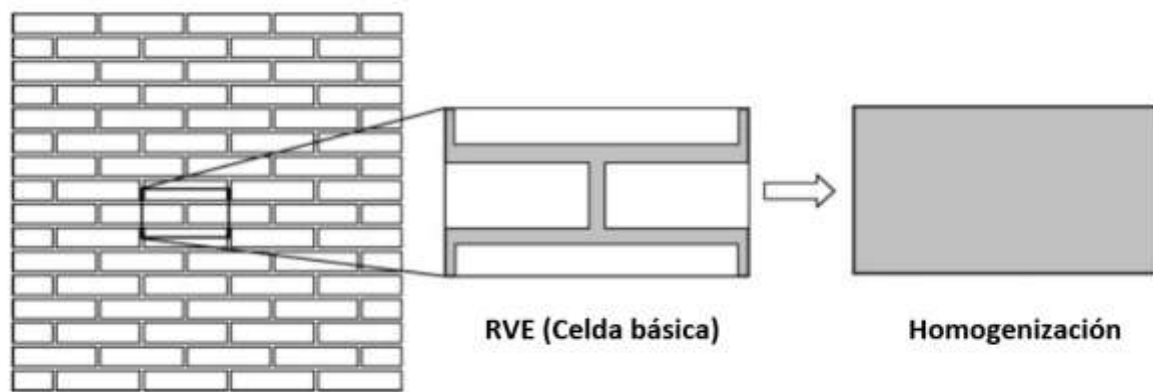


Figura 8. Representación esquemática del proceso de homogenización por el método RVE (García, 2023).

En el análisis de materiales compuestos, el micromodelo se utiliza para simular una porción representativa del material, permitiendo el cálculo de propiedades elásticas equivalentes y el estudio de los modos de fallo. Un enfoque propuesto (Ma et al., 2001) utiliza el micromodelo del RVE para la homogeneización micromecánica, que permite calcular las propiedades efectivas de los materiales compuestos y evaluar los posibles modos de fallo en estructuras compuestas.

En el caso del adobe, se considera como un material continuo y se pueden obtener sus leyes mediante técnicas de homogeneización. El modelo de elementos finitos se define como una mesoescala, donde los ladrillos y el mortero se discretizan con elementos continuos (Lourenço et al., 2007).

Petracca et al. (2017) presentan un modelo continuo a escala micro que se basa en la mecánica del daño. En este enfoque, los bloques y el mortero se discretizan utilizando elementos continuos, y se utiliza un modelo de daño para representar el comportamiento de corte no lineal través de una ley constitutiva de tensión-compresión. Este método es robusto y computacionalmente eficiente para el presente caso de estudio.

2.7.2 Análisis Pushover

Para caracterizar el comportamiento fuera del plano, se utilizan elementos de malla gruesos (Griffith & Vaculik, 2007). La calibración de las propiedades del material isotrópico se basa en resultados experimentales.

En el análisis de vulnerabilidad sísmica, se sigue un marco de trabajo basado en el desempeño que evalúa la capacidad estructural ante fuerzas sísmicas. Este marco consta de varios pasos. El primer paso es seleccionar un modelo numérico para representar el edificio. Luego, se establece un enfoque de evaluación sísmica, que puede ser un análisis incremental

no lineal de tiempo-historia (Dolsek, 2009; Vamvatsikos & Cornell, 2002) o un análisis pushover (o análisis de empuje) (A. K. Chopra & Chintanapakdee, 2004; A. K. Chopra & Goel, 2002).

El análisis incremental no lineal tiempo - historia es más sofisticado, pero requiere más tiempo de análisis computacional, lo que dificulta su uso en estudios paramétricos. Por otro lado, el análisis pushover es el método comúnmente adoptado para la evaluación sísmica (Galasco et al., 2006; Lagomarsino Sergio and Cattari, 2015; Magenes, 2000). La curva de fuerza-desplazamiento obtenida a partir del mismo representa una estimación razonable de la resistencia de la estructura para modelos dominantes del primer modo (Krawinkler & Seneviratna, 1998). Los resultados principales del análisis de empuje son las curvas de empuje y capacidad, clave para definir los estados de daño y límite.

2.8 Software

Para poder llevar a cabo el análisis y simulaciones de materiales y estructuras, es necesario utilizar técnicas computacionales que permitan minimizar el tiempo de procesamiento y a su vez, aproximar las respuestas lo más exacto posible a la realidad. Los programas de modelado son esenciales en este proceso pues permite analizar sistemas complejos de manera eficiente. Existen varios programas de modelado disponibles que se utilizan para implementar tanto micro como macromodelos. Algunos de los programas con interés en el análisis de materiales son:

DIANA FEA: DIANA FEA es un código de elementos finitos desarrollado por TNO desde 1972 que ofrece capacidades avanzadas para el análisis y simulación de estructuras y sistemas complejos. Con su interfaz interactiva y herramientas integradas, DIANA FEA (Figura 9) permite a los usuarios realizar todo el proceso de análisis en un entorno unificado, lo que facilita el modelado, la simulación y la visualización de resultados (DIANA FEA, 2023).

LS-DYNA: DYNA3D es un software de análisis de elementos finitos desarrollado en el Lawrence Livermore National Laboratory. El software ha evolucionado para mejorar la eficiencia computacional y ampliar sus capacidades de modelado y análisis. Se ha utilizado para el análisis de tensiones en estructuras sometidas a cargas de impacto, simulaciones de conformado de metales, análisis de materiales compuestos y más. La versión comercial LS-DYNA se creó para abordar problemas de resistencia al impacto (LS-DYNA®, 2021).

ANSYS: ANSYS es un conjunto de programas de simulación de ingeniería ampliamente utilizado en la industria y la academia. ANSYS (Figura 10) proporciona un entorno completo

para el análisis y la simulación de una amplia gama de fenómenos físicos y sistemas complejos. ANSYS permite modelar y simular el comportamiento de materiales, estructuras y sistemas en condiciones reales con varios módulos como ANSYS Mechanical para el análisis estructural (ANSYS Inc., 2022).



Figura 9. Software DIANA FEA (DIANA FEA, 2023)



Figura 10. Software Ansys (ANSYS Inc., 2022)

El software OpenSees (Open System for Earthquake Engineering) es ampliamente utilizado en el modelado y análisis estructural, y se considera una herramienta con un gran potencial para la investigación en este campo. OpenSees cuenta con herramientas que permiten el manejo de datos en paralelo, lo que brinda la capacidad de realizar tareas complejas de manera eficiente. (Mckenna & Fenves, 2008)

En OpenSees, se pueden utilizar sistemas híbridos y multiprocesados, lo que significa que las diferentes tareas de un modelo se pueden realizar simultáneamente en cada uno de los procesadores de la computadora. Esto tiene como resultado una reducción significativa en los tiempos de resolución de modelos. Existen diversas metodologías para generar estos sistemas, siendo la más sencilla la paralelización. Esta consiste en ejecutar OpenSees por cada proceso requerido a través del sistema de Windows (CMD), lo que permite resolver varios problemas de manera simultánea. (Coello Chica & Vintimilla Salinas, 2022)

Scientific ToolKit for OpenSees (STKO) es una herramienta de última generación utilizada para la visualización de datos complejos en OpenSees. Proporciona una interfaz gráfica avanzada basada en OpenGL que permite crear archivos de entrada y salida en formato Tool Command Language (TCL) que se pueden leer y manipular. STKO (Figura 11) es único en el sentido de que incluye todos los materiales, elementos, condiciones e interacciones disponibles en OpenSees.



Figura 11. Software STKO (ASDEA, 2022)

STKO utiliza la biblioteca de base de datos HDF5 y una interfaz de secuencias de comandos basada en Python para la manipulación y personalización de los resultados. Esto permite una mayor flexibilidad y capacidad de personalización en la visualización y análisis de los resultados obtenidos. (ASDEA, 2022)

En el preprocesamiento, STKO es útil porque las estructuras reales a menudo resultan en modelos complejos. Es difícil y poco práctico escribir los archivos TCL de entrada a mano, por lo que se requiere una interfaz gráfica de usuario programable para generar los archivos de entrada de manera eficiente.

En cuanto al post-procesamiento, existen desafíos debido al alto volumen de datos de salida y a la heterogeneidad de los resultados en problemas de ingeniería sísmica y estructural. STKO aborda esta problemática al proporcionar herramientas de visualización avanzadas y capacidades para manipular y visualizar grandes volúmenes de datos complejos.

El preprocesamiento y post-procesamiento en STKO se divide en diferentes componentes: ModelBuilder, Domain, Analysis y Recorder. ModelBuilder se encarga de construir los objetos en el modelo y agregarlos al dominio. El dominio almacena los objetos creados por el ModelBuilder y proporciona acceso a estos objetos para el análisis y registro. El análisis es responsable de realizar el análisis estructural requerido, y el registro supervisa los parámetros definidos por el usuario en el modelo durante el análisis. El proceso se encuentra esquematizado en la Figura 12.

Para las pruebas, se utiliza el proceso de verificación y validación por el método NAFEMS (National Agency for Finite Element Methods and Standards). La verificación tiene como objetivo determinar si un modelo computacional representa con precisión el modelo matemático subyacente y su solución. Esto implica realizar una verificación de código para asegurarse de que el modelo matemático y los algoritmos de solución estén funcionando correctamente. Se utilizan técnicas como la comparación de las salidas del código con soluciones analíticas para verificar la precisión del modelo. La verificación de cálculo se centra

en estimar los errores en la solución numérica debido a la discretización. Se evalúa la precisión de la solución discreta del modelo matemático y se comparan los resultados con métodos de referencia o soluciones analíticas.

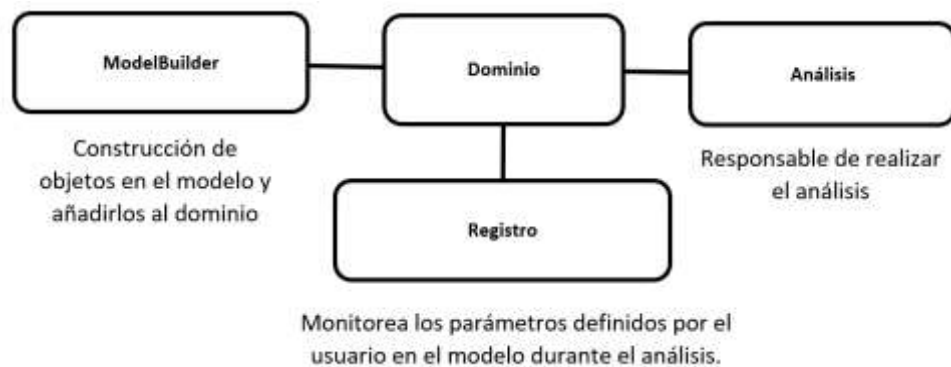


Figura 12. Diagrama de flujo STKO (ASDEA, 2022)

La validación, por su parte, consiste en determinar en qué medida un modelo representa el mundo real desde la perspectiva de los usos previstos. Se compara el modelo con datos experimentales o resultados observados en la realidad para evaluar su grado de representatividad.

En conclusión, el programa OpenSees, junto con su herramienta complementaria STKO, ofrece una serie de características positivas que lo hacen ideal para modelados. OpenSees permite utilizar sistemas híbridos y multiprocesados, lo que acelera significativamente los tiempos de resolución de modelos al realizar tareas simultáneas en múltiples procesadores. La capacidad de generación eficiente de archivos de entrada a través de una interfaz gráfica de usuario programable hace que el preprocesamiento sea más fácil y práctico. Además, STKO aborda los desafíos de post-procesamiento al ofrecer herramientas de visualización avanzadas y capacidad para manejar grandes volúmenes de datos complejos. Teniendo en cuenta estas características positivas, se decidió utilizar este programa para el análisis de los micromodelos, homogenización y desarrollo de macromodelos de las fachadas de adobe de este trabajo.

Capítulo 3: Modelación mediante elementos finitos de fachadas de adobe

3.1 Introducción

El adobe ha sido ampliamente utilizado como material de construcción debido a su disponibilidad y bajo costo. Sin embargo, la variabilidad en las propiedades del adobe plantea desafíos al evaluar su comportamiento estructural. En este contexto, el propósito del capítulo es abordar la variabilidad de las propiedades del adobe estableciendo una metodología para la homogeneización de las propiedades del adobe utilizando un elemento volumétrico representativo (RVE). El RVE representa la composición de la mampostería de adobe, que consiste en bloques de adobe y mortero. Las propiedades del adobe se definen mediante ensayos de compresión, tracción y corte en tres direcciones, utilizando un micromodelo basado en daño. (Petracca, Pelà, Rossi, Zaghi, et al., 2017). En este sentido, se pretende demostrar que esta metodología proporciona una representación precisa de las propiedades de la mampostería de adobe para finalmente aplicar las propiedades homogeneizadas en el análisis de cuatro fachadas tipo, basados en una base de datos de 14 fachadas de una planta del Centro Histórico de Cuenca (Jurado & Vergara, 2019).

En este capítulo, se presenta la teoría del modelado, que incluye el modelo basado en daño, los criterios de falla y las leyes evolutivas para las variables de daño. También se explora la teoría de homogenización y el concepto de macromodelo. A continuación, se realiza el modelado de los Elementos Volumétricos Representativos (RVE), definiendo su geometría, propiedades físicas y condiciones aplicadas. Se presentan los resultados del análisis del RVE y se procede a la selección de las fachadas de adobe para su modelado. En este sentido, el capítulo establece las bases necesarias para llevar a cabo los análisis modales y no lineales que permitirán realizar una completa evaluación estructural de las fachadas de adobe.

3.2 Teoría del modelado

3.1.1 Modelo basado en daño

El modelo basado en daño propuesto por Cervera et al. (1995) sirve como fundamento para la propuesta de un micromodelo continuo desarrollado por Petracca, Pelà, Rossi, Zaghi et al. (2017) para caracterizar materiales compuestos. A diferencia de los modelos isotrópicos, este modelo ofrece la capacidad de presentar un efecto unilateral, lo que permite el modelo de cierre de fisuras, una respuesta típica de materiales frágiles (García, 2023). El modelo basado

en daño puede definir el efecto unilateral mediante el cálculo del esfuerzo efectivo, lo que lo diferencia de los modelos isotrópicos convencionales.

Se utilizan dos parámetros de daño: uno para la parte positiva y otro para la parte negativa del tensor de esfuerzo efectivo. La ecuación para definir el tensor de esfuerzo efectivo es

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

En donde d^+ y d^- son escalares de daño que miden, con valores de 0 a 1, el estado elástico o el estado de rotura respectivamente. Además, $\bar{\sigma}^+$ y $\bar{\sigma}^-$ representan las partes positivas y negativas del tensor de esfuerzo efectivo, obtenido a partir de la relación elástica lineal

$$\bar{\sigma} = \mathbb{C} : \epsilon \quad (2)$$

$\mathbb{C}$ es el tensor de rigidez isotrópica de cuarto orden que describe las propiedades del material y ϵ es el tensor de deformación. Las partes positivas y negativas de $\bar{\sigma}$ se calculan de la siguiente manera

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

$$\bar{\sigma}^- = \bar{\sigma} - \bar{\sigma}^+ \quad (4)$$

donde $\bar{\sigma}_i$ es el i -ésimo esfuerzo principal de $\bar{\sigma}$, p_i es el vector unitario correspondiente a la dirección principal asociada y el símbolo $\langle \rangle$, conocido como corchetes de McAuley, se utiliza para evaluar una expresión interna. Este símbolo devuelve la expresión interna si el resultado de los corchetes es positivo, mientras que, si el resultado es negativo, devuelve cero. Las variables de daño se calculan a partir de criterios de falla.

3.1.2 Criterio de Falla

Se utilizan dos escalares denominados esfuerzos equivalentes, τ^- y τ^+ , para identificar los estados de "carga", "descarga" o "recarga" en un estado general de esfuerzo. El cálculo de la superficie de compresión es una mejora propuesta por Lubliner et al. (1989). El esfuerzo equivalente τ^- se calcula mediante la fórmula

$$\tau^- = H(-\bar{\sigma}_{min}) \left[\frac{1}{1-\alpha} \left(\alpha \bar{I}_1 + \sqrt{3} \bar{J}_2 + k_1 \beta \langle \bar{\sigma}_{max} \rangle + \gamma \langle -\bar{\sigma}_{max} \rangle \right) \right] \quad (5)$$

En dónde

$$\alpha = \frac{k_b - 1}{2k_b - 1} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{f_{cp}}{f_t} (1 - \alpha) - (1 - \alpha) \quad (7)$$

La expresión $\bar{I}_1$ representa el primer invariante del tensor de esfuerzo efectivo, mientras que $\bar{J}_2$ representa el segundo invariante del tensor de esfuerzo desviador efectivo. El esfuerzo principal efectivo máximo se denota como $\bar{\sigma}_{max}$. En el modelo, se introduce el escalar k_1 , el cual es una constante que controla la superficie de compresión en el comportamiento de dilatación. Su valor puede variar entre 0 y 1. El parámetro k_b representa la relación entre las resistencias de compresión biaxial y uniaxial. f_{cp} corresponde al esfuerzo máximo de compresión, mientras que f_t es la resistencia a la tracción. La Figura 13 representa las variaciones en la superficie de falla a compresión para tres valores de k_1 .

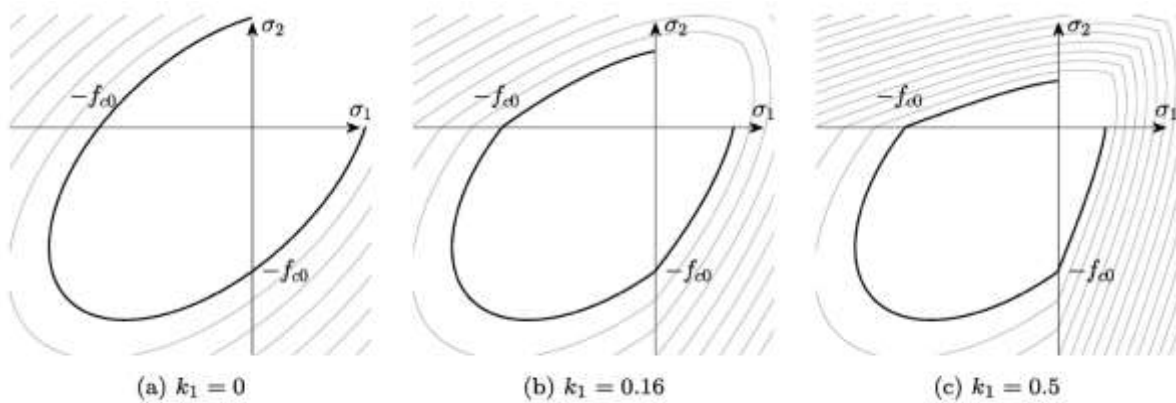


Figura 13. Superficies de fallo a compresión para tres valores de k_1 . (a) $k_1 = 0$, (b) $k_1 = 0.16$ y (c) $k_1 = 0.5$ (Petracca, Pelà, Rossi, Zaghi, et al., 2017)

La superficie de tracción se define como

$$\tau^+ = H(\bar{\sigma}_{max}) \frac{1}{1-\alpha} \left(\alpha \bar{I}_1 + \sqrt{3} \bar{J}_2 + \beta \langle \bar{\sigma}_{max} \rangle \right) \frac{f_t}{f_{cp}} \quad (8)$$

Esta ecuación no considera el parámetro k_1 y en su lugar utiliza la relación $\frac{f_t}{f_{cp}}$ para relacionar la superficie de tracción con la resistencia a la tracción. la Figura 14 muestra las dos superficies de daño en los esfuerzos principales para el caso de esfuerzo en un plano bidimensional. Por otro lado, en la Figura 15 se presenta en el espacio tridimensional. Las superficies de compresión y tracción solo están activas en algunos casos. En el modelo, la

superficie de compresión se desarrolla cuando al menos uno de los esfuerzos principales es negativo, mientras que la superficie de tracción se desarrolla cuando al menos uno de los esfuerzos principales es positivo.

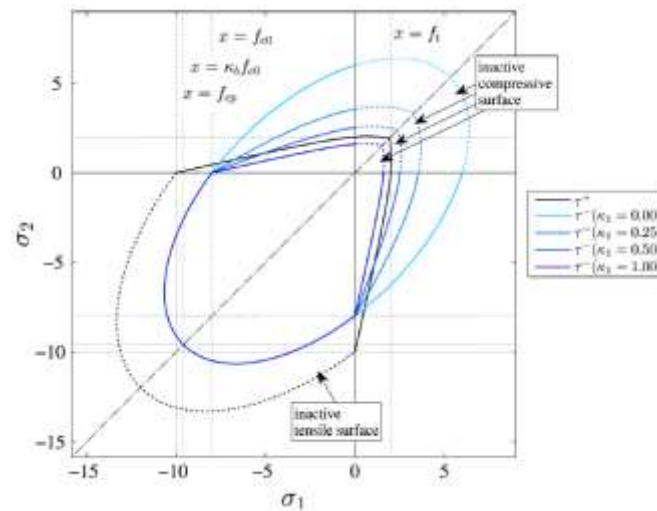


Figura 14. Superficies de daño inicial para esfuerzos en el plano (Petracca, Pelà, Rossi, Zaghi, et al., 2017)

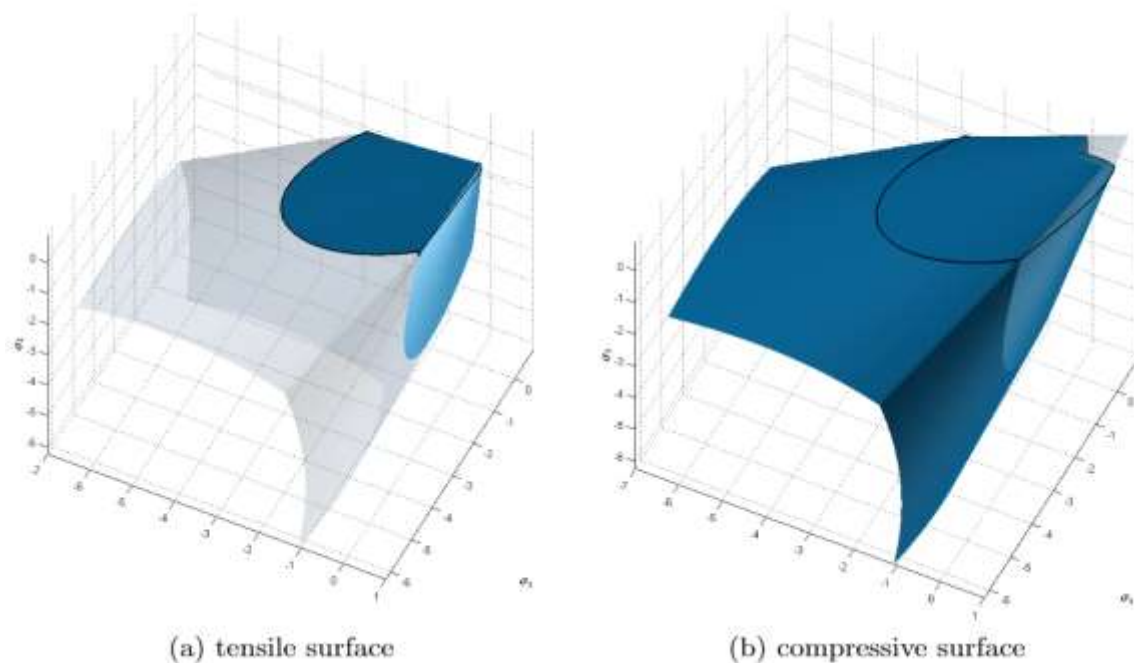


Figura 15. Superficies de daño inicial para esfuerzos en el plano tridimensional (Petracca, Pelà, Rossi, Zaghi, et al., 2017)

Estas condiciones se consideran en el modelo mediante

$$\tau^- = H(-\bar{\sigma}_{min}) \left[\frac{1}{1-\alpha} \left(\alpha \bar{I}_1 + \sqrt{3} \bar{J}_2 + k_1 \beta \langle \bar{\sigma}_{max} \rangle \right) \right] \quad (9)$$

$$\tau^+ = H(\bar{\sigma}_{max}) \left[\frac{1}{1-\alpha} \left(\alpha \bar{I}_1 + \sqrt{3} \bar{J}_2 + \beta \langle \bar{\sigma}_{max} \rangle \right) \frac{f_t}{f_{cp}} \right] \quad (10)$$

En donde $H(x)$ es la función de Heaviside que se define como

$$H(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases} \quad (11)$$

3.1.3 Leyes evolutivas para variables de daño

El índice de daño a tracción d^+ , se calcula con la ecuación

$$d^+(r^+) = 1 - \frac{r_0^+}{r^+} \exp \left\{ 2H_{dis} \left(\frac{r_0^+ - r^+}{r_0^+} \right) \right\} \quad (12)$$

En esta fórmula, $r^\pm$ representan umbrales de daño que son los valores más altos de esfuerzo equivalente $\tau^\pm$ alcanzados en la historia de carga, H_{dis} es el parámetro de ablandamiento discreto.

Para que la ley de ablandamiento cumpla con las características de un problema discreto, debe depender del tamaño de la zona de disipación l_{dis} (Bažant & Oh, 1983; Oliver, 1989) y cumplir con la siguiente condición:

$$g_f l_{dis} = G_f \quad (13)$$

donde G_f es la energía de fractura y g_f es la energía específica disipada definida como:

$$g_f = \left(1 + \frac{1}{H_{dis}} \right) \frac{f_t^2}{2E} \quad (14)$$

Para calcular H_{dis} , se utiliza la siguiente fórmula

$$H_{dis} = \frac{l_{dis}}{l_{mat} - l_{dis}} \quad (15)$$

En esta fórmula, l_{dis} es igual a la longitud característica del elemento finito l_{mat} , definida como

$$l_{mat} = \frac{2EG_f}{f_t^2} \quad (16)$$

Donde E es el módulo de elasticidad del material.

La Figura 16 ilustra la representación gráfica de las leyes de esfuerzos uniaxial. La ley de tracción uniaxial con ablandamiento exponencial (Figura 16a) se basa en la energía de

fractura (Petracca, Pelà, Rossi, Zaghi, et al., 2017). Por otro lado, la evolución del daño en compresión se rige por una ley de endurecimiento/ablandamiento compuesta por tres curvas cuadráticas de Bézier, las cuales se dividen en cuatro secciones distintas: una sección lineal, una sección de endurecimiento, una sección de ablandamiento y una fase residual final (Figura 16b) (Petracca, Pelà, Rossi, Zaghi, et al., 2017). En el caso de compresión, al igual que en el problema discreto, la curva de compresión (Figura 16b) debe regularizarse de manera que el área sombreada debajo sea $\frac{G_c}{l_{dis}}$ (Petracca, Pelà, Rossi, Zaghi, et al., 2017).

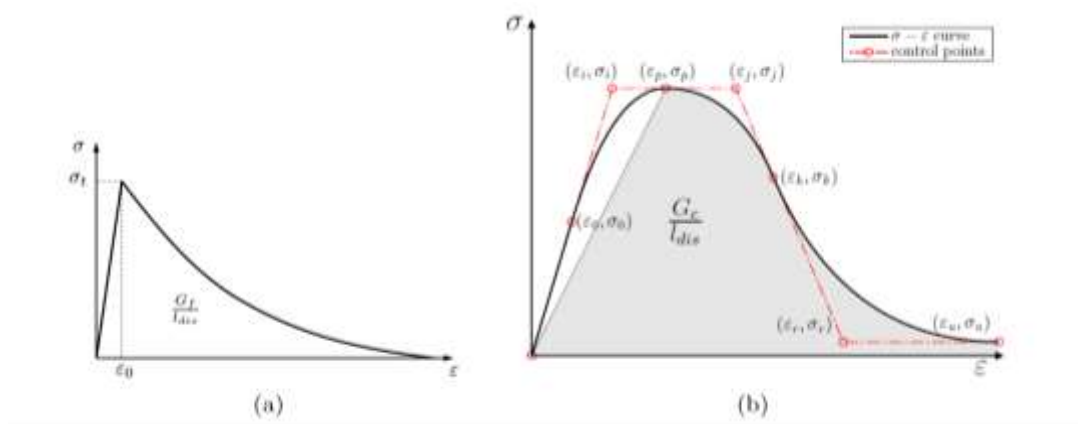


Figura 16. Ley de esfuerzos uniaxiales. (a) ley de tracción uniaxial y (b) ley de compresión uniaxial (Petracca, Pelà, Rossi, Zaghi, et al., 2017)

La ley de evolución permite que los puntos de control de la curva de Bézier se pueden ajustar para que coincidan con las respuestas experimentales de pruebas de compresión uniaxial para calibrar modelos numéricos.

3.1.4 Comportamiento a corte

El enfoque de daño representa de manera indirecta el comportamiento de dilatación del material bajo esfuerzos de corte de manera diferente a una formulación plástica. En el modelo de daño $\frac{d^+}{d^-}$, las superficies de compresión y tracción se activan cuando los esfuerzos principales tienen signos diferentes. El daño a tracción afecta al esfuerzo principal positivo, mientras que el daño a compresión afecta al esfuerzo principal mínimo. El tensor de daño se obtiene mediante una escala anisotrópica del tensor efectivo (Pelà et al., 2011)

La Figura 17 muestra en el sistema de referencia de esfuerzos principales para una distorsión de corte puro, el daño isotrópico (Figura 17a) y el modelo de daño $\frac{d^+}{d^-}$ anisotrópico (Figura

17b). Para el daño isotrópico (Figura 17a), los puntos A y B representan, respectivamente, el estado de esfuerzo efectivo $\bar{\sigma} = \mathbb{C} : \epsilon$ y el estado de esfuerzo de daño para un modelo de daño isotrópico (Petracca, Pelà, Rossi, Zaghi, et al., 2017). El punto B describe el tensor de esfuerzo de daño resultante de una escala isotrópica del tensor de esfuerzo efectivo completo $\bar{\sigma}$.

La Figura 17b muestra el punto C correspondiente al esfuerzo de daño σ del modelo de daño $\frac{d^+}{d^-}$. Este modelo define dos superficies de falla donde los índices de daño a tracción y compresión generalmente tienen diferentes valores con diferentes leyes de evolución. El esfuerzo de daño resultante no es una escala isotrópica del esfuerzo efectivo. La superficie de tracción es más pequeña y se reduce al alcanzar el ablandamiento exponencial. Este comportamiento implica que la variable de daño a tracción crece más rápido que la variable de daño a compresión. A medida que el daño a compresión crece más lentamente que el daño a tracción, el esfuerzo efectivo no seguirá la misma dirección que el elástico, sino que tendrá un aumento en el esfuerzo de compresión en el otro lado. Esta condición define una fuente de dilatación para modelos no confinados. La constante k_1 de la ecuación determina el comportamiento de la superficie de compresión durante el rango no lineal de la respuesta al corte. k_1 controla implícitamente la dilatación del modelo, por lo que para valores decrecientes de k de 1 a 0, el tamaño de la superficie de compresión aumenta y el daño a compresión d^- disminuye.

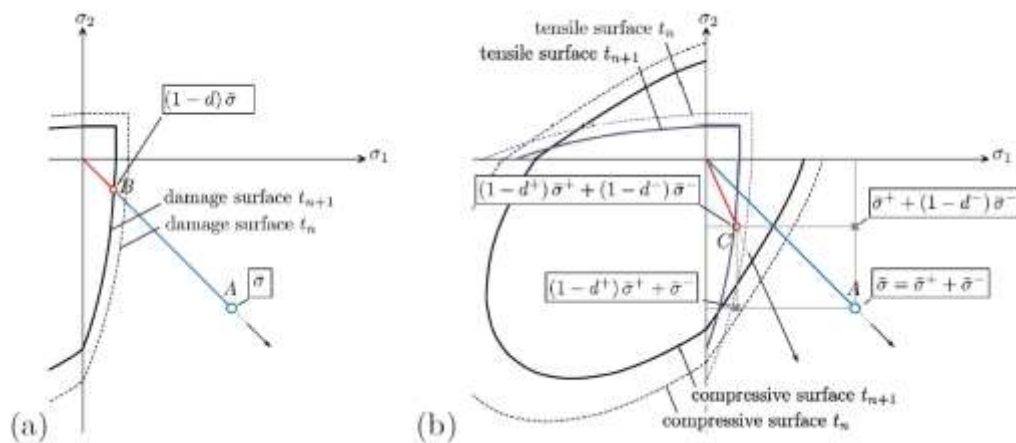


Figura 17. Leyes de evolución para los modelos de daño (a) isotrópico y (b) ortótropico $\frac{d^+}{d^-}$ en los cuadrantes de tensión/compresión.

Este enfoque alcanza la convergencia más rápidamente que un método de plasticidad, ya que no se impone la dilatación y se pueden estimar los esfuerzos fuera de la superficie de daño mediante la escala de los esfuerzos con el valor del daño. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este procedimiento no representa una retroproyección real, ya que escala los esfuerzos alrededor de la misma dirección, modificando la magnitud, pero no la dirección del vector.

Entre las desventajas de este enfoque se encuentra la imposibilidad de ingresar un valor para un ángulo de dilatación, y este efecto solo está presente si las dos superficies de compresión y tracción actúan juntas en un estado de corte.

3.1.5 Homogenización

La homogeneización de primer orden aproxima el comportamiento de un material compuesto, como la mampostería de adobe, que está compuesto por dos componentes, mediante la simplificación de su descripción matemática a un material "homogeneizado" equivalente con propiedades promediadas. Este proceso implica dividir el sistema complejo en partes más pequeñas, denominadas Elementos Representativos de Volumen (RVEs, por sus siglas en inglés), y calcular las propiedades promedio de cada RVE. Estas propiedades se utilizan para representar el comportamiento de todo el sistema.

La homogeneización de los RVEs es posible mediante la homogeneización computacional de primer orden, que sigue tres pasos (Petracca, Pelà, Rossi, Oller, Camata, et al., 2016). En primer lugar, se realiza la transferencia de las deformaciones macroscópicas desde la malla macroscópica hacia la microescala. Para lograr esta transición, se deben definir condiciones de contorno adecuadas para el RVE y resolver el problema de volumen de frontera micro (BVP, por sus siglas en inglés). Estas condiciones imponen que las fluctuaciones de desplazamiento en las fronteras del RVE sean periódicas. El segundo paso consiste en resolver el BVP a escala micro utilizando un enfoque de Método de Elementos Finitos. La solución se basa en el equilibrio del RVE, considerando que las fuerzas internas y las tracciones superficiales en el RVE solo reaccionan a las restricciones cinemáticas elegidas y no pueden ser prescritas de forma independiente (Mandel, 1973).

El último paso es la transición micro-macro. En este paso, se obtiene el tensor de esfuerzos macroscópicos homogeneizados. Aplicar el principio de Hill-Mandel permite derivar el tensor de esfuerzos homogeneizados como el promedio volumétrico del campo de esfuerzos microscópicos del RVE.

Es posible utilizar un enfoque que pueda alcanzar resultados similares a un micromodelo de toda la estructura creando un micromodelo de un RVE para obtener los coeficientes de rigidez y las resistencias en dos direcciones. Estas propiedades definen un modelo ortotrópico homogéneo que puede resolverse utilizando el modelo basado en daño.

Los análisis en los RVEs se realizan considerando fuerzas de compresión, tracción y corte en direcciones perpendiculares y paralelas a los tres planos de estudio. Los resultados obtenidos en estas tres direcciones son esenciales, ya que permiten caracterizar el comportamiento ortotrópico del adobe. Los esfuerzos y deformaciones promedio registrados en los RVEs, tanto en la fase elástica como en la fase no elástica, se utilizan para definir el módulo de Young, el módulo de corte y las resistencias del material en compresión y tracción. Las áreas bajo las curvas correspondientes de fuerza-deformación a compresión y tracción representan los valores de energía de fractura a compresión y tracción, respectivamente (Almeida et al., 2005).

Las propiedades del material compuesto se obtienen a través de experimentación, utilizando los valores de Arcentales y Pizarro (2023) para coeficientes de Poisson, así como los valores de resistencia a la compresión (f_c) de la base de datos para ensayos en Ecuador. Además, se ha establecido una relación sinusoidal entre (f_c) y el módulo de elasticidad (E) según los resultados de laboratorio de Catalán Quiroz et al. (2019). Estos tres parámetros son fundamentales para definir las propiedades adicionales del material en el modelo basado en daño.

3.1.6 Macromodelo

El modelado de edificaciones de mampostería de adobe en tres dimensiones utilizando enfoques de micromodelo se dificulta debido al tamaño y la complejidad de estas estructuras. En su lugar, se opta por una representación a nivel macro, ya que permite definir de manera más sencilla las paredes y caracterizar su comportamiento utilizando un modelo basado en daño. Aunque esta aproximación macro proporciona una respuesta muy similar, la precisión de la homogeneización depende de cómo se definan las propiedades elásticas y no elásticas del material. Dado que los datos experimentales disponibles suelen ser limitados, una opción viable es definir estas propiedades mediante el uso de Elementos Volumétricos Representativos (Ma et al., 2001).

Con el objetivo de modelar la fachada de adobe como un medio homogéneo, es importante utilizar un modelo que considere las características y propiedades de este tipo de construcción. Es necesario tener en cuenta el efecto de la unión entre los bloques de adobe

y el mortero para estimar correctamente sus propiedades mecánicas. Una prueba experimental de compresión puede proporcionar las propiedades necesarias para una homogeneización en una dirección específica (García, 2023). Como resultado, se obtendrán propiedades isotrópicas, como el módulo de Young y la resistencia a la compresión. Es importante tener en cuenta que los resultados pueden variar dependiendo del procedimiento de prueba utilizado, ya que una dirección puede presentar mayor resistencia que otra. Este hecho respalda la idea de utilizar un modelo ortotrópico para representar de manera más precisa la mampostería de adobe.

La modelización de la resistencia y el comportamiento no lineal de la mampostería requiere la formulación de leyes constitutivas adecuadas. En particular, para capturar la ortotropía elástica, de resistencia y de ablandamiento, es necesario utilizar un modelo sólido ortotrópico que sea capaz de representar de manera precisa estas características. Este tipo de modelo permitirá una mejor aproximación del comportamiento real de la mampostería de adobe y proporcionará resultados más precisos en términos de resistencia y deformación.

3.2 Definición de los ejes de referencia

La modelación para el análisis del micromodelo y macromodelo se realizó con la herramienta STKO impulsada con OpenSees y con el uso de una licencia de prueba. Es necesario establecer los ejes de referencia global y los ejes de referencia local. Los ejes globales se refieren a un sistema de coordenadas fijo utilizado para describir la posición y la orientación de una estructura en relación con un punto de referencia común. Los ejes globales son independientes de la forma o la orientación de la estructura en sí y se utilizan para establecer una referencia uniforme en todo el análisis o diseño. Por otro lado, los ejes locales se refieren a sistemas de coordenadas específicos que se definen dentro de un elemento o componente individual de la estructura. Estos ejes locales se utilizan para describir la geometría y el comportamiento del elemento de manera relativa a su posición y orientación en el sistema global. En la Figura 18 se muestran los ejes globales, donde el eje rojo representa el eje X, el eje verde representa el eje Y y el eje azul representa el eje Z. Para la definición del RVE y el armado de la fachada, se considerará que el eje local coincide con el eje global.

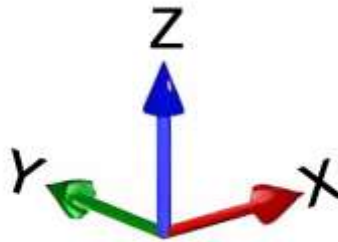


Figura 18. Representación de ejes globales en STKO

3.3 Modelado del RVE

3.3.1 Definición de la geometría del RVE

Se procedió a definir un RVE que presente las características geométricas de un armado de adobe y mortero. La discretización del RVE se realizó utilizando una malla de tamaño 20.00 mm, 40.00 mm y 50.00 mm. Se optó por utilizar los resultados obtenidos con la malla de 20.00 mm, ya que, en simulaciones por elementos finitos, una malla más fina permite una representación más detallada de la geometría y una mayor precisión en los cálculos. En total, el RVE estaba compuesto por 20125 nodos y 116486 elementos.

Para garantizar que los RVE replicaran fielmente el patrón de la pared, se definieron sus características geométricas de tal manera que permitieran su unión en las direcciones X y Z, formando así un muro completo de mampostería de adobe. En la Figura 19 se puede apreciar la geometría del RVE en una vista isométrica, mientras que en la Tabla 1 se presentan las áreas de las caras en vistas frontal, planta y lateral. El material de color verde representa al adobe, mientras que el color rojo representa el mortero.

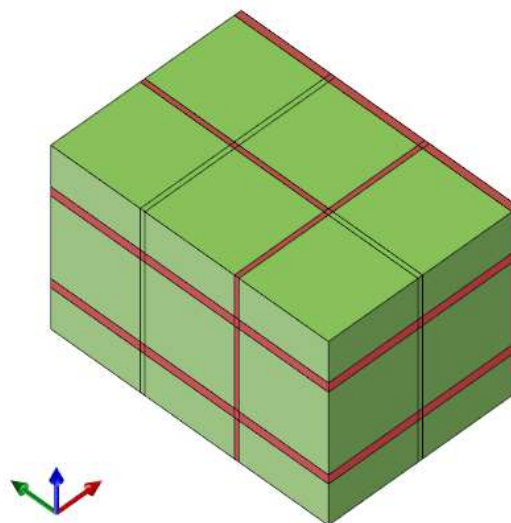
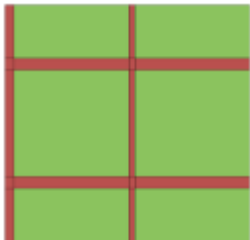
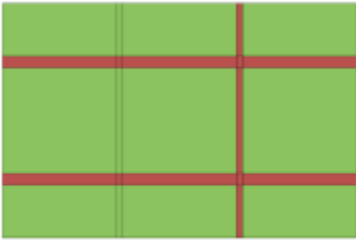
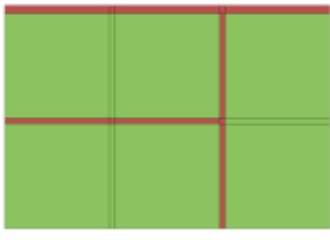


Figura 19. Geometría del RVE en vista isométrica

Tabla 1. Geometría del RVE en vistas frontal, planta y lateral.

	Definición geométrica del RVE		
			
	Plano xz	Plano yz	Plano xy
Área	166000 mm²	242000 mm²	251075 mm²

El RVE tiene un espesor de 605.00 mm una altura de 400.00 mm y un grosor de 415.00 mm como se esquematiza en la Figura 20. El RVE está formado por una fase de bloque de adobe y otra de mortero. En la Figura 21 se especifican las dimensiones del bloque de adobe con un espesor de 195.00 mm, una altura de 180.00 mm y una base de 400.00 mm. Los espesores del mortero no son iguales en todas las direcciones con el fin de simular la variabilidad presente en los métodos constructivos antiguos. Los espesores para la fase de mortero se encuentran especificados en la Tabla 2. El adobe se encuentra resaltado en color rojo para diferenciar cada fase.

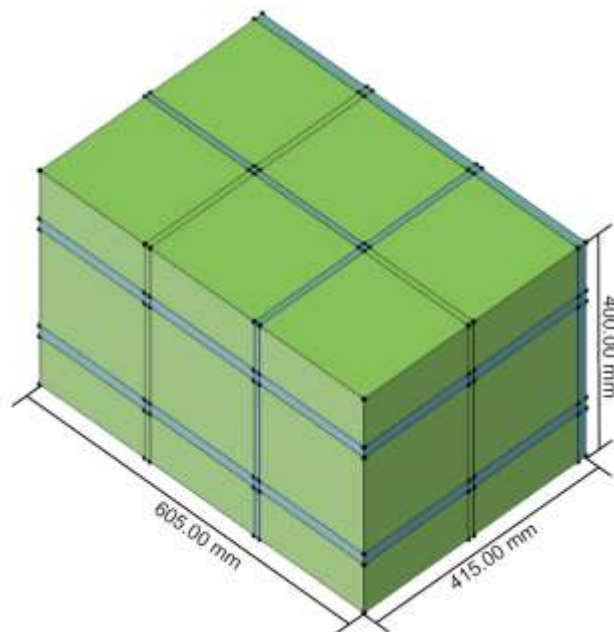


Figura 20. Dimensiones del RVE en mm.

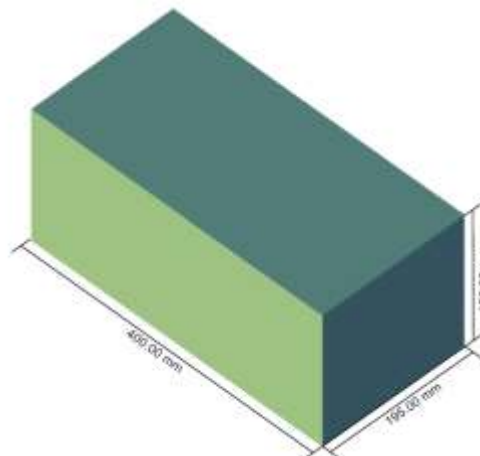
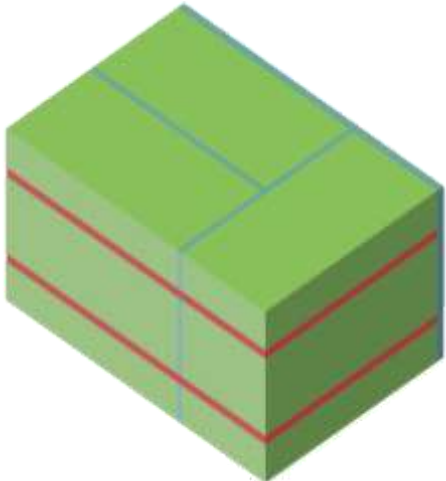
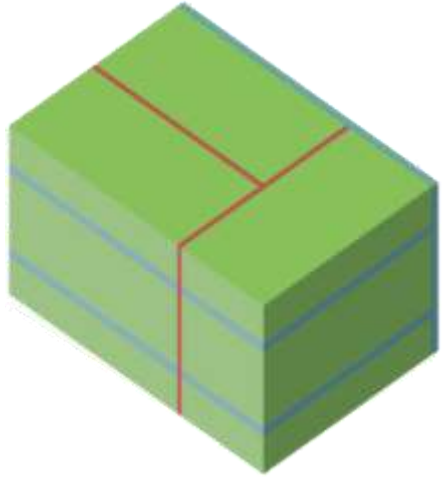
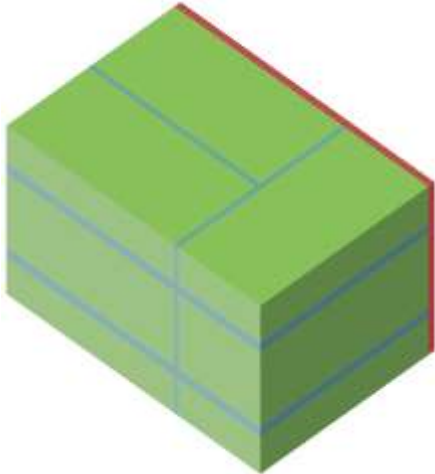


Figura 21. Dimensiones del bloque de adobe en mm.

Tabla 2. Espesores de los morteros.

Tipo	Selección Mortero	Espesor (mm)
A		20.00
B		10.00

C		15.00
---	---	-------

La función principal de un RVE es ensamblarse y generar un modelo general que represente adecuadamente la estructura que se está estudiando. En la figura 22 se muestra el proceso de ensamblaje de una pared de adobe utilizando el RVE. La Figura 22a representa una vista isométrica del armado de la pared. En la Figura 22b, se muestra una vista frontal de la pared, donde se resalta en color rojo un bloque que representa una unidad de RVE. Este ensamblaje de RVEs permite obtener un modelo general que captura las características y propiedades del sistema estructural de la pared de adobe en estudio.

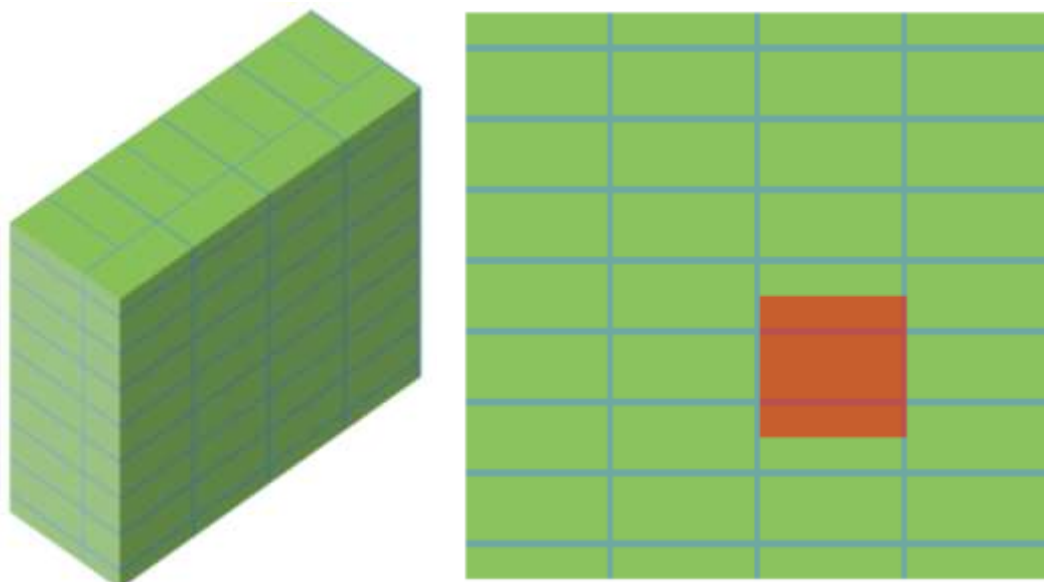
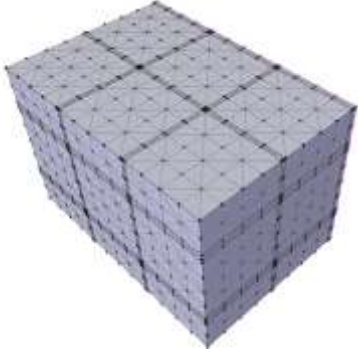
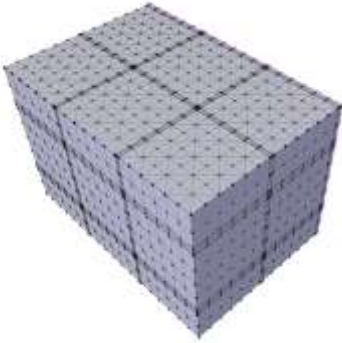
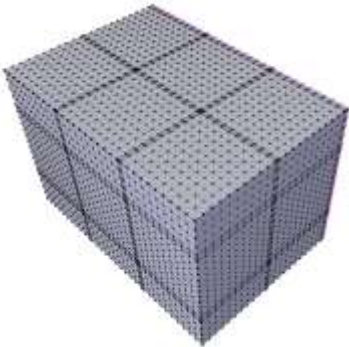


Figura 22. Ensamblaje de RVEs en un muro de adobe (a) vista isométrica y (b) vista frontal.

Finalmente se debe definir el tamaño de mallado. La comparativa entre el tamaño del mallado en el RVE (20.00 mm, 40.00 mm y 50.00 mm) se presenta en la Tabla 3. Cabe recalcar que

mientras la malla sea más fina, se requerirá más capacidad computacional para analizar el modelo.

Tabla 3. Comparativa de los tamaños de mallado

	Mallado del RVE
Malla 50.00 mm	
Malla 40.00 mm	
Malla 20.00 mm	

3.3.2 Definición de las propiedades físicas del RVE

Para llevar a cabo el modelo basado en daño, se utiliza el software STKO, donde se define el material de adobe y mortero como un material de tipo DamageTC3D, basado en la teoría de daño implementada por Petracca et al. (2017). En la Tabla 4 se detallan las propiedades del adobe necesarias para realizar el análisis de daño, las cuales deben ser calculadas u

obtenidas a través de métodos de investigación, experimentación o teorías desarrolladas por otros autores.

Tabla 4. Propiedades necesarias para el análisis de daño.

Elasticidad	
E	Módulo de Young
v	Coefficiente de Poisson
Tensión	
ft	Resistencia a la tracción
Gt	Energía de fractura a tracción
Compresión	
fc0	Límite elástico a compresión
fcp	Resistencia máxima a compresión
fcr	Resistencia residual a compresión
ep	Deformación a compresión en resistencia máxima
Gc	Energía de fractura a compresión

En el estudio realizado por Catalán Quiroz (2019) en México, se llevaron a cabo pruebas experimentales utilizando muretes de adobe. Estos muretes fueron sometidos a ensayos de compresión para determinar su resistencia y calcular el módulo de elasticidad. El módulo de elasticidad se obtuvo a partir de la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación unitaria axial registrada dentro del rango elástico del material. En total, se realizaron ensayos en 9 especímenes de adobe. Los resultados de las pruebas, incluyendo la resistencia a la compresión y los módulos de elasticidad calculados, se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Esfuerzos resistentes en compresión (fm) y módulos de elasticidad (Em) en pilas de adobe. (Catalán Quiroz et al., 2019)

Especimen	fcp (Mpa)	E (Mpa)
PL-1	1.35	230.92
PL-2	1.28	219.24
PL-3	1.28	275.89
PL-4	1.36	210.86
PL-5	1.12	200.94
PL-6	1.18	197.64
PL-7	1.21	273.23
PL-8	1.19	317.67
PL-9	1.07	242.08

A partir de los ensayos, se realizó una curva de ajuste de tipo sinusoidal que tiene la forma

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

(17)

En la Figura 23 se muestra la curva de ajuste con respecto a los valores obtenidos en los ensayos. Los datos de los especímenes PL-6 y PL-8 no se ajustan de manera correcta a la curva. Sin embargo, el ajuste presenta un valor de $R^2 = 0.65$ que se considera aceptable.

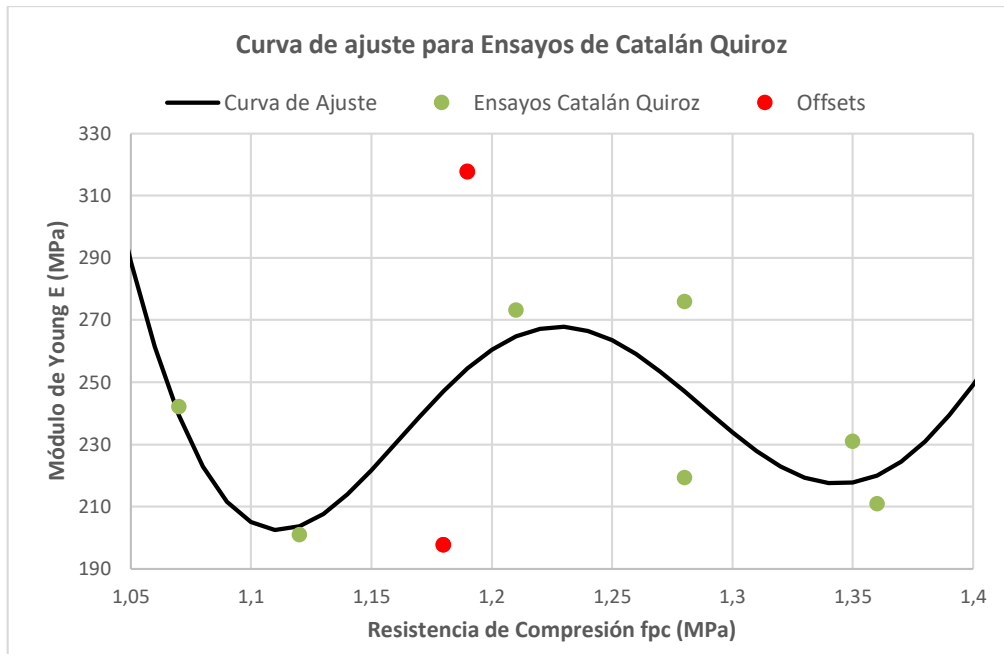


Figura 23. Curva de ajuste para Ensayos de Catalán Quiroz (2019)

A partir de los datos reales obtenidos de las bases de datos para ensayos en muestras de Ecuador, se determinó una resistencia máxima a compresión de $f_{cp} = 1.15 \text{ MPa}$ para el adobe y $f_{cp} = 3.53 \text{ MPa}$ para el mortero. Con resultados obtenidos en el laboratorio de la Universidad de Cuenca por Arcentález et al. (2023), con muestras del cantón Sigüig en Ecuador, se determinó un módulo de Poisson de $\nu = 0.15$ para el adobe y $\nu = 0.30$ para el mortero. Con la ecuación de ajuste para dicho valor de f_{cp} , se obtuvo un Módulo de Young de $E = 221.667 \text{ MPa}$ para el adobe y de $E = 442.1 \text{ MPa}$ para el mortero.

Se considera que una buena aproximación para el comportamiento elástico se define como $f_{cp}/5$ y para el esfuerzo a tensión $f_{cp}/10$. Se utilizan las expresiones para el esfuerzo residual y para la deformación unitaria como $f_{cp}/10$ y $2 \frac{f_{cp}}{E}$ respectivamente según las recomendaciones realizadas por Petracca et al. (2017). Para la obtención de los valores de f_{co} , f_{cr} , f_t y ϵ_p se utilizaron las siguientes ecuaciones

$$f_{co} = f_{cp}/5 \quad (18)$$

$$f_{cr} = f_{cp}/10 \quad (19)$$

$$f_t = f_{cp} / 10 \quad (20)$$

$$e_p = 2 * \frac{f_{cp}}{E} \quad (21)$$

Para el cálculo de las energías de fractura a tracción (G_t) y compresión (G_c), se utilizaron las propuestas de Lourenco et al. (2007).

$$G_c = \left(\frac{f_{co}}{f_t} \right)^2 * G_t \quad (22)$$

$$G_t = 0.073 f_t^{0.18} \quad (23)$$

El uso de las ecuaciones mencionadas, generan todos los datos necesarios para realizar el análisis de daño. En la Tabla 6 se muestran los valores utilizados para el adobe y en la Tabla 7 para el mortero.

Tabla 6. Valores de las propiedades físicas para el adobe

Adobe	
Masa	
rho	0 kg/mm ³
Elasticidad	
E	221.7 N/mm ²
v	0.15
Tensión	
ft	0.115 N/mm ²
Gt	0.003335 N/mm
Compresión	
fc0	0.23 N/mm ²
fcp	1.15 N/mm ²
fcr	0.115 N/mm ²
ep	0.01038
Gc	1.84 N/mm

Tabla 7. Valores de las propiedades físicas para el adobe

Mortero	
Masa	
rho	0 kg/mm ³
Elasticidad	
E	442.1 N/mm ²
v	0.3
Tension	
ft	0.353 N/mm ²
Gt	0.01024 N/mm
Compresion	
fc0	1.177 N/mm ²
fcp	3.53 N/mm ²
fcr	0.353 N/mm ²
ep	0.01597
Gc	5.648 N/mm

STKO calcula y analiza los datos con el método de elementos finitos, por lo que los datos solicitados en la Tabla 8 garantizan una simulación precisa y confiable de la respuesta estructural. Con esta información, el programa realiza los cálculos y análisis necesarios para obtener resultados que reflejen de manera precisa el comportamiento del sistema bajo estudio.

Tabla 8. Parámetros a ingresar en STKO para la resolución por MEF.

c1	parámetro de forma de la ley de compresión	0.65
c2	parámetro de forma de la ley de compresión	0.5
c3	parámetro de forma de la ley de compresión	1.5
Misc		
surf_t	Superficie a tracción: Rankine o Lubliner	Rankine
Bm	factor de resistencia compresión biaxial	1.16
m1	factor de reducción de cortante-compresión en el rango [0, 1]	0.16
Kc	factor de forma de compresión triaxial	0.66667
eta	parámetro de viscosidad	0
pdf_t	factor de daño plástico para respuesta a tracción en el rango [0 (daño completo) ... (mixto) ... 1 (plasticidad completa)]	0
pdf_c	factor de daño plástico para respuesta a compresión en el rango [0 (daño completo) ... (mixto) ... 1 (plasticidad completa)]	0
integration	tipo de integración	IMPL-EX
implexCheckError	Verificar el error IMPL-EX asegurándose de que se mantenga bajo una tolerancia definida por el usuario	No
implexError Tolerance	El error IMPL-EX relativo máximo permitido	0.05
implexErrorTime ReductionLimit	El límite de reducción del paso de pseudo-tiempo bajo el cual no se realiza la verificación del error implex	0.01
autoRegularization	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.	Si

Cuando se definen las propiedades físicas y materiales, puede ocurrir un fenómeno de retroceso o también conocido como snapping back. Este fenómeno puede ocurrir en elementos cohesivos debido a su comportamiento inestable. Para ciertos valores de las condiciones iniciales que corresponden a constantes en el diagrama fuerza-desplazamiento, se obtiene una configuración inestable. Esto puede conducir a problemas de inestabilidad

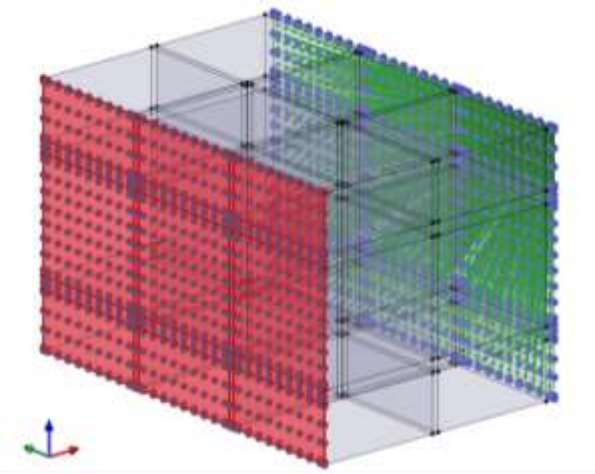
numérica y, en el caso de elementos finitos, puede resultar en la falta de convergencia del análisis por lo que se deben tomar precauciones adicionales para evitar problemas de inestabilidad y asegurarse de que el modelo sea capaz de capturar adecuadamente el comportamiento de los elementos (Petracca, Pelà, Rossi, Zaghi, et al., 2017).

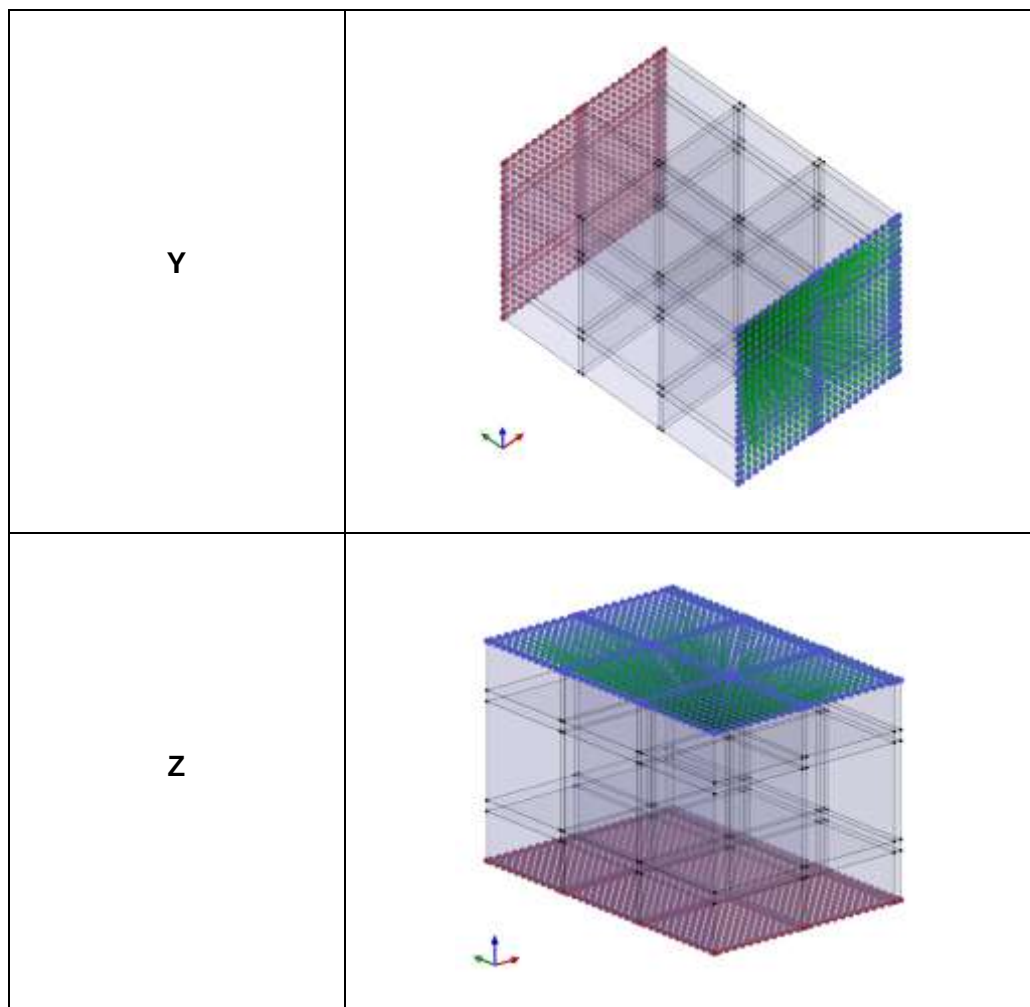
3.3.3 Definición de condiciones

Una vez definida la geometría y las propiedades físicas del RVE, es necesario someterlo a análisis para obtener las propiedades físicas homogeneizadas que se aplicarán al modelo general de las fachadas de adobe. En este sentido, se realizó un análisis del RVE en condiciones de compresión, tracción y corte en el modelo tridimensional.

En el modelo, se establecieron restricciones de desplazamiento en las tres direcciones principales (X, Y y Z) en la base de la estructura. En la parte superior, se permitió el desplazamiento en la dirección de la aplicación de carga y se restringió en las otras dos direcciones. Por ejemplo, si se analizaba la compresión en la dirección X, se restringía el desplazamiento en las direcciones Y y Z. De esta manera, se generó un modelo que simula compresión y tracción pura en la dirección de análisis. La ubicación de las restricciones en los análisis de compresión y tracción en las direcciones X, Y y Z se muestra en la Tabla 9. La cara de color rojo en el modelo indica la zona donde se aplicaron restricciones de desplazamiento, mientras que la zona verde representa la cara donde se aplicó la carga de compresión o tracción.

Tabla 9. Ubicación de las restricciones en el análisis de compresión y tracción en X, Y y Z

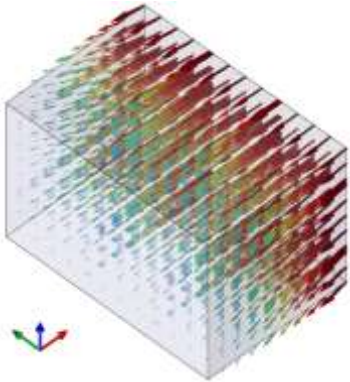
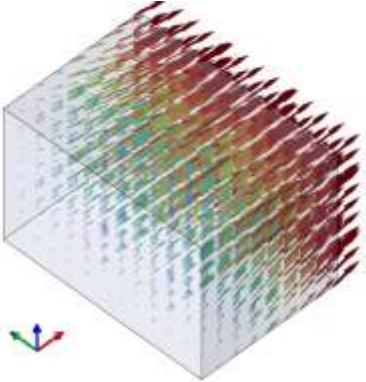
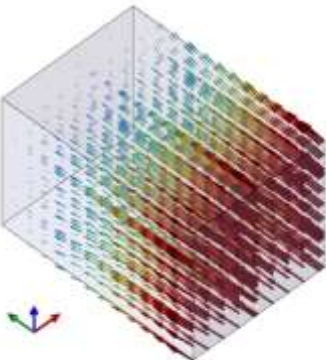
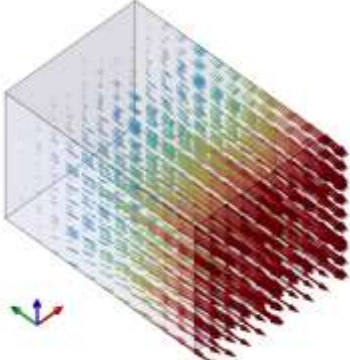
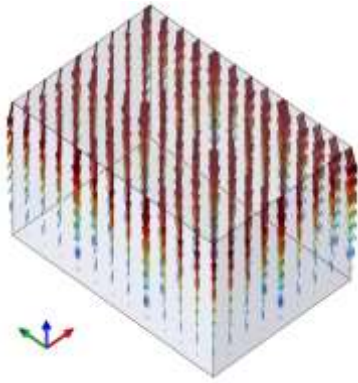
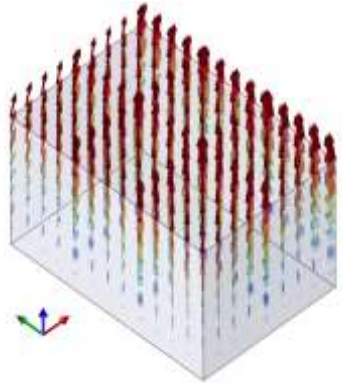
Dirección de análisis	Restricciones de desplazamiento
X	



En este modelo, se aplicó un tipo de carga lineal que actuaba en toda la cara opuesta a aquella que está restringida en desplazamiento (zona verde en las figuras de la Tabla 9). Para cada ensayo se definió un desplazamiento en milímetros que generaba la carga lineal. En el caso del ensayo de compresión, el desplazamiento tenía el signo correspondiente a la dirección de compresión de la cara de aplicación. Por otro lado, para simular el ensayo de tracción, la carga se aplicaba con un signo contrario.

En el modelo, se estableció una interacción que permitía que una región seleccionada tuviera el mismo comportamiento que un nodo específico denominado "nodo maestro". Para los ensayos de compresión y tracción, se requería una carga uniforme en toda la cara para imitar las condiciones de un ensayo de laboratorio. Por lo tanto, la interacción se aplicó en la cara sometida a carga, y el nodo maestro era un nodo de la misma cara. La Tabla 10 muestra la representación vectorial de la dirección de la carga tanto para los ensayos de compresión como para los de tracción.

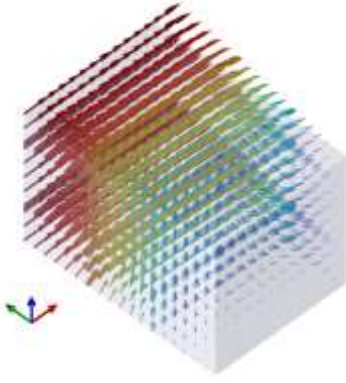
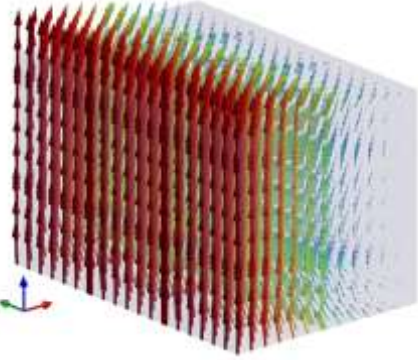
Tabla 10. Representación de la dirección de aplicación de carga mediante vectores para compresión y tracción

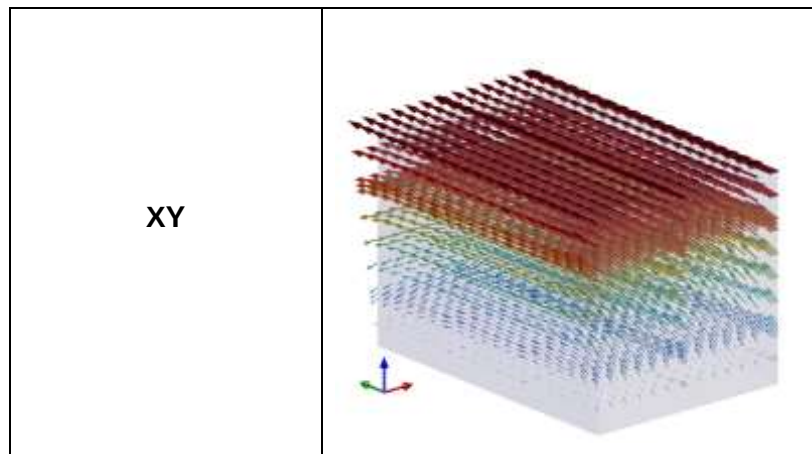
	Compresión	Tracción
X		
Y		
Z		

Para el modelo de corte puro, se establecieron restricciones de desplazamiento similares a las que se muestran en la Tabla 9. Sin embargo, en la cara donde se aplicó la carga, se liberó el desplazamiento en la dirección perpendicular a la cara de estudio, mientras que se

restringieron las otras dos direcciones. Además, se utilizaron las mismas interacciones y carga lineal que en los análisis de compresión y tracción. La diferencia clave en el análisis de corte es que la carga se aplicó en dirección perpendicular a la cara de análisis, de manera que se generara un corte puro en la estructura. Esto implica que la carga se aplica de forma que se produzca únicamente un esfuerzo cortante, sin componentes de compresión o tracción en la dirección de estudio. En la Tabla 11, se muestran representados mediante vectores la dirección de la carga para el ensayo a corte.

Tabla 11. Representación de la dirección de aplicación de carga mediante vectores para corte

	Corte
XZ	
YZ	



3.4 Análisis y resultados del RVE

El objetivo del análisis por RVE es determinar módulos elásticos (E), módulos de corte (G), f_c , f_t , energías de compresión y energías de tracción. Para generar el modelo deseado y obtener la información de los nodos relevantes para el fenómeno en STKO, es necesario definir los pasos de análisis adecuados. Estos pasos incluyen la incorporación de las restricciones y cargas previamente definidas en las condiciones del análisis.

Además, es posible generar un monitor impulsado por Python que permita obtener curvas de desplazamiento y fuerza de reacción. Este monitor se configura para grabar los datos del nodo específico del cual se desea obtener el desplazamiento. En este caso, se debe seleccionar un nodo ubicado en la cara donde se ha aplicado la interacción, es decir, en la cara con la carga definida. Para registrar la fuerza de reacción, se registran los valores de la base donde se ha restringido el desplazamiento y se suman todas las fuerzas de reacción en esta cara. Esto permite obtener información precisa sobre la respuesta de la estructura en términos de fuerzas reactivas. En la Figura 24 se esquematiza en la dirección X, el nodo seleccionado de desplazamiento y la cara que registra los valores de fuerza de reacción.

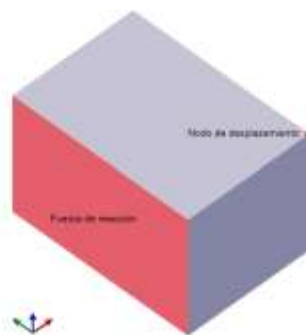


Figura 24. Esquema de la geometría que registra el desplazamiento y la fuerza de reacción.

Adicionalmente, STKO genera una tabla que contiene los valores de la curva generada, proporcionando una representación clara y cuantitativa de los resultados obtenidos. Estos datos fueron procesados y en la Figura 25 se presentan las curvas de Fuerza-Deformación para compresión obtenidas con los valores presentados en el monitor. En la Figura 26 se presentan los resultados para tracción.

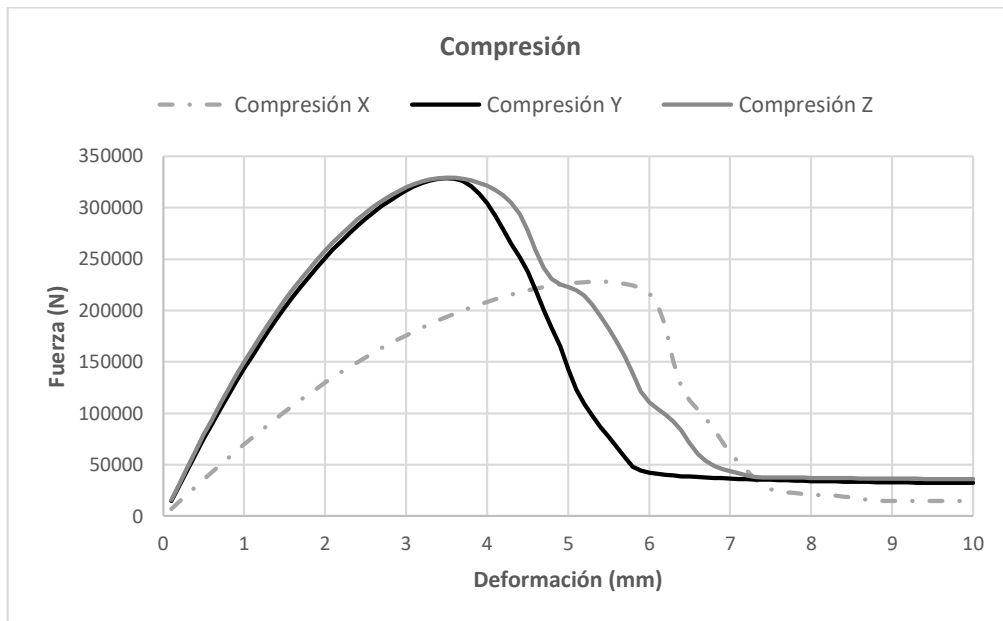


Figura 25. Curvas de Fuerza-Deformación para compresión

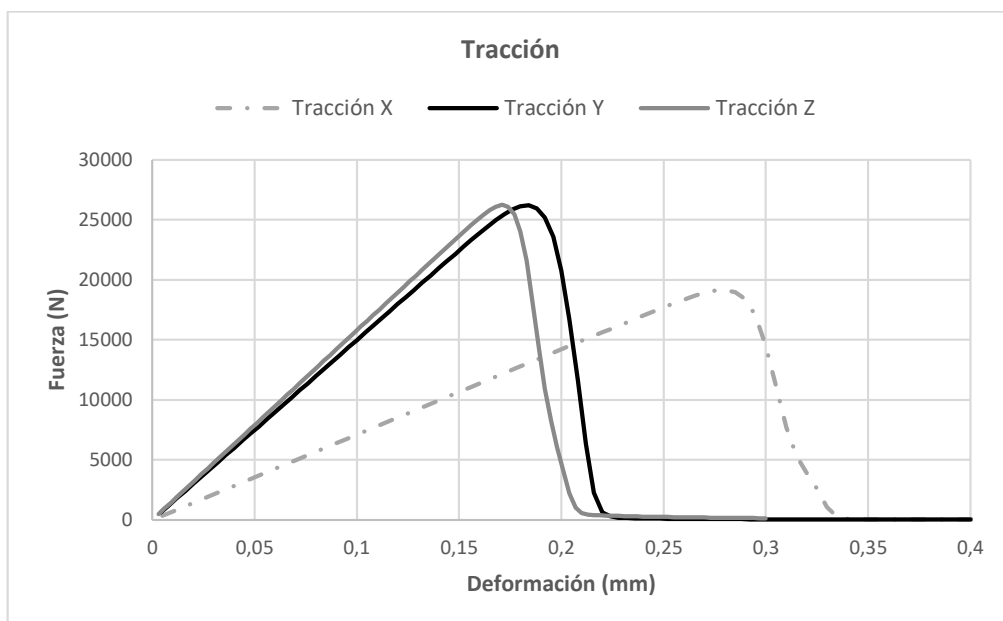


Figura 26. Curvas de Fuerza-Deformación para tracción

Mediante la teoría de Petracca et al. (2017) se tiene que el área bajo de la curva de $\sigma - \varepsilon$ desde el valor de f_c o f_t hasta la fase residual representa al valor de la energía de tensión o energía de compresión respectivamente. Por otro lado, la pendiente en la fase elástica de la curva de $\sigma - \delta$ representa al módulo elástico o módulo de Young. En la figura 27 se muestran los puntos de la curva $\sigma - \delta$ para compresión y la línea de tendencia de los mismos. En la Figura 28 se muestran los valores para tracción. Como resultado se obtendrán los módulos elásticos en cada dirección analizada. Es importante destacar que, aunque en la figura 27 y 28 los valores utilizados para calcular los módulos elásticos parecen estar en la misma posición, los métodos matemáticos revelan que los valores de las pendientes varían entre 251.5 MPa y 258.8 MPa para las diferentes direcciones.

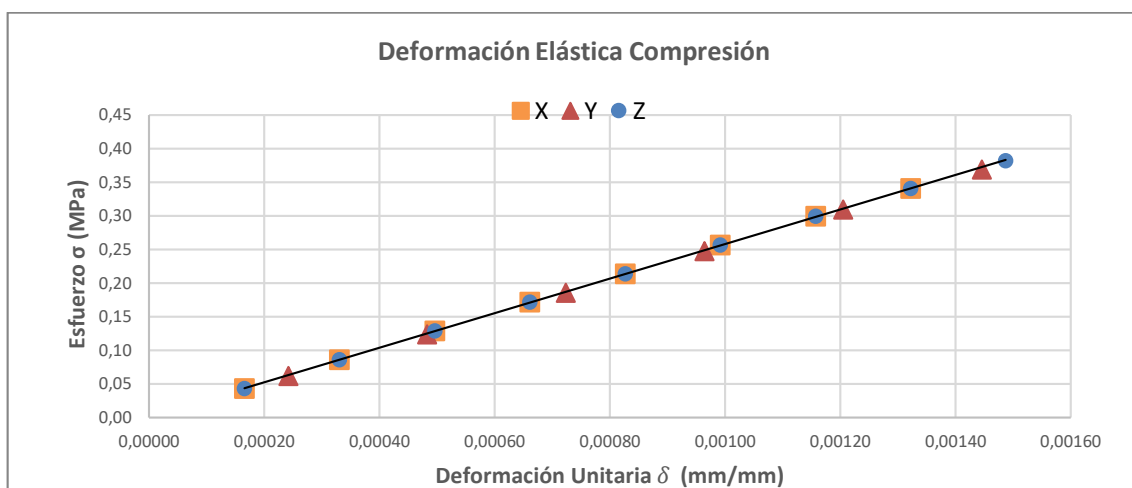


Figura 27. Puntos de la curva σ - δ para compresión en X, Y y Z

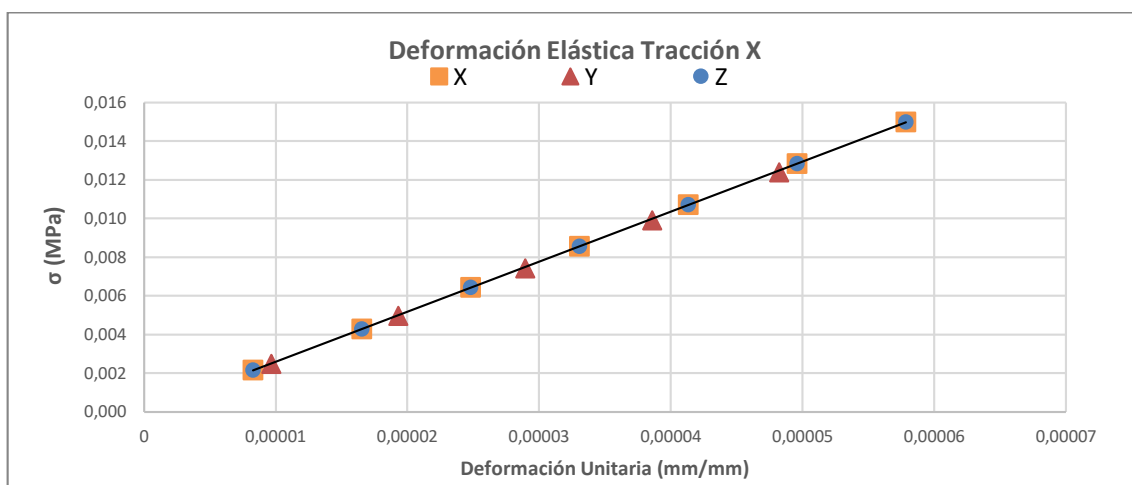


Figura 28. Puntos de la curva σ - δ para tracción en X, Y y Z

Las curvas de $\sigma - \delta$ se muestran en las Figuras 29 y 30 para compresión y tensión respectivamente.

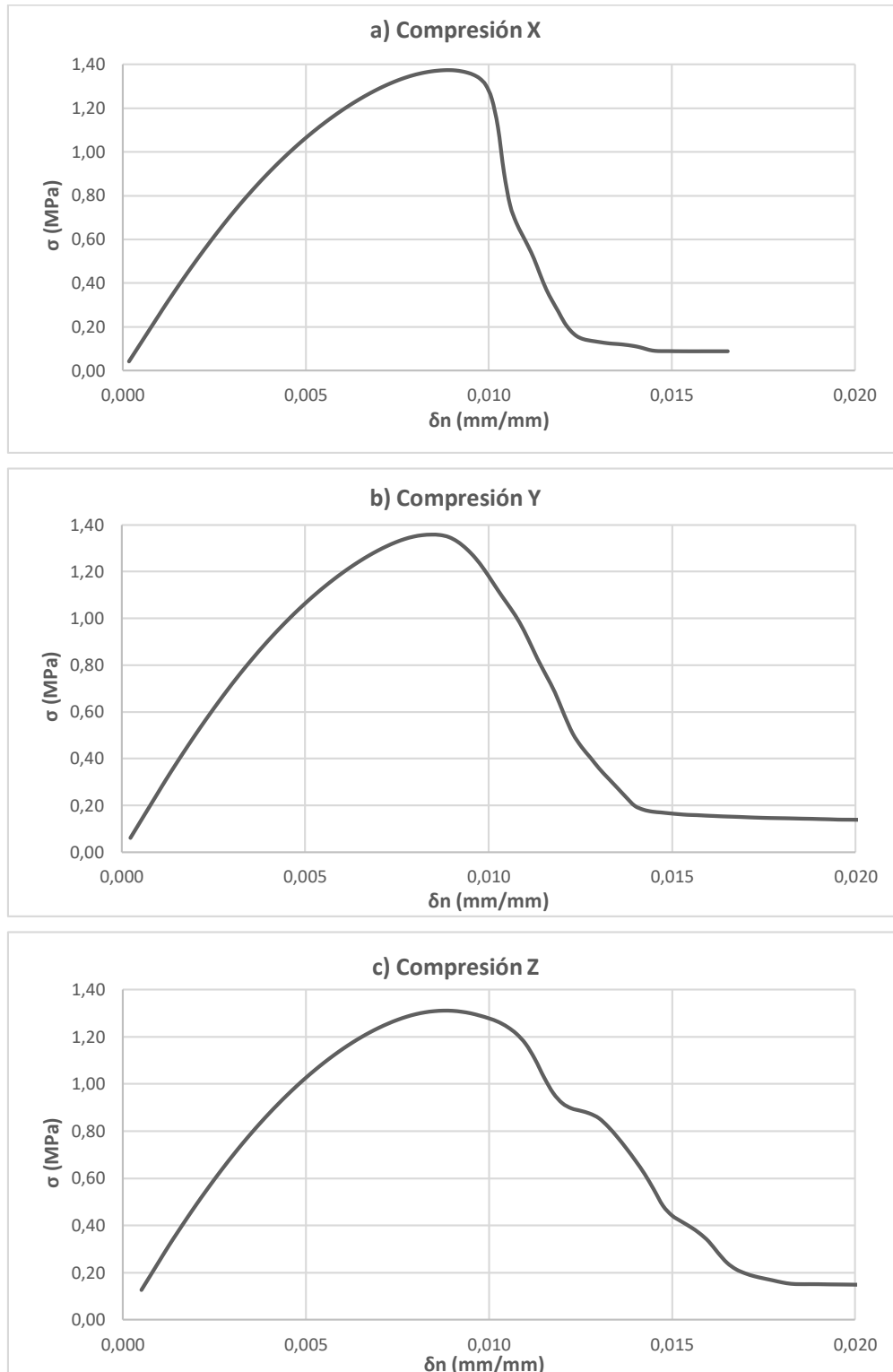


Figura 29. Curva $\sigma - \delta$ para compresión en (a)X, (b)Y y (c)Z

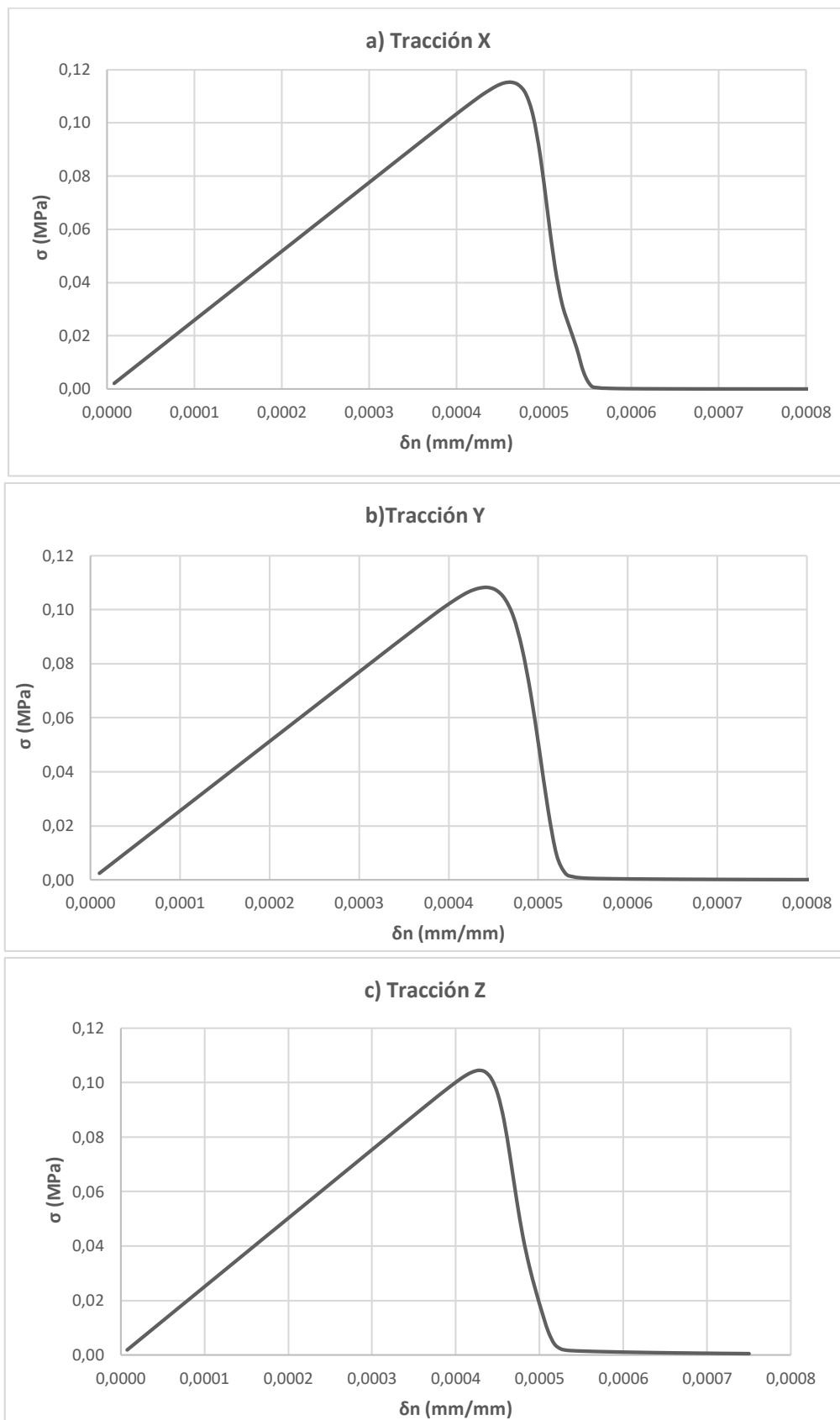


Figura 30. Curva $\sigma - \delta$ para tracción en (a)X, (b)Y y (c)Z

Los resultados numéricos para el modelo a tracción y compresión son los datos necesarios para poder realizar la homogenización de los materiales. A partir de los análisis mencionados, se obtuvieron los valores de energías de compresión y tracción (Tabla 12), los valores de f_c y f_t (Tabla 13) y los módulos elásticos en X, Y y Z (Tabla 14).

Tabla 12. Resultados de Energía (N/mm)

Resumen de Energías (N/mm)		
	Tracción	Compresión
X	0.00243	2.438
y	0.00332	1.774
Z	0.00243	3.182

Tabla 13. Resultados de f_c y f_t

Resumen de f_c y f_t (MPa)		
	Tracción	Compresión
X	0.1083	1.3575
Y	0.1153	1.3741
Z	0.1045	1.3120

Tabla 14. Resultados de los módulos elásticos

Resultados de Módulos Elásticos Isotrópicos (N/mm ²)			
	Tracción	Compresión	Promedio
X	256.8468	256.8472	256.8470
Y	258.7592	258.7592	258.7592
Z	251.5434	251.5440	251.5437

El sistema de post-procesamiento de STKO ofrece la capacidad de generar gráficos que combinan la geometría y los materiales con los resultados tanto en los nodos como en los elementos. Esta funcionalidad permite visualizar de manera tridimensional el fallo del RVE. Se han utilizado gráficos de tiempo-historia para representar de manera evolutiva el comportamiento del RVE bajo diferentes condiciones de carga. En la Figura 31 se muestra un ejemplo del proceso evolutivo del RVE sometido a compresión en dirección Z. En el gráfico se representa el daño del material, donde el valor 0 indica que el material no ha sufrido daño y el valor 1 indica que el material está completamente dañado. Es importante destacar que el daño del material se manifiesta inicialmente en la cara donde se aplica la carga y se propaga hacia la zona de rotura del material.

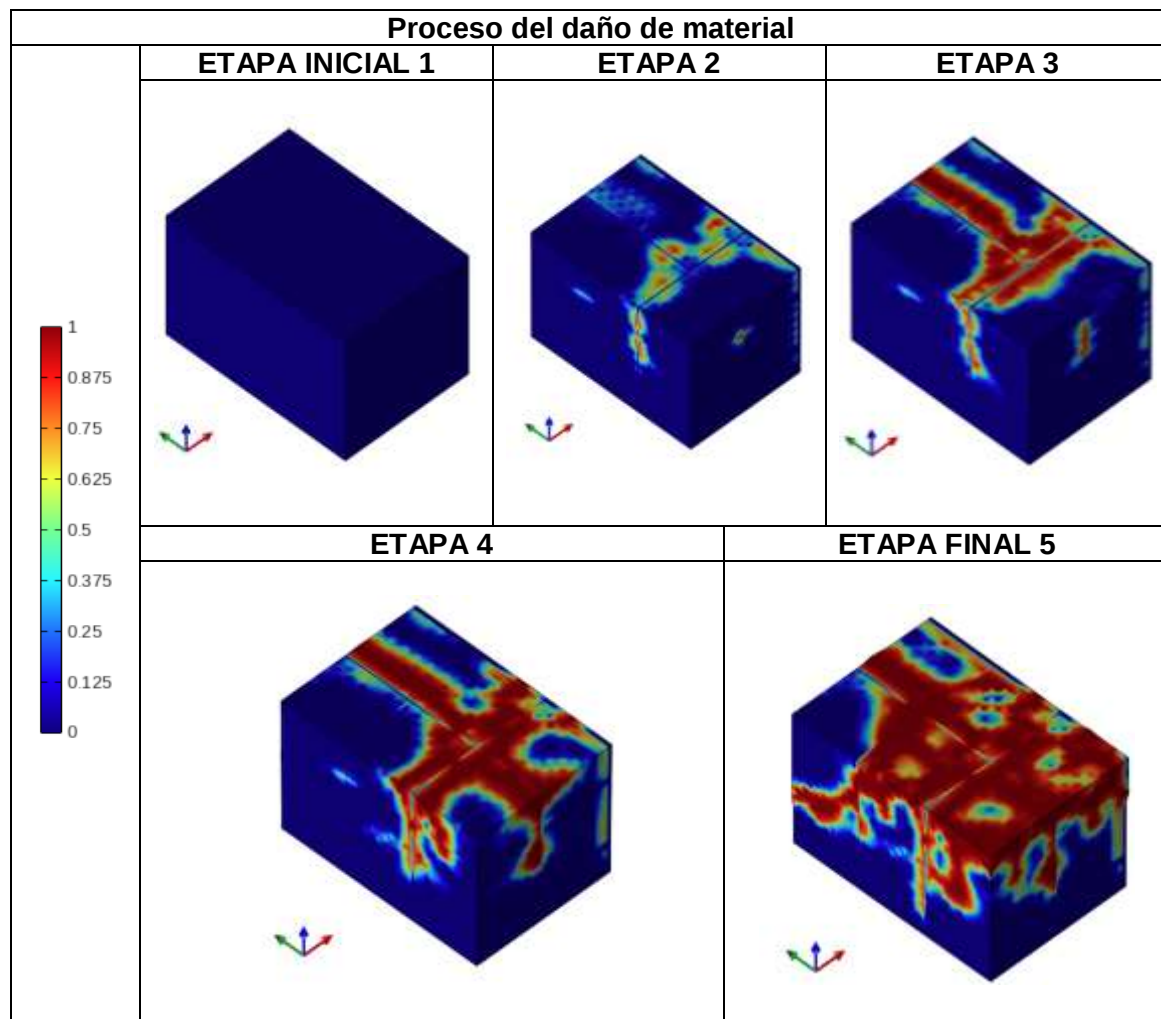


Figura 31. Proceso evolutivo del daño del material para compresión en Y.

También se generaron gráficos de desplazamiento, los cuales muestran que el desplazamiento es continuo hasta que se produce la falla. Estos gráficos permiten obtener el plano de falla de los materiales en todas las condiciones en las que se analiza el RVE. Los resultados visuales del daño del material y los desplazamientos en la etapa final se presentan en la Tabla 15 y 16, respectivamente.

Tabla 15. Resultados del daño del material a compresión.

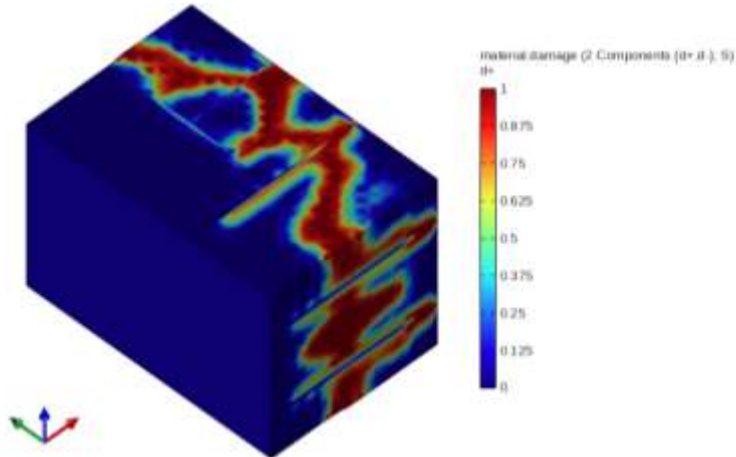
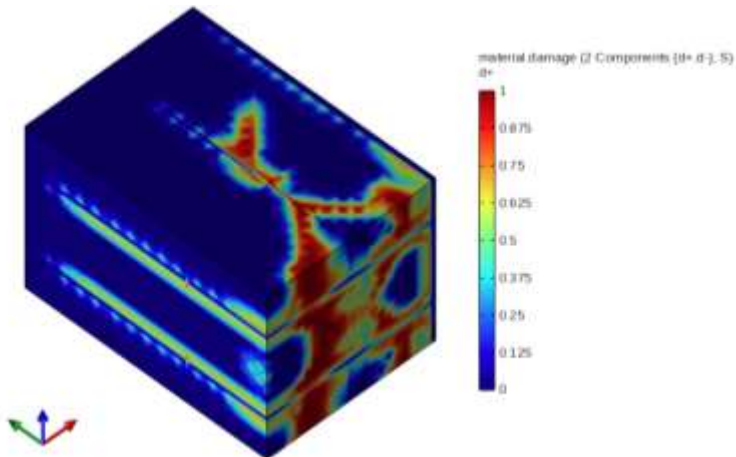
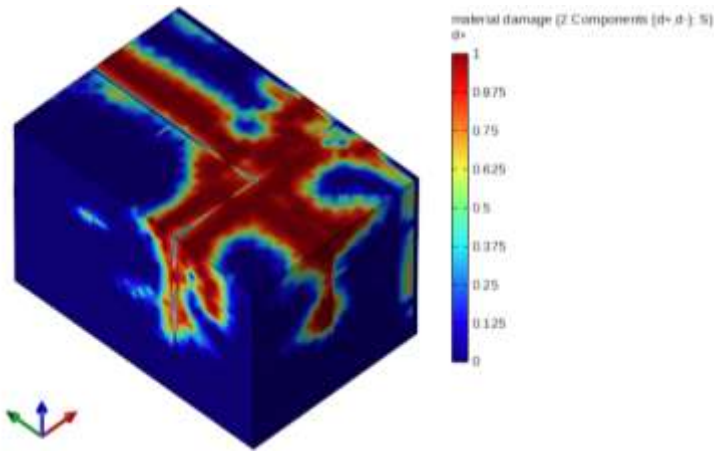
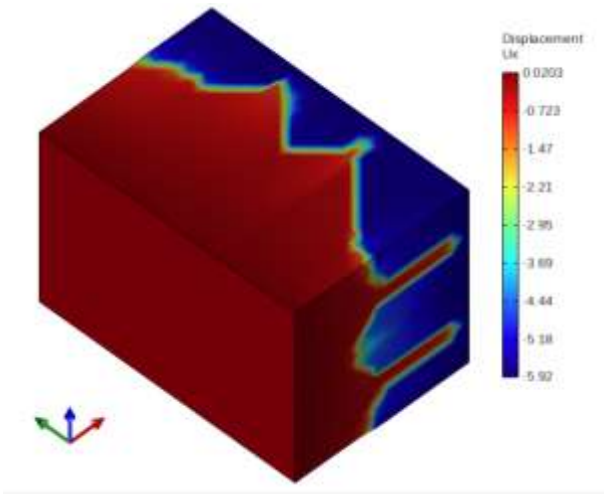
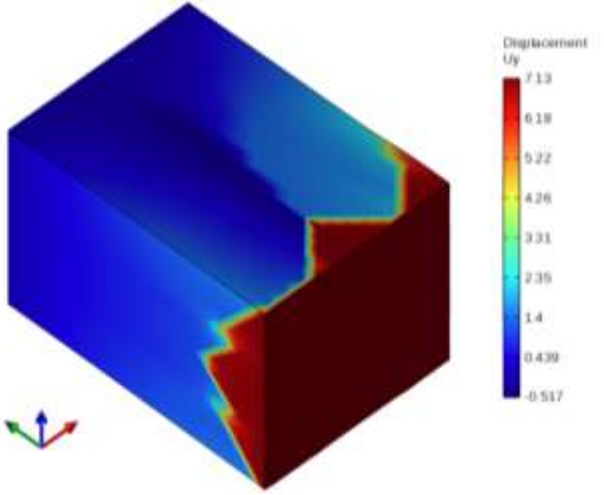
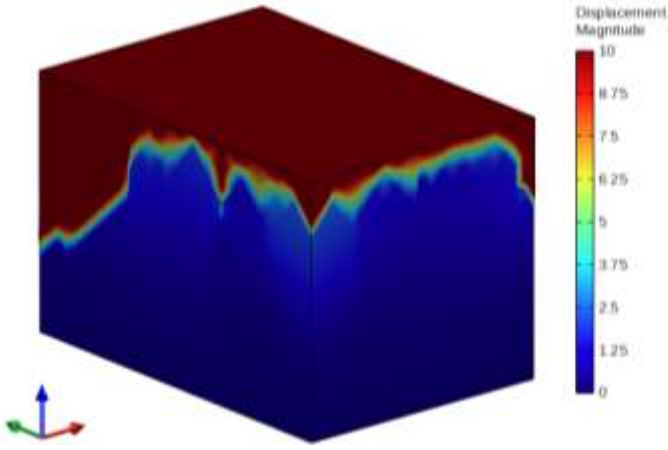
Eje	Esquema de Fallo (daño del material)
X	
Y	
Z	

Tabla 16. Resultados de desplazamiento a compresión.

Eje	Esquema de Fallo (desplazamiento)
X	
Y	
Z	

A partir del modelo de corte, se obtuvieron curvas de fuerza-deformación. Mediante la ecuación $G = \frac{VH}{A\delta}$ se obtuvo el valor de los módulos de corte usando el primer resultado diferente de cero para cada análisis. En la ecuación, A es el área de la cara analizada, δ es el desplazamiento lateral, V es la fuerza total de corte y H es la altura del RVE en la dirección analizada. Las curvas de fuerza-deformación se muestran en la Figura 32

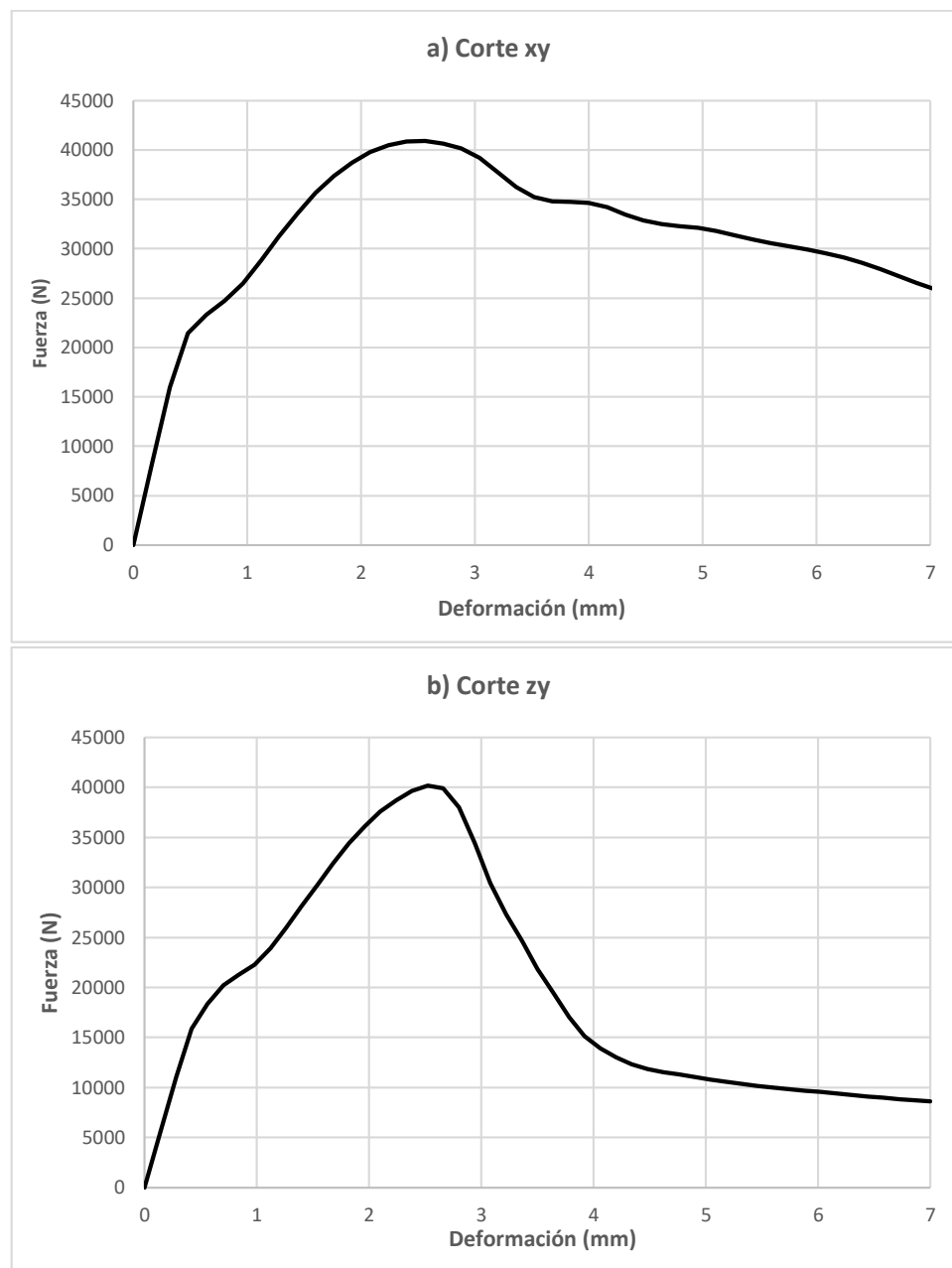




Figura 32. Curva fuerza-deformación para corte en (a)XY, (b)ZY y (c)Z X
Los resultados numéricos para corte necesarios para la homogenización son los resultados de los módulos de corte en X, Y y Z (Tabla 17).

Tabla 17. Resultados de módulos de corte

Módulos Corte Isotrópico			
	G (N/mm ²)	A (mm ²)	h (mm)
xy	81.53241063	251075	400
yz	67.78819215	242000	415
zx	54.77823983	166000	605

Para el diseño del material ortotrópico, se requieren las relaciones de los módulos elásticos y módulos de corte en dirección de la aplicación de carga en el macromodelo. De esta forma, mediante las ecuaciones

$$A_{xx} = \frac{E_z}{E_x} \quad (24)$$

$$A_{yy} = \frac{E_z}{E_y} \quad (25)$$

$$A_{zz} = \frac{E_z}{E_z} \quad (26)$$

$$A_{xyxy} = \frac{G_{zx}}{G_{xy}} \quad (27)$$

$$A_{yzyz} = \frac{G_{zx}}{G_{yz}} \quad (28)$$

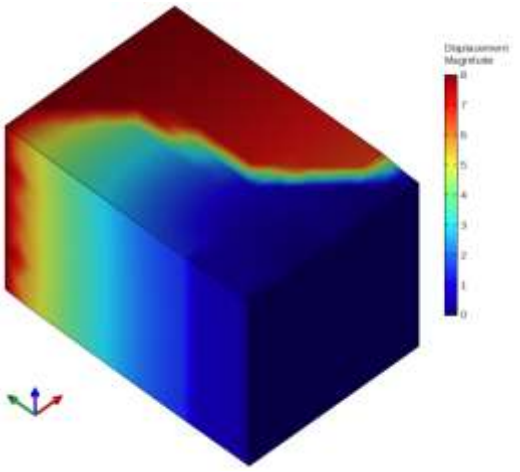
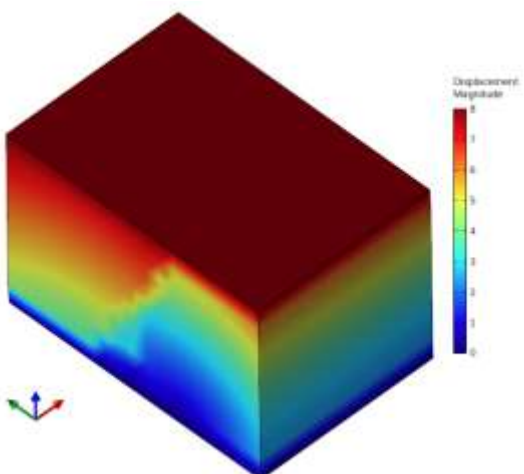
$$A_{zxzx} = \frac{G_{zx}}{G_{zx}} \quad (29)$$

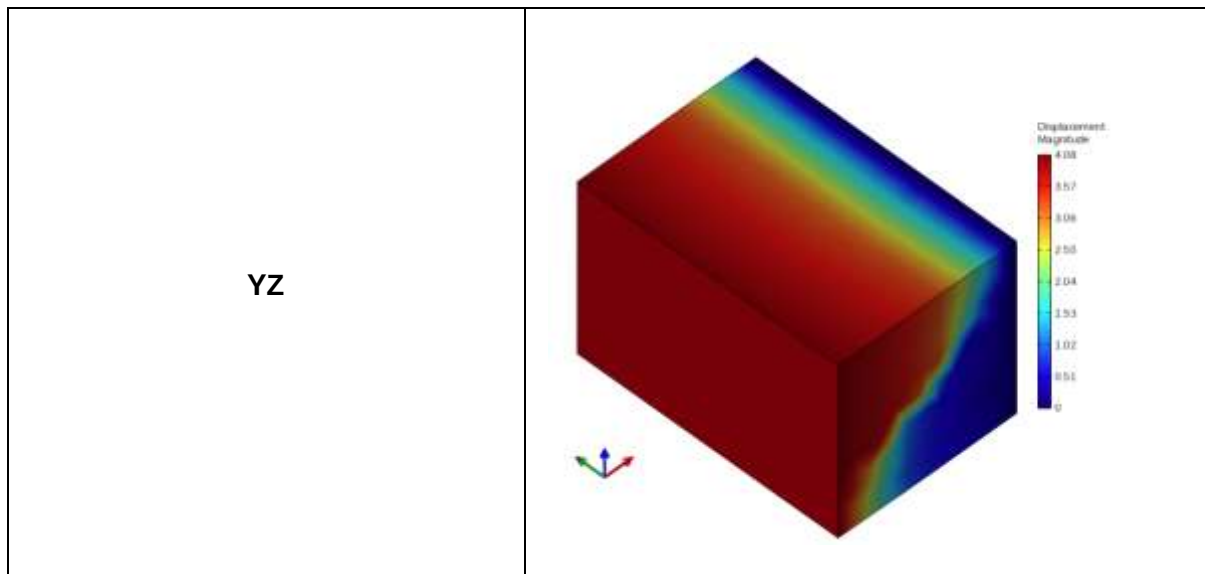
se genera la Tabla 18 que representan los resultados de las relaciones. Con el post-procesador de STKO se generaron las gráficas de desplazamiento en las que se muestran los planos de falla a corte. Los resultados se muestran en la Tabla 19.

Tabla 18. Relaciones entre módulos elásticos y módulos de corte.

Relaciones	
Axx	0.9794
Ayy	0.9721
Azz	1.0000
Axyxy	0.6719
Ayzyz	0.8081
Azxzx	1.0000

Tabla 19. Resultados de desplazamiento a corte.

Plano	Esquema de Fallo (desplazamiento)
ZX	
XY	



3.5 Selección de las fachadas de adobe

El Centro Histórico de Cuenca, Ecuador, alberga numerosas edificaciones construidas con técnicas vernáculas utilizando adobe. Según datos de inventario a nivel de registro, aproximadamente el 43.2% de las edificaciones inventariadas en el área corresponden a fachadas de adobe, mientras que el 18.2% tienen muros de adobe como estructura principal (Achig et al., 2013).

El área de estudio específica es la Parroquia Gil Ramírez Dávalos. Según la información recopilada en el proyecto "Cuenca Patrimonio Mundial" de la Universidad de Cuenca, se identificaron 298 edificaciones con Valor Arquitectónico A (VAR A) o Valor Arquitectónico B (VAR B) en esta área. Estas edificaciones presentan muros de adobe tanto en sus fachadas como en sus paredes internas, lo que indica la importancia del uso de este material en la construcción de patrimonio arquitectónico en la zona.

En el estudio realizado, se aplicó un muestreo que seleccionó el 15% del total de la población de viviendas de adobe con valor arquitectónico en la Parroquia Gil Ramírez Dávalos. Para ello, se asignó una letra del alfabeto a cada manzana que contenía predios a estudiar y se numeraron en orden ascendente los predios arquitectónicamente levantados. La muestra final consistió en 45 predios que poseían Valor Arquitectónico A (VAR A) o Valor Arquitectónico B (VAR B) (Jurado & Vergara, 2019). Sin embargo, el enfoque de la presente investigación se centra específicamente en el comportamiento de las fachadas de una planta. La muestra seleccionada para este análisis consta de 14 edificaciones.

Los valores recolectados por Jurado y Vergara se muestran en la Tabla 20 e incluyen la longitud de la fachada (LF), la longitud de profundidad (LP), la altura de la planta baja de la fachada (hF), el espesor de la fachada (eF), el número de puertas (P) y el número de ventanas (V). Cada fachada se identifica con un código y los valores correspondientes se encuentran especificados en el cuadro de datos recolectados.

Tabla 20. Resumen de dimensiones de fachadas de una planta

No	Código	LF (m)	LP (m)	Relación LF/LP	hF (m)	eF (m)	P	V
1	A1	5.50	9.50	0.58	3.50	0.60	2	0
2	B2	12.09	13.70	0.88	4.50	0.50	3	0
3	C3	5.91	10.96	0.54	3.80	0.50	2	0
4	C4	15.56	19.14	0.81	4.50	0.70	5	0
5	C5	16.10	57.04	0.28	3.86	0.85	4	0
6	D8	14.90	26.28	0.57	5.20	0.50	3	0
7	D9	22.23	38.00	0.59	3.50	0.50	3	1
8	D10	7.00	30.20	0.23	2.78	0.40	2	1
9	E11	6.40	17.91	0.36	3.40	0.40	2	0
10	F14	10.50	51.04	0.21	3.30	0.65	2	0
11	G15	8.45	51.23	0.16	3.10	0.45	2	1
12	G16	8.79	20.82	0.42	3.40	0.62	3	0
13	K23	7.33	7.55	0.97	4.50	0.80	1	1
14	T40	14.07	21.89	0.64	4.20	0.63	3	0

A partir del análisis estadístico realizado en las 14 fachadas de la muestra, se formaron rangos para cada una de las características estudiadas. Se generaron tablas para la longitud de la fachada (Tabla 21), altura de planta baja de la fachada (Tabla 22), espesor de la fachada (Tabla 23), número de puertas (Tabla 24) y la relación longitud de fachada/longitud de profundidad (Tabla 25).

Tabla 21. Rangos para longitud de fachada

ANÁLISIS LONGITUD DE FACHADA							
INTERVALOS	RANGO DE LONGITUD DE FACHADA		MARCA DE CLASE	FRECUENCIA ABSOLUTA	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA ACUMULADA ABSOLUTA	FRECUENCIA ACUMULADA RELATIVA
	DESDE	HASTA					
1	5	10	7.5	7	50.00%	7	50.00%
2	10.01	15	12.5	4	28.57%	11	78.57%
3	15.01	20	17.5	2	14.29%	13	92.86%
4	20.01	25	22.5	1	7.14%	14	100.00%
TOTAL				14	100.00%		

Tabla 22. Rangos para altura de fachada

ANÁLISIS ALTURA DE FACHADA							
INTERVALOS	RANGO DE ALTURA DE FACHADA		MARCA DE CLASE	FRECUENCIA ABSOLUTA	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA ACUMULADA ABSOLUTA	FRECUENCIA ACUMULADA RELATIVA
	DESDE	HASTA					
1	2	3	2.5	1	7.14%	1	7.14%
2	3.01	4	3.5	8	57.14%	9	64.29%
3	4.01	5	4.5	4	28.57%	13	92.86%
4	5.01	6	5.5	1	7.14%	14	100.00%
TOTAL				14	100.00%		

Tabla 23. Rangos para espesor de fachada

ANÁLISIS ESPESOR DE FACHADA							
INTERVALOS	RANGO DE ESPESOR DE FACHADA		MARCA DE CLASE	FRECUENCIA ABSOLUTA	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA ACUMULADA ABSOLUTA	FRECUENCIA ACUMULADA RELATIVA
	DESDE	HASTA					
1	0.4	0.5	0.45	7	50.00%	7	50.00%
2	0.51	0.6	0.56	1	7.14%	8	57.14%
3	0.61	0.7	0.66	4	28.57%	12	85.71%
4	0.71	0.8	0.76	0	0.00%	12	85.71%
5	0.81	0.9	0.86	2	14.29%	14	100.00%
TOTAL				14	100.00%		

Tabla 24. Rangos para número de puertas

ANÁLISIS PUERTAS DE FACHADA							
INTERVALOS	RANGO DE No DE PUERTAS DE FACHADA		MARCA DE CLASE	FRECUENCIA ABSOLUTA	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA ACUMULADA ABSOLUTA	FRECUENCIA ACUMULADA RELATIVA
	DESDE	HASTA					
1	1	2	1.50	7	50.00%	7	50.00%
2	2.01	3	2.51	5	35.71%	12	85.71%
3	3.01	4	3.51	1	7.14%	13	92.86%
4	4.01	5	4.51	1	7.14%	14	100.00%
TOTAL				14	100.00%		

Tabla 25. Rangos para relación $\frac{\text{longitud de fachada}}{\text{longitud de profundidad}}$

ANALISIS RELACION PLANTA LF/LP						
INTERVALOS	RANGO DE RELACION EN PLANTA LF / LP		MARCA DE CLASE	FRECUENCIA ABSOLUTA	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA ACUMULADA RELATIVA
	DESDE	HASTA				
1	0	0.2	0.10	1	7.14%	1
2	0.21	0.4	0.31	4	28.57%	5
3	0.41	0.6	0.51	5	35.71%	10
4	0.61	0.8	0.71	1	7.14%	11
5	0.81	1	0.91	3	21.43%	14
TOTAL				14	100.00%	

Se generaron gráficos de barras para mostrar la frecuencia relativa de la longitud de la fachada (Figura 33), altura de planta baja de la fachada (Figura 34), espesor de la fachada (Figura 35), número de puertas (Figura 36) y la relación longitud de fachada/longitud de profundidad (Figura 37).

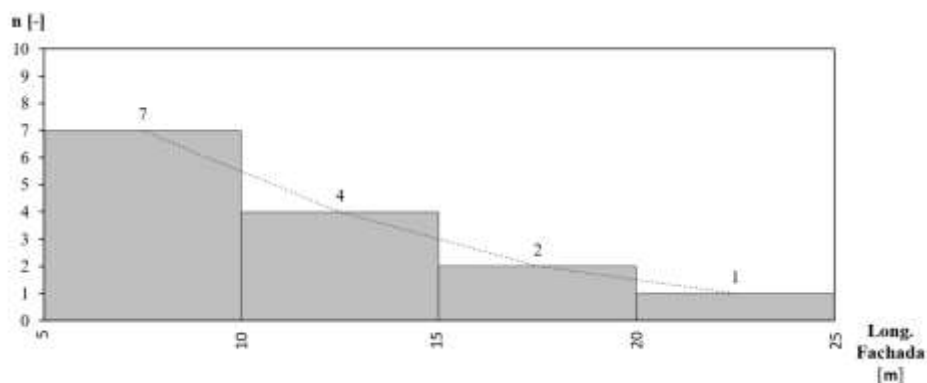


Figura 33. Frecuencia relativa de la longitud de la fachada

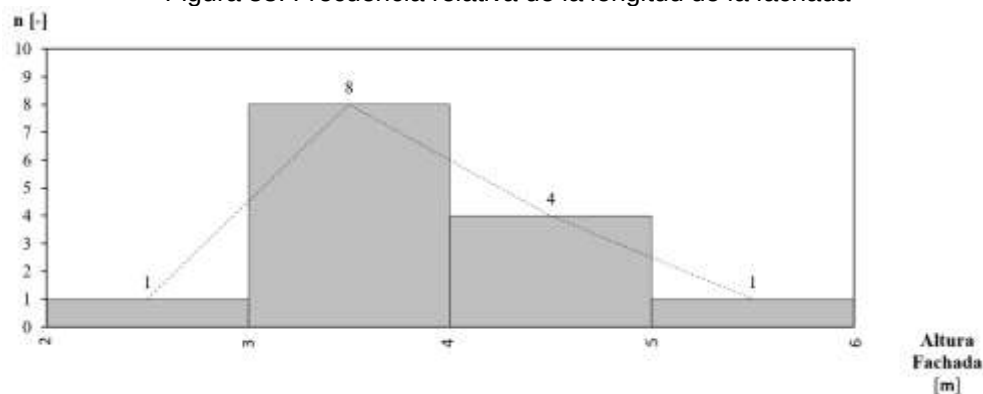


Figura 34. Frecuencia relativa de la altura de planta baja de la fachada

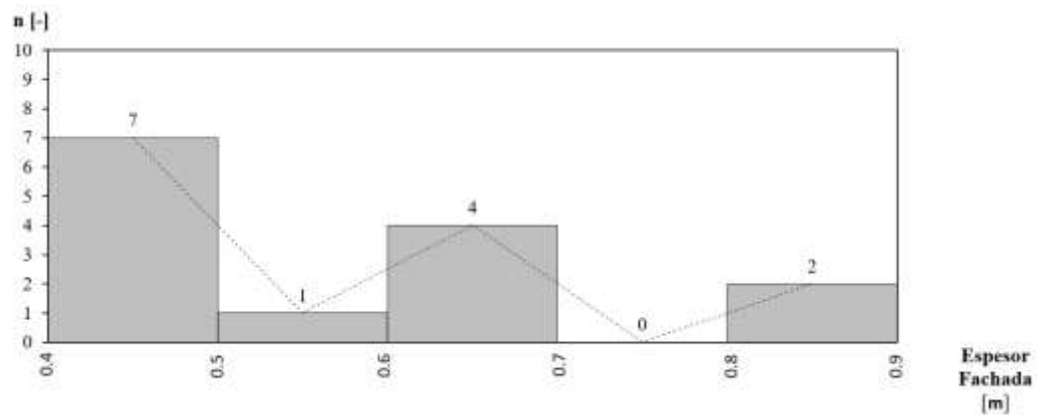


Figura 35. Frecuencia relativa de espesor de la fachada

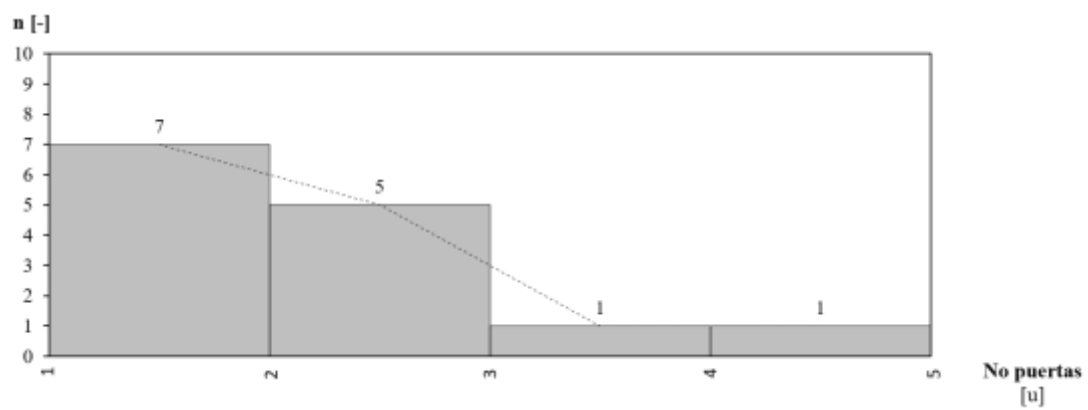


Figura 36. Frecuencia relativa del número de puertas

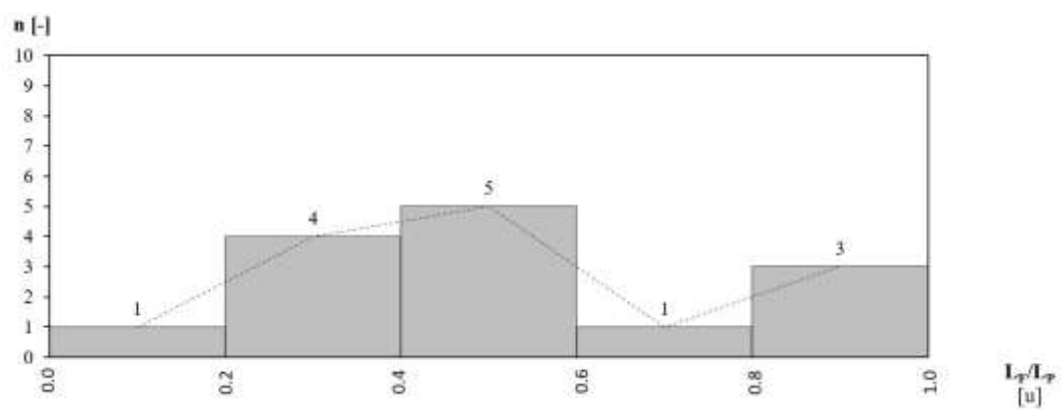


Figura 37. Frecuencia relativa de la relación $\frac{\text{longitud de fachada}}{\text{longitud de profundidad}}$

Luego, se determinó el rango que presentaba la mayor frecuencia de características marcadas, es decir, el rango en el que se encontraban la mayoría de las fachadas de la muestra para cada característica. Las fachadas que caen dentro de ese rango son las más representativas en relación a esa característica específica. Posteriormente, se seleccionaron las fachadas que se encontraban en el rango de mayor frecuencia para cada característica. Se evaluó cuántas características en común tenían estas fachadas seleccionadas y se les asignaron marcas de acuerdo a la cantidad de características compartidas. Por ejemplo, si una fachada caía dentro del rango de mayor frecuencia para tres características, se le asignaba una marca de "3". Finalmente, se organizó el ranking de las fachadas en función de la cantidad de marcas que tenían, estos resultados se muestran en la Tabla 26. Las fachadas con mayor cantidad de marcas son las que presentan más características en común con las demás fachadas de la muestra, lo que las hace más representativas.

Tabla 26. Ranking de fachadas

RANKING DE FACHADAS	
CÓDIGO	No MARCAS
C3	5
A1	4
E11	4
G15	4
D9	3
D10	3
G16	3
D8	2
F14	2
K23	2
B2	1
C5	1
C4	0
T40	0

También se muestran fotografías de las fachadas de una planta que ingresaron al análisis estadístico. Las fotografías fueron extraídas de la investigación de Jurado y Vergara (2019) y se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27. Fotografías de fachadas de una planta analizadas. (Jurado & Vergara, 2019)

Fotografías de Fachadas	
C3	A1
	
E11	G15
	
D9	D10
	
G16	D8
	

F14 	K23 
B2 	C5 
C4 	T40 

Para el macromodelo se definieron 4 fachadas tipo, de más representativa a menos representativa. La fachada 1 corresponde a la representación de la fachada C3, conservando todas sus características marcadas. La fachada 2 es una combinación de las fachadas A1, E11 y G15. La fachada 3 representa las fachadas D9, D10 y G16. Por último, la fachada 4 se compone de las fachadas D8, F14 y K23.

A partir de las dimensiones obtenidas en los levantamientos arquitectónicos realizados por Jurado y Vergara (2019), se realizaron ajustes en las dimensiones para redondearlas a

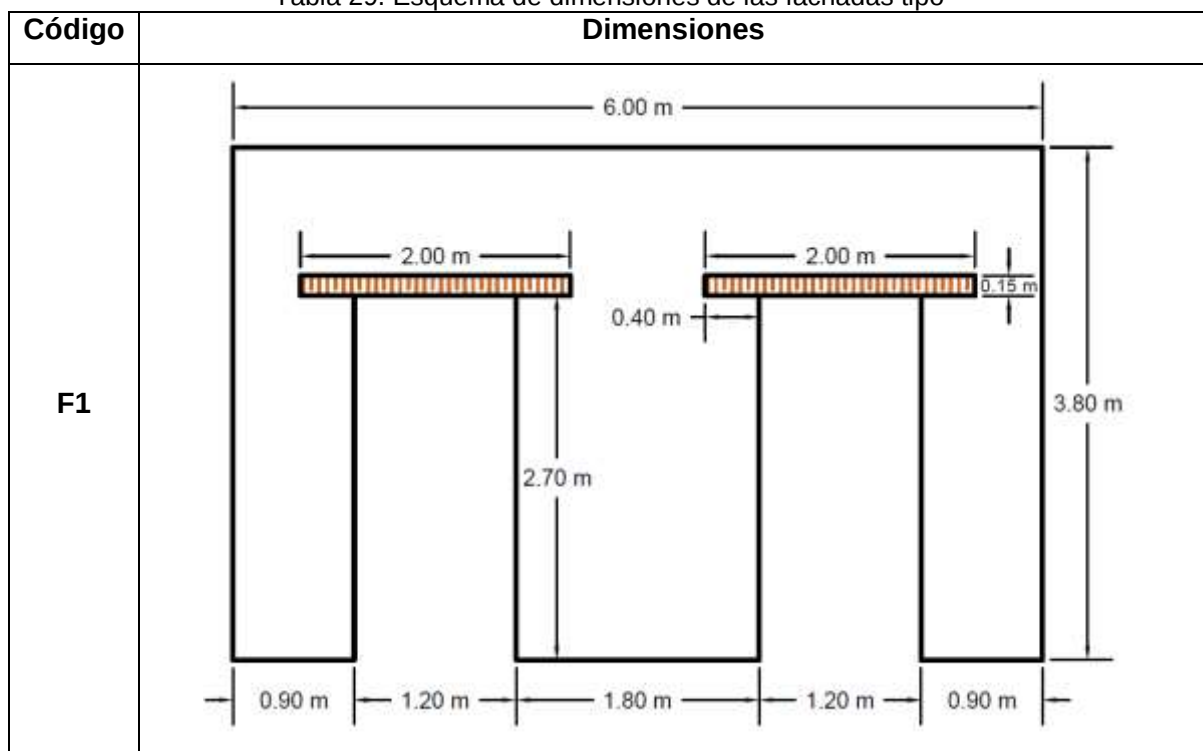
múltiplos de 10 o 5 centímetros. Con base en estos ajustes, se generaron las 4 fachadas tipo. Las dimensiones de estas fachadas se especifican en la Tabla 28.

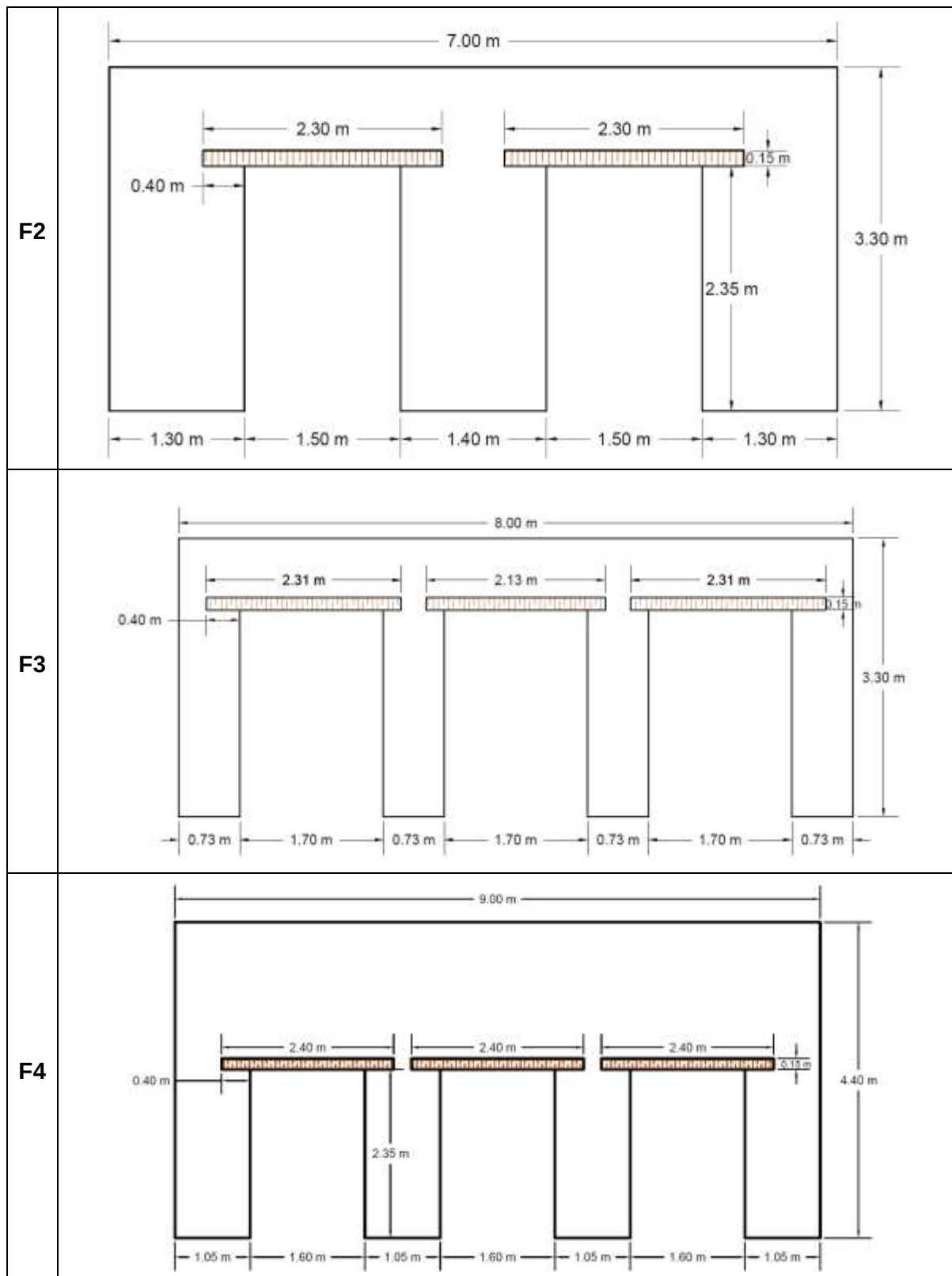
Tabla 28. Dimensiones de fachadas tipo.

Código	LF	hF	E	1P	1V	Puerta	
	(m)	(m)	(m)			b (m)	h (m)
F1	6.00	3.80	0.50	2	0	1.20	2.70
F2	7	3.3	0.5	2	0	1.5	2.35
F3	8	3.3	0.5	3	0	1.7	2.45
F4	9	4.4	0.65	3	0	1.6	2.35

En todas las fachadas tipo se incluyó una viga dintel sobre las puertas. Esta viga tiene una altura de 15.00 cm y un volado de 40.00 cm a cada lado de la puerta. Los esquemas de las fachadas se presentan en la Tabla 29.

Tabla 29. Esquema de dimensiones de las fachadas tipo





3.6 Modelado de las fachadas de adobe

3.6.1 Definición de la geometría de las fachadas de adobe

A partir de los esquemas proporcionados en la Tabla 29, se generó la geometría en STKO. Las fachadas se dibujaron en el plano XY para mantener los ejes globales utilizados para el RVE y evitar la necesidad de cambiar la dirección de los ejes en el proceso de homogenización. Además, se dibujaron muros perpendiculares a las fachadas para simular las paredes colaborantes presentes en las casas patrimoniales. Estos muros perpendiculares tienen una longitud de 4 metros. La Figura 38 muestra la geometría dibujada, donde se pueden apreciar tanto la fachada como los muros perpendiculares.

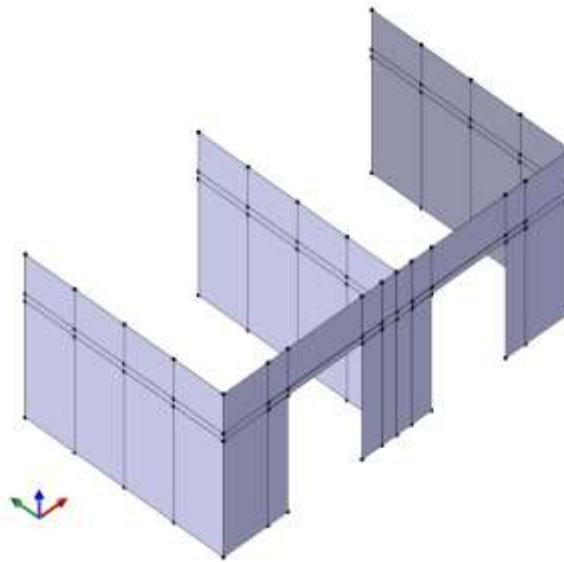


Figura 38. Geometría dibujada en STKO para la Fachada F2

Se han generado cuatro tipos de materiales en la modelación: adobe elástico, adobe ortotrópico, madera e interface. El adobe con comportamiento elástico se coloca en los muros perpendiculares, ya que en el análisis se busca una falla fuera del plano. El adobe con propiedades ortotrópicas definidas en el RVE se coloca en el adobe de la fachada. La madera se coloca en la geometría que representa las vigas dintel situadas sobre las puertas. La interface se coloca en las uniones entre la madera y el adobe, y se define con propiedades elásticas del mortero.

En la Figura 39 se representa el material de adobe elástico en color verde, el adobe ortotrópico en color rosa, la madera en color café y la interface en color amarillo. Sin embargo, la interface no se aprecia en la Figura 39, por lo que en la Figura 40 se muestra la ubicación del detalle (Figura 40a) y en donde se visualiza la interface en color amarillo ubicada entre el

adobe y la madera (Figura 40b). Las geometrías de las cuatro fachadas de análisis se muestran en la Tabla 30.

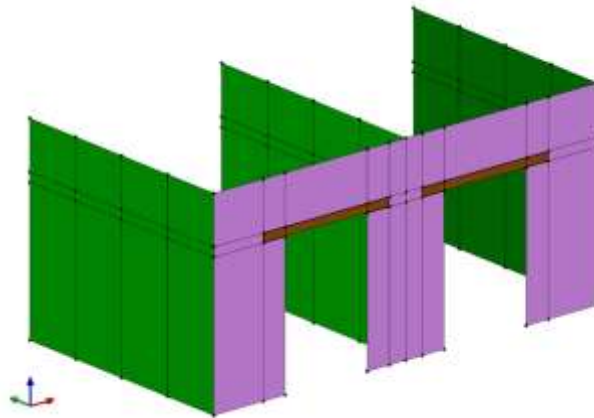


Figura 39. Representación de los materiales en la geometría de la Fachada F2

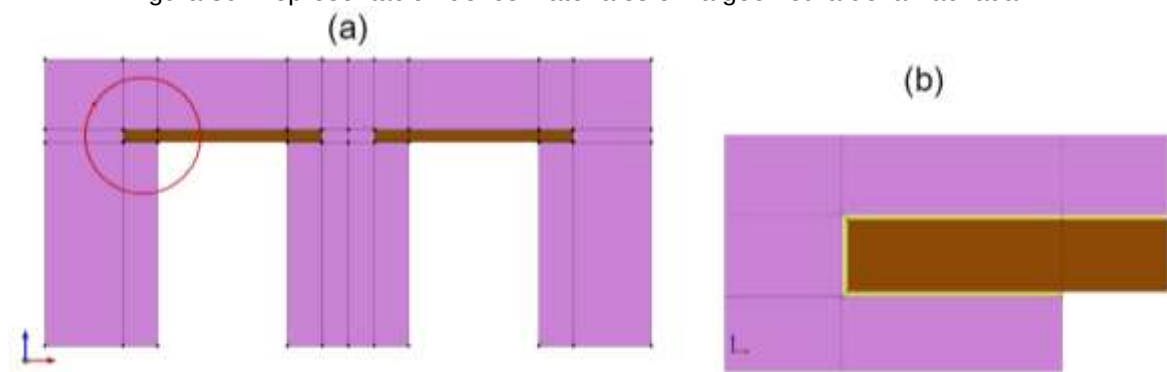
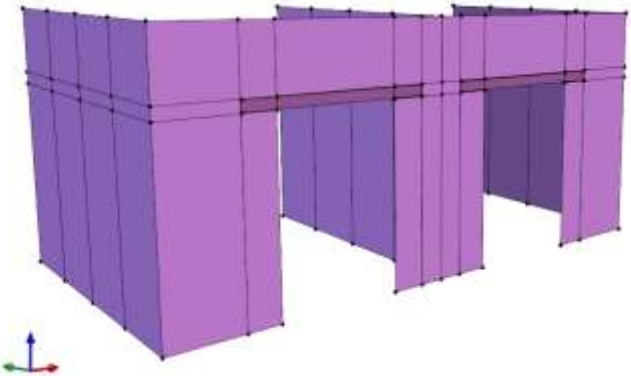
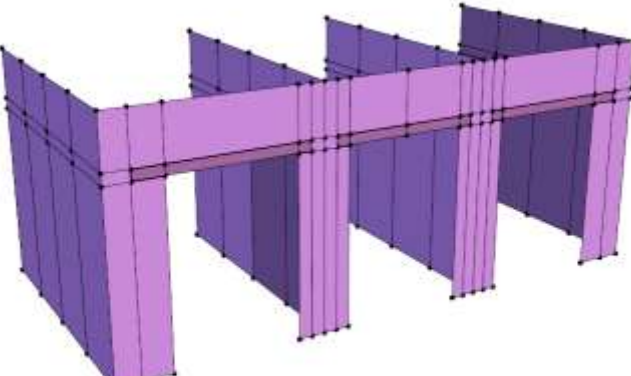
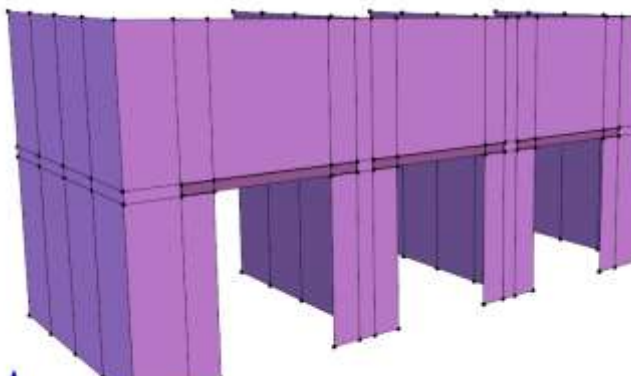


Figura 40. Visualización de la interface (a) Ubicación del detalle y (b) detalle en donde se observa la interface entre el adobe y la madera.

Tabla 30. Geometría dibujada en STKO

Código	Geometría de las fachadas de adobe en STKO
F1	

F2	 A 3D perspective view of a structural frame model labeled F2. The model consists of a rectangular frame with a central vertical opening. The walls and columns are represented by purple rectangular elements. A small 3D coordinate system with red, green, and blue axes is visible in the bottom-left corner of the image.
F3	 A 3D perspective view of a structural frame model labeled F3. The model is similar to F2 but with a different internal partitioning. It features a rectangular frame with a central vertical opening and additional vertical elements. The walls and columns are represented by purple rectangular elements. A small 3D coordinate system with red, green, and blue axes is visible in the bottom-left corner of the image.
F4	 A 3D perspective view of a structural frame model labeled F4. The model is a rectangular frame with a central vertical opening. The walls and columns are represented by purple rectangular elements. A small 3D coordinate system with red, green, and blue axes is visible in the bottom-left corner of the image.

El modelo se realizó utilizando elementos del tipo "shell", lo que elimina la necesidad de definir el espesor dibujándolo explícitamente. En su lugar, la geometría se dibuja como un plano y el espesor se define en las propiedades del material. Esta metodología simplifica la definición de geometrías y reduce el número de nodos y elementos, lo que resulta en una mayor

eficiencia computacional. El espesor del muro se ha establecido como 605.00 mm, que es el mismo espesor utilizado en el RVE.

El tamaño y la calidad de la malla juegan un papel importante en la precisión de los resultados de la simulación. Una malla fina puede capturar características a pequeña escala de la estructura, pero también puede aumentar el costo computacional del análisis. Por otro lado, una malla más gruesa puede resultar en una menor precisión, pero también reduce el tiempo de cálculo. Por lo tanto, seleccionar un tamaño de malla adecuado implica encontrar un equilibrio entre precisión y eficiencia computacional.

En este análisis, se utilizó un tamaño de malla de 10.00 cm. Esta elección se basa en consideraciones de precisión y eficiencia, buscando capturar las características relevantes de la estructura sin generar una carga computacional excesiva y conservando la representatividad de los resultados.

3.6.2 Definición de las propiedades físicas de las fachadas de adobe.

Para llevar a cabo el análisis modal y el análisis no lineal, es necesario definir adecuadamente las propiedades de los materiales. Dado que la geometría se ha dibujado sin espesores, se utiliza el tipo de sección "PlateFiber", el cual permite definir un espesor y un material. Este tipo de sección se utiliza para los elementos que actúan de manera elástica, como las paredes perpendiculares, la madera y la interface. Para la fachada se utilizó el adobe ortotrópico, el cual tiene un comportamiento diferente según sus tres direcciones de análisis. Por esto, se utiliza la sección "LayeredShell" en donde, el espesor de la pared se subdivide en secciones. De esta manera, el programa interpola los resultados en dirección del espesor según la cantidad de divisiones internas que se defina para el modelo. Por lo tanto, a mayor cantidad de divisiones, mayores recursos computacionales son consumidos. En este análisis se subdividió el espesor en 6 secciones según la Tabla 31.

Tabla 31. Definición de la propiedad LayeredShell para las fachadas.

Material	Thickness
Adobe Ortotrópico	102.50
Adobe Ortotrópico	100.00
Adobe Ortotrópico	100.00
Adobe Ortotrópico	100.00
Adobe Ortotrópico	100.00
Adobe Ortotrópico	102.50

Para la definición de los materiales, el adobe fue definido de tres maneras. El adobe elástico ha sido definido utilizando las propiedades obtenidas del RVE, como se muestra en las Tablas 14 y 17. Además, se ha utilizado un coeficiente de Poisson de 0.15 basado en el estudio de Arcentales y Pizarro (2023). Por otro lado, el adobe inelástico ha sido utilizado para el RVE y sus propiedades se encuentran en la Tabla 6. Asimismo, se ha definido un material ortotrópico para el adobe, utilizando las propiedades del adobe elástico y las relaciones de ortotropía detalladas en la Tabla 18.

Los materiales para la madera y la interface se caracterizaron como elásticos por lo que se requiere obtener el módulo de Young y el coeficiente de Poisson. Para la interface se utilizarán las propiedades del mortero utilizadas en el RVE.

Para la selección del módulo elástico, se tomaron los datos obtenidos por Enríquez Morocho (2014) de una muestra (Muestra A3) de un dintel de una edificación del Centro Histórico de Cuenca ubicado en la Calle Simón Bolívar 8-86 y Padre Aguirre. La madera del ensayo tenía más de 90 años de antigüedad y presentaba señales de deterioro de las propiedades físicas y químicas como humedad y xilófagos, consideradas como características generalmente presentes en las fachadas de la zona de estudio. La madera de uso más común en la zona es la madera de eucalipto, por lo que para el desarrollo de técnicas de reforzamiento, pruebas y análisis técnicos se utilizó como base la madera de eucalipto. La sección tenía dimensiones de 12.5 x 10cm. Se realizó un ensayo de compresión simple y se obtuvo una curva de esfuerzo-deformación presentada en la Figura 41 con sus respectivos datos mostrados en la Tabla 32.

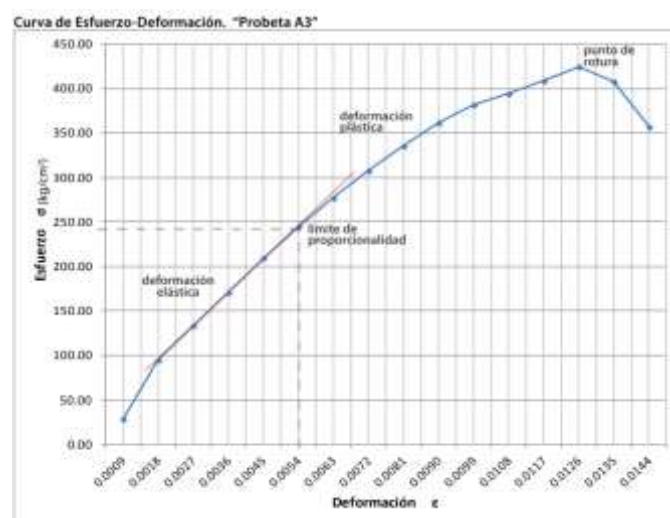


Figura 41. Curva esfuerzo-deformación para el ensayo a la muestra A3 (Enríquez Morocho, 2014)

Tabla 32. Tabla de datos para el ensayo a la muestra A3 (Enríquez Morocho, 2014)

CARGAS kg	DEFORMACIÓN 50×10^{-3} pulg.
479	50
1581	100
2226	150
2845	200
3493	250
4075	300
4620	350
5126	400
5590	450
6020	500
6360	550
6567	600
6808	650
7077	700
6795	750

A partir de los valores expuestos, se obtuvo un módulo de elasticidad de $46426 \frac{kgf}{cm^2}$ que equivale a $4552.8 \frac{N}{mm^2}$. En la investigación se menciona que los valores del módulo de Poisson para maderas coníferas están en el rango de 0.325 a 0.4 por lo que se eligió un valor de 0.35.

En la Tabla 33 se detallan las propiedades físicas de la madera e interface.

Tabla 33. Propiedades físicas de la madera y la interface.

	Módulo de Young (N/mm^2)	Coficiente de Poisson
Madera	4552.8	0.35
Interface	442.1	0.30

3.6.3 Definición de condiciones de las fachadas de adobe

Luego de definir la geometría y las propiedades físicas del RVE, es necesario aplicar las condiciones de contorno adecuadas para simular de manera precisa la realidad. Se aplican condiciones de contorno de Dirichlet en los nodos en contacto con el suelo para imponer desplazamientos nulos en las direcciones X, Y y Z, asegurando así una restricción adecuada del movimiento en el suelo. Además, se definen restricciones para el desplazamiento lateral de los muros perpendiculares, lo que busca reflejar las condiciones de apoyo en la realidad.

En el siguiente capítulo, se llevará a cabo un análisis modal y un análisis no lineal, por lo que es necesario definir la masa de los elementos y las cargas actuantes. Para ello, se considera el peso propio de la cubierta y el peso propio de la fachada.

Para el caso de la cubierta, se consideraron dos tipos de configuraciones basadas en la estructura de los materiales utilizados en su construcción. Según Arcentales y Pizarro (2023), las cubiertas de las edificaciones de adobe tienen una estructura típica compuesta por madera, carrizo, tierra y teja. Los valores de peso para cada elemento se especifican en la Tabla 34, con los que se determina una carga actual de 46.8 kN.

Tabla 34. Resumen de pesos de los materiales para una cubierta típica de edificación de adobe.
(Arcentález & Pizarro, 2023)

Peso de los materiales para una cubierta típica de edificación de adobe		
Madera	935.70	kg/m^3
Carrizo	20.00	kg/m^2
Tierra	1553.00	kg/m^3
Teja	48.00	kg/m^2

Por otro lado, se considera una carga típica para las cubiertas de las edificaciones modernas, que utilizan una opción más industrial con correas de madera y planchas de fibrocemento en lugar de los tradicionales carrizos y tierra. Los pesos de cada material se detallan en la Tabla 35, y para esta carga en particular se define un valor medio de 30 kN. Estas cargas se calcularon para una fachada de estudio de 9.67 m de longitud.

Tabla 35. Resumen de pesos de los materiales para una cubierta típica de edificación moderna
(Arcentález & Pizarro, 2023)

Peso de los materiales para una cubierta típica de edificación moderna		
Madera	935.70	kg/m^3
Correa	22.98	$kg/correa$
Plancha 8'	37.41	kg/U
Teja	48.00	kg/m^2

En las Figuras 42 y 43 se muestran los esquemas de las cubiertas de edificaciones de adobe y modernas, respectivamente.



Figura 42. Esquema de una cubierta típica de edificación de adobe (Arcentález & Pizarro, 2023)



Figura 43. Esquema de una cubierta típica de edificación moderna (Arcentález & Pizarro, 2023)

En los resultados de laboratorio de Arcentales y Pizarro (2023), se obtuvieron resultados para la densidad del adobe de $1538 \frac{kg}{m^3}$.

Para ingresar las cargas de la cubierta en STKO, es necesario expresar las cargas totales de las cubiertas en $\frac{carga}{longitud}$ por lo que se tiene

$$Carga_{liviana} = \frac{30kN}{9.67m} = 3.1024 \frac{N}{mm}$$

$$Carga_{pesada} = \frac{46.8kN}{9.67m} = 4.8397 \frac{N}{mm}$$

A partir de la densidad del adobe se calcula también la expresión de $\frac{carga}{\acute{a}rea}$. Luego de los cálculos se tiene un valor de $0.00913 \frac{N}{mm^2}$.

3.7 Conclusiones

Este capítulo abordó la variabilidad de las propiedades del adobe mediante el micromodelo basado en daño y propuso una metodología para la homogeneización de estas propiedades utilizando un RVE. Los ensayos de compresión, tracción y corte en tres direcciones, realizados con el micromodelo basado en daño, permitieron definir las propiedades del adobe. El RVE se utilizó para representar la composición de la mampostería de adobe, considerando los bloques de adobe y el mortero.

Los resultados obtenidos mostraron valores de módulos elásticos esperados, con una variabilidad entre 251.5 N/mm^2 y 258.8 N/mm^2 en las direcciones X, Y y Z. Además, se observó que el módulo elástico en compresión y tracción presentó valores iguales en la misma dirección, esto quiere decir que los resultados son coherentes. Por otro lado, se esperaba que el RVE presente una resistencia a la compresión mucho mayor que a la tracción. En el análisis, la resistencia a la tracción es solamente el 8% de la resistencia a la compresión. Esto indica que el RVE actúa acorde a lo esperado y se ha demostrado que la metodología proporciona una representación aceptable de las propiedades de la mampostería de adobe

Finalmente, en base a una base de datos de 14 fachadas de una planta del Centro Histórico de Cuenca, se han aplicado las propiedades homogeneizadas en el análisis de cuatro fachadas tipo. Esto demuestra la aplicabilidad de la metodología propuesta en situaciones reales. Las propiedades físicas tanto para el adobe como cubierta, madera e interface han sido recopilados de distintas investigaciones realizadas en la ciudad y en el país. Sin embargo, el número de ensayos en adobe es reducido, por lo que se sugiere realizar más investigaciones en el área para aumentar la fiabilidad de los resultados, tanto de laboratorio y consecuentemente, del modelado con el método de elementos finitos.

Capítulo 4: Evaluación estructural de fachadas

4.1 Introducción

En este capítulo se presentarán los modos de vibración y las curvas del análisis no lineal (pushover) de las fachadas. Se analizarán las fachadas F1, F2, F3 y F4 con dos cargas diferentes de cubierta. Una con carga típica de edificación de adobe (liviana) y otra con carga típica de edificación moderna (pesada) para poder determinar las diferencias en ambos casos. También se compararán los resultados pushover de la fachada F1 con tres muros perpendiculares, y con dos muros perpendiculares, es decir, se eliminará el muro central. Se realizarán los análisis mediante métodos de elementos finitos teniendo en cuenta la geometría y propiedades del adobe elástico e inelástico obtenidas por el RVE. En la primera sección se realizarán los análisis modales para identificar el comportamiento dominante y las propiedades modales. La segunda parte consiste en realizar los análisis pushover en los mismos modelos de los análisis modales.

4.2 Teoría del análisis modal

4.2.1 Valores de masa

Las densidades de los materiales son las características más importantes para la determinación de la masa y, por tanto, del comportamiento general de la estructura bajo el análisis modal y el análisis pushover. La distribución y ubicación de la masa tiene un impacto significativo en la respuesta sísmica de la estructura. Además, la masa debe asignarse a los elementos por unidad de longitud para elementos lineales como bordes y por unidad de área para elementos bidimensionales como paredes o muros. En el contexto del análisis vertical previo al análisis pushover, el peso del modelo estructural es el producto de la gravedad y las masas de sus elementos constituyentes.

4.2.2 Proceso computacional.

El análisis modal se realiza con el programa STKO y con los procesos de análisis llamados `Analyses.eigen` y `Analyses.modalProperties`. Mediante un script de Python se genera carpetas para el modelo. Cada carpeta contiene siete archivos: "definitions.tcl" (invariable), "nodes.tcl" (invariable), "sections.tcl" (invariable), "materials.tcl" (variable), "elements.tcl" (invariable), "analysis_steps.tcl" y "main.tcl". De esta manera, los archivos se ejecutan con un archivo "RunSolver.bat" y realiza el análisis. Esta parte del proceso genera un archivo de texto que contiene los períodos, masa total, centro de masa, factores de participación modal y masas de participación modal.

Con un script de Matlab, se genera el archivo con los valores de empuje para el análisis pushover. Se generaron las primeras tres formas modales para cada fachada. El análisis revela que los cuatro modelos tienen un modo dominante en la dirección Y, es decir, fuera del plano. La respuesta modal dominante es una indicación del posible comportamiento dinámico de la estructura bajo carga sísmica. Además, los análisis modales pueden proporcionar la dirección para realizar los análisis pushover, la participación de masa y los factores de participación.

4.3 Teoría del análisis pushover.

El análisis pushover es un método de análisis estático no lineal utilizado para evaluar el comportamiento sísmico de las estructuras. Este método consiste en aplicar cargas o desplazamientos incrementales a un modelo numérico hasta que se produzca la falla o se alcance un desplazamiento predefinido. El resultado principal del análisis pushover es la curva pushover, que es crucial para la evaluación sísmica y define las capacidades y los límites de resistencia de la estructura. Es importante tener en cuenta que este método tiene como objetivo estimar la resistencia de la estructura en la dirección de su modo de vibración dominante, que es probable que ocurra durante un terremoto.

4.3.1 Definición del patrón de carga

Se elige utilizar un patrón de carga modal para el análisis pushover. La definición del patrón de carga se toma de Chopra (2012). Primero, se propone la expansión modal del vector de excitación como:

$$p(t) = sp(t) \quad (30)$$

donde s , definido como carga modal, es:

$$s = \sum_{r=1}^N s_r = \sum_{r=1}^N \Gamma_r M \varphi_r \quad (31)$$

donde M es la matriz de masa, Γ_r es el factor de participación y φ_r es el modo de forma r . Premultiplicando ambos lados de la ecuación (31) por la forma modal φ_r y utilizando las propiedades de ortogonalidad de los modos, se obtiene $\Gamma_r = \frac{\varphi_n^T s}{M_n}$ (32) donde M_n es la masa generalizada para el n -ésimo modo natural. Es común normalizar las formas modales de un sistema en relación a la matriz de masa, de modo que $M_n = 1$. la ecuación (31) muestra la contribución del n -ésimo modo de s como:

$$s_n = \Gamma_r M \varphi_r \quad (33)$$

Además, en el caso de excitación sísmica, las fuerzas de inercia $\ddot{u}_g$ se definen como la fuerza efectiva por

$$P_{eff}(t) = -M\ddot{u}_g(t) \quad (34)$$

Donde ι es un vector de influencia que indica el DOF que está bajo excitación sísmica. Considerando la ortogonalidad de los modos, la ecuación (31) se modifica a:

$$s = M\iota = \sum_{n=1}^N s_n = \sum_{n=1}^N \Gamma_n M\varphi_n \quad (35)$$

Y Γ es

$$\Gamma_n = \frac{\varphi_n^T M \iota}{M_n} \quad (36)$$

Finalmente, a partir de la ecuación (33), el valor de s_1 correspondiente a la primera forma modal es:

$$s_1 = \Gamma_1 M\varphi_1 \quad (37)$$

En general, el valor de s_n se puede simplificar para su uso como patrón de carga en el análisis modal pushover:

$$s_n^* = M\varphi_1 \quad (38)$$

4.3.2 Solución numérica

El análisis está controlado por el desplazamiento asignado a un nodo de control específico. La posición de este nodo se elige de manera que la suma de las fuerzas laterales ejercidas en la dirección x solo producirá desplazamiento lateral y no inducirá rotaciones torsionales. El análisis pushover utiliza la discretización exacta y las condiciones de contorno discutidas para el análisis modal. Sin embargo, este análisis es no lineal y consta de dos partes. Primero, se define un análisis de peso propio a partir de las cargas gravitatorias utilizando las masas multiplicadas por la gravedad. En el presente trabajo, este análisis se realizó en 10 pasos. En segundo lugar, para el análisis pushover, que comienza con el estado de deformación resultante del análisis de peso propio, s_1 define un patrón de carga invariable. Un método controlado por desplazamiento escala el patrón de carga para empujar el modelo, en este caso, en 100 pasos hasta alcanzar el desplazamiento objetivo. Es importante recordar que el modelo basado en daños caracteriza la mampostería. En ambos casos, el algoritmo de

Krylov-Newton (Scott & Fenves, 2010) resuelve las ecuaciones no lineales utilizando un esquema de iteración implícito-explicito (Petracca, Pelà, Rossi, Oller, & Camata, 2016).

4.4 Análisis de los casos modelados

4.4.1 Comparativa de la F1

Para el primer análisis, se consideró la Fachada F1 con una carga de cubierta moderna de 30kN. Esta Fachada se analizó con un muro interno y en otro modelo sin muro. En la Figura 44 se muestra la geometría de F1 sin el muro interior.

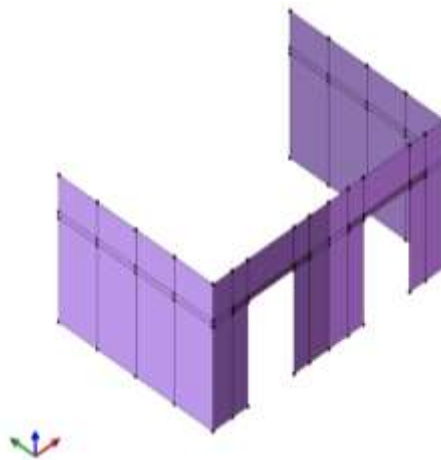


Figura 44. Geometría F1 sin pared interior.

El análisis modal muestra que el muro interior genera una distribución de los desplazamientos en cada vano, pues actúa como un punto de apoyo que rigidiza la estructura. El primer modo de vibración se presentan en la Figura 45 para la Fachada sin muro interior y en la Figura 46 para la fachada con muro interior.

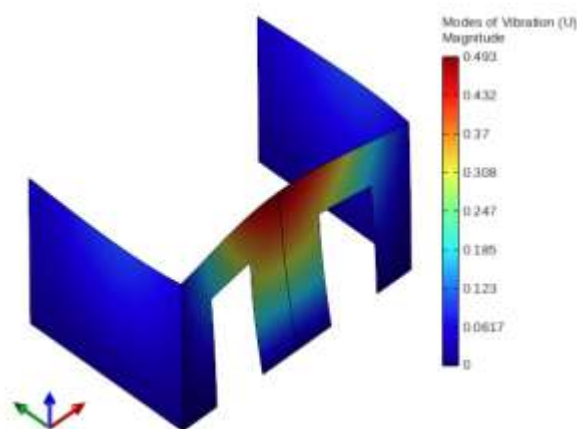


Figura 45. Primer modo de vibración para la fachada sin muro interior.

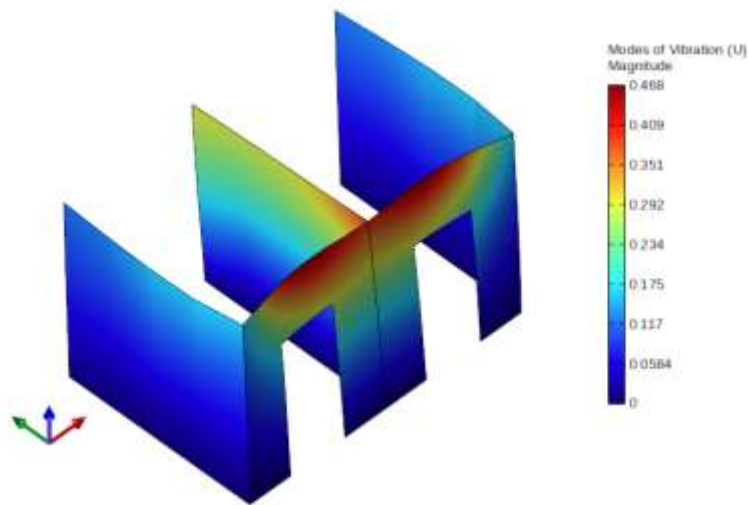


Figura 46. Primer modo de vibración para la fachada con muro interior.

Finalmente, se aplicó el análisis pushover en las fachadas en donde se observa que su deformación tiene el mismo comportamiento que el modo de vibración. En la Figura 47 se muestra el análisis pushover para la F1 sin muro interior y en la Figura 48 el análisis pushover para la F1 con muro interior. Ambos gráficos muestran los resultados para un mismo tiempo, es decir, para un mismo número de paso. En este sentido, el desplazamiento máximo para F1 sin muro es de 201.00 mm, mientras que F1 con muro tiene un desplazamiento de solamente 2.14 mm. Esto indica la importancia de la presencia de muros perpendiculares a la fachada para aumentar su capacidad sísmica.

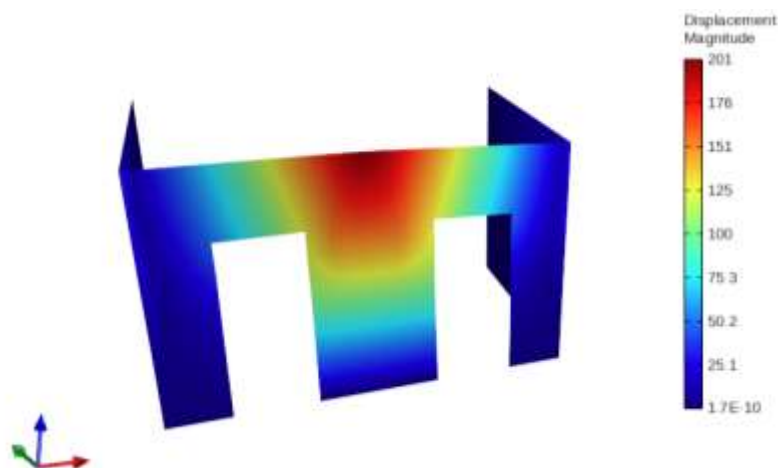


Figura 47. Análisis pushover para F1 sin muro interior

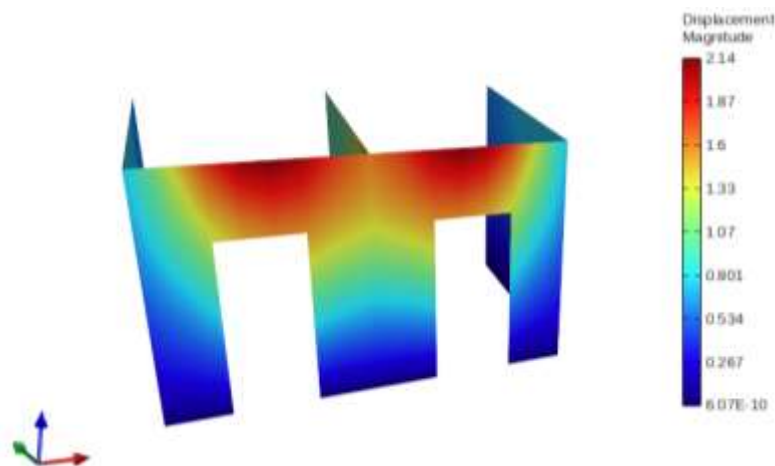


Figura 48. Análisis pushover para F1 con muro interior

4.4.2 Comparativas de fachadas con diferente carga de cubierta.

4.4.2.1 Fachada F1

Para la Fachada F1 se obtuvieron tres modos de vibración, representados gráficamente en la Tabla 36. En esta sección también se incluyen los tres modos de vibración de F1 sin muro interno (Tabla 37). A partir del análisis modal se generó un archivo que indica la carga que se aplicará en el pushover. Con estos datos, se mostraron curvas pushover para F1 con carga de 46.80 kN (F1_46.8) y 30.00 kN (F1_30) (Figura 49). Con el monitor de STKO, se generaron resultados del comportamiento tridimensional. Para un mismo tiempo, la F1_30 tiene un desplazamiento 6.58 mm, mientras que F1_46.8 tiene un desplazamiento de 6.54 mm que se puede observar en la Figura 50 y 51 respectivamente.

Tabla 36. Modos de Vibración para F1 sin muro interno.

Modo	F1 sin muro interno
Primer Modo	

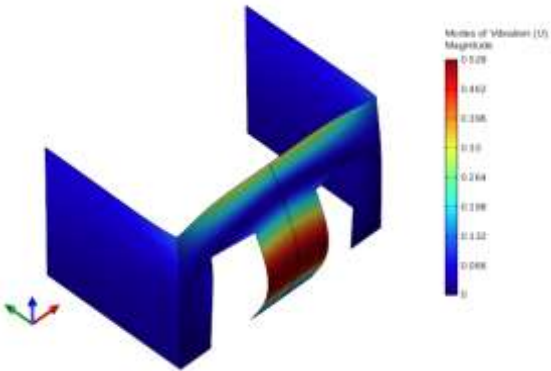
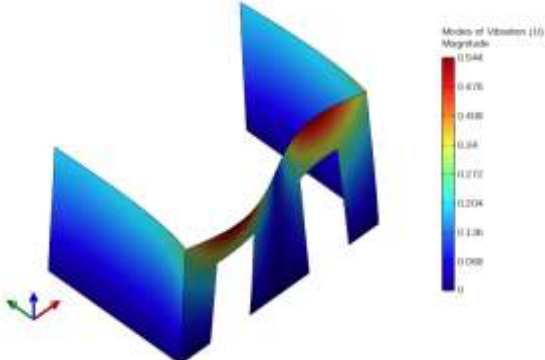
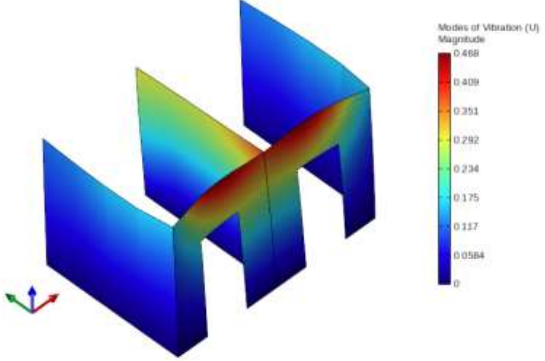
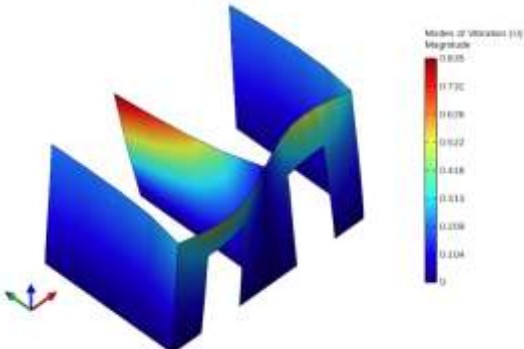
Segundo Modo	
Tercer Modo	

Tabla 37. Modos de Vibración para F1.

Modo	F1
Primer Modo	
Segundo Modo	

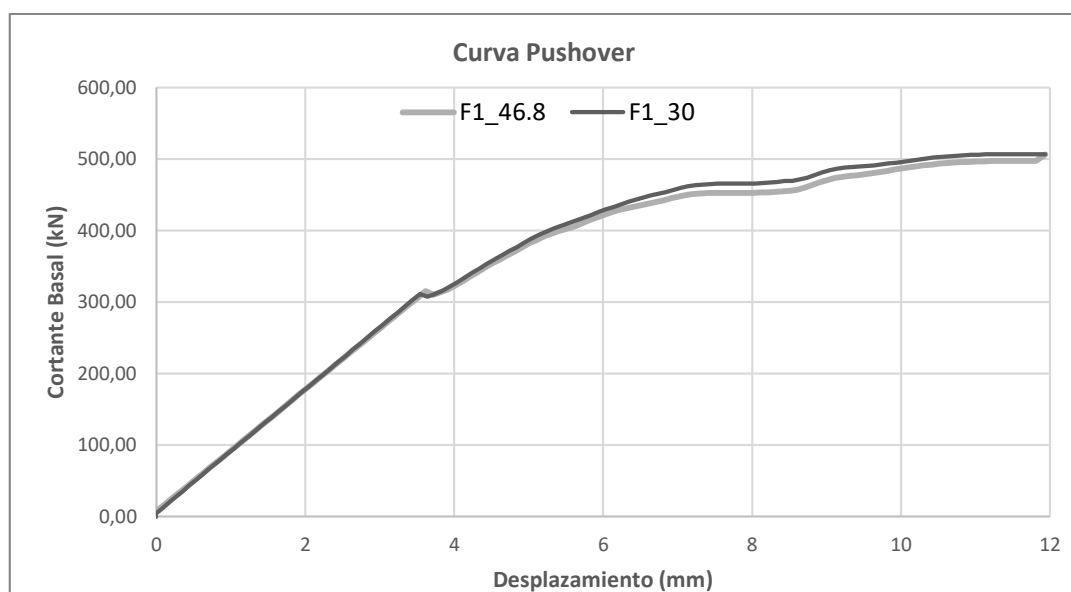
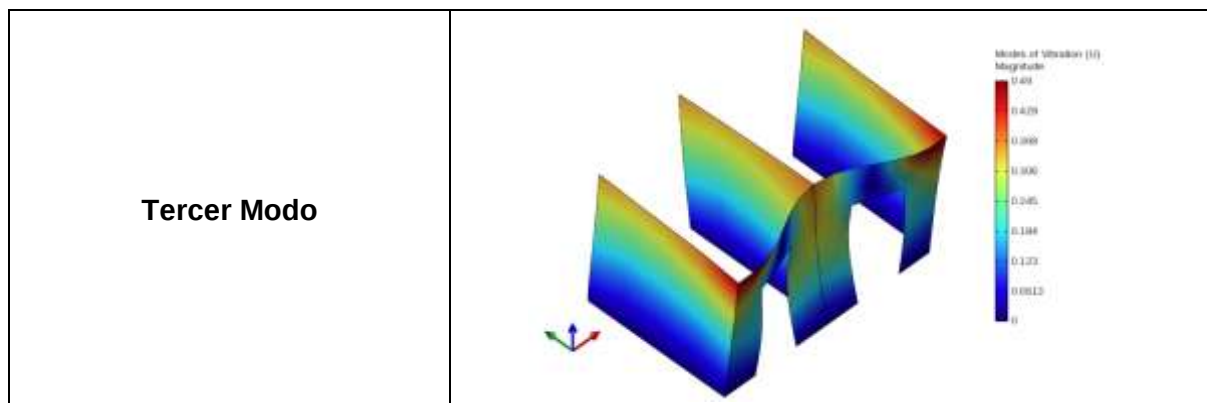


Figura 49. Curvas Pushover para F1

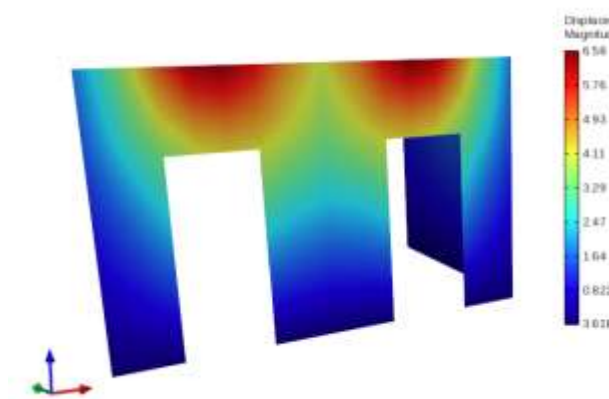


Figura 50. Análisis Pushover para F1_30 en t=30

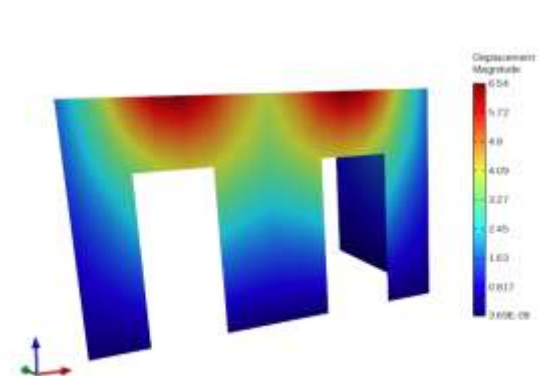
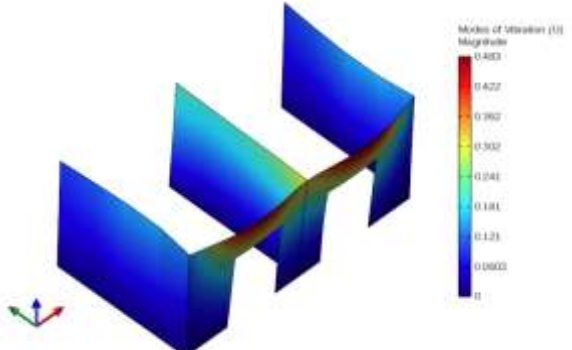
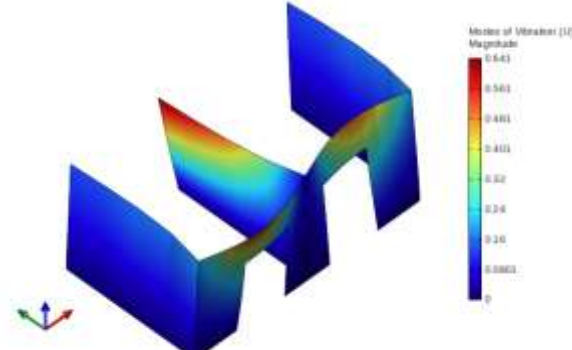
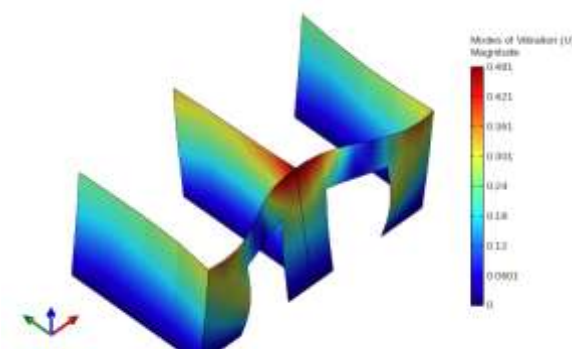


Figura 51. Análisis Pushover para F1_46.8 en t=30

4.4.2.2 Fachada F2

Para la Fachada F2 se obtuvieron tres modos de vibración, representados en la Tabla 38. Se generaron curvas pushover para F2 con carga de 46.80 kN (F2_46.8) y 30.00 kN (F2_30) (Figura 52). Con el monitor de STKO, se graficaron los resultados del comportamiento tridimensional. Para un mismo tiempo, la F2_30 tiene un desplazamiento 5.60 mm, mientras que F2_46.8 tiene un desplazamiento de 5.57 mm que se puede observar en la Figura 53 y 54 respectivamente.

Tabla 38. Modos de Vibración para F2.

Modo	F2
Primer Modo	
Segundo Modo	
Tercer Modo	

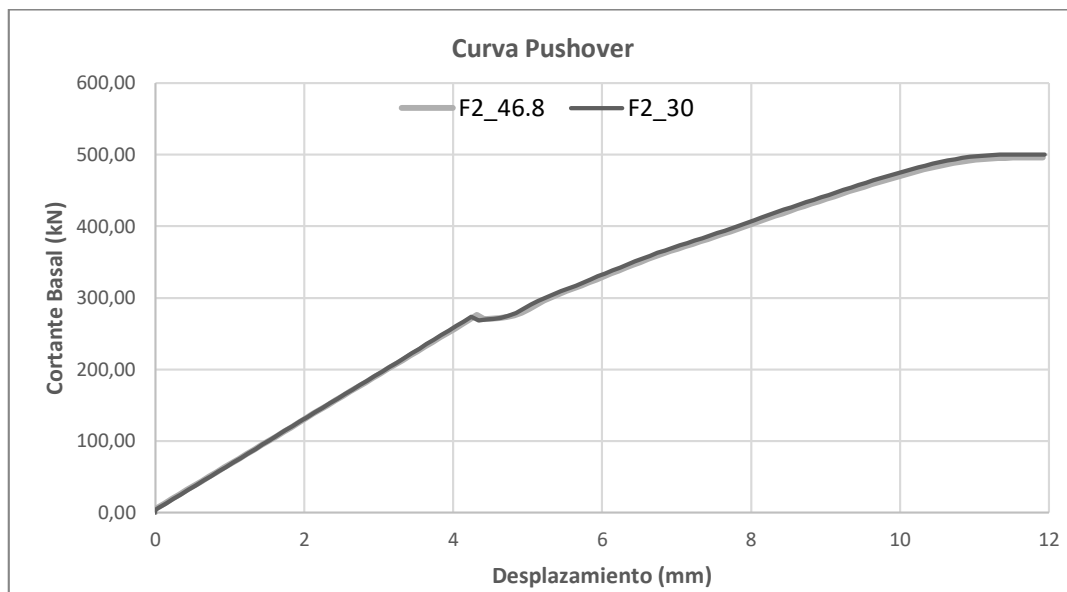


Figura 52. Curvas Pushover para F2

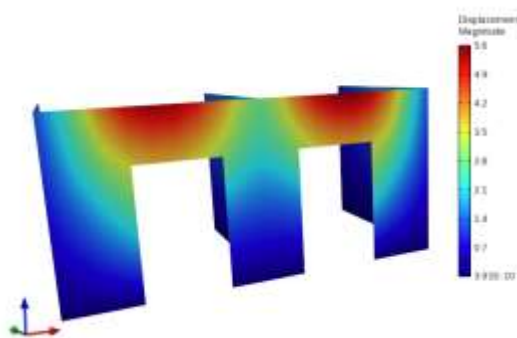


Figura 53. Análisis Pushover para F2_30 en t=30

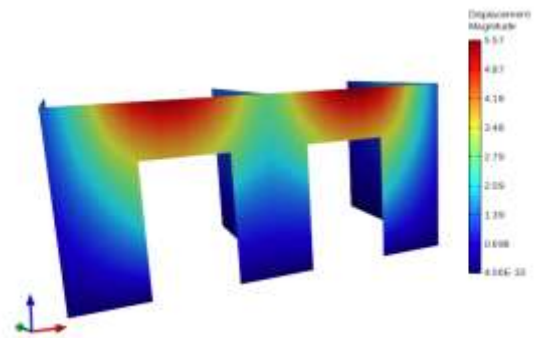
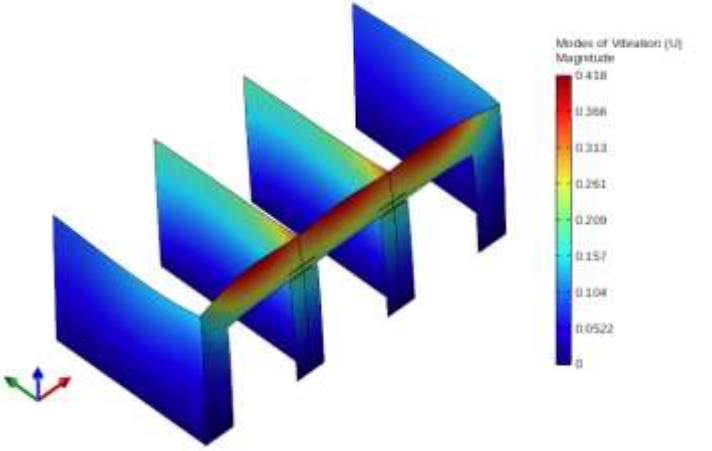
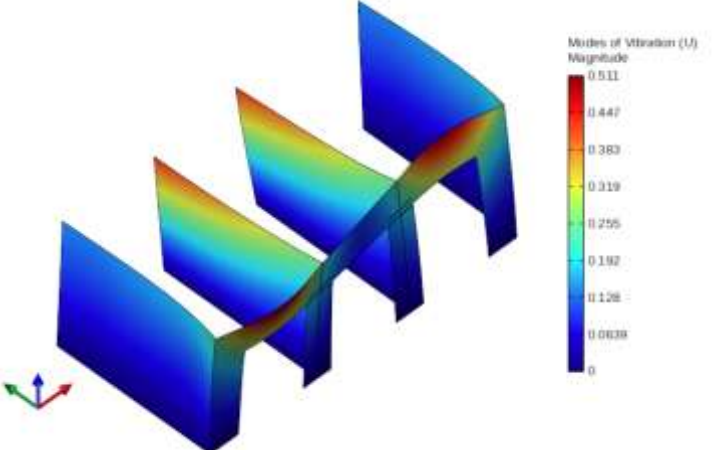
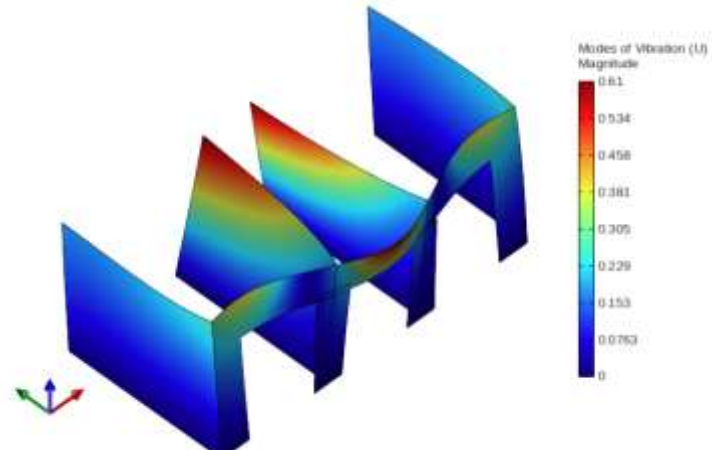


Figura 54. Análisis Pushover para F2_46.8 en t=30

4.4.2.3 Fachada F3

Para la Fachada F3 se obtuvieron tres modos de vibración, representados en la Tabla 39. Se generaron curvas pushover para F3 con carga de 46.80 kN (F3_46.8) y 30.00 kN (F3_30) (Figura 55). Con el monitor de STKO, se graficaron los resultados del comportamiento tridimensional. Para un mismo tiempo, la F3_30 tiene un desplazamiento 2.55 mm, mientras que F3_46.8 tiene un desplazamiento de 2.54 mm que se puede observar en la Figura 56 y 57 respectivamente.

Tabla 39. Modos de Vibración para F3.

Modo	F3
Primer Modo	 Modes of Vibration (U) Magnitude 0.418 0.386 0.313 0.261 0.209 0.157 0.104 0.0522 0
Segundo Modo	 Modes of Vibration (U) Magnitude 0.511 0.447 0.383 0.319 0.255 0.192 0.128 0.0638 0
Tercer Modo	 Modes of Vibration (U) Magnitude 0.61 0.534 0.458 0.381 0.305 0.229 0.153 0.0783 0

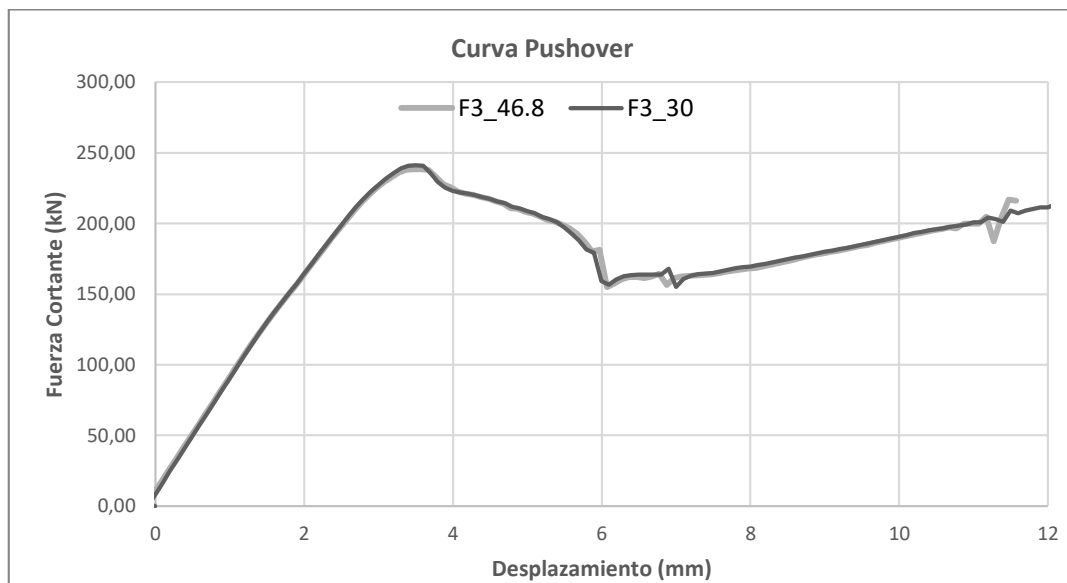


Figura 55. Curvas Pushover para F3

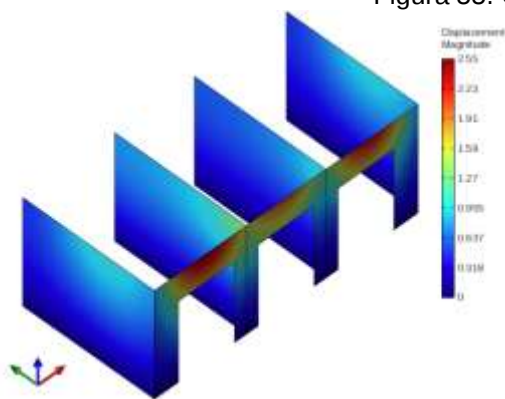


Figura 56. Análisis Pushover para F3_30 en t=30

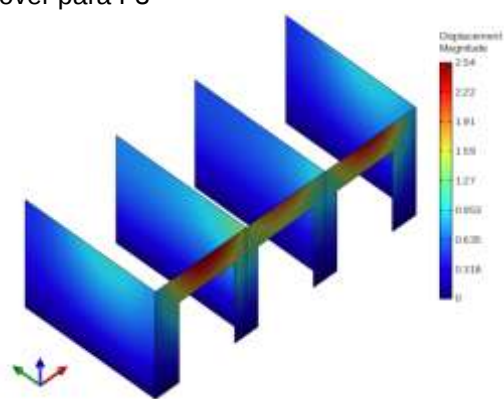
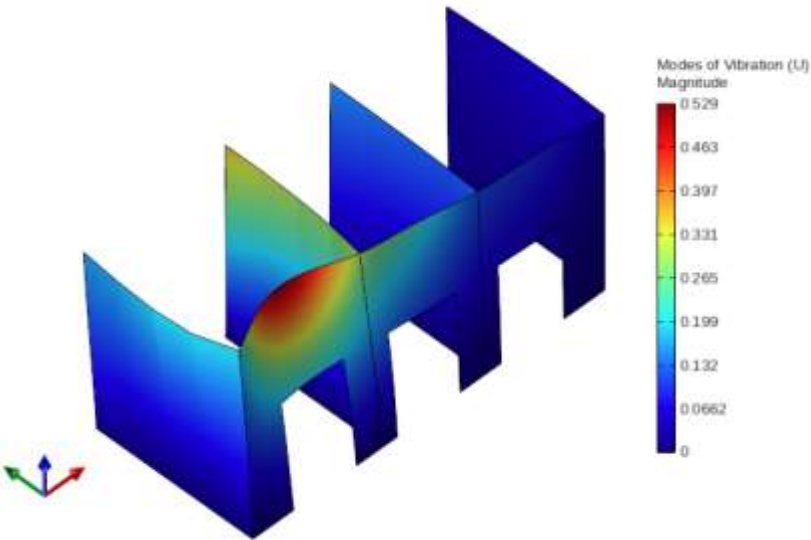
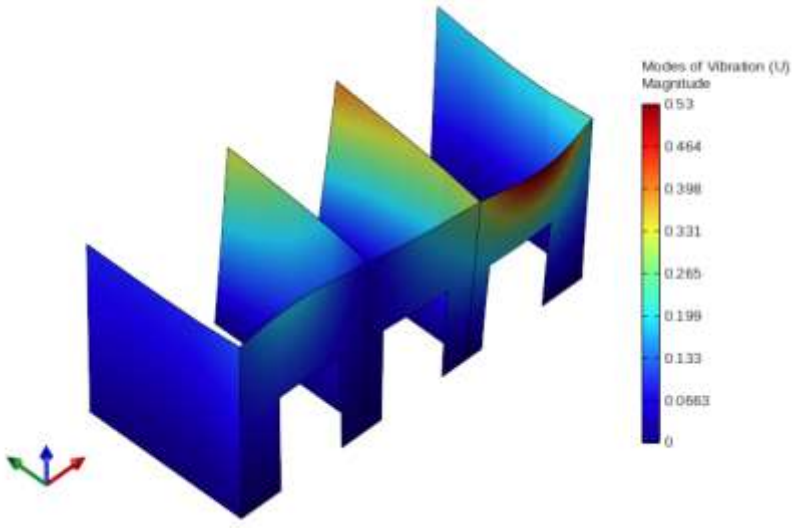
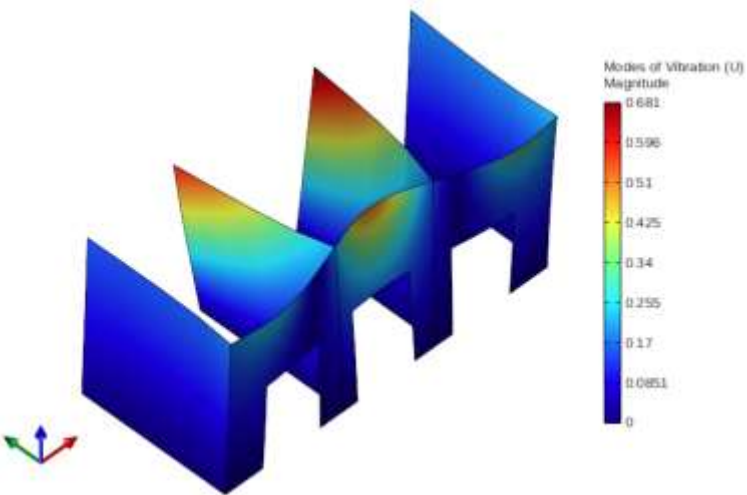


Figura 57. Análisis Pushover para F3_46.8 en t=30

4.4.2.4 Fachada F4

Para la Fachada F4 se obtuvieron tres modos de vibración, representados en la Tabla 40. Se generaron curvas pushover para F4 con carga de 46.80 kN (F4_46.8) y 30.00 kN (F4_30) (Figura 58). Con el monitor de STKO, se graficaron los resultados del comportamiento tridimensional. Para un mismo tiempo, la F3_30 tiene un desplazamiento 2.55 mm, mientras que F3_46.8 tiene un desplazamiento de 2.54 mm que se puede observar en la Figura 59 y 60 respectivamente.

Tabla 40. Modos de Vibración para F4.

Modo	F4
Primer Modo	
Segundo Modo	
Terce Modo	

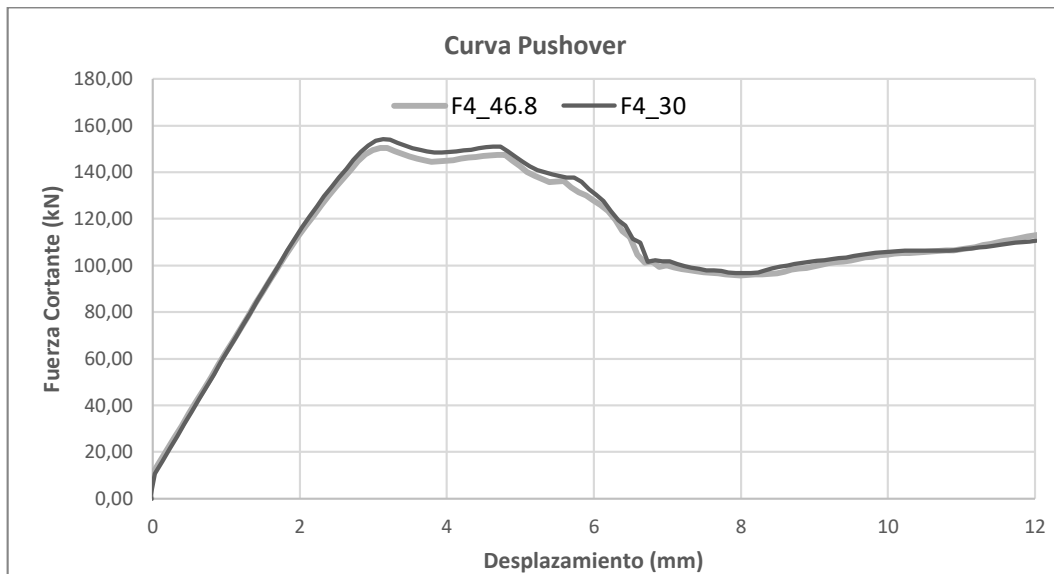


Figura 58 Curvas Pushover para F4

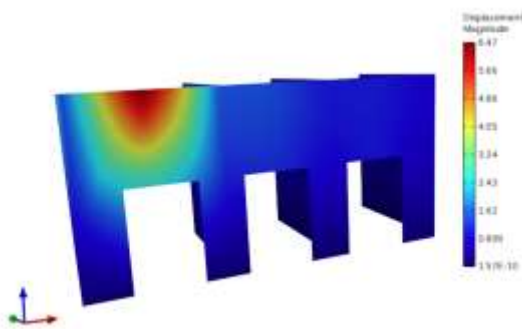


Figura 59. Análisis Pushover para F4_30 en t=30

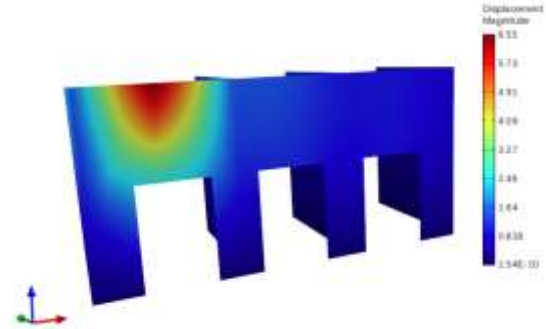


Figura 60. Análisis Pushover para F4_46.8 en t=30

4.5 Conclusiones gráficas de los casos modelados

Una de las ventajas del post-procesamiento de STKO es la capacidad de generar representaciones gráficas que muestran la gran cantidad de datos obtenidos en el análisis de manera sencilla. Se usó esta herramienta para presentar claramente la distribución y propagación de las grietas en la estructura. Estas imágenes permiten visualizar las áreas más vulnerables y los puntos críticos de deformación, lo que ayuda a comprender mejor el comportamiento y la resistencia de las fachadas.

En la Tabla 41 se observa de manera consistente que las grietas principales tienden a generarse cerca de las paredes perpendiculares, independientemente de si las fachadas son de dos o tres vanos. Esto indica un patrón común de falla y resalta la importancia de reforzar estas áreas críticas para mejorar la resistencia sísmica de las estructuras.

Además, el post-procesamiento de STKO permite visualizar el desarrollo del daño en el material a lo largo del análisis. Se pueden identificar las zonas donde se produce un mayor grado de deterioro y evaluar el impacto del daño en la integridad estructural de las fachadas. En la Tabla 42 se puede apreciar cómo el daño se manifiesta tanto en las aperturas de la fachada como en las uniones con las paredes perpendiculares. En las esquinas de las vigas dinteles, se genera daño en un ángulo de 45 grados. Esto proporciona información crucial para tomar decisiones sobre el diseño y la mejora de la resistencia de las construcciones de adobe.

Tabla 41. Grietas en las Fachadas F1, F2, F3 y F4

Fachada	Generación de grietas en fachadas
F1	
F2	
F3	
F4	

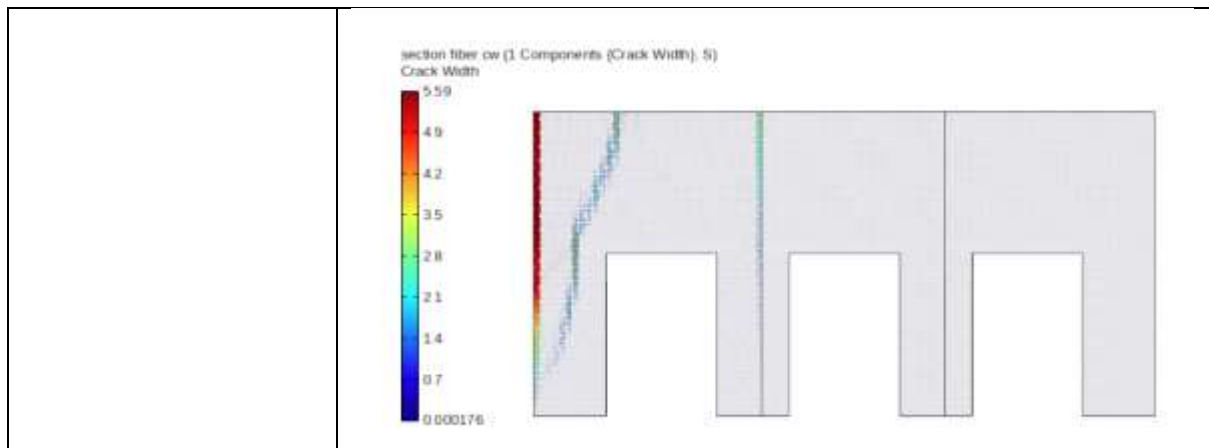
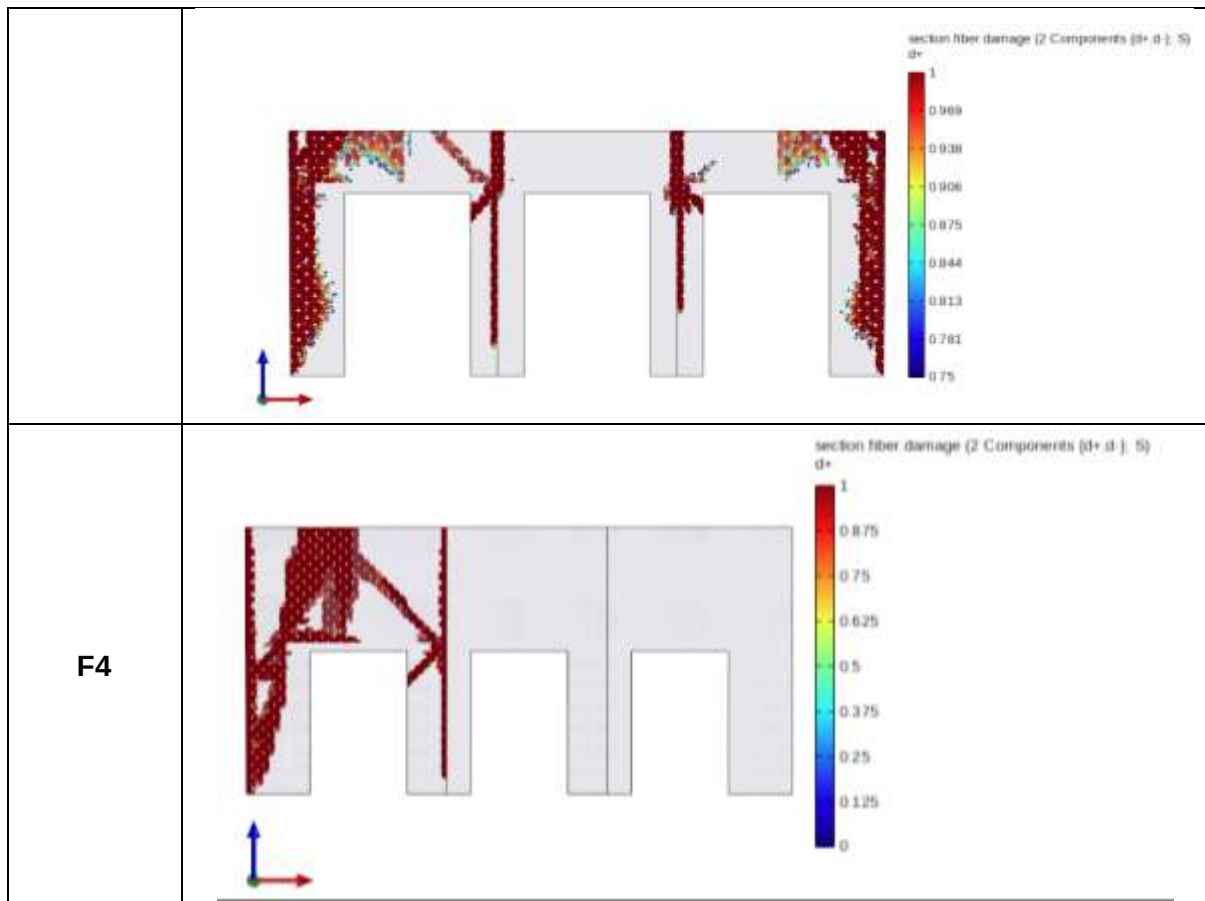


Tabla 42. Daño en las Fachadas F1, F2, F3 y F4

Fachada	Daño en el material de fachadas
F1	section fiber damage (2 Components (d+ d-): S) d+ 1 0.875 0.75 0.625 0.5 0.375 0.25 0.125 0 The figure shows a cross-section of facade F1 with three rectangular openings. A color-coded plot represents the fiber damage distribution. The color scale ranges from 0 (blue) to 1 (red). The highest damage is concentrated in the top chord and around the openings. A coordinate system (d+, d-) is shown at the bottom left.
F2	section fiber damage (2 Components (d+ d-): S) d+ 1 0.875 0.75 0.625 0.5 0.375 0.25 0.125 0 The figure shows a cross-section of facade F2 with three rectangular openings. A color-coded plot represents the fiber damage distribution. The color scale ranges from 0 (blue) to 1 (red). The highest damage is concentrated in the top chord and around the openings. A coordinate system (d+, d-) is shown at the bottom left.
F3	



4.6 Conclusiones

A modo de conclusión, en la Figura 61 se presentan las curvas pushover correspondientes a las cuatro fachadas modeladas, cada una con dos tipos de carga de cubierta. Los resultados se han seleccionado hasta un desplazamiento de nodo arbitrario de control de 12 mm. A partir del análisis realizado, se observa una diferencia significativa en la resistencia sísmica entre los modelos F1-F2 y F3-F4. Se determina que las fachadas de dos vanos (F1-F2) tienen una mayor capacidad para resistir fuerzas sísmicas en comparación con las fachadas de tres vanos (F3-F4). Estas fachadas de dos vanos presentan un alto valor de cortante basal, lo cual indica un comportamiento más rígido y controlado, con deformaciones menores. Por otro lado, las fachadas de tres vanos muestran valores más bajos de cortante basal, lo que puede resultar en un comportamiento más dúctil, con deformaciones mayores.

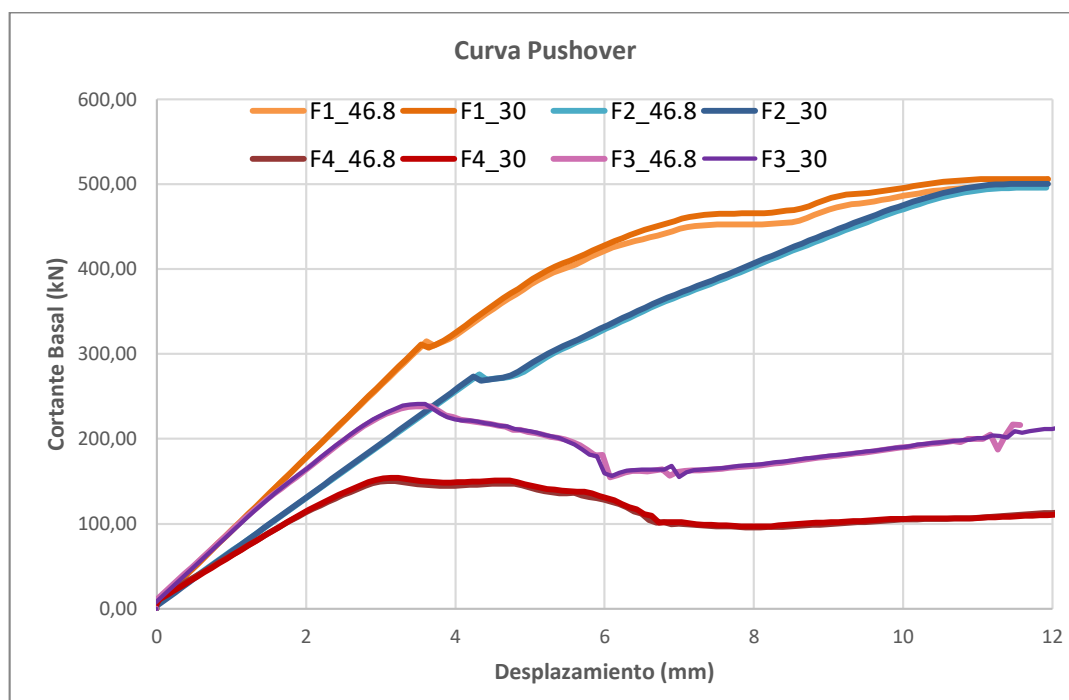


Figura 61. Curvas Pushover de todos los modelos

La respuesta elástica para las fachadas de dos vanos termina en un promedio de 12.00 mm, mientras que para las fachadas de tres vanos termina alrededor de 3.00 mm. En este estado, algunas paredes pueden estar sometidas a tensiones que superan su capacidad, lo que resulta en una disminución global de la rigidez y la redistribución de las fuerzas hacia paredes perpendiculares. En las fachadas de tres vanos (F3-F4) se define una ligera pendiente negativa que representa la fase de ablandamiento.

La Fachada F4, al ser asimétrica, muestra una concentración de desplazamiento en el vano con mayor luz, como se puede apreciar tanto en el análisis modal como en los resultados de pushover. Por otro lado, la Fachada F3 es simétrica, lo que se refleja en una distribución simétrica de los desplazamientos. A través de la Figura 61, se puede observar que la fachada simétrica exhibe un mejor comportamiento ante cargas sísmicas.

Es importante destacar que la Fachada F2 tiene una longitud total de 7.00 m, mientras que la Fachada F1 mide 6.00 m. Al observar la Figura 61, se puede apreciar que, a medida que la fachada es más pequeña, presenta una mayor resistencia ante cargas laterales y una mayor capacidad para soportar fuerzas sísmicas.

Capítulo 5: Conclusiones, recomendaciones y líneas de investigación

5.1 Conclusiones

Durante el desarrollo de esta investigación, se ha profundizado en los antecedentes relevantes que rodean a estas construcciones, destacando su significado histórico y cultural. Se ha enfatizado la importancia de ampliar la investigación en construcciones de adobe, ya que no solo representan un invaluable patrimonio arquitectónico, sino también un potencial peligro ante los movimientos telúricos que puedan asolar la región.

Se proporcionó un marco teórico completo para comprender el contexto de las construcciones de tierra en Ecuador. Se describieron los métodos constructivos tradicionales, como el adobe, el tapial y el bahareque, destacando su importancia histórica y cultural. Se analizó la relevancia del patrimonio arquitectónico en la ciudad de Cuenca y se revisó la normativa existente relacionada con las construcciones de tierra. Además, se exploraron las técnicas de modelación, como la micromodelación, la homogenización y la macromodelación, así como el análisis modal y no lineal y el software utilizado en el estudio.

Para abordar la variabilidad de las propiedades del adobe se utilizó un micromodelo basado en daño propuesto por Petracca et al. (2017) y se desarrolló una metodología para la homogeneización de estas propiedades mediante un RVE. Las propiedades físicas iniciales usadas para definir el adobe y el mortero se recopilaban de investigaciones realizadas en la ciudad y el país y el RVE fue utilizado para representar la composición homogénea de la mampostería de adobe. Los resultados obtenidos demostraron que la metodología propuesta proporciona una representación aceptable de las propiedades de la mampostería de adobe. Además, se aplicaron las propiedades homogeneizadas en el análisis de fachadas tipo, que fueron obtenidas a partir de un análisis estadístico de una base de datos recolectados por Jurado y Vergara (2019). Todo lo anterior ha demostrado la aplicabilidad de la metodología en situaciones reales.

Finalmente, se realizó un análisis modal y un análisis no lineal para evaluar la respuesta estructural de las fachadas estudiadas. Del análisis modal se obtuvieron los 3 primeros modos de vibración, resultando en todos los casos, el modo fuera del plano como el más significativo, es decir, como un volteo de la fachada o partes de ella.

Los resultados revelaron que los modelos de fachadas de dos vanos tienen una mayor capacidad para resistir fuerzas sísmicas que los modelos de fachadas de tres vanos. Las fachadas de dos vanos tienen un valor alto de cortante basal, lo que indica un comportamiento más rígido y controlado, con deformaciones menores. Por otro lado, las fachadas de tres

vanos presentan valores bajos de cortante basal, lo que pueden resultar en un comportamiento más dúctil, con deformaciones mayores. Mediante el post-procesador de STKO, se generaron diagramas de las zonas que reciben mayor daño y de las grietas que se generan por el análisis pushover.

5.2 Recomendaciones

Durante el desarrollo de la investigación, se identificaron deficiencias en cuanto a la escasez de investigaciones y ensayos en materiales de tierra cruda. Además, se observó una gran variabilidad en las propiedades físicas de estos materiales, debido a las diferencias en la materia prima utilizada según la zona de construcción. Por estas razones, se recomienda realizar más investigaciones en el área de los materiales de construcción de tierra cruda, como el adobe, con el fin de establecer bases más sólidas que aumenten la fiabilidad de los resultados.

Por otro lado, se sugiere ampliar la base de datos de las fachadas estudiadas. Esto permitiría obtener resultados más robustos y generalizables, contribuyendo a mejorar la validez de las conclusiones obtenidas. Una base de datos más amplia proporcionaría una perspectiva más completa de las características y los desafíos de estas construcciones, abriendo nuevas oportunidades para el desarrollo de soluciones y técnicas de refuerzo más efectivas.

5.3 Líneas de investigación futura

Esta investigación sentó las bases para que, mediante la metodología del modelo basado en daño, se pueda analizar el comportamiento fuera del plano ante una carga sísmica de las fachadas de adobe en el Centro Histórico de Cuenca. Como parte final, se plantean líneas de investigación futura que tienen el potencial de alcanzar resultados aún más significativos en base al presente trabajo.

- Generar RVEs con diferentes aparejos de los bloques de adobe para obtener diferentes espesores de muro: Para obtener una representación más completa de las propiedades de la mampostería de adobe, sería interesante generar más RVE que consideren diferentes aparejos de los bloques de adobe. Esto permitiría estudiar cómo varían las propiedades mecánicas y el comportamiento estructural en función del espesor del muro, lo que podría ser especialmente relevante en la evaluación de la resistencia sísmica de las construcciones de adobe.
- Modelar las fachadas reales de las bases de datos: Aunque en este trabajo se utilizaron fachadas tipo para el análisis, sería valioso realizar el modelado y análisis de las fachadas reales presentes en las bases de datos disponibles. Esto permitiría

obtener resultados más específicos y aplicables a situaciones concretas, lo que contribuiría a una mejor comprensión del comportamiento estructural de las fachadas de adobe en situaciones reales.

- Investigar fachadas de dos pisos: Además de las fachadas estudiadas en este trabajo, sería interesante enfocar la investigación en fachadas de dos pisos, que también son comunes en el centro histórico. Estas fachadas presentan características y desafíos adicionales en términos de carga, resistencia y comportamiento estructural. Explorar su respuesta frente a cargas sísmicas y desarrollar estrategias de refuerzo específicas para este tipo de construcciones sería una línea de investigación valiosa.

Referencias

- Achig, M.-C., Zúñiga, M., Van-Balen, K., & Abar, L. (2013). Sistema de registro de daños para determinar el estado constructivo en muros de adobe. *MASKANA*, 4(2), 71–84. <https://doi.org/10.18537/mskn.04.02.06>
- Aguilar. Eddy, Cárdenas, A., Cárdenas, X., Quezada, R., & Sarmiento, J. (2018). Comparación de parámetros físicos y mecánicos entre el adobe y el tapial en el Austro del Ecuador. *IV encuentro PRECOM*, 268–279. <https://doi.org/10.1007/3-7643-7873-5>
- Almeida, J. C., Lourenco, P., & Barros, J. (2005). Experimental investigation of bricks under uniaxial tensile testing. *Masonry International* 01/2005; 18(1):11-20.
- Amaya, J., García, G., & Jara, D. (2017, octubre). SEMINARIO IBEROAMERICANO DE ARQUITECTURA Y CONSTRUCCIÓN CON TIERRA CONTEXTO Y DESAFÍOS DE LA PRODUCCIÓN DE ADOBE EN LA PROVINCIA DEL AZUAY: REFLEXIÓN DESDE LA MIRADA EXPERTA Y LOS CASOS DE ESTUDIO EN SUSUDEL Y SININCAY. 17 *Siacot*.
- ANSYS Inc. (2022). *Ansys Advantage* (Vol. 1).
- Arcentález, C., & Pizarro, D. (2023). *Análisis paramétrico para determinar el comportamiento estructural de fachadas de adobe*.
- ASDEA. (2022). STKO: a revolutionary toolkit for OpenSees. En *ASDEA Software Technology* (1a ed., pp. 1–92).
- Barrera Zuñiga, J., & Peñaloza Moran, J. (2018). *Análisis paramétrico de la respuesta sísmica global de una edificación de mampostería no reforzada típica del Centro Histórico de Cuenca*. Universidad de Cuenca.
- 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., Villa, G., Svetlana Brzev, G. M., & Rubiños, Á. (2011). *Earthquake-Resistant Construction of adobe buildings: a tutorial*. www.world-housing.net
- Blondet, M., Villa Garcia, G., & Loaiza, C. (2003). Viviendas Sismioresistentes De Tierra: Una Vision a Futuro. *Capitulo de Ingeniería Civil del Consejo Departamental de Loreto del Colegio de Ingenieros del Peru XIV Congreso Nacional De Ingeniería Civil - Iquitos*.

- Cárdenas-Haro, X., Tarque, N., Todisco, L., & León, J. (2021). Loss Estimation for Typical Adobe Façades of Cuenca (Ecuador) Due to Earthquake Scenarios. *International Journal of Architectural Heritage*. <https://doi.org/10.1080/15583058.2021.1977417>
- 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>
- Catalán Quiroz, P., Moreno-Martínez, J. Y., Galván, A., & Arroyo Matus, R. (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>
- Cervera, M., Oliver, J., & Faria, R. (1995). Seismic evaluation of concrete dams via continuum damage models. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 24(9), 1225–1245. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290240905>
- Cevallos, P. (2015). La construcción con tierra en el Ecuador y la necesidad de la norma. *15 Siacot*.
- Chopra, A. (2012). *Dynamics of structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering* (4a ed.). Prentice-Hall.
- Chopra, A. K., & Chintanapakdee, C. (2004). Evaluation of Modal and FEMA Pushover Analyses: Vertically “Regular” and Irregular Generic Frames. *Earthquake Spectra*, 20(1), 255–271. <https://doi.org/10.1193/1.1647580>
- Chopra, A. K., & Goel, R. K. (2002). A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3), 561–582. <https://doi.org/10.1002/eqe.144>
- Coello Chica, E. N., & Vintimilla Salinas, X. S. (2022). *Guía para la Implementación de análisis en paralelo de modelos dinámicos y estáticos No lineales mediante OpenSees* [Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/40271>
- Coronel, Y., & Paredes, S. (1993). *Medio ambiente Urbano: estudio de un caso en el área del centro histórico de Cuenca. Ocupación del espacio urbano*. Universidad de Cuenca.
- Dall’Orto, V. (2016). *Estudio del adobe en Latinoamérica y aplicación en Quito, Ecuador*.
- DIANA FEA. (2023). *DIANA User’s Manuals* (D. Ferreira, Ed.; Vol. 1).

- Dolsek, M. (2009). Incremental dynamic analysis with consideration of modeling uncertainties. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 38(6), 805–825. <https://doi.org/10.1002/eqe.869>
- Enríquez Morocho, D. E. (2014). *Reforzamiento estructural para forjados de madera en edificaciones patrimoniales y contemporáneas*.
- Fundación Altiplano. (2011). *Guía Práctica para talleres de Capacitación de restauración en Adobe*. .
- Galasco, A., Lagomarsino, S., & Penna, A. (2006). *On the use of pushover analysis for existing masonry buildings*.
- García, H. (2023). *Seismic vulnerability assessment of low-rise masonry buildings in Cuenca*.
- Griffith, M., & Vaculik, J. (2007). Out-of-Plane Flexural Strength of Unreinforced Clay Brick Masonry Walls. *TMS Journal*, 25, 53–68.
- Henneberg de León, A. (2012). Aproximación a un estudio sobre las lesiones del bahareque en el estado Zulia, Venezuela. Algunas recomendaciones para su intervención. *Informes de la Construcción*, 64(525), 63–74. <https://doi.org/10.3989/ic.08.049>
- 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*, 49(8), 3293–3308. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0720-5>
- INEC. (2010). *Fascículo provincial del Azuay, Ecuador*.
- INPC. (2010). *Glosario de Arquitectura*.
- JGBL, SH, & JCSA. (2023). *Informe de las señales acelerográficas registradas en el evento del 18 de marzo de 2023 en el golfo de guayaquil*. www.igepn.edu.ec
- Jiménez, J., Cabrera, J., Sánchez, J., & Avilés, F. (2018). Vulnerabilidad sísmica del patrimonio edificado del Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca: Lineamientos generales y avances del proyecto. *MASKANA*, 9(1), 59–78. <https://doi.org/10.18537/mskn.09.01.07>
- Jurado, S., & Vergara, E. (2019). *Estudio de la configuración geométrica y material de viviendas de construcción vernácula en un sector de Cuenca*. Universidad de Cuenca.

- Krawinkler, H., & Seneviratna, G. D. P. K. (1998). Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation. *Engineering Structures*, 20(4–6), 452–464. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00092-8](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00092-8)
- Lagomarsino Sergio and Cattari, S. (2015). Seismic Performance of Historical Masonry Structures Through Pushover and Nonlinear Dynamic Analyses. En A. Ansal (Ed.), *Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology: Volume 2* (pp. 265–292). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16964-4_11
- Lara, L. (2017). Patología en tierra cruda, estudio de caso construcciones en el Área Andina. *XIV Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción, II*, 1–10.
- Lara, M. L., & Bustamante, R. (2022). Characterization and Pathology of Earthen Building Walls in the Ecuadorian Andean Area. *Revista Politécnica*, 49(2), 37–46. <https://doi.org/10.33333/rp.vol49n2.04>
- Leroy, E., Kimbro, E., & Ginell, W. (2005). *Planning and Engineering Guidelines for the Seismic Retrofitting of Historic Adobe Structures*.
- Lourenço, P. B. (2013). Challenges on computational strategies for masonry structures: homogenization techniques and seismic analysis. *10th HSTAM International Congress on Mechanics*, 25–27. <http://www.isise.net>
- Lourenço, P. B., Milani, G., Tralli, A., & Zucchini, A. (2007). Analysis of masonry structures: review of and recent trends in homogenization techniques This article is one of a selection of papers published in this Special Issue on Masonry. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34(11), 1443–1457. <https://doi.org/10.1139/L07-097>
- LS-DYNA®. (2021). *LS-DYNA® Keyword user's manual* (Vol. 1). www.lstc.com
- 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))
- Magenes, G. (2000). *A method for pushover analysis in seismic assessment of masonry buildings*.

- Mandel, J. (1973). Equations constitutives et directeurs dans les milieux plastiques et viscoplastiques. *International Journal of Solids and Structures*, 9(6), 725–740. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(73\)90120-0](https://doi.org/10.1016/0020-7683(73)90120-0)
- Mckenna, F., & Fenves, G. L. (2008). Using the OpenSees Interpreter on Parallel Computers. En *Program of the National Science Foundation under Award Number CMS*. <http://opensees.berkeley.edu>
- Minke, G. (2006). *The Building Material Earth in Modern Architecture – Earth Construction Handbook*. 135–148.
- NEC-SE-VIVIENDA. (2014). *Vivienda de hasta 2 pisos con luces de hasta 5m parte 2*.
- Norma E.080. (2017). Diseño y construcción con tierra reforzada. *Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento*.
- Oliver, J. (1989). A consistent characteristic length for smeared cracking models. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 28(2), 461–474. <https://doi.org/10.1002/nme.1620280214>
- Orellana Calle, V. C. (2017). *Adobe, puesta en valor y estrategias para la conservación de una cultura constructiva*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/28182>
- 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>
- Pesántez Alvarado, W. S., & Portugal Puma, J. D. (2020). *Comportamiento sísmico de paredes de adobe en el plano* [Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/34881>
- Petracca, M., Pelà, L., Rossi, R., Oller, S., & Camata, G. (2016). *STKO user manual*.
- 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., Oller, S., Camata, G., & Spacone, E. (2017). Multiscale computational first order homogenization of thick shells for the analysis of out-of-plane loaded masonry walls. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 315, 273–301. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2016.10.046>

- 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>
- PNUD. (1987a). *Cómo hacer nuestra casa en adobe*.
- PNUD. (1987b). *Cómo hacer nuestra casa en tapial*.
- Quinde Martínez, P. D., & Reinoso Angulo, E. (2016). Estudio de Peligro Sísmico de Ecuador y Propuesta de Espectros de Diseño para la Ciudad de Cuenca. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 94, 1–26. <https://doi.org/10.18867/ris.94.274>
- Redacción El Mercurio. (2023a, marzo 18). Sismo de magnitud 6.5 sacude varias provincias de Ecuador; hay una víctima mortal en Cuenca. *El Mercurio*.
- Redacción El Mercurio. (2023b, marzo 18). Suben a dos los fallecidos en Azuay por el sismo. *El Mercurio*.
- Reinoso, M. (2018). *Prototipo de vivienda social en adobe para el cantón Saraguro, en la provincia de Loja*. Universidad Técnica Particular de Loja.
- Rudofsky, B. (2000). Constructores prodigiosos: apuntes sobre la historia Natural de la arquitectura. *Arbol Mexico*, 21–51.
- Scott, M. H., & Fenves, G. L. (2010). Krylov Subspace Accelerated Newton Algorithm: Application to Dynamic Progressive Collapse Simulation of Frames. *Journal of Structural Engineering*, 136(5), 473–480. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000143](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000143)
- Tarque, N. (2008). Seismic risk assessment of adobe dwellings. *Pavia: Istituto Universitario di Studi Superiori Pavia*.
- Tavera, H. (2020, abril 22). Cinturón de Fuego del Pacífico: ¿activación en cadena? *Diario Correo*. <https://www.gob.pe/institucion/igp/noticias/127394-cinturon-de-fuego-del-pacifico-activacion-en-cadena/>
- Ulloa, F. (2013). Inventario de los sistemas ancestrales de construccion en la parroquia La Matriz, cantón Ambato, provincia Tungurahua. *CIENCIAMÉRICA*, 2, 7–11.
- Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3), 491–514. <https://doi.org/10.1002/eqe.141>

Yepes, H., Audin, L., Alvarado, A., Beauval, C., Aguilar, J., Font, Y., & Cotton, F. (2016). A new view for the geodynamics of Ecuador: Implication in seismogenic source definition and seismic hazard assessment. *Tectonics*, 35(5), 1249–1279. <https://doi.org/10.1002/2015TC003941>