

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo
**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**TEMA: REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES
PATRIMONIALES. CASO DE ESTUDIO EDIFICACIÓN EN EL
CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA**

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

**AUTOR: MILTON JAVIER LEMA LEMA, LUIS SANTIAGO
ZHUMI SUCUZHAÑAY**

DIRECTOR: ING. JUAN DIEGO URGILES ROJAS, MGS

AZOGUES - ECUADOR

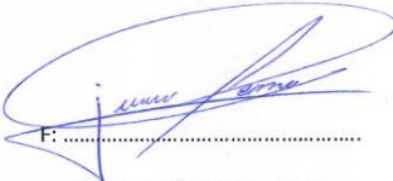
2023

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

Declaratoria de Autoría y Responsabilidad

Milton Javier Lema Lema portador(a) de la cédula de ciudadanía N° **0302640461**. Declaro ser el autor de la obra: **“Rehabilitación estructural de edificaciones patrimoniales. Caso de estudio edificación en el centro histórico de Cuenca”**, sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Azogues, 16 de noviembre de 2023



F:

Milton Javier Lema Lema

C.I. 0302640461

Declaratoria de Autoría y Responsabilidad

Luis Santiago Zhumi Sucuzhañay portador(a) de la cédula de ciudadanía N° 0302417605. Declaro ser el autor de la obra: “Rehabilitación estructural de edificaciones patrimoniales. Caso de estudio edificación en el centro histórico de Cuenca”, sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Azogues, 16 de noviembre de 2023



F:

Luis Santiago Zhumi Sucuzhañay

C.I. 0302417605

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TESIS

Ing. Juan Diego Urgiles Rojas. MIng

DOCENTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

De mi consideración:

Certifico que el presente trabajo de titulación denominado: "**Rehabilitación estructural de edificaciones patrimoniales. Caso de estudio edificación en el centro histórico de Cuenca**", realizado por: **Milton Javier Lema Lema y Luis Santiago Zhumi Sucuzhañay**, con documentos de identidad: **0302640461 y 0302417605**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil** ha sido asesorado, orientado, revisado y supervisado durante su ejecución, bajo mi tutoría en todo el proceso, por lo que certifico que el presente documento, fue desarrollado siguiendo los parámetros del método científico, se sujeta a las normas éticas de investigación que exige la Universidad Católica de Cuenca, por lo que está expedito para su presentación y sustentación ante el respectivo tribunal.

Azogues, 14 de noviembre de 2023



Ing. Juan Diego Urgiles Rojas. MIng

0302679477

DIRECTOR

Rehabilitación estructural de edificaciones patrimoniales. Caso de estudio edificación en el centro histórico de Cuenca.

Milton Javier Lema Lema, Luis Santiago Zhumi Sucuzhañay- Ing. Juan Diego

Urgiles Rojas, Mgs. Universidad Católica de Cuenca mjlemal61@est.ucacue.edu.ec

RESUMEN

Este documento se centra en el análisis del comportamiento estructural de una edificación ubicada en el centro histórico de la ciudad de Cuenca, caracterizada por la utilización de una diversidad de materiales constructivos, como; bahareque, madera, adobe y ladrillo. Mediante la inspección visual, se ha identificado las diferentes patologías que presenta, siendo la gran mayoría de estas disfunciones atribuibles a la prolongada exposición a condiciones climáticas adversas y la deficiencia de mantenimiento que los componentes constructivos han experimentado a lo largo del tiempo. En un contexto más detallado, se realizaron ensayos a fin de determinar las propiedades físicas y mecánicas de los elementos que conforma la edificación, lo que ha permitido llevar a cabo una evaluación integral del estado de conservación de los materiales y su composición. Dentro de este marco de análisis, se implementó el análisis no lineal pushover como herramienta esencial para la evaluación del comportamiento estructural, con el fin de garantizar la seguridad ocupacional. Finalmente se menciona algunas sugerencias para la intervención en muros mediante el uso de materiales compatibles con la edificación como geomallas o grapas de madera para mejorar la resistencia y la estabilidad.

Palabras clave: Patrimonial, Adobe, Rigidez, Estabilidad, Modelo no lineal.

Structural Rehabilitation of Heritage Buildings. Building in the Historic Center of Cuenca. A Case Study

Milton Javier Lema Lema, Luis Santiago Zhumi Sucuzhañay - Juan Diego Urgiles Rojas, Eng, Mag. Catholic University of Cuenca mjlemal61@est.ucacue.edu.ec

ABSTRACT

This document focuses on analyzing the structural behavior of a building located in the historic center of the city of Cuenca, characterized by the use of various construction materials such as wattle and daub, wood, adobe, and brick. Through visual inspection, different pathologies have been identified. Most of these dysfunctions are attributable to prolonged exposure to adverse weather conditions and the lack of maintenance that the construction components have experienced over time. In a more detailed context, tests were conducted to determine the physical and mechanical properties of the elements that comprise the building, which has permitted a comprehensive assessment of the state of conservation of materials and their composition. Within this framework, nonlinear pushover analysis was implemented as an essential tool for assessing structural behavior and ensuring occupational safety. Finally, some suggestions are made for intervention in walls using materials compatible with the building, such as geogrids or wooden staples, to improve resistance and stability.

Keywords: Heritage, Adobe, Rigidity, Stability, Nonlinear Model.

I. INTRODUCCIÓN

La protección de las edificaciones, construidas típicamente con materiales de tradición como: adobe, madera, ladrillo y el bahareque, representa un desafío en la actualidad debido a su importancia en la preservación de la identidad cultural en los centros históricos.

El centro histórico de Cuenca, oficialmente es conocido como Patrimonio Mundial de la Humanidad por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura *UNESCO* en el año de 1999, tiene en su mayoría viviendas patrimoniales construidas con tierra, muchas de estas viviendas están actualmente en uso gracias a las rehabilitaciones realizadas, y otras, como la edificación a ser analizada, han estado varios años en el abandono por lo que necesitan ser evaluadas y posteriormente rehabilitadas para continuar brindando servicio a sus propietarios. La figura 1 representa un mapa de ubicación del proyecto.

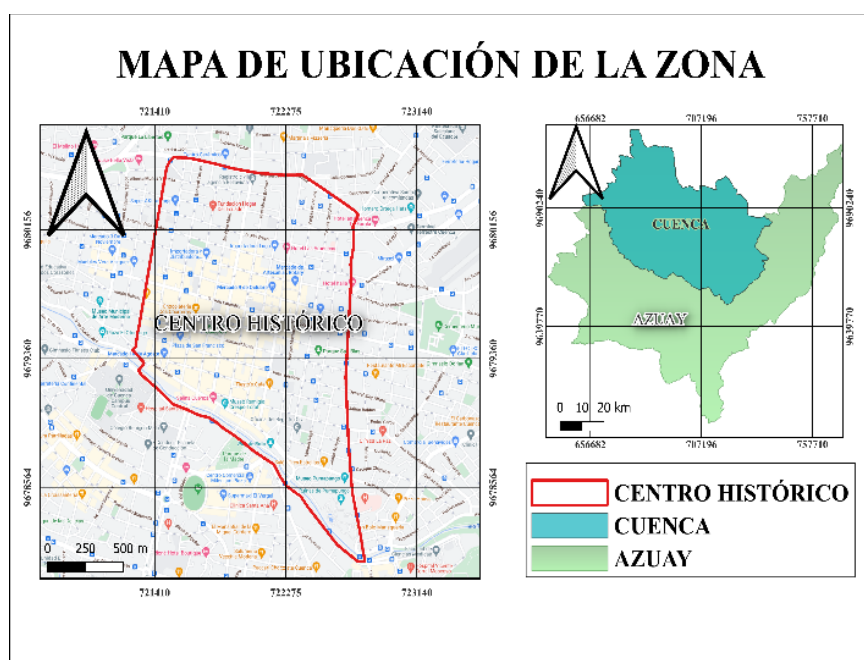


Figura 1. Ubicación de la estructura patrimonial para analizar.

Se llevó a cabo el análisis de una estructura patrimonial ubicada en el centro histórico del cantón Cuenca, este estudio tiene como objetivo evaluar la condición y la integridad de la vivienda, así como dar algunas recomendaciones de intervención teniendo en cuenta las normativas nacionales y locales. La edificación es de construcción mixta, está compuesta por vigas, columnas, entrepisos y cubierta de madera, así como muros portantes de adobe, bahareque y paredes de ladrillo. En la Figura 2 se presenta la configuración en planta de la edificación a ser analizada.

Antes de emprender acciones de rehabilitación es fundamental realizar un análisis exhaustivo de la vivienda mencionada, ya que ha presentado deterioro durante su vida útil, siendo la falta de mantenimiento una de los principales problemas encontrados. Para garantizar la seguridad y el confort ocupacional, es necesario diagnosticar y analizar las patologías que afectan a este tipo de estructuras, y es por ello que, se clasifica la anomalía que presentes en los elementos estructurales. Posteriormente, se recomienda intervenciones basadas en los criterios establecidos por algunas normativas y reglamentos vigentes.

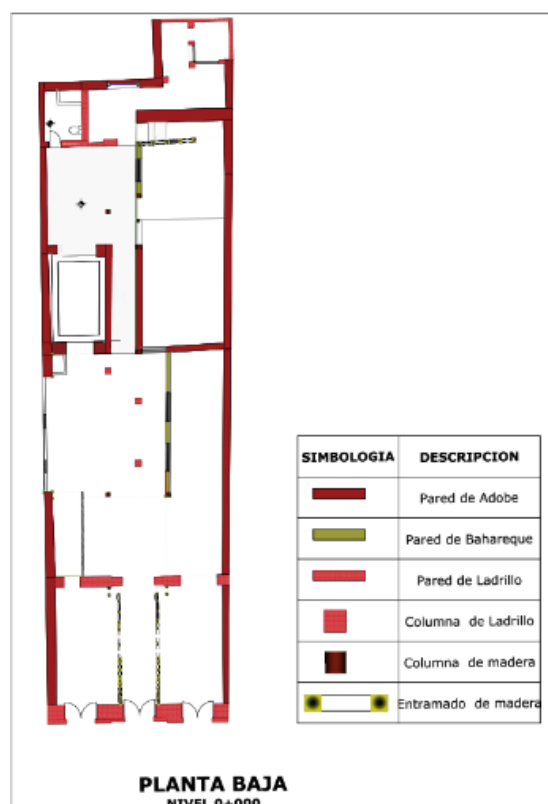


Figura 2. Configuración en planta de la edificación.

Dentro de la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 15, en el capítulo NEC-SE-RE, apartado 4.10 *Rehabilitación de edificaciones patrimoniales*, se menciona que esta sección será completada en versiones posteriores de la normativa, sin embargo, se sugiere seguir los procedimientos propuestos en la norma chilena NCh 3332.

La norma NCh 3332 establece requisitos para la intervención de construcciones patrimoniales de tierra, con el objetivo de conservar y proteger su valor histórico y cultural. Proporciona pautas para el análisis, diseño y ejecución de intervenciones, considerando aspectos como la estabilidad estructural, resistencia sísmica, preservación de materiales originales y compatibilidad con técnicas tradicionales. Busca equilibrar la rehabilitación y adaptación de estas construcciones para uso actual, manteniendo su autenticidad y valor patrimonial.

Por otra parte, para las recomendaciones de intervención en la vivienda patrimonial en estudio se tuvo en cuenta también la normativa local, “*ORDENANZA PARA LA GESTIÓN Y CONSERVACIÓN DE LAS ÁREAS HISTÓRICAS Y PATRIMONIALES DEL CANTÓN CUENCA*”, donde menciona la categorización de las construcciones y espacios públicos, los tipos de mediación en las edificaciones, los tipos de operación de acuerdo a la categoría de las edificaciones, las normas generales de actuación y los artículos sobre la conservación o restauración del bien histórico a fin de mantener su originalidad local. La edificación que se ha mencionado para el respectivo estudio, se encuentra dentro de la categoría de valor arquitectónico A (VAR A), la ordenanza en mención específica que las edificaciones que se encuentran dentro de esta categoría únicamente serán susceptibles a conservación y restauración, lo que significa que únicamente se permite la consolidación de los elementos estructurales portantes, así como los elementos distributivos, constructivos y decorativos de valor. (Municipalidad de Cuenca, 2010)

II. ESTADO DEL ARTE

Normativas y ordenanzas para la conservación de edificaciones patrimoniales

Las normativas representan un conjunto de regulaciones destinadas a salvaguardar y preservar el patrimonio arquitectónico y cultural, enfocándose en garantizar la conservación de los inmuebles. Estas directrices establecen pautas claras para la restauración, rehabilitación y mantenimiento de dichos edificios, asegurando el uso de técnicas y materiales apropiados que permitan su preservación a largo plazo. Un ejemplo relevante de estas directrices es la CARTA DE VENECIA adoptada en 1964, misma que destaca la importancia de llevar a cabo un mantenimiento sistemático utilizando técnicas modernas, y materiales que sean compatibles con la estructura al tiempo que se respeta y conserva la apariencia original de los edificios.(ICOMOS, 19664)

Así mismo, la UNESCO cita las diferentes herramientas para trabajar a partir de la noción de paisaje urbanístico, dichas herramientas son; de participación activa de la comunidad, de diseminación de conocimientos y de planificación estratégica, del establecimiento de sistemas normativos sólidos y en última instancia, la implementación de herramientas financieras, las cuales servirán para reforzar las aptitudes, las formas renovadoras de desarrollo y generadoras de ingresos basados en la tradición.

Otra documentación que orienta a la preservación de construcciones históricas es la ordenanza municipal de la ciudad de Cuenca publicada en febrero del 2010, misma que regula la administración y conservación de áreas históricas y patrimoniales, esta ordenanza destaca también dos criterios a considerar en la rehabilitación de edificaciones con valor arquitectónico. El primero es la protección, que busca el mantenimiento y cuidado constante de las riquezas patrimoniales para asegurar su permanencia a lo largo del tiempo. El segundo es la restauración, cuyo objetivo es rescatar los valores arquitectónicos originales del bien, reintegrando sus particularidades distintivas. Adicional a esto, el Art. 25 del mismo documento especifica que se permitirán edificaciones que no superen las tres plantas y su altura se ha de determinar acorde a la altura principal del tramo, esto se refiere a la altura de la edificación que sume la mayor longitud frontal en el tramo específico o acorde a la altura de las edificaciones contiguas. (UNESCO, 2011)

En la documentación de la ordenanza municipal, el Capítulo tres establece los tipos de operación que se pueden llevar a cabo de acuerdo a la categoría de las edificaciones, en este caso en la categoría VAR A, especifica que únicamente serán susceptibles a conservación y restauración, lo que significa que se permite la intervención en el sostenimiento y cuidado de las riquezas patrimoniales o también recuperar los valores arquitectónicos devolviendo sus características originales.(Municipalidad de Cuenca, 2010)

La normativa clave para el presente proyecto es la norma chilena NCh 3332 2013, recomendada por la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 15, esta norma establece recomendaciones para proyectos estructurales que involucran la intervención, restauración y rehabilitación de construcciones patrimoniales. El objetivo de estas intervenciones es asegurar la resistencia ante movimientos sísmicos leves y prevenir el colapso total en caso de movimientos sísmicos severos. Se enfatiza en el control de los desplazamientos de las estructuras agrietadas y la prevención del colapso de los elementos a través de refuerzos, teniendo en cuenta la compatibilidad de los materiales utilizados.(NCh3332, 2013)

Establece también criterios para el análisis de las estructuras existentes. Por ejemplo, recomienda que la esbeltez de los muros no supere el valor de 8. Además, la distancia entre los puntos de conexión de los refuerzos transversales de un muro debe no debe superar a seis veces el espesor del mismo, y cualquier desviación vertical del muro a su posición ideal no debe exceder el 10% de su altura. En caso de no cumplir alguno de estos criterios, se debe evaluar la necesidad de utilizar elementos adicionales de refuerzo. (NCh3332, 2013)

En cuanto a la reparación de los muros, esta misma normativa señala que, en caso de que la desviación de verticalidad de un muro oscile en un rango comprendido entre el 10% y el 25% de su altura, se requiere llevar a cabo un proceso de estabilización. Recomienda también promover una rigidez horizontal adecuada en el coronamiento de los muros mediante un sistema de amarre, que permita la conexión entre los muros y garantice la operación conjunta y la transferencia de cargas desde la cubierta. Para la intervención en este tipo de estructuras la norma menciona una variedad de materiales de refuerzo, como geomallas de polipropileno, mallas de acero electrosoldadas, madera y albañilería de adobe. Asimismo, recomienda sistemas de refuerzo que contribuyen a restaurar las características de carga de la estructura, tales como; contrafuertes de adobe, conectores de acero para madera, estructuras de madera y mallas poliméricas elaboradas (NCh3332, 2013)

Adicionalmente y como referencia esencial para las respectivas recomendaciones de actuación es la guía establecida por la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 15, la cual tiene como objetivo asegurar la estabilidad estructural y la durabilidad de las edificaciones frente a diversas cargas y fuerzas. Para lograrlo, establece directrices específicas para la construcción, como la inclusión de un diafragma sólido en la planta, conexiones adecuadas y un adecuado contacto con las paredes perimetrales. Asimismo, recomienda dotar a la planta y las paredes de capacidad de flexión y reducir la masa de la edificación, especialmente si se utiliza bahareque u otros materiales cohesivos.

Según esta guía, se considera la masa de cada piso como base para calcular las fuerzas sísmicas. Para simplificar el análisis, se utiliza un enfoque que consiste en distribuir la masa total de la estructura en cargas puntuales en cada nivel, estas cargas se incrementan progresivamente de menor a mayor, en función de la contribución relativa de cada piso. (NEC, 2015)

Este enfoque permite simplificar los cálculos al concentrar la masa en puntos específicos en lugar de distribuirla uniformemente en toda la estructura. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este método implica una aproximación y puede haber cierta pérdida de precisión en comparación con modelos más detallados. (NEC, 2015)

Además, es considerable recalcar que el cómputo de las fuerzas laterales mencionadas está sujetas a un análisis sísmico que considera la rigidez de la estructura, dicho análisis se enfoca en evaluar el comportamiento de la estructura ante las fuerzas sísmicas y determinar su capacidad de resistencia.

En el proceso de diseño sísmico, uno de los aspectos clave a evaluar es el desempeño sísmico de la estructura. Para ello, se analizaron las derivas totales, que son las deformaciones relativas entre los pisos de la estructura debido a la acción del terremoto. Estas derivas totales se comparan con criterios de desempeño establecidos en las normativas aplicables para asegurar que la estructura acate a todos los estándares de seguridad establecidos. (NEC, 2015)

Directrices para la preservación de bienes Patrimoniales

En 2015 se desarrolló la guía “Directrices para la Conservación de Inmuebles Patrimoniales de Tierra”, como parte integral del proyecto promovido por la UNESCO denominado “Movilización de mujeres y jóvenes en la transferencia de las técnicas tradicionales para salvaguardar la arquitectura de tierra, en el centro histórico de la ciudad de Cuenca”, donde participaron varios profesionales de la ciudad y de Europa. Por lo tanto, para el estudio de la edificación se sigue también las recomendaciones de esta guía, misma que ofrece un enfoque integral para la conservación de edificios históricos, proporcionando directrices claras y prácticas para propietarios, arquitectos y autoridades locales. (Carnevale et al., 2015)

La guía también aborda aspectos de seguridad estructural y prevención de riesgos en inmuebles antiguos. Además, se incorpora una planificación urbana del patrimonio, que busca integrar el desarrollo moderno con la protección de la identidad histórica de Cuenca. Se promueve la participación comunitaria y el diálogo entre diferentes actores para asegurar la conservación a largo plazo. (Carnevale et al., 2015)

La guía ofrece estudios de casos ilustrativos y herramientas para evaluar el estado de conservación de los inmuebles, así como estrategias para restauraciones respetuosas y adecuadas. Finalmente, ofrece recomendaciones sobre materiales y técnicas de restauración acordes con las características locales. (Carnevale et al., 2015)

Comportamiento sísmico en los muros de adobe

Según (Morán & Álvarez, 2017), el comportamiento sismo-resistente en edificaciones de adobe se ve afectado por los movimientos telúricos que provocan rendijas y la subdivisión de los muros en segmentos de menor tamaño, a su vez, la formación de fisuras en un muro tiene un efecto significativo en su comportamiento sísmico, dado que reduce la frecuencia fundamental del muro y provoca un incremento en los desplazamientos sísmicos en los segmentos debido a la fragilidad del material, por lo tanto, se vuelve necesario considerar el agrietamiento a fin de evaluar la máxima aceleración sísmica que un segmento de muro agrietado, llamado “segmento de masa crítica muraria” (mcm), pueda soportar. Acorde la pared se agrieta, tanto la aceleración como la frecuencia menoran, mientras que los desplazamientos experimentan un aumento significativo. El análisis sísmico del segmento de masa crítica muraria (mcm), concede especial atención a la identificación de los sitios con posibles concentraciones de esfuerzos, ya que estos lugares son determinantes para el inicio de las trazas de fisuración. Estas fisuras siguen dos tendencias conocidas como sistemas de fisuras verticales y horizontales, como se puede observar en la figura 3. (Morán & Álvarez, 2017)

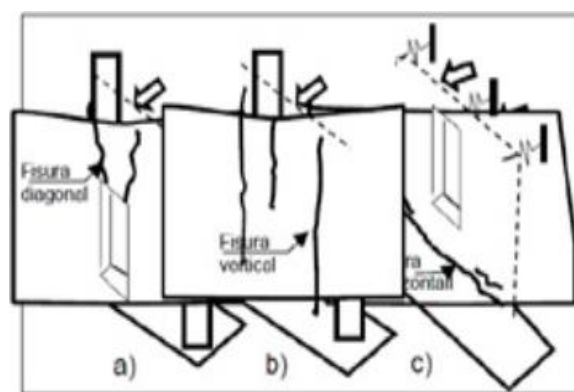


Figura 3. Tipos de fisuras en muros de adobe.

Fuente: (Morán & Álvarez, 2017)

En la figura proporcionada, se exhibe un diagrama de un muro que ha sufrido deformación como fruto de eventos sísmicos, donde se puede apreciar manifestaciones habituales de fisuras por flexión y cortante: los literales a) y b) hacen referencia a fisuras verticales que se desarrollan en muros que están reforzados lateralmente por muros convencionales; en cuanto al literal c) muestra la presencia de fisuras horizontales en muro que está lateralmente apoyado por una estructura de entrepiso. (Morán & Álvarez, 2017)

Los segmentos mcm que experimentan fisuración vertical se localizan en las cercanías del centro del vano o en las inmediaciones de las paredes convencionales, estas fisuras pueden ocasionar desplazamiento fuera del plano cuando los apoyos laterales resultan insuficientes para controlar los desplazamientos debido a la falta de rigidez. En el caso de los segmentos mcm afectados por fisuración horizontal, surgen como resultado de la restricción a los desplazamientos de la estructura de entrepiso, por otra parte, para los segmentos de mcm con fisuración inclinada se deben a: a) esfuerzos cortantes generados por asentamientos diferenciales del suelo, b) concentración de esfuerzos cortantes en las esquinas superiores de las aberturas; y c) interacción entre muros convencionales que presentan diferencias en frecuencias y desplazamientos. La solución dinámica para muros no restringidos se basa en el principio de que la firmeza de dichas paredes necesita exclusivamente del equilibrio estático entre el momento que estabiliza el muro debido a su propio peso y la fuerza sísmica que actúa sobre él. (Morán & Álvarez, 2017)

Para el proceso de rehabilitación es importante considerar la adopción de materiales que guarden similitud con los originales y han de ser estructuralmente compatibles para el fortalecimiento o reparación de secciones deterioradas en una estructura con la finalidad de asegurar un comportamiento uniforme de la misma.

Evaluación y Reforzamiento de Construcciones Patrimoniales con Irregularidad en Planta

Para (Chacón, Suquillo, & Sosa, 2021) algunas de estas estructuras son altamente vulnerables a fenómenos naturales, especialmente lluvias y sismos, lo que puede resultar pérdidas significativas de vidas humanas y del patrimonio.

Para abordar esta problemática, se sugiere desarrollar un análisis inicial para reconocer las áreas con mayor susceptibilidad en la estructura mediante un mapeo de asignación de fuerzas y control de movimientos, además menciona la importancia de la configuración del mallado en el análisis estructural utilizando elementos finitos, ya que esta estrategia de mallas resulta altamente beneficiosa para estructuras de geometría compleja, en vista de que permite evaluar la sensibilidad del método frente a los elementos finitos y realizar un efectivo control de fuerzas y desplazamientos.

Para ejemplificar, la figura 4 proporciona una disposición común de adobe con abertura de ventana, al tener esta configuración la susceptibilidad es mayor en comparación con muros sin abertura. En el mallado del muro, existen dos configuraciones distintas, la primera sección se denomina "murete vertical" y su función principal es absorber las cargas laterales (PLAT) que generalmente provienen de un sismo, mientras que la segunda sección es el "murete horizontal", diseñado para soportar las cargas verticales (PVERT) como entrepisos, el peso del techo y cargas sobre estas, esta idealización se muestra en la figura 5. (Chacón, Suquillo, & Sosa, 2021)



Figura 4. Muro de adobe con abertura de ventana.
Fuente: (Chacón, Suquillo, Sosa, et al., 2021)

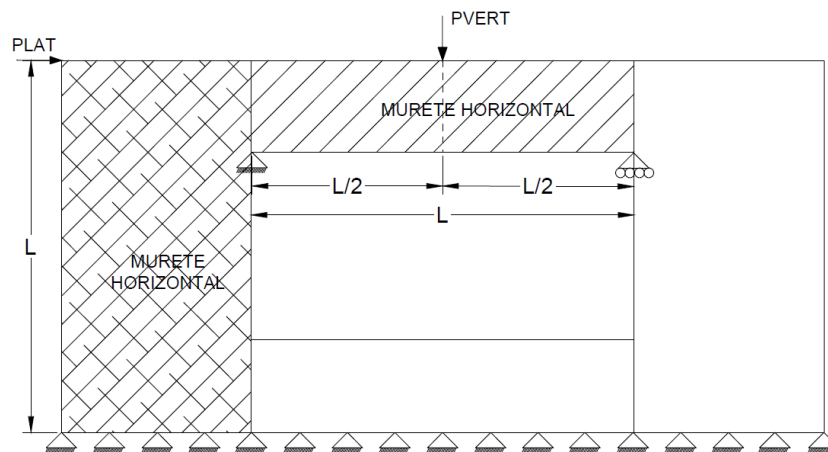


Figura 5. Muro de adobe adoptado como muretes vertical y horizontal. (Chacón, Suquillo, & Sosa, 2021)

Para determinar la cantidad de los elementos finitos en el mallado inicial, se inicia mediante el cálculo de los desplazamientos y las acciones internas máximas en respuesta a la carga externa (P). En el contexto de análisis del murete vertical, se modela este elemento como una viga sobresaliente con la carga en el extremo, y en el caso del murete horizontal se representa como una viga simple apoyada con la carga en el centro, adicionalmente, se incorporan los desplazamientos generados por deformaciones de corte y flexión, donde el momento de flexión que se origina como respuesta de la ejecución de la carga se describe mediante la siguiente ecuación: (Chacón, Suquillo, & Sosa, 2021)

$$E = \sigma * S \quad (1)$$

donde σ es el esfuerzo de flexión y S es el módulo de sección que se calcula mediante la ecuación.

$$S = \frac{b * h^2}{6} \quad (2)$$

Los valores de base (b) y altura (h) es representada en una sección rectangular mediante una vista transversal, finalmente el esfuerzo se calcula a partir de:

$$\sigma = \frac{M}{S} \quad (3)$$

El comportamiento no lineal de una estructura de adobe puede comprenderse como una mampostería no reforzada, misma que responde casi como un bloque rígido. En la figura 6 se puede ver que en las deformaciones por flexión en un muro de mampostería son insignificantes, de modo que se puede simplificar la respuesta real como la respuesta de un sólido rígido. (Chacón, Suquillo, & Sosa, 2021)

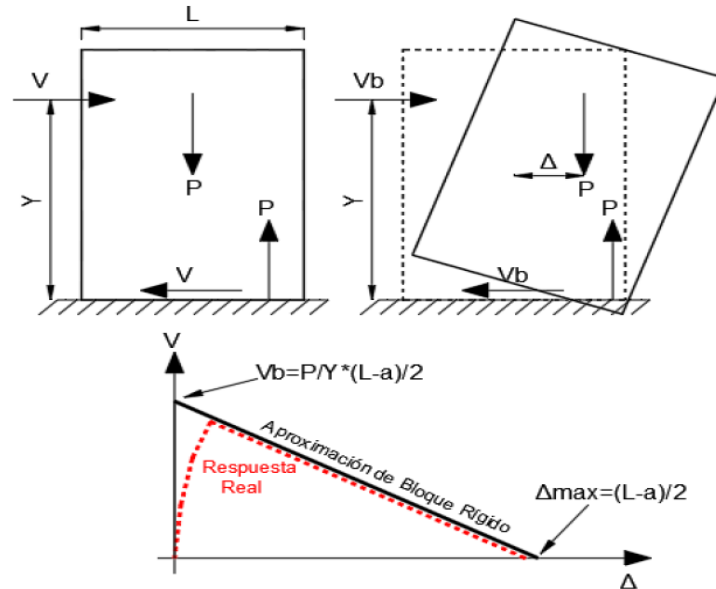


Figura 6. Curva de capacidad para mampostería sin refuerzo. (Chacón, Suquillo, & Sosa, 2021)

En los muros de adobe, la capacidad para resistir el volteo se logra a través de la fuerza del cortante basal (V_b), cuando la resistencia a corte del muro resulta baja, ocurre una falla antes de que se alcance el valor de (V_b), por lo que suele observar una conducta lineal hasta el punto de falla por corte, momento en el que se considera el colapso del muro. (Chacón, Suquillo, & Sosa, 2021)

$$V_b = P * \frac{L-a}{2} \quad (4)$$

Donde, V_b es la fuerza de corte basal que ocasiona el volteo, P es la carga axial, L el espesor del muro, y a es la elevación del bloque de compresión de Whitney.

Durante un sismo, los elementos más vulnerables tienden a agrietarse y degradarse gradualmente debido a las cargas cíclicas generadas por las mismas, la baja ductilidad sugiere un coeficiente de reducción estructural ($R=1$) a fin de evitar el colapso ante cargas sísmicas. La estimación imprecisa de las acciones sísmicas podría llevar al colapso del muro en el caso de que su resistencia a corte sea superada, de tal forma que disminuye los esfuerzos a muros restantes.

Para el análisis sísmico se tienen en cuenta el componente de regularidad en planta como en la altura de la estructura (ϕ_P y ϕ_E). Estos componentes toman valores menores a 1.0 cuando existen irregularidades geométricas en la estructura, esta situación provoca un aumento en la demanda sísmica. (Chacón, Suquillo, & Sosa, 2021)

$$V = \frac{I * Sa(Ta)}{R * \phi_P * \phi_R} * W \quad (5)$$

Donde V es la fuerza de corte basal, I el factor de importancia de la estructura, Sa es la aceleración espectral de diseño, R el componente de reducción de respuesta de la estructura ($R=1.0$), y el factor de regulación en planta y elevación (ϕ_P y ϕ_E de 0.9), W es el peso estructural, y Ta es la fase de vibración estructural.

III. METODOLOGÍA

El análisis de la estructura incluye una inspección detallada de los materiales con los que se ha construido, la técnica de construcción empleada y el estado actual de la edificación. Se examinó los elementos estructurales, como los muros, vigas, columnas y los cimientos, con el fin de identificar posibles daños, deterioros estructurales.

Se han revisado documentos históricos tales como planos de la edificación, y se recopiló información sobre los cambios que haya experimentado a lo largo del tiempo. Durante el análisis, se utilizó herramientas y técnicas de diagnóstico como pruebas de resistencia, inspecciones visuales y análisis de laboratorio de muestras de materiales.

Se han distinguido entonces los elementos que conforman la edificación, tales como adobe, bahareque, ladrillo y madera, identificando diversos daños que afectan al inmueble. La tabla 1 resume los niveles de intervención necesarios y las técnicas requeridas para diferentes tipologías de construcciones de tierra.

Tabla 1. Niveles de intervención y técnicas requeridas en construcciones de tierra.

	Niveles de mediación	Objetivos de la intervención	Directrices para la mediación
Muros anchos $H/t < 6$ y medianos $H/t < 8$	Mínimo	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Salvar la vida de las personas. ✓ Incrementar la estabilidad de las estructuras. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Realización de conexiones (anclajes) entre la viga solera y el muro.
	Moderado	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Salvar la seguridad de las personas. ✓ Incrementar la estabilidad de las estructuras murarias. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Optar por sistemas de vigas soleras perimetrales cerradas que estén firmemente sujetas a los muros.
	Alto	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Garantizar la preservación de vidas. ✓ Mejorar la resistencia y estabilidad de las estructuras. ✓ Supervisar el desarrollo de fisuras sesgadas. ✓ Controlar los descentramientos fuera del plano estructural. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Emplear sistemas de vigas soleras perimetrales cerradas que estén sujetas a los muros. ✓ Realizar la fabricación de tirantes que se adhieran a los muros y estén fijados en sus extremos, colocándolos en proximidad al entrepiso.
Muros delgados $H/t > 8$	Mínimo	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Salvar la seguridad de las personas. ✓ Incrementar la estabilidad de las estructuras. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Construcción de fijadores entre la viga de cimentación y la pared.
	Moderado	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Garantía de vida. ✓ Enriquecer la estabilidad del muro. ✓ Dominio de rajaduras inclinadas. ✓ inspección de movimientos fuera del plano. ✓ Cuidado del volteo 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Instalación de uniones entre la viga solera y la pared. ✓ Creación de tensores que estarán fijados a los muros en sus extremos, ubicados en proximidad al entrepiso. ✓ Implementación de sistemas de tensores entre paredes paralelas, posicionados en el entrepiso, con anclaje externo a los muros.
	Alto	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Involucra los objetivos del nivel mínimo, y ✓ Supervisar y prevenir la formación de grietas inclinadas. ✓ Controlar los desplazamientos fuera del plano estructural. ✓ Mitigar el riesgo de volcamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Creación de conexiones firmes entre la viga solera y la pared. ✓ Instalación de tensores impregnados a los muros y fijados en los extremos, colocándolos cerca del entrepiso. ✓ Implementación de sistemas de tensores entre paredes paralelas, Colocados al nivel del entresuelo o del techo, anclados externamente a las paredes. ✓ Fortalecimiento de los muros y su vinculación con la cimentación para prevenir volcamientos.

Mediante la inspección visual se ha identificado las diferentes anomalías que se presentan; la mayoría de estas, están asociadas a la exposición a la intemperie y falta de mantenimiento que han sufrido los elementos. Se realizó también un análisis de los componentes empleados en la construcción para determinar su estado de conservación, con el fin de identificar problemas de corrosión, desgaste, oxidación, desprendimiento y otros posibles deterioros. De igual forma el análisis permite detectar problemas relacionados con la presencia de humedad, filtraciones, condensación y capilaridad, entre otros fenómenos que pueden afectar la estructura.

Mediante la recopilación íntegra de todos los datos fundamentales necesarios para llevar a cabo la determinación del estado actual estructural, se ha desarrollado un modelo matemático que representa la estructura en cuestión, considerándolo como una herramienta esencial para realizar la evaluación requerida. Posteriormente, se ha aplicado la metodología pushover, misma que ha permitido evaluar la respuesta de la edificación frente a cargas sísmicas u otras situaciones críticas, por lo que se ha podido identificar de manera efectiva las debilidades estructurales y determinar como la edificación se comportaría bajo cargas externas.

A fin de abordar las patologías, se empleó una clasificación basada en los agentes de deterioro, siguiendo las recomendaciones de la enciclopedia o tratado de (Broto, 2016) para la construcción, así como normativas locales, nacionales y diferentes documentos asociados. Dicha clasificación patológica se describe a continuación.

Físicas: causadas por fenómenos como; la humedad, erosión, variaciones de temperatura o radiación solar.

Mecánicas: esto se debe a que una fuerza provoca movimiento de algún elemento. Las principales patologías son grietas y deflexiones.

Biológicas: resultado de la aparición de vegetación y organismos que alteran la estructura física y química del material.

Antrópicos: estos dependen de factores generados por la intervención humana.

Seguidamente, se detallan las diversas patologías que se han identificado, mediante un análisis secuencial, centrándose en cada tipo de elemento por separado.

En primer lugar, se examinaron las patologías presentes en los muros de adobe; posteriormente, se aborda las afectaciones encontradas en las paredes de bahareque, seguido por una evaluación de los elementos de ladrillo; y finalmente, se mencionan las problemáticas relacionadas con estructuras de madera.

Patologías en muros de adobe

En las inspecciones realizadas se encontraron patologías como; *degradación de la base de los muros*, producido por la presencia de agua en la base, afectando la estabilidad y durabilidad de la edificación ya que tiene contacto directo con la cimentación. El aumento de porción de agua ha ocasionado la degradación progresiva debido a una falta de drenaje. Otra patología que se ha registrado es *la pérdida del revoque*, pues los cambios climáticos, la variación de humedad, la exposición constante a la intemperie y los sismos han provocado el desgaste, debilitando el revoque. (Juménez Moncayo, 2017)

La Erosión es otra de las patologías que se ha encontrado en la edificación, misma que ha sido causada por factores atmosféricos, lo que ha provocado una disminución en el espesor del muro en ciertos tramos debido a la disgregación. La sismicidad ha acelerado la erosión ya que su

flexibilidad y resistencia son limitadas viéndose afectada la estabilidad del muro.(Lozano Jaramillo, 2022)

Acumulación de humedad, debido a esta patología, los muros de adobe han llegado a ser vulnerables, perdiendo su resistencia y cohesión en el transcurso del tiempo, provocando la aparición de moho y hongos. Las *Grietas con poca profundidad en el muro* también han afectado la situación de la vivienda, ocasionado asentamientos diferenciales. Además, los cambios en el nivel de humedad han provocado expansiones y contracciones en los muros de tal forma que se reflejan en grietas poco profundas.

La acción humana también ha afectado la estructura de adobe en esta edificación, pues es evidente que aparecen *lesiones antrópicas*, se observa roturas en los muros realizados para instalaciones eléctricas o empotramientos de elementos de madera que se dejaron sin recubrir ocasionando daños exteriores e interiores en la estructura. Así mismo, los eventos sísmicos pasados han provocado la *desvinculación de piezas*, se ha observado que las piezas de adobe se han desprendido, creando fisuras en el muro. Esta desvinculación consta tanto en las uniones verticales, en las horizontales como también en las esquinas.

Finalmente se ha registrado el *desarrollo de vegetación*, en ciertos tramos de los muros donde las raíces han penetrado en las juntas del adobe.

Patologías en muros de bahareque

Entre las patologías encontradas en muros de bahareque se menciona *la erosión*, misma que ha sido causada por la acción del agua, debido a la escasez de protección adecuada produciendo el desgaste y desprendimiento del barro que se utiliza como relleno, lo cual debilita la estructura.

Otra de las patologías presenciadas son las *grietas y fisuras superficiales* que están asociados a factores antrópicos. Por otra parte, los agentes climáticos han provocado un desgaste en el recubrimiento de las paredes. (Lozano Jaramillo, 2022)

La presencia del *desprendimiento y degradación de la base de los muros* se ha dado debido a la falta de mantenimiento y presencia del agua provocando una degradación continua, comprometiendo su estabilidad. Otros factores evidenciados son las lesiones antrópicas provocados por la mala intervención (golpes, cortes o impactos), debilitando y comprometiendo su integridad.

Patologías en muros de ladrillo

La mayor parte de las afecciones identificadas en los elementos construidos con ladrillo han sido causados por *factores climáticos* y en algunas ocasiones *efectos sísmicos* registrados anteriormente, lo que conlleva un deterioro del material, sin embargo, presentan afecciones muy superficiales en los elementos, que se describe a continuación: (Juménez Moncayo, 2017)

La presencia de humedad es un factor crucial que ha afectado los elementos construidos, ya que el efecto capilar ha ocasionado la aparición de sales o manchas en los muros. Además, dicha humedad ha provocado el crecimiento de musgos en condiciones específicas de temperatura, lo cual ha deteriorado el material sobre el que se han desarrollado, ocasionando grietas y fisuras.(Lozano Jaramillo, 2022)

Como consecuencia de la humedad, se ha presentado también la *eflorescencia*, esto ha ocasionado roturas y desmoronamientos, debido a que el sulfato de magnesio es altamente

soluble y puede expandirse al cristalizar durante la evaporación. Otra patología que se ha detectado es *la erosión* que causa el extravío de la capa superficial de los materiales, afectando su resistencia. Esta afección suele ser por; *la pulverización*, donde el material se desprende en forma de polvo; *arenización*, cuando se desintegra en pequeñas partículas de arena; y *exfoliación*, cuando se desprenden en forma de escamas o lascas. (Juménez Moncayo, 2017)

Patologías en elementos de madera

Al realizar la inspección visual en la edificación patrimonial, se ha encontrado patologías en los sistemas estructurales de madera, tales como; *la infección*, pues se ha evidenciado la presencia de termitas o polillas, que son organismos que se alimentan de sustancias nutritivas de la madera, están presentes en las vigas, cerchas y pisos, de igual manera son comunes en zonas de humedad, mayor presencia en los elementos de los niveles inferiores de la edificación. *La pudrición blanca* es otra de las patologías que se han encontrado en la madera estructural de esta edificación, pues han sido causados por hongos, mismos que se alimentan de la lignina de la madera. (Paez & Perez, 2014)

La pudrición parda no es un caso de excepción, pues se ha notado claramente que la madera presenta un color pardo y se ha observado la desintegración de la madera en forma de cubos. Finalmente se ha identificado *partiduras* como consecuencia de la pérdida de humedad.

Descripción de propiedades físicas y mecánicas de la madera

Los ensayos se llevaron a cabo utilizando una prensa universal como se observa en la figura 7, con una carga máxima de 1112 KN.



Figura 7. Prensa Hidráulica.

Para la evaluación de los materiales utilizados en estructuras patrimoniales, se ha seguido pautas establecidos por la Normativa ASTM (American Society for Testing and Materials,). Esta norma permite determinar las propiedades mecánicas como: módulo de elasticidad (E), resistencia a compresión (f'_m) y el módulo de corte (G_o). (ASTM, 2000)

Se ha evaluado el comportamiento de la madera bajo diferentes cargas, que se describe a continuación:

Pruebas de compresión paralela al grano (ASTM-D134): Se utilizó un espécimen de dimensiones 5cm x 5cm x 20 cm, en dirección paralela al grano. Se anotaron los datos de carga

y deformación para obtener las propiedades mecánicas de la madera, como muestra la siguiente figura



Figura 8. Prensa para ensayo de compresión.

Ensayo de flexión (Normas ASTM-D134 y D790-17): Este ensayo permitió valorar la resistencia y la capacidad de flexión de la madera, que recomienda dimensiones de 50 mm de altura, 5 mm de anchura y una longitud de 760 mm. La máquina registra los datos de carga y deformación para calcular parámetros como el límite proporcional, la resistencia máxima, el módulo de elasticidad y la deflexión. En la figura 9 se observa el modo en el que se ha aplicado la carga.



Figura 9. Prensa para ensayo ha flexión.

Determinación de propiedades físicas y mecánicas del adobe y bareque

En el caso del adobe, se ha utilizado la norma Peruana E.080, conocida como "*Diseño y Construcción con Tierra Reforzada*", en esta normativa señala que se debe obtener seis muestras cúbicas y las dimensiones deben ser de 0,1m de arista. Se realizaron también pruebas para determinar las particularidades de resistencia a la compresión y flexión de la pieza de

bahareque. Los productos obtenidos se procesaron estadísticamente para obtener datos representativos del esfuerzo permisible a la compresión y flexión de este material de construcción. Además, se registró el peso volumétrico de la pieza ensayada.

Para realizar estas pruebas, se siguió las indicaciones dadas en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (2004), la norma NTCD-2004, NSR 10 y SCT (2000 y 2005). Fue necesario recurrir a estas normativas debido a la falta de un procedimiento específico para ensayos de bahareque a nivel nacional. Los trabajos de laboratorio se realizaron siguiendo las siguientes etapas:

- Extracción de la muestra
- Moldeamiento de la muestra
- Roturas



Figura 10. Ensayos al Bahareque.

Análisis sísmico de la edificación

En el caso de estudio, se observa una edificación que ha sufrido agrietamientos y daños debido a movimientos telúricos, las fotografías que se muestran a continuación indican el estado en el que se mantienen algunos segmentos después de haber experimentado movimientos ocasionados por los sismos, mismos que influyen en su comportamiento estructural.

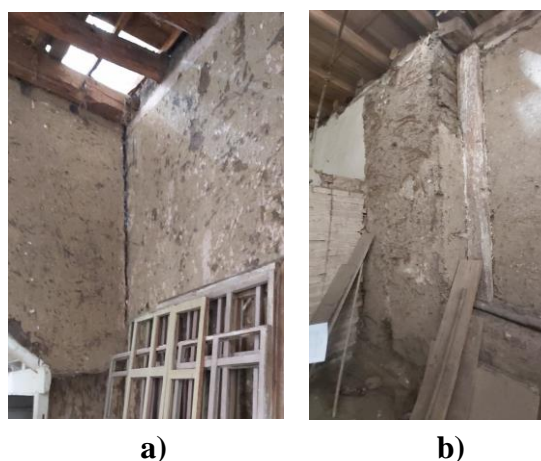


Figura 11. Segmentos de mcm de un muro.

Los muros de adobe se mantienen estables gracias a la presencia de una viga solera a nivel del entrepiso, estableciendo vínculos laterales que refuerzan su estabilidad. Se ha sistematizado las formas de agrietamiento a fin de tener una caracterización estructural del segmento de masa crítica muraría (mcm) que consiste en tomar una masa representativa que ha sufrido fisuración

y degradación en la base, debido a los desplazamientos transversales o verticales causados por sismos y/o asentamientos diferenciales del suelo. Como resultado, se identificaron cinco tipos distintos de segmentos, los cuales están ilustrados en la figura 12.

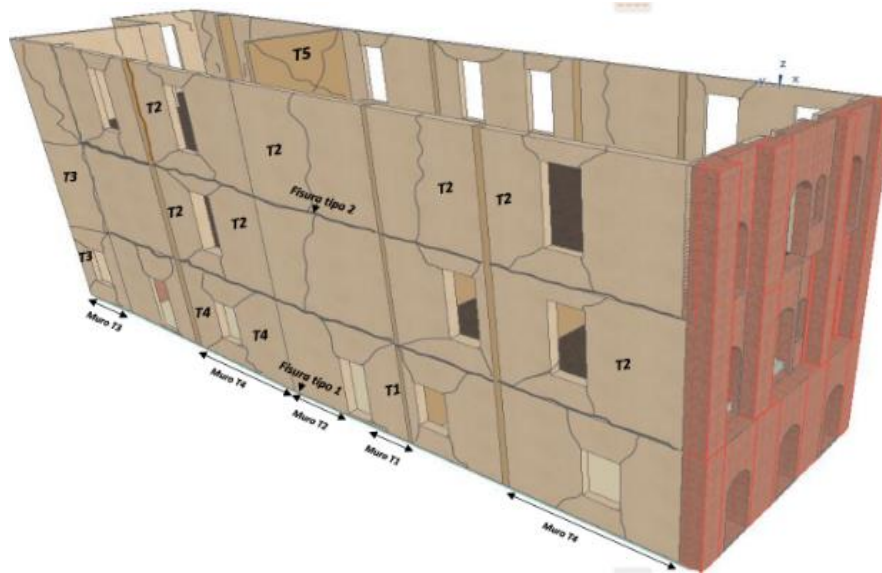


Figura 12. Sistematización de las formas de agrietamiento.

De esta figura se explica que T1 está localizado en segmento intermedio limitado por puertas y ventanas; T2 se encuentra localizado en segmentos que están entre muros y aberturas, por lo general el T1 Y T2 se representa con fisuras verticales o inclinadas; T3 se localiza en muros cortos ($L < 20$ veces el espesor del muro), que no poseen aberturas, se representa con fisuras en los extremos; T4 en muros largos ($L > 20$ veces el espesor del muro) sin aberturas, se representa con fisuras verticales o diagonales en extremos y finalmente T5 que se localiza en segmentos de muros transversales cortos ($4e < L < 8e$) donde e representa el espesor del muro, donde las fisuras son en X.

Debido a que, durante el sismo los muros de adobe se desvinculan dejando de actuar como un solo cuerpo monolítico, y ya que este comportamiento no puede ser captado por el método de los elementos finitos utilizado en muchas ocasiones para hacer el análisis de este tipo de edificaciones, se plantea realizar el análisis de una de las secciones más críticas de la vivienda mediante un método analítico simplificado detallado en la siguiente sección. En el plano arquitectónico que se muestra a continuación, se ha señalado la región específica donde se ha tomado los muros que han sido objeto de análisis en el presente estudio de caso. La selección de esta área se basa en la identificación de las secciones con mayor masa crítica dentro del conjunto edificado, justificando así la elección de esta región como fuente principal de datos para la evaluación del comportamiento estructural del edificio.

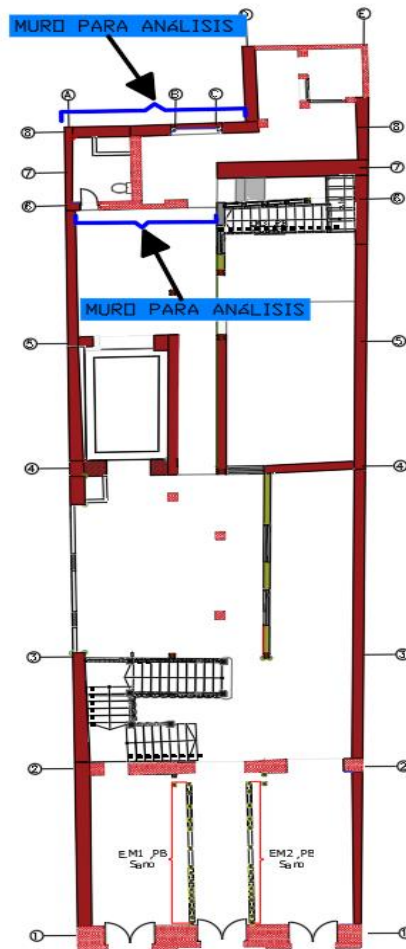


Figura 13. Sección de análisis en la edificación.

El gráfico siguiente representa el área de la masa crítica muraria mediante la sistematización de los agrietamientos, esto se presenta en la figura 14, los puntos de disposición se clasifican en T1 y T2, las cuales están representadas como fisuras inclinadas.

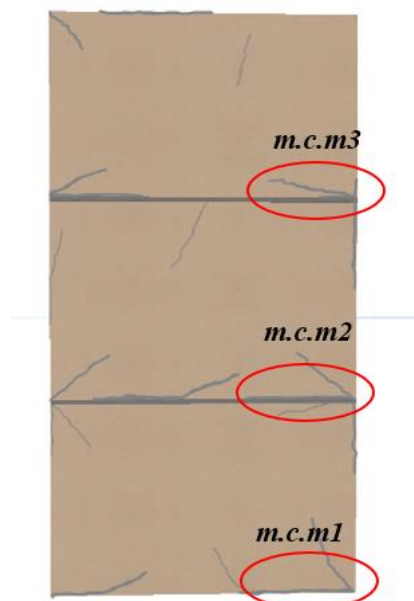


Figura 14. Masa crítica muraria agrietada.

Posteriormente se presenta una gráfica en 3D de la sección analizada, aquí se identifican las masas, las vigas de entrepiso que unen los muros y las fuerzas sísmicas.

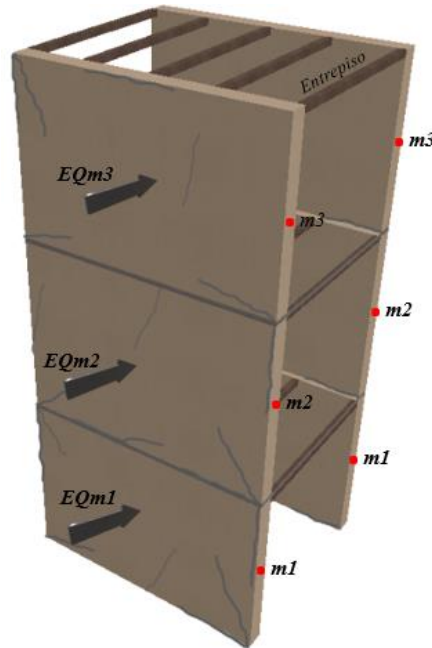


Figura 15. Sistema analizado.

En la figura 16 se puede observar un esquema del modelo matemático que se evalúa.

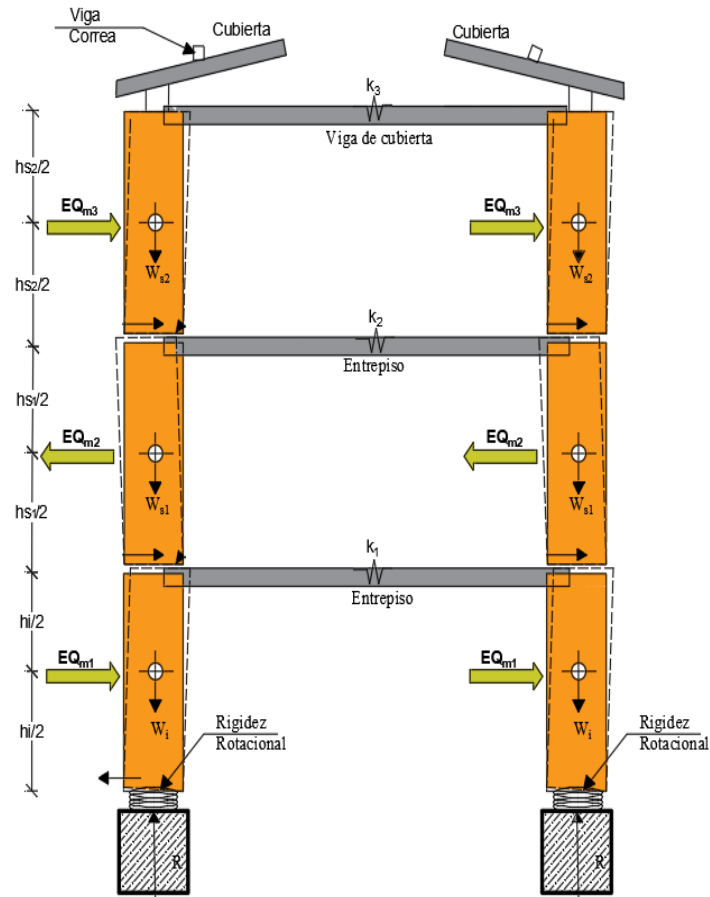


Figura 16. Segmento de mcm de tres niveles.

Modelo matemático y comportamiento sísmico de la región seleccionada

La caracterización del modelo matemático abarca diversos componentes, considerando, en primer lugar, los muros de adobe que se han asumido como infinitamente rígidos, estos muros están interconectados a través de elementos tipo barras, con una rigidez lateral equivalente a cinco vigas de madera por cada nivel, contribuyendo así a la estabilidad global de la estructura. Para abordar el análisis del comportamiento del muro de adobe sobre una cimentación rígida, se han implementado resortes rotacionales en la base, diseñados para modelizar el comportamiento del muro de adobe sobre una base rígida, además se restringió los desplazamientos en la dirección X & Y .

Los cálculos respectivos de las masas, la rigidez lateral, y rotacional se detallan más adelante. Con todos los elementos que se han mencionado, finalmente se ha realizado el modelamiento en el software ETABS proponiendo un análisis no lineal Pushover.

Cálculo de la rigidez rotacional para el modelo

Para obtener la rigidez rotacional, se ha empleado como referencia la documentación de (Diamantopoulos & Fragiadakis, 2017), mismo que proporciona ecuaciones para calcular la relación momento-rotación de un cuerpo rígido sobre una base rígida. Esta perspectiva es de particular importancia ya que mediante estos resortes evaluamos la no linealidad en el sistema. Este documento ha sido fundamental para establecer parámetros críticos en nuestro análisis de rigidez rotacional y ha contribuido significativamente a nuestra comprensión de la respuesta de la estructura ante eventos sísmicos. La ecuación proporcionada por el autor es el siguiente:

$$k = m * g * R * \sin(\alpha) \quad (6)$$

Donde

k	Rigidez rotacional	α	Ángulo de volteo
m	Masa de la sección	R	Esbeltez
g	Gravedad		

En la figura 17 se muestra la relación momento-rotación, del resorte rotacional no lineal.

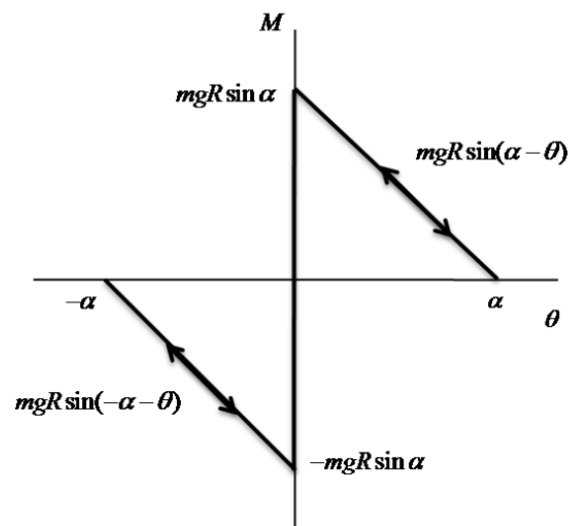


Figura 17. Relación momento-rotación del resorte rotacional no lineal.

Masas y rigidez para cálculo del desplazamiento

Para el cálculo de la masa se consideró el aporte de la masa de los muros de adobe y del sistema de entrepiso. De igual forma fue necesario el cálculo de la rigidez axial de los entrepisos, en vista de que la estabilidad del muro se ve involucrado con los mismos. Según (Sánchez & González, 2011), esta rigidez se ha de calcular en base a la ecuación que se observa a continuación:

$$kv = \frac{E \cdot A}{L} \quad (7)$$

Donde

- kv Rigidez lateral
- E Módulo de elasticidad del material
- A Área de la sección
- L Longitud de la sección

Desplazamiento objetivo

El desplazamiento objetivo (δ_T) constituye un parámetro de suma importancia en el contexto del diseño y análisis de estructuras, desempeñando un papel crucial. Este factor aborda aspectos esenciales que inciden en la integridad de la edificación, abarcando cuestiones tales como la seguridad estructural, la capacidad de respuesta ante movimientos sísmicos, las deformaciones máximas admisibles y la capacidad de carga máxima, entre otros elementos de carácter determinante.

Este desplazamiento simboliza el máximo desplazamiento que tiene la edificación para el nivel del riesgo sísmico. La FEMA-356 (Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings) ha sido la más relevante para el desplazamiento objetivo (δ_T) de la estructura, donde establece la siguiente ecuación:

$$\delta_T = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (8)$$

Para el periodo fundamenta efectivo en la dirección de interés (T_e) se expresa en la siguiente ecuación:

$$T_e = T_i * \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad (9)$$

Donde

K_i = Rigidez lateral elástica de la edificación en la dirección considerada.

K_e = Rigidez lateral efectiva de la edificación en la dirección considerada.

El Período fundamental elástico (T_i) para edificios de mampostería no reforzada con diafragmas flexibles, recomendado por la FEMA-356 en la sección 3.3.1.2.3, se expresa:

$$T_i = (0.078 * \Delta_d)^{0.5} \quad (10)$$

De modo que Δ_d , es el desplazamiento máximo expresado en pulgadas.

En base al desplazamiento objetivo se genera una curva de capacidad y el nivel de desempeño de la estructura, misma que indicará en qué situación se encuentra la edificación que se ha analizado, en la figura que se muestra a continuación, se puede observar una referencia de la curva de capacidad estructural.

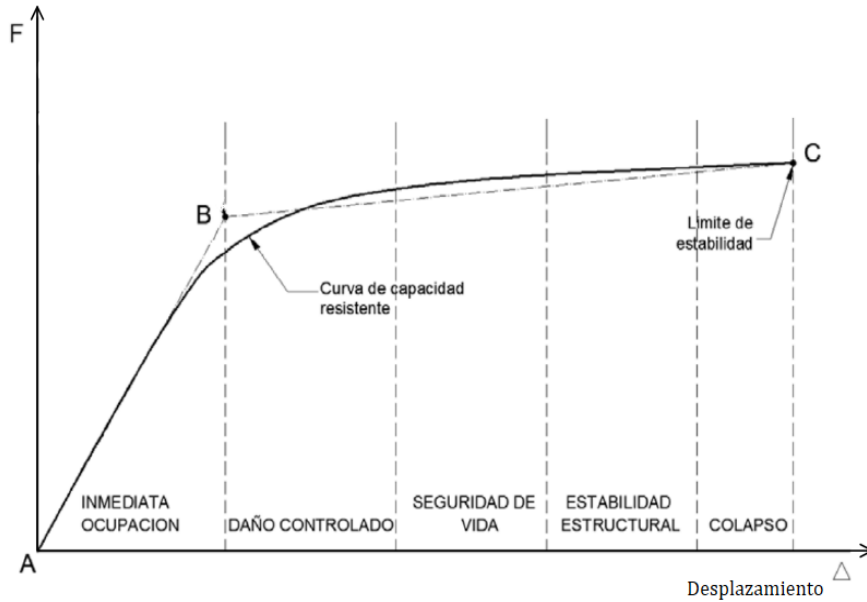


Figura 18. Curva de capacidad y niveles de desempeño.

IV. RESULTADOS

Resultados de los ensayos de los materiales

A partir de los ensayos realizados, tal es el caso de la madera, bahareque, adobe y ladrillo se obtuvo el cálculo de las curvas de fuerza-deformación. Estas curvas representan el vínculo entre la fuerza aplicada y la deformación resultante, permitiendo analizar cómo responde el material bajo cargas diferentes. A continuación, se presentan dichas curvas, de los materiales que conforman la edificación, que servirán para determinar las propiedades mecánicas del material

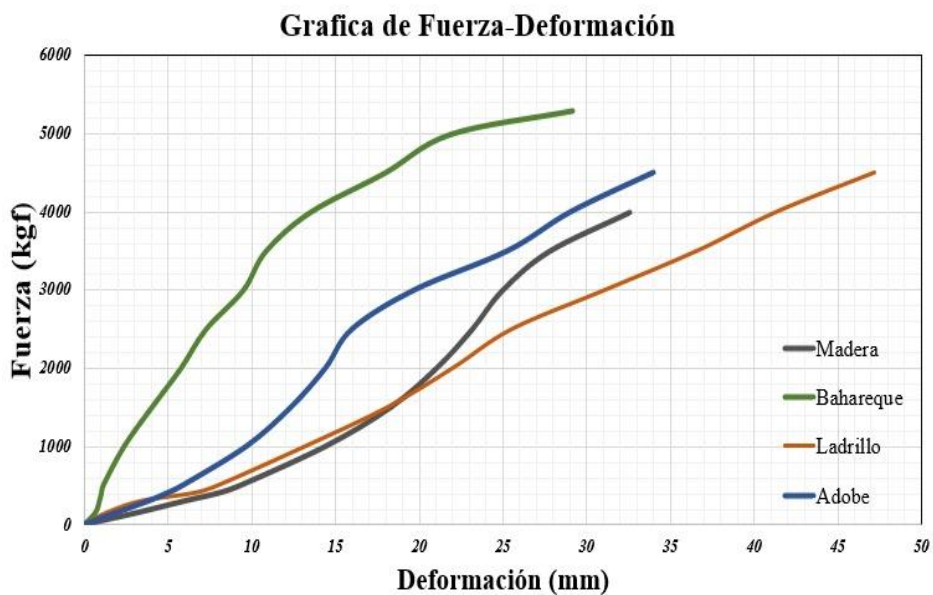


Figura 19. Curva fuerza-deformación de elementos estructurales.

Seguidamente, se presenta una tabla con las diferentes propiedades y características de los materiales que conforma la edificación:

Tabla 2. Propiedades mecánicas de los materiales.

MATERIAL	PROPIEDADES	ABRIVIATURAS	VALOR	Unid.
Madera	Módulo de Elasticidad	E	10389	Mpa
	Resistencia a Compresión	f'm	23	Mpa
	Módulo de Corte	Go	53	Mpa
Bahareque	Módulo de Elasticidad	Em	0.11	Mpa
	Resistencia a Compresión	f'm	0.81	Mpa
	Módulo de Corte	Gm	1.21	Mpa
Adobe	Módulo de Elasticidad	Em	123	Mpa
	Resistencia a Compresión	f'm	0.82	Mpa
	Módulo de Corte	Gm	0.32	Mpa
Ladrillo	Módulo de Elasticidad	Em	9.57	Mpa
	Resistencia a Compresión	f'b	1.093	Mpa
	Módulo de Corte	Gm	5.21	Mpa

Encontrar los valores de las cargas que actúan, tanto cargas vivas como cargas muertas, la rigidez en los entrepisos, rigidez rotacional (momento, rotación), y las masas respectivas actuantes fue indispensable, ya que con estos valores se ha podido realizar un modelamiento en el software ETABS y evaluar la edificación a través de la metodología pushover. Estos datos calculados se resumen en las tablas que se muestran a continuación.

Tabla 3. Masas y rigidez en cada uno de los niveles.

NIVELES	MASA m (kg)	RIGIDEZ DE ENTREPISO ks (kN/m)
Nivel 1	13639.61	292190.625
Nivel 2	7619.21	292190.625
Nivel 3	5600.17	292190.625

Tabla 4. Cargas en cada uno de los niveles.

Niveles	CARGA MUERTA (kN/m)	CARGA VIVA (kN/m)
----------------	------------------------------------	------------------------------

Nivel 1	3.79	2.4
Nivel 2	3.79	2.4
Nivel 3	3.78	2.4

El cálculo de los parámetros necesarios del resorte rotacional que se requiere incluir en el modelamiento se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Valores encontrados correspondientes al resorte rotacional.

	Momento (kN/m)	Rotación (rad)
A	0	0
B	60.19	0
C	40.12	0.020
D	20.06	0.040
E	0	0.610

Para el ingreso de estas cargas en el modelo se necesita una combinación de cargas la cual se denomina carga gravitacional (*QG*), de acuerdo con (ATC 3-06, 1978), *Consejo De Tecnología Aplicada*, esta carga de gravedad toma el 110% de la carga muerta y el 25% de la carga viva. Con los de los valores que proporcionan las tablas 3, 4 y 5 se ha realizado el modelamiento en el software, de tal modo que; los desplazamientos y el modo de deformación que se han obtenido al ejecutar el programa se muestran en la figura 20.

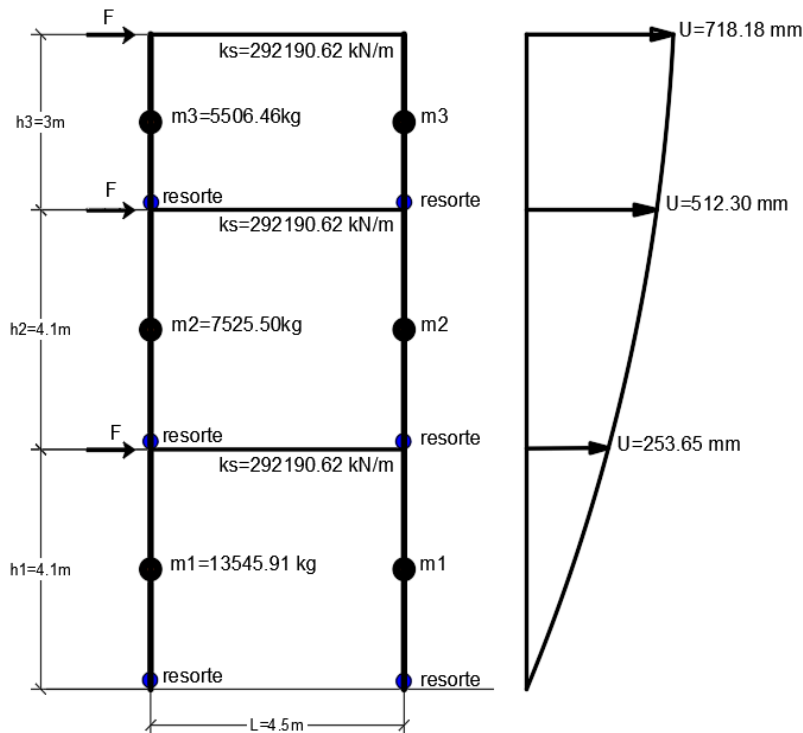


Figura 20. Modos y valores de desplazamientos.

En la tabla 6 se observa los desplazamientos que se han generado al momento de ejecutar el programa pushover.

Tabla 6. Desplazamientos encontrados con el software.

	CARGA LAT	DEZPLAZAMIENTO (U)
Nivel 1	1000 kN	0.718 m
Nivel 2	2000 kN	0.512 m
Nivel 3	3000 kN	0.254 m

Para el cálculo del desplazamiento objetivo, se toma como referencia las Normas: FEMA 356, NEC-15 y la ATC-306 para los coeficientes que se representa en la siguiente tabla:

Tabla 7. Valores de los coeficientes establecidos por la FEMA 273.

Nombre	Simbología	valor
Factor de modificación de un grado de libertad	C_0	1.3
Factor de modificación para desplazamiento inelástico.	C_1	1.0
Factor que representa la forma de histéresis.	C_2	1.2
Factor de modificación para el aumento del desplazamiento	C_3	1.0
Espectro de respuesta general	Sa	0.806
Aceleración de la gravedad	g	9.81 m/s^2
Periodo fundamental elástico	Ti	1.960 s
Periodo fundamental efectivo	Te	1,796 s

Por lo tanto, mediante la ecuación 8 el desplazamiento objetivo es:

$$\delta_T = 0.579 m$$

Con el desplazamiento objetivo obtenido, se presenta un gráfico que ilustra la relación entre la fuerza o capacidad de carga y el desplazamiento o deformación de la estructura del presente proyecto, en el marco de un análisis no lineal pushover. Esta curva de capacidades ofrece la posibilidad de evaluar el comportamiento sísmico de la estructura y de ajustar su diseño o aplicar medidas de refuerzo, si así se requiriese, con el objetivo de asegurar la seguridad y la integridad de la edificación.

En este caso de estudio, el valor del desplazamiento objetivo (δT) representado en la gráfica se sitúa dentro del rango completamente operativo. Este hecho indica que se encuentra dentro de los límites de un sistema plenamente funcional, lo que a su vez permite afirmar que la edificación sigue cumpliendo con los requisitos de un sistema estructural adecuado.

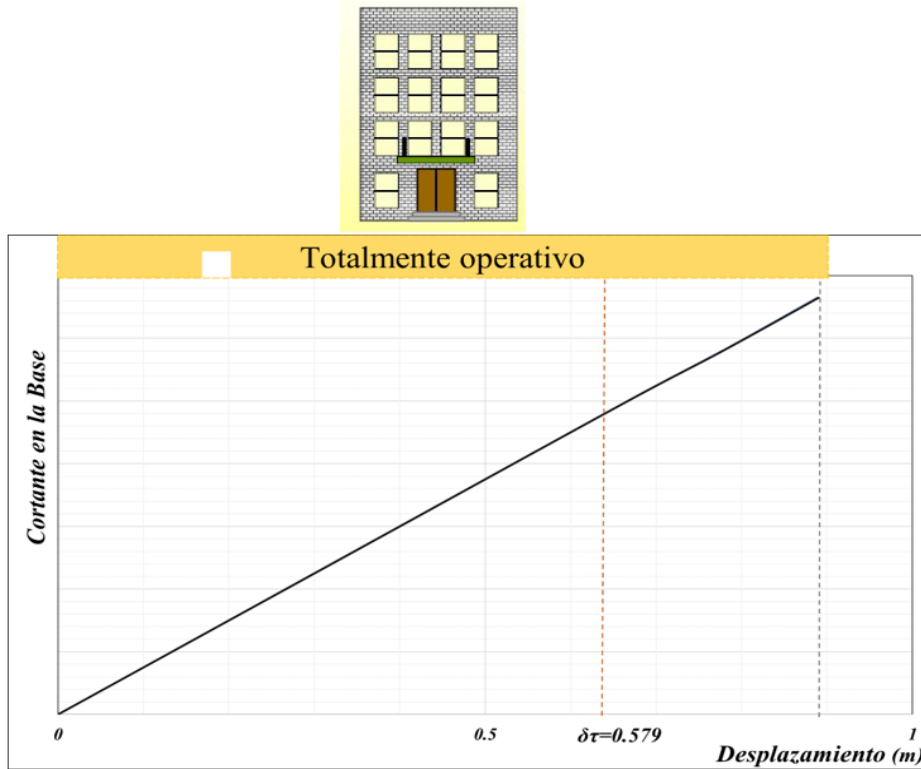


Figura 21. Curva de capacidad.

Análisis de Estabilidad de muro

Para realizar el análisis de estabilidad del muro se ha seguido las pautas que proporciona (Enciso, 217 C.E.) donde menciona que, si la línea de acción del peso se encuentra dentro de la base del muro, entonces significa que el muro es estable (figura 22a), caso contrario el muro es inestable (figura 22b).

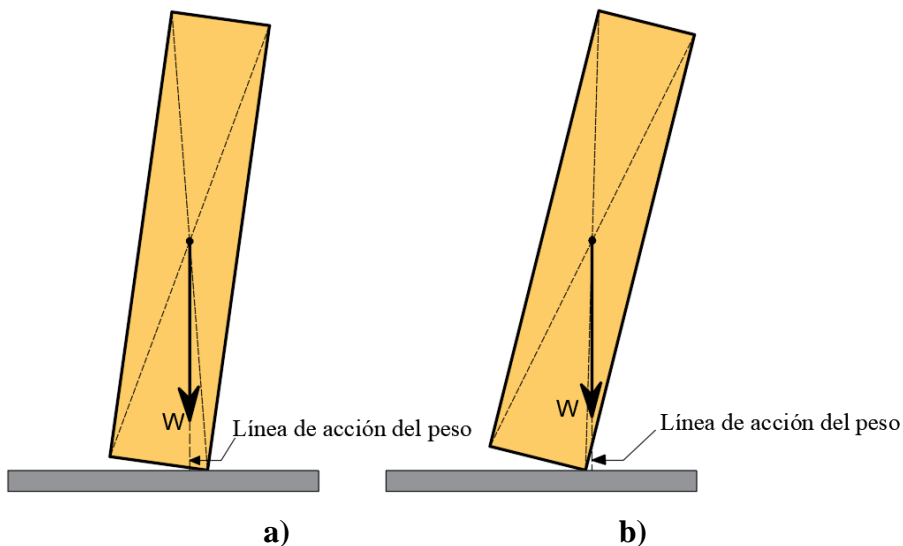


Figura 22. Muro inclinado estable (a), inestable (b).

Seguidamente, en la figura 23 se muestra el muro en su estado inicial con su respectivo esfuerzo normal de compresión que genera la acción del peso, mientras que en la figura 24 se muestra el muro inclinado luego de haber analizado mediante la metodología pushover, cuando el muro tiende a desplazarse el esfuerzo de compresión en uno de los extremos se incrementa. El primer caso (figura 23) considera un esfuerzo normal de 1.33 kg/cm^2 antes de que sea expuesto a fuerzas y desplazamientos.

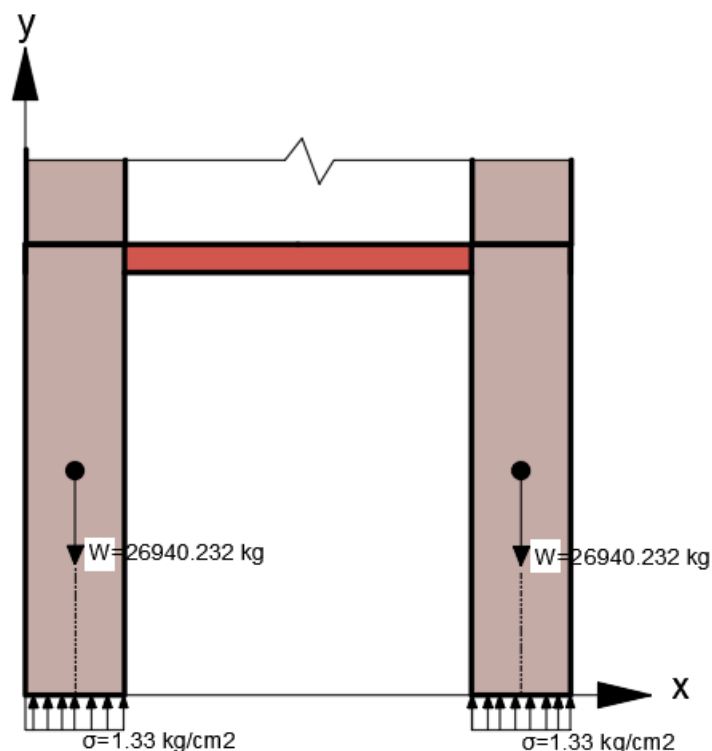


Figura 23. Muro en su estado inicial.

En el segundo caso (Figura 25), se presenta un sistema inclinado con desplazamiento en la parte superior. En este escenario, se ha determinado el desplazamiento objetivo, que a su vez se ha utilizado para calcular el ángulo de rotación, mismo que se emplea para identificar la región en el muro donde la presión aumenta a medida que se desplaza la parte superior. Los coeficientes del ángulo de rotación se presentan en la tabla a continuación, los cuales se obtuvieron mediante interpolación en el punto preciso de 0.579 m de desplazamiento.

Tabla 8. Coeficientes de relación ángulo-rotación

<i>Desplazamiento</i> <i>U (m)</i>	<i>Momento</i> <i>M3 (N-m)</i>	<i>Rotación</i> <i>R3 (rad)</i>
0.579	43025.43	0.050

La Figura 24 representa un esquema de referencia empleado para calcular la distancia en la que se produce un aumento en el esfuerzo cuando un muro experimenta un desplazamiento lateral. Se aprecia que el área de contacto entre la base rígida y el muro varía a medida que el muro

experimenta una rotación debido a las fuerzas sísmicas. Conforme el área de contacto disminuye, el esfuerzo en el adobe aumenta, lo que subraya la importancia de evaluar si, durante este proceso, los niveles de esfuerzo en el adobe no superan el esfuerzo máximo admisible.

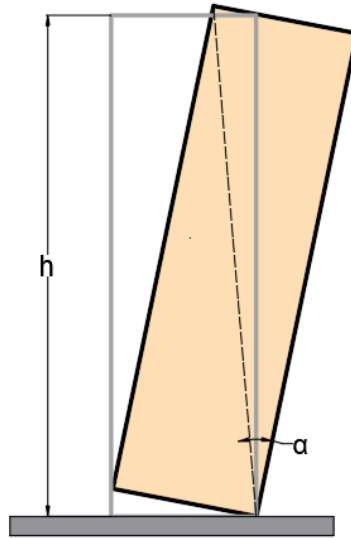


Figura 24. Muro sujeto a desplazamiento lateral.

Utilizando el área de contacto cuando el muro llega a su desplazamiento objetivo el esfuerzo de volcamiento en el adobe es de $\sigma_{vol} = 2.89 \text{ kg/cm}^2$, inferior al esfuerzo admisible $\sigma_{adm} = 4.1 \text{ kg/cm}^2$ y al esfuerzo máximo $\sigma_{max} = 8.2 \text{ kg/cm}^2$.

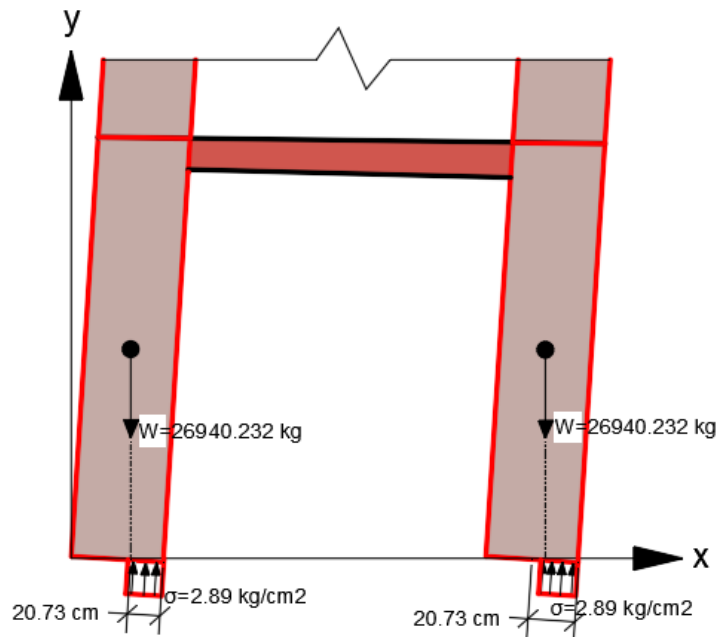


Figura 25. Muro expuesto al volteo.

La resistencia estructural alcanza su límite cuando se llega al esfuerzo admisible, por lo tanto, se dice que:

$$\sigma_{vol} > \sigma_{Adm} < \sigma_{max}$$

V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los ensayos de materiales, incluyendo las curvas de fuerza-deformación, son esenciales en el proceso de restauración de edificaciones. Estos resultados han permitido comprender cómo se comportan los materiales en condiciones específicas y tomar decisiones informadas para garantizar la seguridad y eficiencia de las estructuras. La información obtenida en esta etapa fue importante para la interpretación del estado actual de la edificación.

Dos aspectos muy importantes se ponen en consideración al momento de analizar un bien patrimonial, por un lado, está la conservación del patrimonio mientras que la otra parte está enfocada en la seguridad estructural. Se sabe que en este tipo de edificaciones o bienes existen políticas donde ponen por objetivo principal la autenticidad, la estética y el valor cultural de las mismas, especialmente en los centros históricos, mientras que del otro lado existen normativas donde mencionan los requisitos de diseño y algunos coeficientes que deben cumplirse al fin de asegurar la estructura ante desastres naturales como por ejemplo, el movimiento telúrico de tal modo que se pueda salvaguardar la vida de las personas.

Al ser dos temas de esencial importancia en el presente trabajo se ha considerado las dos partes, la conservación del patrimonio como tal y el cumplimiento de las recomendaciones de algunas normas normativas que se han revisado conforme se ha avanzado en el desarrollo del trabajo, al ser un análisis de conservación patrimonial se ha adaptado a diversas recomendaciones en vista de que no existe una normativa específica.

El análisis estructural no lineal pasa a ser parte fundamental en este trabajo al permitir una representación aproximada de cómo se comporta la estructura ante cargas externas, lo cual da como resultado la capacidad de resistencia que tiene la estructura y la identificación de áreas críticas que requieren refuerzos. Al evaluar la estructura en su capacidad de resistencia a lo largo del tiempo, se pueden tomar medidas preventivas para evitar costosos trabajos de reparación.

Los desplazamientos han sido obtenidos a través del mencionado análisis no lineal pushover, como ya se ha indicado en la figura 20, teniendo un desplazamiento de 253,65 mm, 512,30 mm y 718,18 mm respectivamente, mismo que conlleva al análisis de la estabilidad del muro. Con todas las cargas respectivas actuantes en la estructura evidentemente el muro es estable, sin embargo, debido a patologías presentes, es necesario la intervención a fin de reforzar el comportamiento de estabilidad, todo esto tomando en consideración que para dicho análisis se ha elegido el más desfavorable ya que se ha tomado como masa crítica muraria de la edificación.

La revisión de la FEMA 356, 273, NEC-15 y la ATC-03 se torna esencial en el Se llevó a cabo el análisis de una estructura patrimonial ubicada en el centro histórico del cantón Cuenca, este estudio tiene como objetivo evaluar la condición y la integridad de la vivienda, así como dar algunas recomendaciones de intervención teniendo en cuenta las normativas nacionales y locales. La edificación es de construcción mixta, está compuesta por vigas, columnas, entresijos y cubierta de madera, así como muros portantes de adobe, bahareque y paredes de ladrillo. A partir de estas regulaciones se deriva la determinación del desplazamiento objetivo, siendo el mismo de 0.579 m. Este desplazamiento, por su parte, constituye un parámetro crítico para el cálculo de los esfuerzos experimentados en un borde específico del muro cuando está sometido a cargas externas.

VI. CONCLUSIONES

Los materiales que han experimentado un mayor grado de afectación son la madera y el adobe, evidenciando manifestaciones patológicas tales como la presencia de humedad, la degradación y la descomposición, factores que comprometen la integridad de los demás elementos estructurales al hacerlos susceptibles a las fuerzas sísmicas a las que la naturaleza pueda exponerlos.

A través de la conceptualización de un segmento representativo de la masa crítica muraría, se ha llevado a cabo un análisis de la estabilidad de los muros que conforman la estructura edificada, de modo que se ha determinado que el muro analizado se encuentra estable, ubicándose en la zona totalmente operativa en la gráfica de la curva de capacidad.

El análisis estructural no lineal en edificaciones patrimoniales es un tema que requiere un enfoque equilibrado. Si bien puede brindar beneficios significativos en términos de seguridad sísmica y conservación a largo plazo, también presenta desafíos en términos de alteración del valor histórico. El punto aquí es encontrar un equilibrio entre la seguridad estructural y la preservación del patrimonio cultural, buscando soluciones que minimicen el impacto en la autenticidad de las edificaciones históricas. Además, es crucial que cualquier intervención en edificaciones patrimoniales sea realizada por profesionales expertos en conservación y con un profundo respeto por la historia y el valor cultural de estos monumentos.

VII. RECOMENDACIONES

Es recomendable emplear un sistema de refuerzo como son las geomallas, que cubre toda la superficie e integrando una capa de mortero de barro incrustado en la geomalla. Este enfoque mejora la resistencia a la flexión y la ductilidad de los muros, proporcionando una protección de las paredes para disipar la energía durante un sismo y reducir el riesgo de colapso.

Otra solución es la implementación de un refuerzo mediante grapas de madera dispuestas transversalmente sobre las estructuras de adobe afectadas por fisuras. Este procedimiento consiste en la inserción de grapas a lo largo de la grieta en un patrón de disposición transversal, creando así una configuración que se asemeja a un "puente" que abarca la fisura. Este refuerzo busca fortalecer y estabilizar el muro de adobe, y ayuda a prevenir la propagación de grietas. Además, agregan resistencia y rigidez al sistema estructural, mejorando la capacidad para resistir cargas y movimientos.

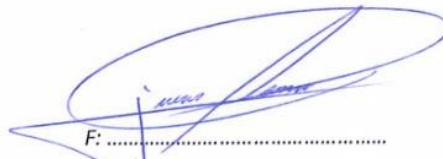
Es aconsejable que los muros construidos con adobe se rijan sobre cimientos sólidos y estén diseñados para una única planta. Asimismo, se requiere un control preciso de la altura de dichos muros, ya que no debe superar ocho veces el espesor de su base, y en ningún caso debe exceder los 3.5 metros. En lo que respecta a las aberturas en los muros, estas no deben sobrepasar un tercio de la longitud total del muro, y ninguna de ellas debe tener una anchura mayor a 1.2 metros.

VIII. REFERENCIAS

- ASTM. (2000). *Métodos de prueba estándar para pequeños especímenes claros de madera*. 1–31.
- ATC 3-06. (1978). *TENTATIVE PROVISIONS FOR THE DEVELOPMENT OF SEISMIC REGULATIONS FOR BUILDINGS*.
- Broto. (2016). *Enciclopedia Broto de Patologías de la Construcción*. https://higieneysseguridadlaboralcv.s.files.wordpress.com/2012/07/enciclopedia_broto_de_patologias_de_la_construccion.pdf
- Carnevale, E., Rakotomamonjy, B., Sevillano, E., María, G., & Abad, L. (2015). *FUENTES DE IMÁGENES E ILUSTRACIONES Panasonic apoya el desarrollo sostenible a través de la educación y la conservación del Patrimonio Mundial de la UNESCO*.
- Chacón, J., Suquillo, B., & Sosa, D. (2021). Evaluación y Reforzamiento de una Estructura Patrimonial de Adobe con Irregularidad en Planta. *Revista Politécnica*, 47, 1–14.
- Diamantopoulos, S., & Fragiadakis, M. (2017). SIMPLE MODELS FOR THE SEISMIC RESPONSE OF RIGID OR FLEXIBLE BLOCKS. *ECCOMAS Proceedia*, 1–19.
- Enciso, C. R. (217 C.E., May 3). *Análisis de estabilidad de muros de mampostería*.
- ICOMOS. (19664). *CARTA INTERNACIONAL SOBRE LA CONSERVACION Y LA RESTAURACION DE MONUMENTOS Y SITIOS (CARTA DE VENECIA 1964)*.
- Juménez Moncayo, L. E. (2017). *ANÁLISIS SÍSMICO Y PROPUESTA DE REFORZAMIENTO MEDIANTE EL CÓDIGO ASCE 41 APLICADO AL EDIFICIO SANTACRUZ*. Universidad de Ferzas Armadas ESPE.
- Lozano Jaramillo, D. M. (2022). *PROPUESTA DE REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL DE UNA EDIFICACIÓN PATRIMONIAL DE MADERA, UBICADA EN LA PARROQUIA ESMERALDAS, CANTÓN ESMERALDAS, PROVINCIA ESMERALDAS, EN EL AÑO 2021*. Universidad Politécnica Salesiana sede Quito.
- Morán, M., & Álvarez, O. (2017). Comportamiento sísmico de los muros de adobe en edificaciones patrimoniales. *Revista Cubana de Ingeniería*, VIII, 1–11.
- Municipalidad de Cuenca. (2010). *ORDENANZA PARA LA GESTIÓN Y CONSERVACIÓN DE LAS ÁREAS HISTÓRICAS Y PATRIMONIALES DEL CANTÓN CUENCA* (pp. 1–22).
- NCh3332. (2013). *NORMA CHILENA NCh3332 Estructuras-Intervención de construcciones patrimoniales de tierra cruda-Requisitos del proyecto estructural Structural design-Retrofitting of historic earth buildings-Requirements for the structural design planning*. www.inn.cl
- NEC. (2015). *RIESGO SÍSMICO, EVALUACIÓN, REHABILITACIÓN DE ESTRUCTURAS*.
- Paez, J., & Perez, J. (2014). *ESTUDIO PATOLOGICO PRELIMINAR EN ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERIA COMO CASO ESTUDIO LA FACHADA ORIENTAL DEL EDIFICIO ALBERTO E. ARIZA (ARCOS), DE LA UNIVERSIDAD SANTO TOMAS*. Universidad de Santo Tomás.
- Sánchez, D., & González, R. (2011). *Cálculo de elementos estructurales* (Primera edición).
- UNESCO. (2011). *RECOMENDACIÓN SOBRE EL PAISAJE URBANO HISTÓRICO* (pp. 1–9).

Milton Javier Lema Lema portador(a) de la cédula de ciudadanía N° **0302640461**. En calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación **“Rehabilitación estructural de edificaciones patrimoniales. Caso de estudio edificación en el centro histórico de Cuenca”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos y no comerciales. Autorizo además a la Universidad Católica de Cuenca, para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Azogues, 16 de noviembre de 2023



F:

Milton Javier Lema Lema

C.I. 0302640461



Luis Santiago Zhumi Sucuzhañay portador(a) de la cédula de ciudadanía N° 0302417605. En calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación **“Rehabilitación estructural de edificaciones patrimoniales. Caso de estudio edificación en el centro histórico de Cuenca”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos y no comerciales. Autorizo además a la Universidad Católica de Cuenca, para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Azogues, 16 de noviembre de 2023



F:

Luis Santiago Zhumi Sucuzhañay

C.I. 0302417605