

## Brick masonry accumulated damage assessment of the “Basílica de la Santísima Trinidad”

### Evaluación del daño acumulado en la mampostería de ladrillo de la “Basílica de la Santísima Trinidad”

#### Autores:

Castellanos-Guzmán, Steeven Paul  
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA, ECUADOR  
Ingeniero civil  
Cuenca – Ecuador



[steeven.castellanos.96@est.ucacue.edu.ec](mailto:steeven.castellanos.96@est.ucacue.edu.ec)



<https://orcid.org/0000-0002-6548-5227>

Maldonado-Noboa, Juan  
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA, ECUADOR  
Docente Tutor del área  
Cuenca – Ecuador



[jmaldonadon@ucacue.edu.ec](mailto:jmaldonadon@ucacue.edu.ec)



<https://orcid.org/0000-0001-5329-2201>

Fechas de recepción: 25-AGOS-2024 aceptación: 16-OCT-2024 publicación: 15-DIC-2024



<https://orcid.org/0000-0002-8695-5005>

<http://mqrinvestigar.com/>



## Resumen

El objetivo general de este estudio fue evaluar el daño acumulado en la mampostería de ladrillo confinado de la Basílica de la Santísima Trinidad y calcular su desempeño estructural. Los objetivos específicos incluyeron caracterizar la mampostería mediante elementos finitos, identificar patrones de grietas y compararlos con los observados en la basílica, así como calcular la curva de capacidad y el desempeño sísmico según ASCE 41-17.

Para ello, se empleó una metodología dual. Primero, se realizó una revisión detallada de los registros existentes sobre el estado de la mampostería, documentando los daños previos y los patrones de grietas. Posteriormente, se desarrolló un modelo computacional utilizando el software DIANA FEA, que permitió simular las propiedades mecánicas y el comportamiento estructural bajo distintas condiciones.

Los resultados mostraron que el software DIANA FEA puede representar adecuadamente la estructura, con coherencia en los esfuerzos, deformaciones y grietas observadas. La curva de capacidad indicó un cambio de rigidez a un desplazamiento de 0.3 cm, ingresando al rango no lineal y alcanzando una resistencia máxima de 39.9 toneladas-fuerza. Bajo cargas sísmicas, se identificaron grietas significativas, confirmando la vulnerabilidad de la estructura. Sin embargo, el desempeño observado es funcional, lo que indica una capacidad remanente de deformación y daño ligero.

**Palabras clave:** Evaluación de daño; Mampostería; DIANA FEA; Análisis no lineal; Desempeño sísmico



## Abstract

The general objective of the study was to assess the accumulated damage on the confined brick masonry of the “Basilica de la Santísima Trinidad” and calculate its structural performance. Specific objectives included characterizing the masonry by finite elements and identify crack patterns to compare them with the ones of the basilic, as well as, calculate the curve capacity and seismic performance according to ASCE 41-17.

For its purpose a dual methodology was employed. A detailed review of the existing records on the current masonry state at first, documenting previous damage and crack patterns, later on, a computational model was developed using DIANA FEA software which allowed to simulate its mechanical properties and structural behavior under different seismic conditions.

The results show that DIANA FEA software can adequately represent the structure, with consistency in the observed stresses, deformations, and cracks. The capacity curve indicated a change in stiffness at 0.3cm of displacement, entering to the nonlinear range and reaching a maximum resistance of 39.9 tons-force. Under seismic loads, significant cracks were identified, confirming the structure's vulnerability. However, the observed performance is functional, indicating a remaining capacity for deformation and minor damage.

**Keywords:** Damage assessment; Masonry; DIANA FEA; Nonlinear analysis; Seismic performance

## Introducción

Ecuador es un país altamente sísmico debido a que se ubicado en una zona de subducción con la placa tectónica de Nazca y la placa Continental Sudamericana. (Ordoñez Sacapi & Salazar Riera, 2023), lo que genera vulnerabilidad sísmica en sus construcciones. La Basílica de la Santísima Trinidad es el núcleo de la Universidad Católica de Cuenca, representa mucho más que religión sino también una construcción de forma paralelepípedo rectangular levantada en medio de mampostería de ladrillo visto. Este emblemático edificio es un símbolo de la historia y cultura que se ha transmitido a lo largo del tiempo. Su infraestructura es testigo de un legado que debemos conservar para generaciones futuras. Últimamente, se observó en la mampostería agrietamientos, lo que nos produjo a realizar una evaluación no lineal detallada de su condición del muro lateral. Este análisis no se limitó a una inspección técnica; lo consideramos un análisis no lineal de albañilería crucial para preservación de la salud estructural.

La evaluación del daño acumulado en estructuras históricas de mampostería es vital para garantizar su conservación y seguridad. En este contexto, es necesario analizar el desempeño estructural de la Basílica de la Santísima Trinidad, que ha mostrado un deterioro significativo debido a factores como el daño acumulado y la acción sísmica. La problemática de investigación se enfoca en comprender cómo este daño afecta la integridad del edificio y cómo puede caracterizarse y evaluarse mediante técnicas avanzadas, como el análisis de elementos finitos a través del software DIANA FEA, complementado con la comparación de patrones de grietas observadas y una evaluación detallada de su desempeño sísmico conforme a las recomendaciones del ASCE 41-17.

Para abordar esta problemática, se definieron criterios metodológicos que combinan enfoques cualitativos y cuantitativos. La elección del método se fundamenta en la observación y revisión exhaustiva de registros previos de daños, junto con el desarrollo de un modelo computacional utilizando el software DIANA FEA. Esta herramienta permite simular las propiedades mecánicas de la mampostería de ladrillo y analizar su comportamiento bajo diferentes condiciones, aportando información relevante para la toma de decisiones en la conservación del edificio.

En línea con los objetivos de la investigación, se plantea caracterizar la mampostería de la basílica mediante un enfoque basado en elementos finitos, que permita estudiar tanto su comportamiento elástico como plástico. Además, se pretende identificar y comparar los patrones de grietas generados por el modelo computacional con los observados in situ, proporcionando así una validación empírica del análisis. Finalmente, se busca calcular la curva de capacidad de la estructura y el punto de desempeño utilizando el método de coeficientes del ASCE 41-17 para evaluar su desempeño sísmico frente a un evento telúrico, lo cual permitirá entender su resistencia actual y las posibles intervenciones necesarias para su preservación.



Esta investigación se justifica por la importancia de caracterizar el patrimonio edificado en zonas históricas, como el Centro Histórico de Cuenca (CHC), Ecuador. Los análisis detallados de vulnerabilidad sísmica dependen de extensos conjuntos de datos que describan con precisión las construcciones. Estudios previos, como el de (Quezada Zambrano, Jimenez Pacheco, & Garcia Erazo, 2021), se enfocan en la caracterización geométrica de las edificaciones patrimoniales del CHC, incluidas las de adobe y ladrillo, utilizando métodos como el análisis de la Base de Datos Catastral, revisión de tesis en arquitectura y examen de expedientes de intervenciones en edificaciones. Estos estudios concluyen que la modelización numérica de estas tipologías es factible utilizando el software actual de análisis sísmico para edificios de mampostería.

Asimismo, la arquitectura tradicional en Ecuador enfrenta desafíos significativos debido a factores como la globalización, el abandono y la falta de estrategias efectivas de gestión y preservación, como se observó en la parroquia rural de Quingeo, Azuay. Investigaciones recientes (López Suscal & Aguirre Ullauri, 2023) han enfatizado la necesidad de analizar, identificar y priorizar los riesgos y vulnerabilidades específicos en la arquitectura patrimonial, implementando métodos innovadores como la estratigrafía muraria y la matriz de análisis de riesgos. Estos estudios concluyen con la creación de protocolos de conservación que pueden aplicarse en otras áreas patrimoniales.

A nivel internacional, se ha destacado la importancia de la evaluación de daños en edificios históricos de mampostería, como señalan (Clementi, Formisano, Milani, & Ubertini, 2021). La evaluación de la salud estructural es un reto en estructuras heterogéneas y complejas, especialmente en países como Italia, que cuenta con un alto riesgo sísmico y un abundante patrimonio arquitectónico. La vigilancia de la salud estructural se vuelve crucial para predecir el comportamiento y el estado de conservación de edificios de importancia histórica y artística.

Este enfoque integrado no solo contribuye a una mejor comprensión del estado actual de la Basílica de la Santísima Trinidad, sino que también aporta una metodología aplicable a otras edificaciones de mampostería con características similares, consolidando así las prácticas de evaluación y conservación del patrimonio arquitectónico frente a amenazas sísmicas. Este artículo, más allá de ser un diagnóstico, constituye un plan de acción para preservar la infraestructura como un pilar de historia, cultura y educación.

## Material y métodos

La metodología utilizada en esta investigación se basó en un enfoque dual para la recopilación y análisis de datos. En primer lugar, se llevó a cabo una observación detallada junto con una revisión exhaustiva de los registros existentes sobre el estado actual de la mampostería de la Basílica. Esto incluyó la documentación de daños previos, la



identificación de patrones de grietas y la evaluación de la existencia de intervenciones pasadas. En segundo lugar, se desarrolló un modelo computacional mediante el software DIANA FEA, aplicando técnicas de análisis de elementos finitos. Este enfoque permite simular con precisión las propiedades mecánicas y el comportamiento estructural de la mampostería bajo diferentes condiciones, para la caracterización y evaluación del desempeño sísmico de la estructura (Espinoz Chácara, 2018).

### **Caracterización de los daños en la zona de estudio**

El primer paso de la investigación se centró en la recolección de información y visitas de campo enfocadas en los daños acumulados en la mampostería de la Basílica de la Santísima Trinidad. Durante estas visitas, se llevó a cabo un registro fotográfico detallado para documentar visualmente el estado actual de las estructuras. Se examinaron cuidadosamente las secciones más afectadas del edificio, seleccionadas en función del nivel de deterioro observado, incluyendo grietas, desprendimientos y otros signos de daño estructural. Estas patologías fueron descritas de manera precisa, para posteriormente ser utilizadas en la comparativa con los resultados de la modelación y análisis computacional con el software DIANA FEA, siguiendo los lineamientos del ASCE 41-17.

### **Modelamiento estructural**

La modelización se realizó a una escala detallada, considerando los modelos constitutivos y energía de los materiales que componen la mampostería, específicamente los ladrillos de la Basílica de la Santísima Trinidad y el mortero. Este enfoque permite simular con precisión la mecánica del daño mostrado en grietas a base de energía y analizar la respuesta estructural de la mampostería bajo condiciones sísmicas (Bueno Cadena, 2016). El muro modelado se compone de ladrillos de dimensiones de 28 cm de longitud, 13.8 cm de profundidad y 8.5 cm de altura, como se muestra en la Figura 1. Las juntas de mortero, tanto horizontales como verticales, tienen un espesor de aproximadamente 1 cm. La geometría de la mampostería y sus materiales corresponden a las dimensiones y características observadas durante la inspección visual de la estructura. Las paredes principales tienen una altura de 11 m y una longitud de 7.98 m, con un espesor equivalente a una hilada de ladrillos y mortero. El muro incluye diversos elementos arquitectónicos, como ventanas y arcos, cuya presencia se ha considerado en el modelo computacional para evaluar su influencia en la distribución de las tensiones y el desarrollo de grietas.

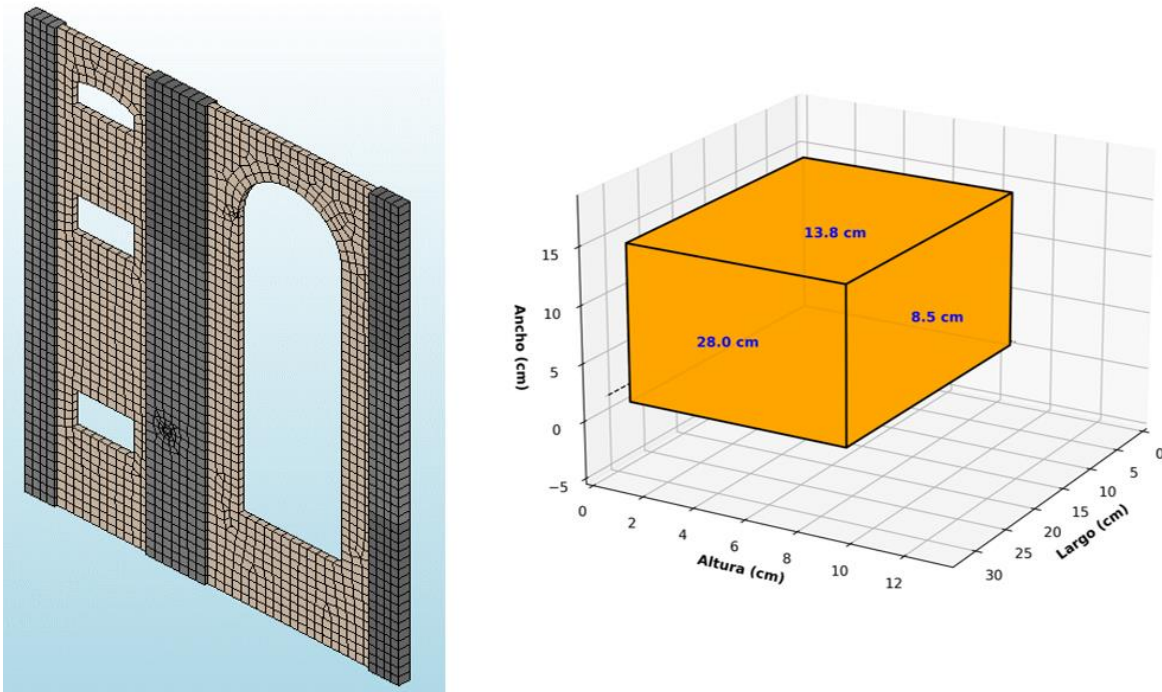


**Figura 1**  
 Geometría de la mampostería de la Basílica de la Santísima Trinidad en la universidad Católica de Cuenca



Fuente: Elaboración propia

**Figura 2**  
 Modelo computacional en DIANA FEA y dimensiones de ladrillo



Fuente: Elaboración propia

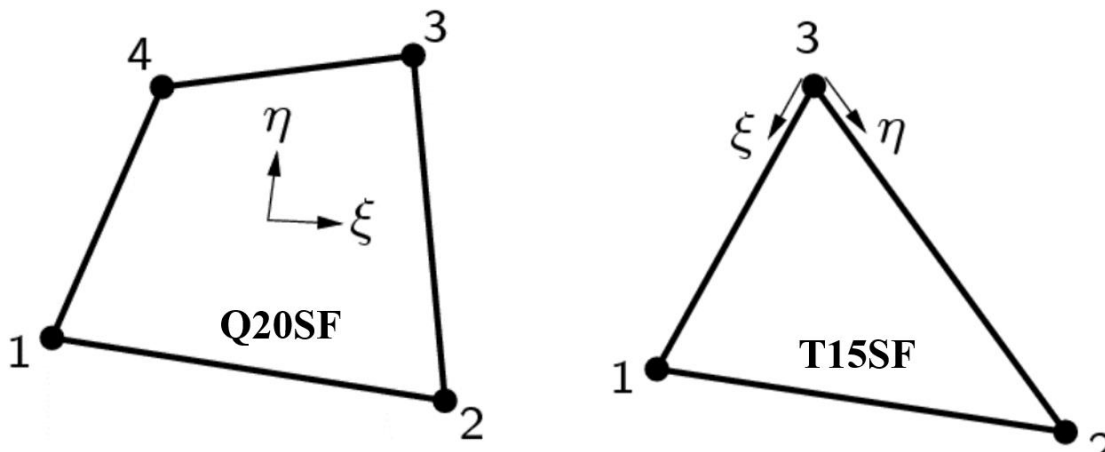
En el modelamiento estructural de la basílica, se han utilizado elementos tipo shell debido a la geometría compleja y las características estructurales de la edificación. Los elementos shell permiten representar con precisión tanto las propiedades de flexión como las de membrana de la estructura. Para este modelado, se han seleccionado dos tipos de elementos shell: Q20SH y T15SH (Ferreira, 2024).

1. Q20SH: Este es un elemento cuadrilateral de cuatro nodos con 20 grados de libertad en total. Emplea una interpolación lineal y una integración numérica por la regla de Gauss 2x2 en el área del elemento. Para el espesor, utiliza la integración de Simpson de tres puntos por defecto en la dirección  $\zeta$ . Las propiedades del material y el espesor se mantienen uniformes en la dirección  $\zeta$  y los desplazamientos en cada nodo incluyen tanto variables de traslación como de rotación (Chai, 2020).

2. T15SH: Es un elemento triangular de tres nodos con un total de 15 grados de libertad. Este elemento utiliza una interpolación lineal con una integración de área basada en tres puntos. Además, realiza la integración de Simpson de tres puntos en la dirección  $\zeta$  para el espesor. Este tipo de elemento se utiliza para representar superficies curvas con mayor precisión y mantener la continuidad de las deformaciones (Chai, 2020).

**Figura 3**

Elementos shell isoparamétricos Q20SF y T15SF con coordenadas locales



Fuente: (Chai, 2020)

### Configuración de los materiales

El modelo "Total Strain Crack Model" se basa en el concepto de deformaciones totales, donde el esfuerzo se relaciona con la deformación a través de modelos constitutivos específicos del material. Los esfuerzos se calculan en la dirección de las grietas. La



orientación de estas grietas puede cambiar constantemente siguiendo la dirección principal de las deformaciones, o puede fijarse una vez que comienza el proceso de agrietamiento.

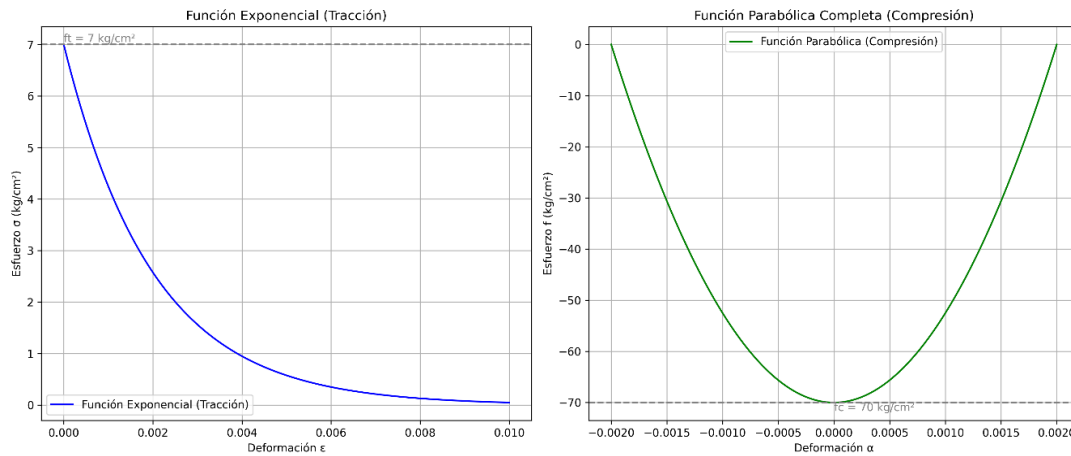
Cuando la dirección de la grieta se actualiza continuamente, se conoce como "Modelo de Grieta Rotante". Este enfoque, relacionado con el concepto de "Rotating Smeared Crack" propuesto por (Cope, Rao, Clark, & Norris, 1980), implica que los ejes de ortotropía del material giran junto con los ejes de la deformación principal. Este método es atractivo desde un punto de vista ingenieril porque simplifica la especificación de curvas no lineales de esfuerzo-deformación en las direcciones principales. Sin embargo, (Bazant, 1983) señaló algunas objeciones a este concepto, principalmente porque la rotación de los ejes del material implica que los ejes de esfuerzo principal pueden desviarse de los ejes de deformación principal. Esto provoca inconsistencias en las curvas de esfuerzo-deformación, a menos que se apliquen ciertas reglas de transformación que tengan en cuenta estas desviaciones.

En contraste, cuando la dirección de la grieta se fija una vez que el agrietamiento comienza, se denomina "Modelo de Grieta Fija". Aquí se puede aplicar el concepto de "Fixed Smeared Crack con Descomposición de Deformaciones". Este enfoque propone que la deformación total del material agrietado se divida en una parte que corresponde al agrietamiento y otra que corresponde al material sólido situado entre las grietas. Esta distinción permite una representación más precisa de las características del material, separando completamente el efecto de las grietas del comportamiento del sólido que las rodea. Este método se emplea para modelar con más detalle la respuesta estructural, utilizando coordenadas globales y considerando incrementos de deformación para la actualización del vector de deformación (Rots & Blaauwendraad, 1989).

Para representar las deformaciones en la dirección de la grieta, se emplea una matriz de transformación, que se calcula a partir de las características del tensor de deformación. Las ecuaciones del material se formulan en este sistema de coordenadas alineado con la grieta y luego se traducen al sistema de coordenadas global mediante esta matriz de transformación. Durante la aplicación de cargas, el material puede experimentar tracción o compresión, resultando en agrietamiento o aplastamiento. El proceso de deterioro se controla mediante ciertas variables de daño. Las condiciones de carga, descarga y recarga también se regulan para reflejar la pérdida de rigidez del material (Rots & Blaauwendraad, 1989).

La relación entre el esfuerzo y la deformación en una dirección específica de la grieta se ajusta mediante una función que depende del estado del material y de la historia de carga y descarga. En el software DIANA FEA, la tracción se puede modelar mediante funciones basadas en la energía de fractura, como un modelo con función exponencial. Existen también modelos que se basan en la deformación máxima, como el modelo lineal, que no dependen directamente de la energía de fractura. La función exponencial incluye términos que consideran la resistencia a la tracción y la energía asociada a la fractura del material. Para el comportamiento en compresión, se utilizan modelos basados en la energía de fractura, como el modelo con función parabólica (Lourenco, Angelill, & Milani, 2014).

**Figura 4**  
 Modelos Constitutivos de Material: Respuesta en Tracción y Compresión

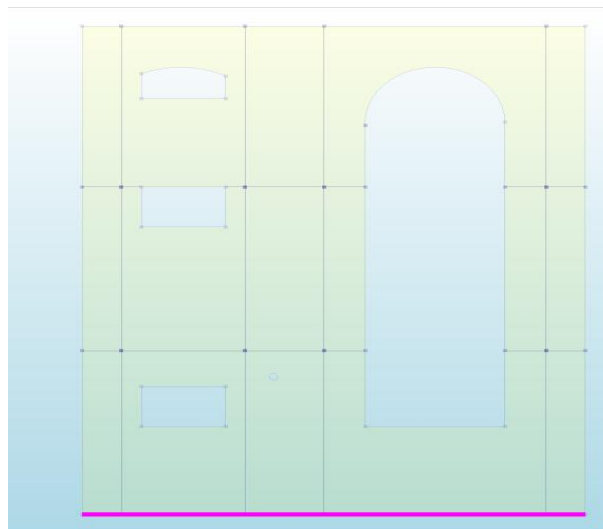


Fuente: Elaboración propia

### Modelo computacional en DIANA FEA

El modelo computacional se desarrolló en DIANA FEA, utilizando un sistema de empotramiento en la base para representar las condiciones reales del edificio, como se muestra en la figura 5. En cada nivel, se colocaron puntos maestros que controlan el movimiento del diafragma rígido, mientras que los demás nodos actúan como puntos esclavos siguiendo a los maestros. Esta configuración se aplica en todos los niveles de la estructura para asegurar la correcta interacción, se muestra lo anterior en la figura 6.

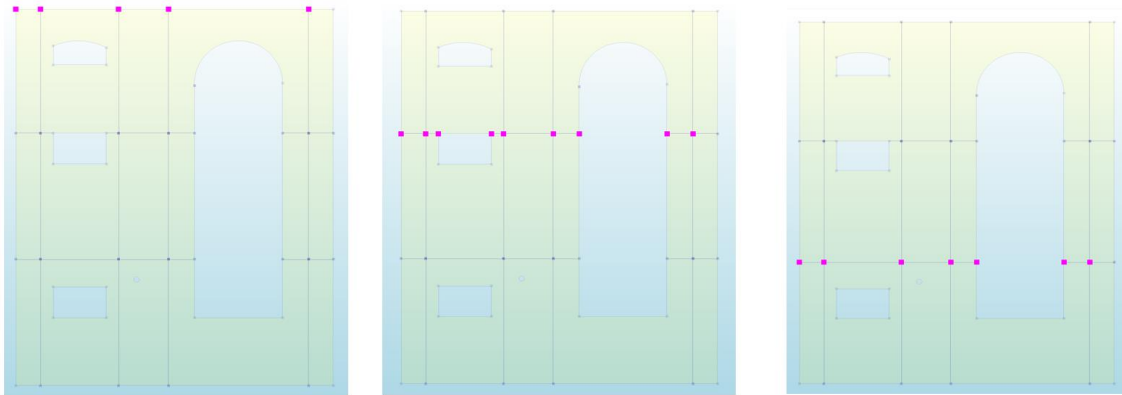
**Figura 5**  
 Empotramiento en la Base del Modelo Estructural



Fuente: Elaboración propia



Figura 6 Nodos de Control y Puntos Esclavos para Diafragmas Rígidos

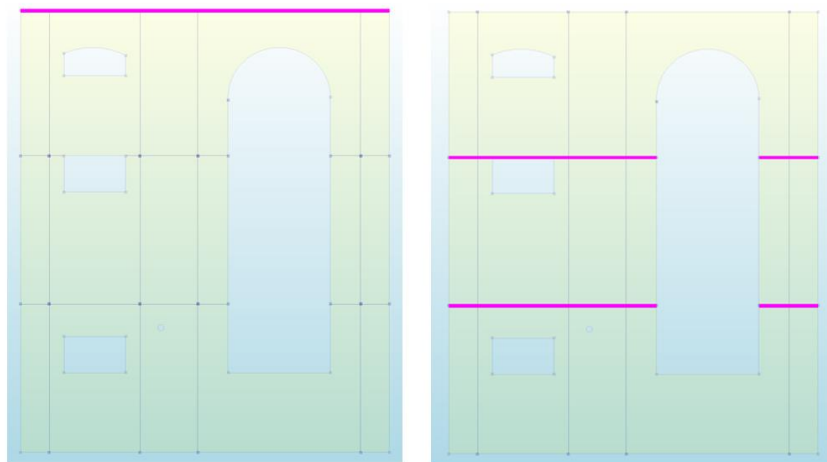


Fuente: Elaboración propia

En cada nivel, se asignó el peso correspondiente como carga distribuida para simular con precisión la masa del edificio, tomando en cuenta la diferencia de la masa en la azotea y primer y segundo nivel como se muestra en la figura 7. La carga lateral aplicada se definió acorde al modo fundamental de vibración, representando fielmente el comportamiento dinámico de la estructura. El desplazamiento resultante debido a esta carga lateral se ilustra en la Figura 8, donde se observa el perfil de deformación de la edificación. El análisis se realizó en base al desplazamiento, pero antes de esto, se aplicó una carga gravitacional que incluyó el 100% de la carga muerta y el 50% de la carga viva. Para el proceso de cálculo, se utilizaron métodos y criterios específicos, empleando el método iterativo de Newton-Raphson con un máximo de 400 iteraciones. Además, se seleccionó el primer tangente como "Tangencial", se activó la búsqueda de línea y la opción de iteración continua. En cuanto a los criterios de convergencia, se optó por satisfacer todas las normas especificadas, tomando en cuenta tanto la energía como el desplazamiento para garantizar la precisión del análisis.

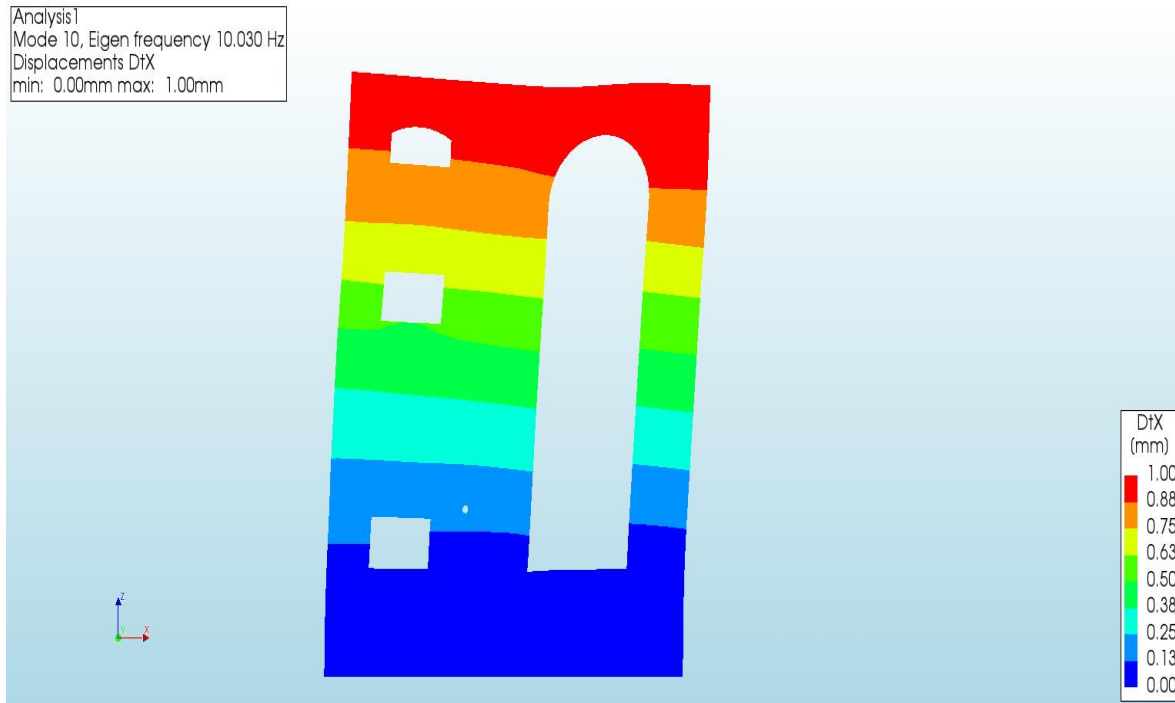
**Figura 7**

Asignación de Cargas Distribuidas en Cada Nivel



Fuente: Elaboración propia

**Figura 8**  
Desplazamiento en el Modo Fundamental de Vibración



Fuente: Elaboración propia

Con la ejecución de los análisis descritos en las secciones anteriores, se obtuvo una mejor comprensión del comportamiento estructural del modelo frente a las cargas aplicadas. Los resultados permiten visualizar el desplazamiento de la estructura bajo el modo fundamental de vibración, proporcionando una base sólida para evaluar el sistema. A continuación, se presentan los resultados obtenidos y se procede a la caracterización detallada de los daños identificados en la zona de estudio.

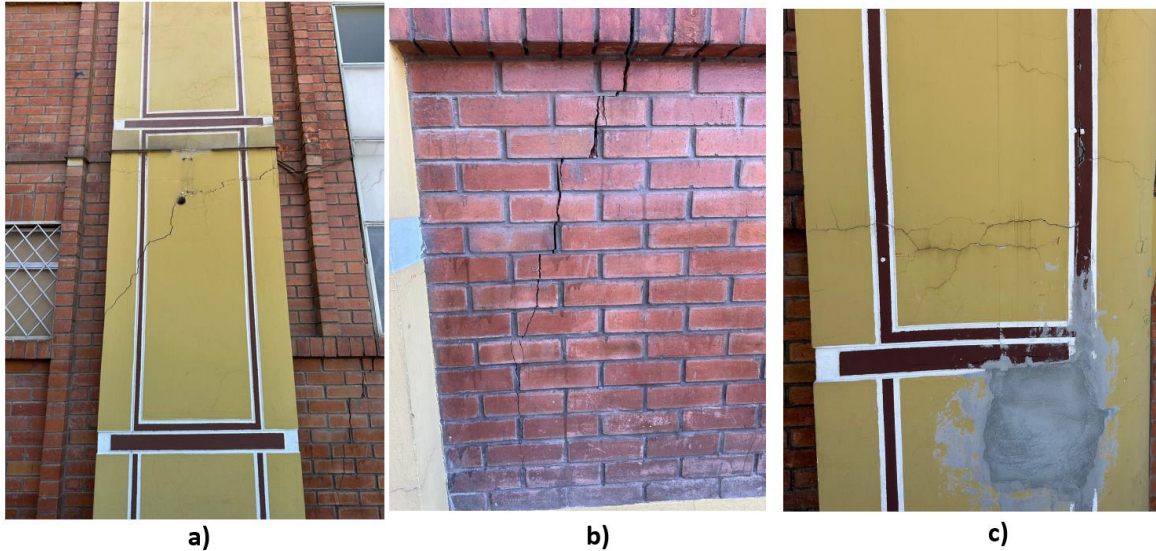
## Resultados

### Caracterización de los daños en la zona de estudio

La caracterización de los daños es una etapa fundamental en el análisis de las estructuras afectadas. Esta sección se enfoca en la identificación y descripción de las grietas presentes en la edificación, destacando su ubicación, forma y orientación. Esta información es crucial para comprender la naturaleza de los daños y evaluarlo en función de los resultados obtenidos del modelo computacional.

**Figura 9**

Tipologías de Grietas Observadas en la Fachada del Edificio: a) Grieta Diagonal, b) Grieta Vertical, c) Grietas Horizontales y Reparación Parcial



Fuente: Elaboración propia

En las imágenes presentadas, se pueden observar diferentes tipos de grietas en la fachada del edificio ubicado en la zona de estudio:

- **Imagen (a):** La grieta se encuentra ubicada en el pilar central de la fachada. La dirección de la grieta es diagonal y recorre gran parte de la superficie del pilar. La forma de la grieta es irregular, lo que indica posibles movimientos diferenciales en la estructura, que pueden estar asociados con los provocados por un sismo.
- **Imagen (b):** Se observa una grieta vertical en una pared de ladrillo expuesta. La ubicación de esta grieta, que se extiende desde el nivel del piso hasta la parte superior de la pared, sugiere que podría estar relacionada con un problema de carga excesiva o movimientos en la base del edificio. La forma vertical y continua de la grieta es indicativa de la acción de esfuerzos de compresión o tensión en la dirección perpendicular al muro.
- **Imagen (c):** La grieta presente en esta imagen se encuentra en el pilar, con una orientación principalmente horizontal. La forma de la grieta es algo irregular, y parece haber sido previamente intervenida, como se observa por el parche de material aplicado debajo de la zona afectada. Esta ubicación y forma sugieren posibles problemas de flexión o corte en la base del pilar, probablemente debidos a las cargas dinámicas que actúan sobre la estructura.



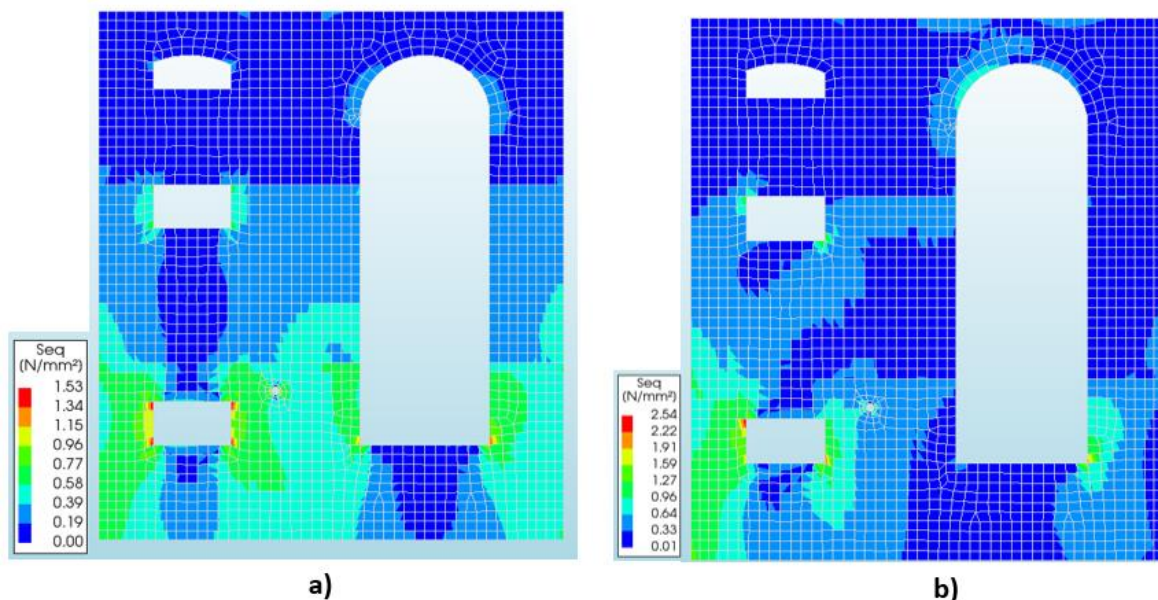
Esta descripción inicial de las grietas permite establecer una base para el análisis detallado de los daños estructurales en la edificación.

### Resultados del modelo computacional en DIANA FEA

En las siguientes figuras se presentan los resultados de los esfuerzos de Von Mises en el modelo estructural sometido a cargas de gravedad y carga sísmica. Estas imágenes permiten comparar la ubicación y distribución de los esfuerzos máximos con las grietas previamente observadas en la estructura real. La Figura 10a) muestra los esfuerzos debidos únicamente a las cargas gravitacionales, mientras que la Figura 10b) ilustra la evolución de los esfuerzos bajo condiciones sísmicas. Se observa cómo los esfuerzos tienden a concentrarse en las mismas áreas donde se identificaron los daños, ofreciendo un entendimiento más profundo de las posibles causas y del comportamiento estructural.

**Figura 10**

Distribución de Esfuerzos de Von Mises Bajo Cargas Gravitacionales y Sísmicas: a) Concentración de Esfuerzos por Carga Gravitacional, b) Evolución de Esfuerzos Principales por Carga Sísmica



Fuente: Elaboración propia

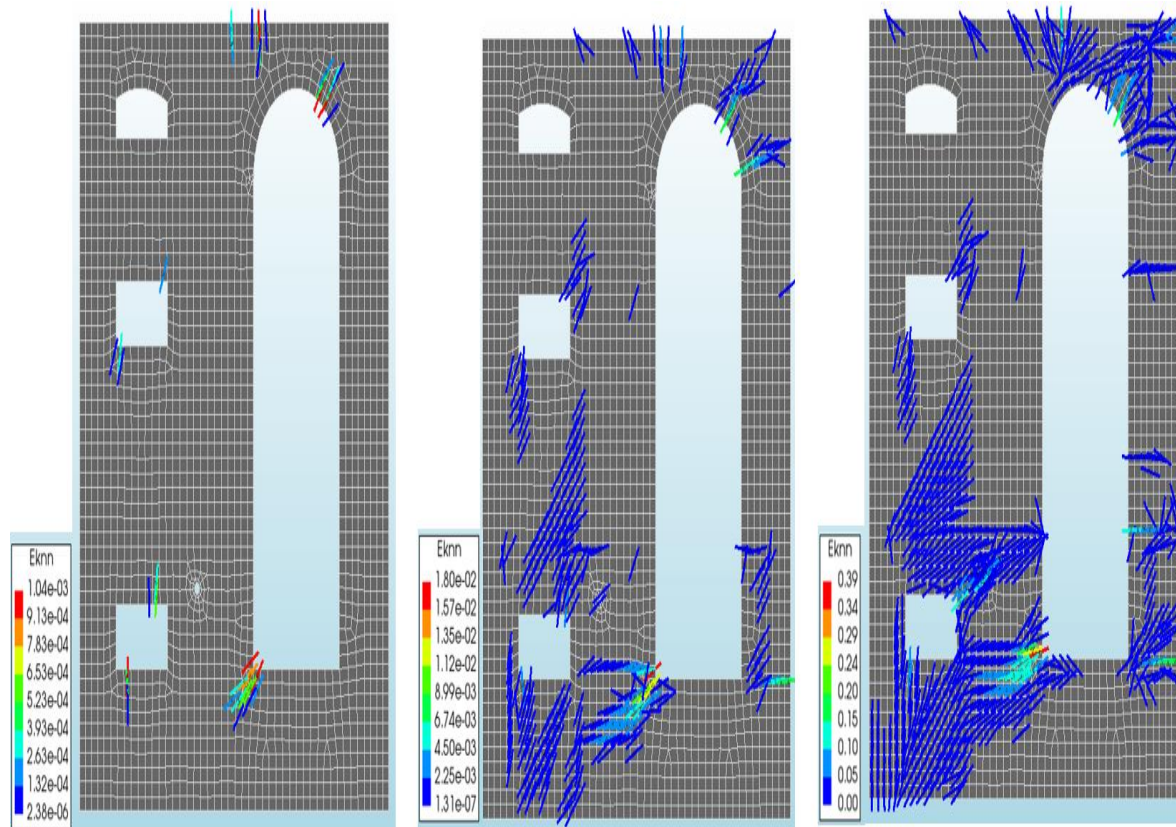
El análisis visual de los esfuerzos de Von Mises en ambas condiciones de carga (gravitacional y sísmica) permite concluir que las áreas con mayores concentraciones de esfuerzo corresponden, en gran medida, a los puntos donde se observaron daños y grietas en la estructura real. La identificación de estas zonas críticas proporciona información valiosa para la planificación de futuras intervenciones de refuerzo y para mejorar la resistencia sísmica



del edificio. A continuación, se presenta un análisis más detallado de la dirección y propagación de las grietas observadas.

**Figura 11**

Propagación y Dirección de Grietas con Deformación Unitaria: a) Inicio de las Grietas, b) Crecimiento Intermedio, c) Propagación Final

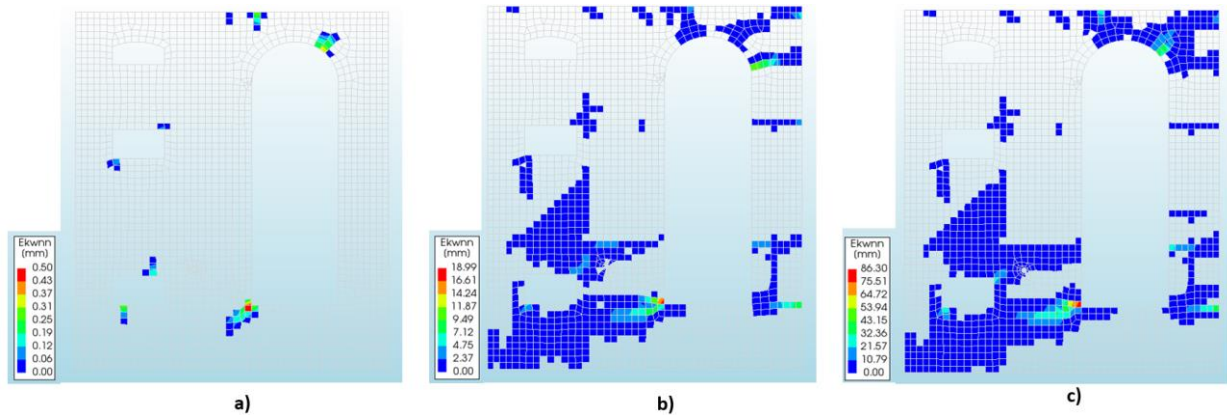


Fuente: Elaboración propia

En las figuras a), b) y c) se observa cómo se propagan las grietas en función de la deformación unitaria del modelo estructural. La primera imagen muestra el inicio del agrietamiento en áreas críticas, como alrededor del hueco circular y en el borde de la ventana larga. En la segunda imagen, se observa el crecimiento de las grietas en diferentes zonas, siguiendo patrones similares a los identificados en campo. Finalmente, la tercera imagen muestra la propagación final de las grietas, visualizándose claramente las trayectorias diagonales y horizontales en las áreas críticas. Esta evolución resalta los puntos vulnerables de la estructura. En el análisis estructural, es crucial observar no solo la dirección de las grietas, sino también su evolución en términos de apertura y extensión. La siguiente serie de imágenes muestra la formación y propagación de las grietas en la estructura bajo condiciones de carga progresiva. Esto nos permitirá comparar los resultados numéricos con las observaciones reales y comprender mejor la magnitud de los daños, especialmente en las zonas críticas identificadas anteriormente.

**Figura 12**

Evolución de la Formación y Propagación de Grietas en la Estructura: a) Inicio del Agrietamiento, b) Propagación Intermedia, c) Estado Final de las Grietas



Fuente: Elaboración propia

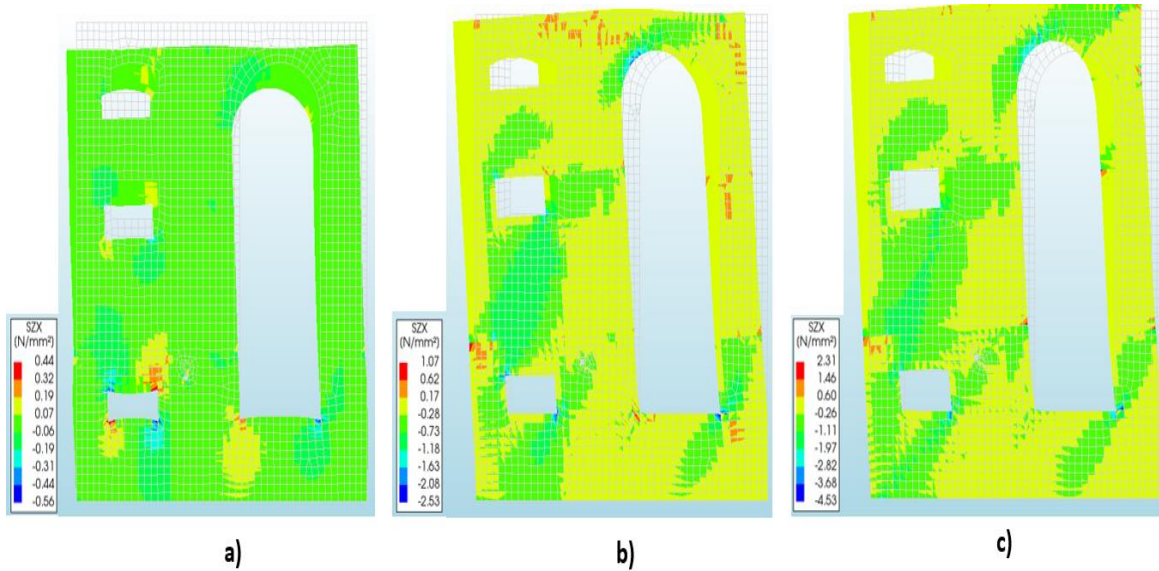
En la secuencia de imágenes presentadas, se observa claramente la evolución de las grietas en la estructura:

- **Figura a):** Se muestra el inicio de la formación de grietas, con un valor máximo de 0.5 mm. Estas grietas emergen en áreas críticas, particularmente en la zona debajo de la ventana larga, donde se encuentra actualmente la grieta más grande en diagonal. Este comportamiento inicial es indicativo de la concentración de esfuerzos en puntos vulnerables, que pueden convertirse en zonas de propagación de daños más significativos a medida que la carga aumenta.
- **Figura b):** Aquí se evidencia una expansión significativa de las grietas, especialmente en la misma zona identificada previamente. Las grietas alcanzan un valor máximo de 19 mm justo en el área crítica debajo de la ventana. Además, se observan otros puntos con valores críticos, como 10 mm en otras áreas vulnerables, mientras que en el resto de la estructura las grietas presentan valores menores a 2 mm.
- **Figura c):** La imagen final muestra la extensión máxima de las grietas con valores críticos de hasta 86 mm en la zona de falla principal. Otras áreas críticas presentan grietas de 40 mm, mientras que en el resto de la estructura se observan valores inferiores a 20 mm. La evolución visible de las grietas refuerza la importancia de identificar y reforzar las zonas críticas para evitar una propagación extensa.

Estos resultados demuestran cómo las grietas se inician en puntos de alta concentración de esfuerzos y se propagan con la carga, generando daños significativos en áreas clave de la estructura. Para entender mejor la naturaleza de las grietas y concentraciones de esfuerzo en la estructura, se analizó la propagación de esfuerzos cortantes en el plano Z, la tensión mínima y la tensión máxima en la basílica. A continuación, se muestran tres series de

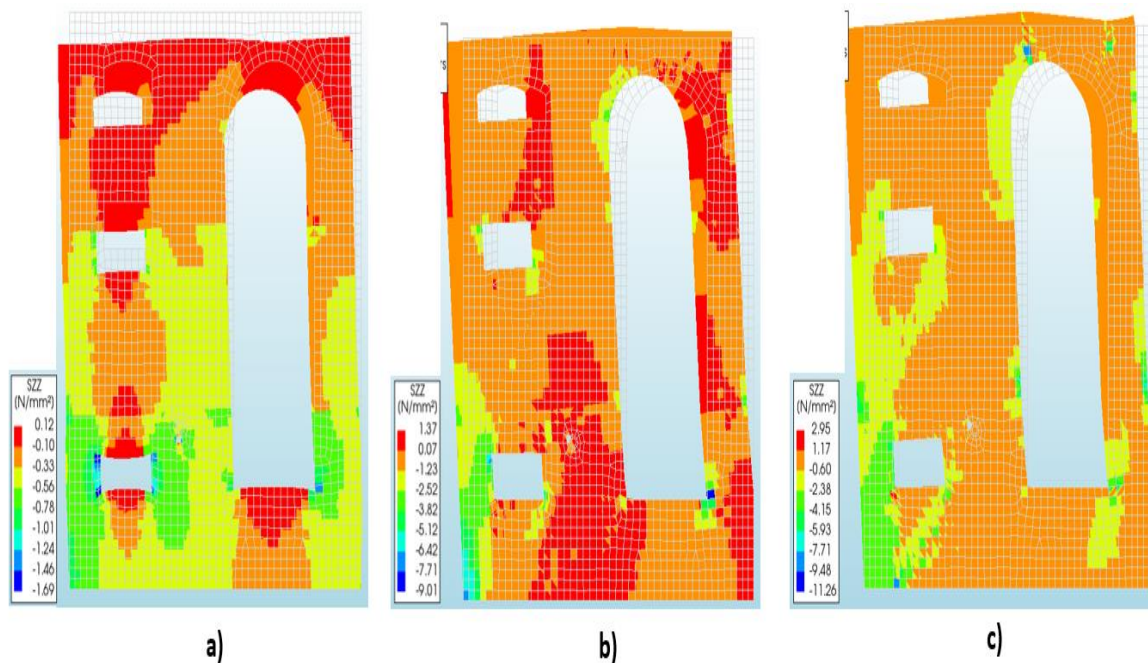
imágenes que detallan la evolución de estas magnitudes, permitiendo identificar las zonas más vulnerables y los posibles puntos de inicio y propagación de grietas.

**Figura 13**  
 Propagación de Esfuerzos Cortantes SZX en el Plano Z, Dirección XX



Fuente: Elaboración propia

**Figura 14**  
 Distribución y Propagación de Tensión Mínima en la Estructura

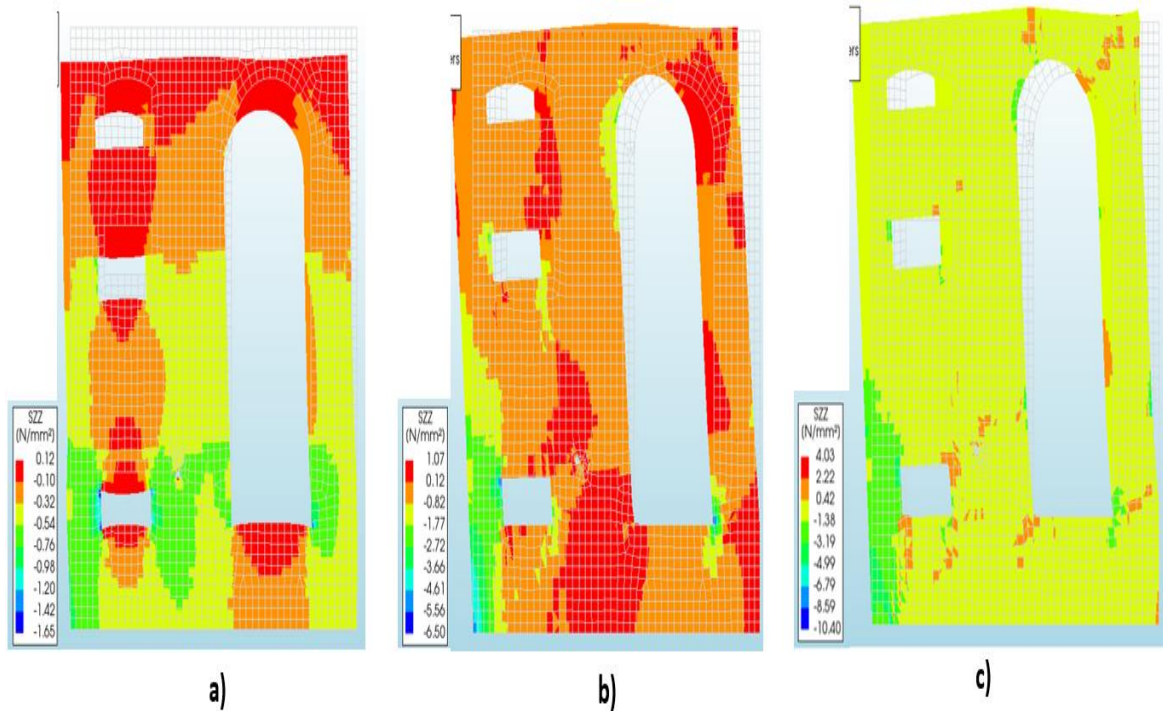


Fuente: Elaboración propia





**Figura 15**  
Distribución y Propagación de Tensión Máxima en la Estructura



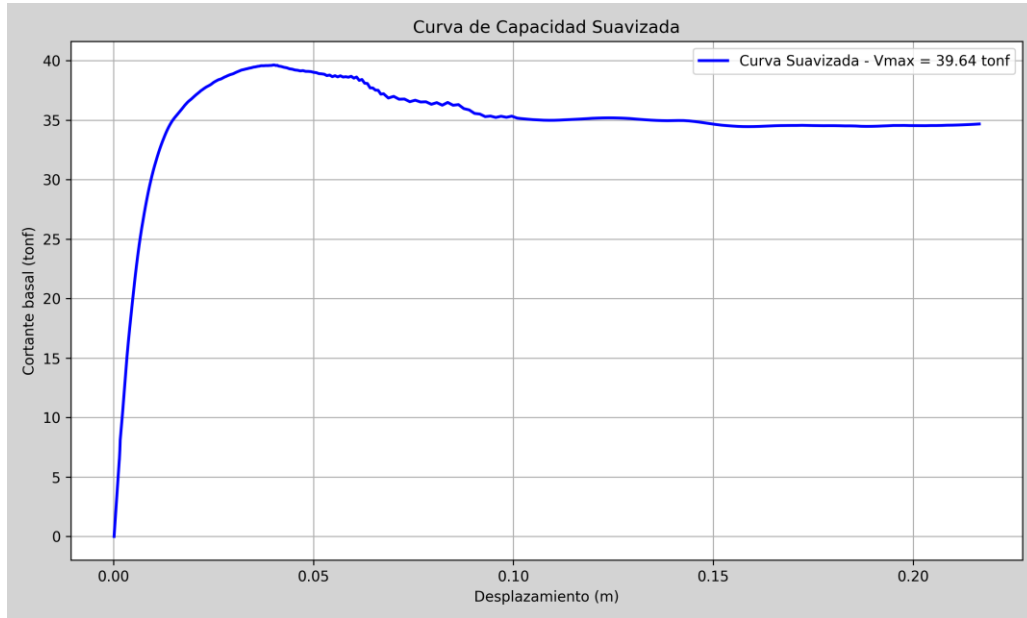
Fuente: Elaboración propia

Los resultados presentados en las tres series de imágenes evidencian una relación directa entre la distribución de esfuerzos y tensiones y la ubicación de las grietas observadas en la estructura. La primera serie, enfocada en los esfuerzos cortantes (SZX), muestra cómo las concentraciones iniciales se localizan en áreas críticas, propagándose conforme se incrementan las cargas aplicadas. De manera similar, las imágenes de tensión mínima reflejan la aparición y desarrollo de puntos de debilidad, especialmente en los bordes de las aberturas y zonas cercanas al hueco circular. La tercera serie, centrada en la tensión máxima, resalta las zonas con los mayores valores tensionales, coincidiendo con las áreas identificadas en campo como más propensas al agrietamiento. Este análisis integral de los esfuerzos cortantes y tensiones brinda una comprensión profunda del comportamiento estructural.

### Curva de capacidad y desempeño estructural

La curva de capacidad de la basílica se muestra en la siguiente imagen, esta muestra en el eje horizontal el desplazamiento y en el eje vertical la cortante basal. Al ser un gráfico de estos dos indirectamente estoy obteniendo la rigidez, dado que esto se muestra en la pendiente de cortante basal y desplazamiento.

**Figura 16**  
 Curva de capacidad de la basílica



Fuente: Elaboración propia

Se observa en la curva de capacidad que tenemos una primera pendiente elástica donde el edificio aún permanece con su rigidez inicial, luego con un desplazamiento de 4cm alcanza su resistencia máxima y posterior a ello se observa una pérdida de resistencia con una pendiente cada vez menor hasta llegar prácticamente a una recta horizontal sin rigidez, donde se da el colapso de la basílica. Posterior a ello, se debe de calcular el punto de desempeño que es la respuesta frente al sismo, se calculan mediante los lineamientos del ASCE 41-17 y al aplicarlo se utilizan los siguientes factores y recta de bilinealización.

**Tabla 1**

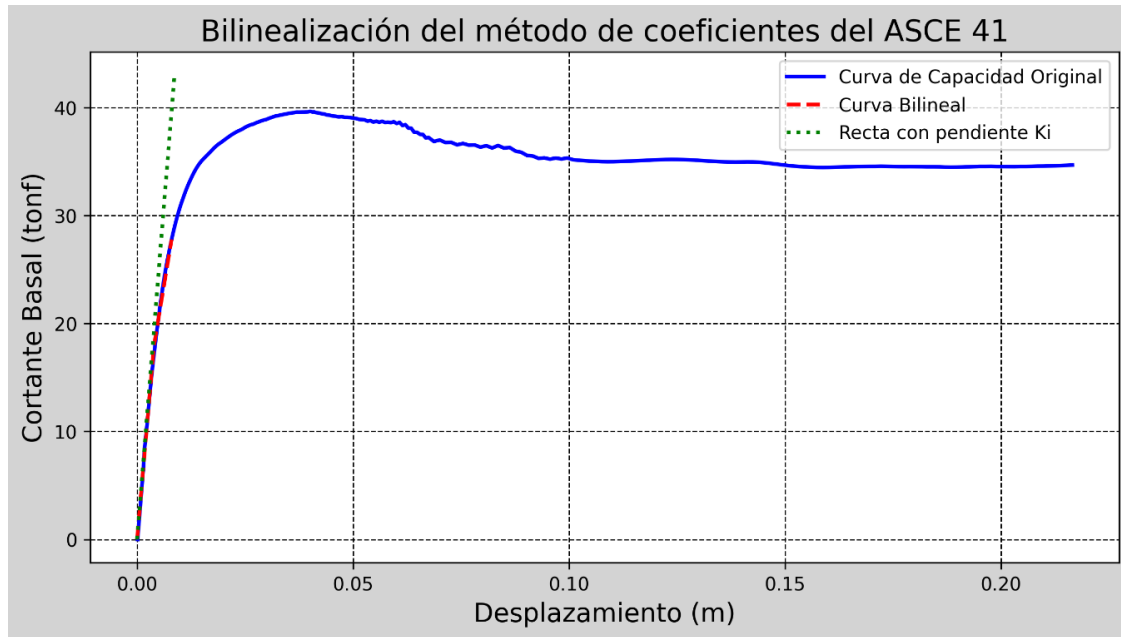
Parámetros para el cálculo del punto de desempeño mediante el método de coeficientes del ASCE 41-17

| c0         | c1       | a                           | te(seg) | ke(tonf/m) | sa(g) |
|------------|----------|-----------------------------|---------|------------|-------|
| 1.30       | 1.90     | 60.00                       | 0.10    | 4592.52    | 0.74  |
| ki(tonf/m) | Vy(tonf) | W(tonf)                     | ti(seg) | c2         | cm    |
| 4964.89    | 17.89    | 76.10                       | 0.10    | 1.55       | 1.00  |
| delta(cm)  | ustrg    | Cortante Basal Final (tonf) |         |            |       |
| 0.75       | 3.16     | 27.79                       |         |            |       |

Fuente: Elaboración propia

**Figura 17**

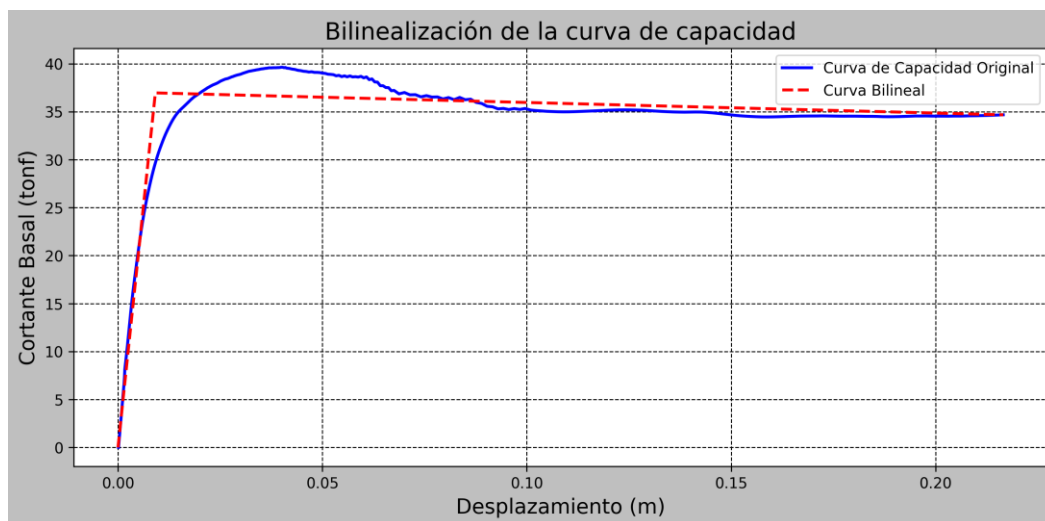
Bilinealización para el cálculo del punto de desempeño acorde al ASCE 41-17



El punto de desempeño se calcula con un valor de 0.75 cm. Esta respuesta frente al sismo de diseño esperado indica que hay un ingreso al rango no lineal, ya que la pendiente de este muro difiere de la pendiente 'ki', disminuyendo así dicha pendiente. Esta información será utilizada posteriormente para calcular el desempeño de la basílica. En la siguiente figura, se muestra la bilinealización completa de la curva de capacidad.

**Figura 18**

Bilinealización de la curva de capacidad completa



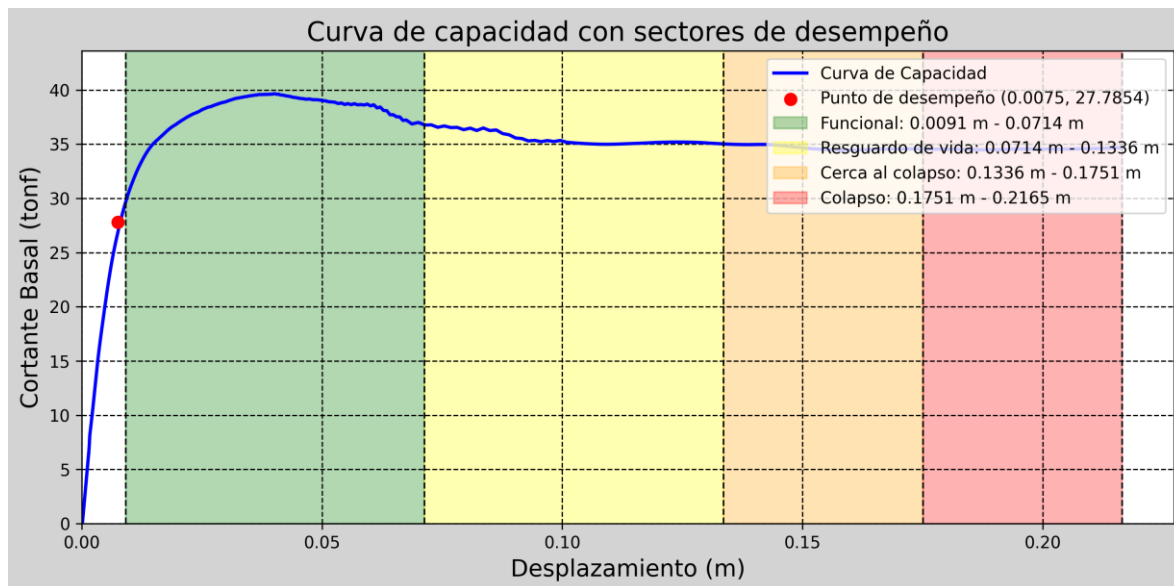


Fuente: Elaboración propia

La curva bilineal sirve para clasificar la parte elástica de la parte inelástica y realizar la sectorización de la curva de capacidad en 4 estados de daño: Funcional, resguardo de vida, cercano al colapso y colapso. Además, se coloca el punto de desempeño en la curva de capacidad sectorizado y acorde a donde caiga el punto de desempeño se clasifica el desempeño.

**Figura 19**

Sectorización de la curva de capacidad para el cálculo del desempeño acorde al SEAC VISION 2000



Fuente: Elaboración propia

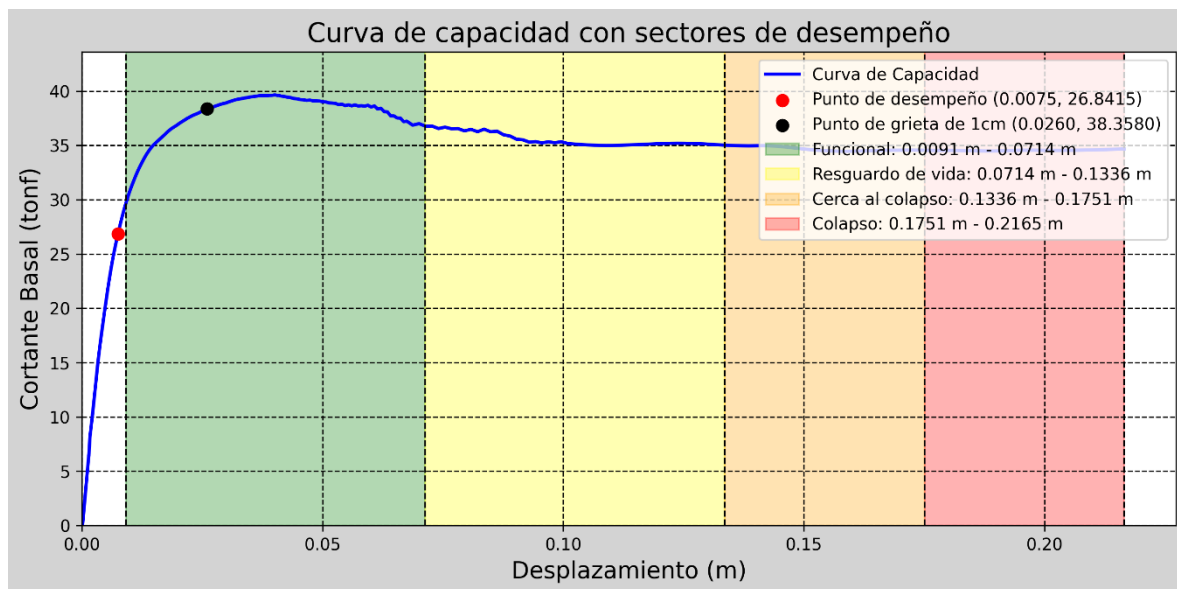
El desempeño del edificio se clasifica como totalmente operacional, ya que el punto de desempeño se encuentra en 0.75 cm, mientras que el inicio de la fluencia y, por tanto, el comienzo del desempeño funcional, está en 0.91 cm. Este nivel de desempeño indica que el daño presente es mínimo; sin embargo, se confirma la existencia de cierto daño debido a una pérdida de rigidez, distinta de la rigidez inicial de la estructura. Durante el tiempo de vida del edificio, este ha experimentado múltiples eventos sísmicos. Como resultado, se han observado grietas de hasta 1 cm en la zona más crítica, localizada debajo de la ventana larga, como se muestra en la siguiente imagen. Adicionalmente, se incluye una imagen que representa el desempeño sísmico, señalando el punto exacto donde se encuentra la basílica cuando se obtiene una grieta de 1 cm, para evaluar el nivel de desempeño al que correspondería este daño.

**Figura 20**  
 Espesor de la Grieta de 1 cm en la Zona Crítica Debajo de la Ventana Larga



. Fuente: Elaboración propia

**Figura 21**  
 Sectorización de desempeño con indicadores de situación actual y punto de desempeño para sismo de diseño



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se observa que, debido a que la estructura ha experimentado varios eventos sísmicos, su desempeño es más exigente en comparación con haber sido afectada únicamente por un sismo de diseño. En su estado actual, con grietas de 10 mm, su desempeño real se clasifica como funcional.

## Discusión

Este trabajo realiza un análisis detallado del comportamiento estructural de la Basílica de la Santísima Trinidad en Cuenca, Ecuador, utilizando técnicas avanzadas de evaluación sísmica no lineal. Se establecieron los fundamentos teóricos del análisis estructural, analizando las relaciones entre los esfuerzos, deformaciones, anchos de grieta y dirección de grietas generados por cargas gravitacionales y sísmicas. Para llevar a cabo este análisis, se utilizó un modelo computacional en el software DIANA FEA, que permitió simular el comportamiento del edificio bajo diversas condiciones de carga.

Durante el estudio se identificaron ciertas excepciones y problemas no resueltos. Entre ellos, se destaca la variabilidad en las propiedades de los materiales de la mampostería debido a factores como su antigüedad, composición y métodos de secado, así como valores específicos de estos dado que no se podían extraer muestras directas de la basílica. Además, se reconoció que el modelado de los materiales como sólidos homogéneos no contempla la irregularidad y la heterogeneidad propias de las estructuras de mampostería. Asimismo, el análisis se centró en cargas estáticas, sin incluir efectos dinámicos.

Desde un punto de vista práctico, se recomienda la implementación de estrategias de evaluación y posible rehabilitación acorde a la resistencia del material y tiempo de antigüedad de construcciones de patrimonios similares, dado que, en vista de estas dos variables con geometrías similares, podría resultar crítico si son de baja resistencia o si ya muestra grietas anchas de más de 4cm.

Las conclusiones obtenidas indican que la estructura, en su estado actual con grietas de 10 mm, se clasifica como funcional. Sin embargo, su desempeño ha sido más exigente debido a la exposición a múltiples eventos sísmicos a lo largo de los años. El análisis computacional reveló que las cargas sísmicas generan esfuerzos de tracción y cortante en la mampostería, lo que provoca la aparición y propagación de grietas en las áreas más vulnerables, que han resultado alrededor de un círculo circular en el pilar y en la base de la ventana más larga. El registro fotográfico comprueba que las zonas de mayor exigencia en el modelo computacional, coinciden con las zonas con mayor ancho de grietas observada en las fotos. Cada conclusión se basa en simulaciones detalladas realizadas con el software DIANA FEA, comparando los resultados obtenidos con los patrones de grietas observados en la edificación. Estos hallazgos son coherentes con investigaciones previas, como la de (Briceño, Noel,



Chácara, & Aguilar, 2021) quienes resaltan la vulnerabilidad de las estructuras de adobe y mampostería ante cargas laterales, mostrando grietas y patrones de daño en áreas como puertas y ventanas. La evaluación permitió delinear la curva de capacidad del edificio e identificar su punto de desempeño ante un evento sísmico.

La metodología y el modelado de materiales para mampostería empleados en este estudio son comparables a los utilizados en diversas estructuras patrimoniales, como la Huaca de la Luna (Perucchio, y otros, 2014), utilizando herramientas como DIANA FEA. Este software facilita la obtención de modos de vibración y curvas de capacidad con puntos de desempeño, proporcionando una visión completa del comportamiento estructural. Asimismo, el uso del "Total Strain Crack Modeling" para la albañilería ha mostrado una excelente correlación con las características de la mampostería, según estudios experimentales realizados por (Huamani Rojas, 2018).

El software, junto con el tipo de modelado y materiales utilizados, ha sido validado a través de comparativas con ensayos experimentales en edificaciones de mampostería evaluadas en mesas vibratoras bajo diferentes registros sísmicos, tal como lo demuestran los trabajos de (Herrera Villa, 2018).

## Conclusiones

1. Se concluye que los parámetros de modelamiento de la basílica se pudieron caracterizar adecuadamente, basándose en estudios previos. Esto permitió alcanzar un modelado preciso que incluyó condiciones de borde, carga y la aplicación de cargas laterales adecuadas para representar los efectos sísmicos.
2. El software DIANA FEA demostró ser eficaz en la representación mediante elementos finitos, mostrando resultados coherentes en términos de esfuerzos, deformaciones, dirección y anchura de grietas, así como en los modos fundamentales de la estructura.
3. A partir de un desplazamiento de 0.3 cm, se observa un cambio en la rigidez, como se refleja en la curva de capacidad de desplazamiento versus cortante basal, ingresando así al rango no lineal. La curva de capacidad muestra que se alcanza una resistencia máxima de 39.9 toneladas-fuerza y un desplazamiento máximo de 21.65 cm.
4. Bajo sollicitaciones sísmicas, se identificaron zonas principales de agrietamiento, especialmente alrededor de un hueco circular para tuberías y alrededor de la ventana más grande, con grietas en formas diagonales y horizontales. El software capturó la formación y dirección de estas grietas, las cuales variaron en amplitud desde 0.5 mm hasta 86 mm.
5. Se concluye que, debido a que el edificio ha experimentado múltiples sismos, su desempeño es más exigente que si hubiera sido afectado por un solo sismo de diseño. A pesar de ello, el desempeño observado es funcional, lo que indica que el edificio aún mantiene una considerable capacidad de deformación remanente y presenta un nivel de daño ligero.
6. Se recomienda realizar estudios con acelerogramas para captar las frecuencias y modos de las edificaciones patrimoniales. Esto permitirá determinar el módulo de elasticidad y, por tanto, el estado del material, logrando una mejor estimación del desempeño, especialmente cuando no es posible extraer muestras del material.

7. Se sugiere llevar a cabo un análisis integral de toda la basílica para considerar también la posibilidad de falla perpendicular al plano. Además, se recomienda realizar un análisis no lineal en el tiempo-historia para evaluar el daño cíclico de la mampostería de manera más exhaustiva y crítica.

### Referencias bibliográficas

- Bazant, Z. P. (1983). *Comment on orthotropic models for concrete and geomaterials*. Journal of Engineering Mechanics.
- Briceño, C., Noel, M., Chácara, C., & Aguilar, R. (2021). *Integration of non-destructive testing, numerical simulations, and simplified analytical tools for assessing the structural performance of historical adobe buildings*. Lima: Elsevier.
- Bueno Cadena, D. C. (2016). *Análise estrutural da Igreja de Nossa Senhora da Conceição*. Minho: Universidade de Minho.
- Chai, S. (2020). *Finite Element Analysis for Civil Engineering with DIANA Software*. China: Springer.
- Clementi, F., Formisano, A., Milani, G., & Ubertini, F. (2021). *Structural Health Monitoring of Architectural Heritage: From the past to the Future Advances*. Taylor & Francis.  
doi:<https://doi.org/10.1080/15583058.2021.1879499> © 2021 Taylor & Francis
- Cope, R., Rao, P., Clark, L., & Norris, P. (1980). *Modelling of reinforced concrete behaviour for finite element analysis*. New York: Pineridge Press, Swansea, UK.
- Espinoz Chácara, C. J. (2018). *Macro-Element Nonlinear Dynamic Analysis or the Assessment of the Seismic Vulnerability of Masonry Structures*. Minho: Universidade de Minho.
- Ferreira, D. (2024). *Release Notes - DIANA User's Manuals*. Netherlands: DIANA Finite Element Analysis.
- Herrera Villa, D. I. (2018). *MODELAMIENTO NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE VIVIENDAS DE MAMPOSTERÍA CON BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA*. Lima: PUCP.
- Huamani Rojas, S. K. (2018). *MACRO-MODELACIÓN NUMÉRICA CON SÓLIDOS DE ENSAYOS CUASI-ESTÁTICOS DE PRISMAS Y MURETES DE ALBAÑILERÍA DE ARCILLA*. Lima: PUCP.
- López Suscal, P. M., & Aguirre Ullauri, M. d. (2023). *Protocolos técnicos de conservación patrimonial desde el análisis de riesgos y vulnerabilidades. El caso de la arquitectura vernácula de Quingeo (Azuay, Ecuador)*. ARQUEOLOGÍA DE LA ARQUITECTURA.  
doi:<https://doi.org/10.3989/arq.arqt.2023.006>
- Lourenco, P. B., Angelill, M., & Milani, G. (2014). *Masonry behaviour and modelling*. ResearchGate.
- Ordoñez Sacapi, G. E., & Salazar Riera, M. V. (2023). *Elaboración de un manual de usuario del programa "RCrisis" y su aplicación en el caso de amenazas sísmicas en el cantón Quito, provincia Pichincha*. Quito: Tesis de Licenciatura.
- Perucchio, R., Chácara, C., Zvietcovich, F., Briceño, C., Marques, R., Castañeda, B., . . . Aguilar, R. (2014). *ON-SITE INVESTIGATION AND NUMERICAL ANALYSIS FOR STRUCTURAL ASSESSMENT OF THE ARCHAEOLOGICAL COMPLEX OF HUACA DE LA LUNA*. Ciudad de México: SAHC2014.
- Quezada Zambrano, R. A., Jimenez Pacheco, J. C., & Garcia Erazo, H. A. (2021). *Caracterización del patrimonio edificado del Centro Histórico de Cuenca-Ecuador*. Universidad Tecnológica Indoamérica.
- Rots, J., & Blaauwendraad, J. (1989). *CRACK MODELS FOR CONCRETE: DISCRETE OR SMEARED? FIXED, MULTI-DIRECTIONAL OR ROTATING?*. HERON.





**Conflicto de intereses:**

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

**Financiamiento:**

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

**Agradecimiento:**

A Dios por otorgarme salud para llegar a culminar mis estudios con éxito. A mis padres por la perseverancia, esfuerzo y sacrificio. A mis docentes por transmitirme sus conocimientos.

A Vivian por su motivación y apoyo. A Juan Maldonado por abrirme las puertas de esta prestigiosa UCACUE.

**Nota:**

El artículo no es producto de una publicación anterior.

