



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**Modelado del Puente del Centenario de la ciudad de Cuenca Mediante  
Elementos Finitos en SAP2000, con Base en Registros de Vibración Ambiental.**

Trabajo de graduación previo a la obtención de:

**INGENIERO CIVIL**

Autores:

**RIVERA REDROVAN JOSE ANTONIO**

**TRELLES AVILA GALO EDUARDO**

Director:

**ING. ESTEBAN MARCELO CABRERA VELEZ, PhD**

**CUENCA, ECUADOR**

**2026**

## **Dedicatoria**

José Antonio Rivera Redrovan

Dedico este trabajo a mi familia, en especial a mis padres, Marco y Raquel, quienes han sido mi apoyo constante a lo largo de toda mi vida. A mi padre, por ser mi mayor punto de admiración, un hombre de gran visión, cuyo ejemplo ha marcado profundamente mi forma de pensar y de actuar. A mi madre, por su amor incondicional y por su dedicación absoluta en mi crianza y en la de mis hermanas, siendo un pilar fundamental en todo lo que soy hoy.

A ellos, que me han brindado confianza, respaldo y la oportunidad de alcanzar cada meta que me he propuesto, les debo todo lo que he logrado.

A mis hermanas, Sofía y Nathalia: a Sofía, por ser una fuente de inspiración, perseverancia y resiliencia; a Nathalia, por su inteligencia, su forma de pensar y sus valores.

A todas las personas que han estado presentes a lo largo de este camino, brindándome su apoyo en cada una de las etapas que han formado parte de este proceso.

Finalmente, a mi familia, por ser un ejemplo de valores, rectitud y fortaleza, principios con los que crecí y que han guiado cada paso de mi vida.

Galo Eduardo Trelles Avila

Dedico el presente trabajo principalmente a mi padre, Galo, por su esfuerzo, sacrificio y por brindarme la oportunidad de estudiar y alcanzar esta meta; su apoyo constante ha sido fundamental en cada etapa de este camino. A mi madre, María Eugeia, por su inmenso amor, esfuerzo y sacrificio, por todo lo que ha hecho por mí y por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi formación.

A mis abuelos, Víctor y Cumandá, por su cariño, sus valiosas enseñanzas y por ser un ejemplo de vida que siempre me ha guiado e inspirado a seguir adelante.

A mi tía Tania, por su gran apoyo, por su ayuda constante y por sus palabras de aliento que han sido de gran motivación para seguir adelante.

A mi familia, por acompañarme durante todo este proceso, y a todas las personas que confiaron en mí y me impulsaron a seguir adelante hasta cumplir este objetivo.

## **Agradecimientos**

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a Dios, por la vida, por las oportunidades que nos ha brindado y por permitirnos alcanzar esta meta tan importante en nuestra formación profesional.

A nuestras familias, por ser el pilar fundamental a lo largo de este proceso, por su apoyo constante, su cariño incondicional y por brindarnos la motivación necesaria para seguir adelante en cada etapa de nuestra formación académica.

A la Universidad del Azuay y a la Escuela de Ingeniería Civil, por proporcionarnos las herramientas, conocimientos y la formación integral que nos han permitido desarrollarnos tanto a nivel académico como profesional.

De manera especial, agradecemos a nuestro director de trabajo de titulación, el Ing. Esteban Marcelo Cabrera Vélez, PhD, por su guía, dedicación y acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo. Su apoyo constante, sus enseñanzas y su pasión por la ingeniería han sido fundamentales para fortalecer nuestro interés y compromiso con la carrera.

Extendemos nuestro agradecimiento al Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador (IERSE), cuyo aporte fue clave para la obtención de información y el desarrollo de la campaña experimental, constituyendo un apoyo esencial para la realización de esta investigación.

A nuestros amigos, y en especial a aquellos que hicimos a lo largo de este proceso, por su compañía, apoyo y por hacer que este camino haya sido mucho más llevadero.

Finalmente, agradecemos a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron al desarrollo de este trabajo y formaron parte de este proceso académico.

## **Resumen**

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo desarrollar un modelo numérico tridimensional del Puente del Centenario, ubicado en la ciudad de Cuenca, mediante el uso del Método de los Elementos Finitos (FEM) en el software SAP2000, con el fin de analizar su comportamiento estructural y contribuir a su preservación. La investigación se enfoca en una estructura patrimonial de mampostería, caracterizada por su heterogeneidad y la incertidumbre en sus propiedades mecánicas. La metodología integra la recopilación de información geométrica y mecánica, el modelado numérico y la caracterización dinámica experimental mediante Análisis Modal Operacional (OMA). La geometría fue obtenida a partir de levantamientos en campo y registros fotogramétricos, mientras que las propiedades del material se definieron mediante un enfoque de homogenización basado en literatura especializada. El modelo fue desarrollado con elementos sólidos tridimensionales, considerando comportamiento elástico lineal y condiciones de borde idealizadas. A partir de mediciones de vibración ambiental, se identificaron las frecuencias naturales y formas modales del puente, lo que permitió calibrar el modelo ajustando parámetros como el módulo de elasticidad y la densidad. Posteriormente, se realizó el análisis estructural bajo cargas estáticas y dinámicas, identificando la distribución de esfuerzos y las zonas críticas. Los resultados evidencian un comportamiento predominantemente compresivo, coherente con la tipología estructural de mampostería, con concentraciones localizadas de esfuerzos. Finalmente, el estudio propone una metodología replicable para la evaluación de estructuras patrimoniales, proporcionando una línea base para la gestión y conservación del Puente del Centenario.

## **Palabras clave**

Modelado numérico, elementos finitos, mampostería histórica, análisis modal operacional, calibración estructural.

## **Abstract**

This undergraduate thesis aims to develop a three-dimensional numerical model of the Centenario Bridge, located in the city of Cuenca, using the Finite Element Method (FEM) implemented in SAP2000, in order to analyze its structural behavior and contribute to its preservation. The study focuses on a historical masonry structure, characterized by material heterogeneity and uncertainty in its mechanical properties. The methodology integrates the collection of geometric and mechanical data, numerical modeling, and experimental dynamic characterization through Operational Modal Analysis (OMA). The bridge geometry was obtained from field measurements and photogrammetric records, while material properties were defined using a homogenization approach based on specialized literature. The numerical model was developed using three-dimensional solid elements, assuming linear elastic behavior and idealized boundary conditions. Based on ambient vibration measurements, the natural frequencies and modal shapes of the bridge were identified, allowing the calibration of the model by adjusting key parameters such as the modulus of elasticity and material density. Subsequently, a structural analysis was carried out under static and dynamic loads, enabling the identification of stress distribution and critical zones. The results show a predominantly compressive structural behavior, consistent with masonry typology, with localized stress concentrations. Finally, the study proposes a replicable methodology for the evaluation of historical structures, providing a reliable baseline for the management and preservation of the Centenario Bridge.

## **Keywords:**

Numerical modeling, finite element method, historical masonry, operational modal analysis, structural calibration.

---

ING. JOSÉ FERNANDO VÁZQUEZ CALERO

---

ING. ESTEBAN MARCELO CABRERA VELEZ, PhD

---

RIVERA REDROVAN JOSE ANTONIO

---

TRELLES AVILA GALO EDUARDO

## Tabla de contenidos

Dedicatoria .....	i
Agradecimientos.....	iii
Resumen .....	iv
Palabras clave .....	iv
Abstract .....	v
Keywords: .....	v
Índice de tablas.....	x
Índice de figuras .....	xi
Índice de ecuaciones.....	xii
Trabajo de titulación.....	xiii
Tipo de trabajo: .....	xiii
Problemática y justificación .....	xiii
Marco teórico .....	xv
Objetivos .....	xvii
Objetivo general .....	xvii
Objetivos específicos.....	xvii
Metodología .....	xviii
Capítulo 1: Levantamiento de información y caracterización del Puente del Centenario .....	1
1.1 Introducción .....	1
1.2 Importancia de la caracterización de la mampostería en estructuras históricas .....	2
1.3 Propiedades mecánicas de referencia según García et al. (2024) .....	3
1.4 Propiedades de mampostería histórica según Cabané Cañas (2023) .....	4
1.5 Contexto normativo y criterios simplificados para mampostería histórica con mortero de cal .....	5
1.6 Curva esfuerzo–deformación de Kaushik y su aporte al análisis de mampostería histórica..	7

1.7 Información geométrica del Puente del Centenario .....	8
1.7.1 Fuente de información geométrica.....	9
1.7.2 Configuración estructural general .....	9
1.7.3 Uso de la información geométrica en el modelo numérico.....	9
1.8 Aplicación de la información recopilada en el modelado numérico .....	9
Capítulo 2: Modelado numérico con elementos finitos .....	11
2.1. Fundamentos del método de los elementos finitos y su aplicación en SAP2000 .....	11
2.2. Obtención de la geometría del puente .....	12
2.3. Definición del modelo estructural .....	13
2.3.1. Modelo 3D y uso de elementos sólidos.....	14
2.3.2. Supuestos adoptados en el modelo estructural .....	15
2.4. Propiedades del material .....	15
2.5 Discretización y malla.....	17
2.6 Condiciones de borde y apoyos.....	18
2.7. Configuración del análisis numérico.....	20
2.8. Criterios de validación del modelo numérico .....	23
2.8.1. Los principales criterios de validación considerados serán: .....	23
3.1 Introducción .....	25
3.2 Caracterización modal experimental del puente mediante OMA .....	26
3.2.1 Instrumentación y disposición de sensores .....	26
3.2.2 Frecuencias naturales identificadas .....	27
3.2.3 Análisis e interpretación de las formas modales experimentales.....	28
3.3 Resultados del modelo numérico inicial (FEM) .....	31
3.3.1 Análisis modal en SAP2000.....	31
3.3.2 Frecuencias naturales del modelo .....	32

3.3.3 Formas modales numéricas .....	32
3.4 Comparación inicial OMA vs FEM .....	33
3.4.1 Comparación de frecuencias .....	33
3.4.2 Comparación de formas modales .....	33
3.4.3 Evaluación preliminar .....	34
3.5 Estrategia de calibración del modelo .....	35
3.5.1 Parámetros de calibración .....	35
3.5.2 Criterio de ajuste .....	36
3.6 Modelo calibrado.....	37
3.6.1 Parámetros finales adoptados .....	37
3.6.2 Resultados modales calibrados.....	37
3.6.3 Validación del modelo .....	40
3.7 Análisis estructural del modelo calibrado .....	41
3.7.1 Análisis estático.....	41
3.7.3 Análisis dinámico.....	43
Capítulo 4: Interpretación de resultados.....	50
4.1 Introducción .....	50
4.2 Identificación de zonas críticas .....	51
4.3 Interpretación del comportamiento estructural global .....	52
4.4 Implicaciones para la preservación del puente.....	54
4.5 Alcances y limitaciones del modelo.....	55
4.6 Síntesis del capítulo.....	56
Conclusiones generales .....	57
Recomendaciones.....	59
Referencias .....	61

## Índice de tablas

Tabla 1.1: Propiedades mecánicas del ladrillo macizo y mortero según García et al. (2024). .....	3
Tabla 2.1: Propiedades mecánicas típicas de mampostería histórica según Cabané Cañas (2023). 4	
Tabla 3.1: Propiedades mecánicas de mampostería de ladrillo macizo con mortero de cal según distintas normativas.....	6
Tabla 4.3 Resultados modales experimentales identificados mediante OMA. ....	28
Tabla 5.3. Resultados modales del modelo numérico inicial. ....	32
Tabla 6.3: Comparación inicial de frecuencias entre OMA y modelo numérico.....	33
Tabla 7.3. Parámetros considerados en la estrategia de calibración. ....	36
Tabla 8.3. Parámetros iniciales y calibrados del modelo estructural. ....	37
Tabla 9.3. Comparación entre las frecuencias naturales obtenidas experimentalmente mediante OMA y las calculadas en el modelo calibrado (FEM), junto con el error porcentual y la mejora respecto al modelo inicial.....	38

## Índice de figuras

Figura 1.1: Vista general del Puente del Centenario.....	1
Figura 2.1: Esquema general del Puente del Centenario.....	2
Figura 3.1: Detalle de la mampostería del Puente del Centenario. ....	3
Figura 4.2: Modelo tridimensional del Puente del Centenario discretizado mediante elementos sólidos en SAP2000. ....	14
Figura 5.2: Detalle de apoyos y estribos del Puente del Centenario, representativos de las condiciones de borde.....	19
Figura 6.2 Forma modal del modelo numérico del Puente del Centenario obtenida mediante análisis modal en SAP2000.....	21
Figura 7.3: Acelerómetro utilizado para la medición de vibraciones en el Puente del Centenario. ....	26
Figura 8.3. Disposición de sensores y sistema de coordenadas utilizado en la campaña OMA. ....	27
Figura 9.3: Forma modal experimental correspondiente al modo 1 obtenido mediante OMA. ....	29
Figura 10.3: Forma modal experimental correspondiente al modo 2 obtenido mediante OMA. ....	29
Figura 11.3: Forma modal experimental correspondiente al modo 3 obtenido mediante OMA. ....	30
Figura 12.3: Forma modal experimental correspondiente al modo 4 obtenido mediante OMA. ....	31
Figura 13.3: Forma modal numérica correspondiente al modo 1. ....	39
Figura 14.3: Forma modal numérica correspondiente al modo 2. ....	39
Figura 15.3: Forma modal numérica correspondiente al modo 3. ....	40
Figura 16.3: Forma modal numérica correspondiente al modo 4. ....	40
Figura 17.3: Distribución de compresión en el modelo calibrado del Puente del Centenario bajo carga estática. ....	42
Figura 18.3: Distribución de tensión en el modelo calibrado del Puente del Centenario bajo carga estática.....	43
Figura 19.3: Acelerograma del sismo utilizado en el análisis dinámico, componente X. ....	44
Figura 20.3: Acelerograma del sismo utilizado en el análisis dinámico, componente Y. ....	45
Figura 21.3: Acelerograma del sismo utilizado en el análisis dinámico, componente Z.....	45
Figura 22.3: Envolvente máxima de esfuerzos del modelo calibrado bajo acción sísmica. ....	47
Figura 23.3: Envolvente mínima de esfuerzos del modelo calibrado bajo acción sísmica. ....	48

## Índice de ecuaciones

Ecuación 1.3. Expresión utilizada para determinar el error porcentual entre las frecuencias naturales obtenidas del modelo numérico (FEM) y las identificadas experimentalmente mediante OMA. .33

## **Trabajo de titulación**

### **Tipo de trabajo:**

Estudio de caso: Se realizará un modelo en SAP2000 del Puente del Centenario en Cuenca-Ecuador utilizando elementos sólidos, y validándolos mediante una comparación de su periodo de vibración numérico y su periodo de vibración ambiental en servicio, entendiendo el comportamiento del puente y su estado actual y cambios futuros.

Línea de investigación afín de la carrera: Gestión de riesgos.

## **Problemática y justificación**

Cuenca es una ciudad patrimonial declarada por la UNESCO en 1999 como Patrimonio Cultural de la Humanidad gracias a su trazado urbano colonial y su armoniosa fusión de elementos arquitectónicos europeos e indígenas. Es una ciudad que alberga una rica infraestructura patrimonial que refleja su cultura y orígenes, donde se exhiben elaborados balcones torneados y detalles manuales. Sin embargo, la ciudad no cuenta con un método certero para evaluar la salud estructural de edificaciones de tan alto valor histórico y cultural (UNESCO World Heritage Centre, s. f.).

El Puente del Centenario es un puente histórico en la ciudad de Cuenca que conmemora los 100 años de independencia de la ciudad, construido entre 1920 y 1922. Este es un puente de alta importancia histórica, cultural y patrimonial para la ciudad de Cuenca y su posición sobre el río Tomebamba lo convierte en un eje principal de la conexión urbana y a la vez en un símbolo histórico en el paisaje de la ciudad, por lo que su preservación es prioritaria. Su silueta sobre el río Tomebamba no es solo un elemento funcional, sino un testigo silencioso de la historia de Cuenca que merece ser preservado para las futuras generaciones. Es un puente antiguo, que no cuenta con los métodos constructivos actuales, donde la mampostería y mortero son los únicos elementos estructurales, por lo que podría ser vulnerable a varios factores de vibración ambiental, como sismos, el afluente de agua sobre el que se construyó el puente, el paso del tiempo y su uso constante para el tránsito de vehículos y peatones; factores que podrían poner en riesgo su integridad estructural a largo plazo (Osorio Guerrero et al., 2017; UNESCO World Heritage Centre, s. f.).

Ecuador al ser un país altamente sísmico por su ubicación en el Cinturón de Fuego del Pacífico y estar sobre la zona de subducción de la placa Nazca, está expuesto a sismos y terremotos de distinta magnitud; La ciudad de Cuenca, está altamente expuesta a estos eventos, especialmente por fallas locales y la densidad en el centro histórico, lo cual podría ser un factor de riesgo para la integridad estructural de edificaciones patrimoniales de alto valor histórico, como el Puente del Centenario.

Por este motivo, es necesario contar con un modelo actualizado. Dicho modelado se realizará apoyado con los resultados de las mediciones de vibración ambiental mediante una técnica de Análisis Modal Operacional (OMA), por sus siglas en inglés, basada en acelerómetros. El OMA aprovecha las vibraciones ambientales generadas por el tránsito, los transeúntes, y el río, en condiciones de servicio, permitiendo caracterizar su comportamiento dinámico, lo que permitirá calibrar el modelo numérico de tal manera que permita tener una idea de su comportamiento estructural y ayude a entender cuáles son sus condiciones de respuesta. El modelo numérico en elementos finitos de esta estructura servirá como punto de referencia para futuros análisis, y busca marcar un precedente en la gestión estructural del patrimonio de Cuenca, estableciendo una metodología replicable en otras edificaciones patrimoniales de la ciudad; estas se podrían realizar después de un evento específico o periódicamente para analizar el estado del puente.

## Marco teórico

El estudio de los puentes históricos constituye un campo de gran interés en la ingeniería civil, pues permite comprender la relación entre infraestructura, cultura y desarrollo urbano. En el caso de Cuenca, el Puente del Centenario, construido sobre el río Tomebamba en la primera mitad del siglo XX, representa un hito arquitectónico y social. Su edificación posibilitó la conexión entre el centro histórico y la zona de expansión conocida como El Ejido, consolidándose como símbolo de modernidad y progreso urbano. A diferencia de otras estructuras que colapsaron por las crecientes del río, el Puente del Centenario se ha mantenido en pie, lo que refuerza su valor patrimonial y su importancia en la memoria colectiva de la ciudad (Zeas Guzmán, 2013).

El método de los elementos finitos (FEM) es una técnica numérica utilizada en la ingeniería estructural para analizar el comportamiento de sistemas complejos mediante su división en partes más pequeñas llamadas elementos finitos. En programas como SAP2000, la estructura se modela a partir de elementos tipo barra, shell o sólido, a los cuales se asignan propiedades geométricas, materiales y condiciones de carga. El software resuelve las ecuaciones de equilibrio para determinar desplazamientos, esfuerzos y reacciones, permitiendo representar con precisión el comportamiento estructural. Gracias a este método, es posible evaluar de forma eficiente estructuras con geometrías y condiciones reales de carga, facilitando su análisis y diseño (Cabrera Vélez, 2022).

El análisis de este tipo de estructuras requiere considerar las propiedades de los materiales que las conforman, principalmente la mampostería, ya que la caracterización de este material no es sencillo debido a que no es un material homogéneo, compuesto por ladrillo o bloque, y mortero, lo que provoca que el comportamiento de este sea difícil de predecir (Cabrera Vélez, 2022); por esto y su baja resistencia a tracción, presenta un comportamiento no lineal complejo que dificulta su modelación precisa. Frente a este reto, García et al. (2024) desarrollaron un procedimiento de modelado que, a partir de ensayos experimentales en ladrillos y morteros, permite determinar propiedades efectivas de la mampostería y simular su respuesta mecánica. Este enfoque, con un costo computacional reducido, resulta especialmente útil en el análisis estructural de edificaciones y puentes históricos de Cuenca. La disciplina de la salud estructural (Structural Health Monitoring, SHM) se consolida como una herramienta fundamental para evaluar el estado de conservación de estructuras patrimoniales. Mediante la integración de análisis numéricos y pruebas dinámicas, el

SHM permite identificar daños incipientes, estimar vulnerabilidades y establecer estrategias de preservación. En este marco, el modelado numérico mediante elementos finitos (FEM) constituye un recurso ampliamente utilizado en la ingeniería estructural (Gómez et al., 2010). Esta investigación se enmarca en dicho enfoque, modelando el Puente del Centenario con elementos sólidos en SAP2000, lo cual posibilita representar el volumen tridimensional de la estructura y su respuesta ante cargas estáticas o dinámicas.

En un ámbito internacional, Çubuk et al. (2022) analizaron el puente histórico Murat Bey en Turquía mediante un modelo tridimensional en SAP2000. La investigación incluyó análisis estático, modal y dinámico bajo registros sísmicos, evidenciando los desplazamientos y esfuerzos críticos en la estructura. Los autores demostraron que la caracterización modal es fundamental para localizar las zonas vulnerables de un puente y definir estrategias de conservación. De forma similar, Tuirán (2024) desarrolló en Colombia un modelo numérico del Puente Guayaquil, patrimonio histórico de Medellín, utilizando ANSYS. El estudio identificó tensiones y deformaciones bajo cargas muertas y sísmicas, revelando debilidades en la unión entre ladrillo y mortero, lo que confirma la fragilidad de este tipo de estructuras frente a sollicitaciones laterales.

Por otro lado, la literatura también resalta la importancia de las pruebas de vibración ambiental (Ambient Vibration Testing, AVT) como complemento a los modelos numéricos para identificar frecuencias propias, modos de vibración y rigidez estructural. Las técnicas de OMA aprovechan excitaciones naturales y de servicio como el viento, el río y el tráfico, entre otras, para complementar el modelado elementos finitos, verificar reparaciones y detectar daños en etapas tempranas, todo ello sin interrumpir el uso normal de la estructura. Este método resulta particularmente pertinente en el caso del Puente del Centenario, expuesto constantemente a vibraciones inducidas por el río Tomebamba y el tránsito urbano (Gómez et al., 2010), y sobre el cual es muy difícil llevar a cabo ensayos destructivos.

En conjunto, estos antecedentes evidencian que la preservación de los puentes históricos demanda un enfoque integral que considere su valor cultural y arquitectónico, así como un análisis estructural riguroso que incorpore las propiedades de la mampostería y su respuesta dinámica. La combinación del modelado computacional con elementos sólidos en SAP2000 y el análisis de vibraciones ambientales permitirá obtener un diagnóstico confiable del Puente del Centenario, estableciendo lineamientos para su conservación. De este modo, el estudio contribuye tanto a la

gestión del patrimonio de Cuenca como al desarrollo de estrategias de monitoreo estructural aplicadas a puentes históricos en el contexto ecuatoriano.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Modelar el Puente del Centenario en Cuenca empleando elementos finitos sólidos en SAP2000, calibrado con mediciones mediante una técnica de análisis modal operacional (OMA), basada en el uso de acelerómetros para analizar su comportamiento dinámico y generar una línea base que contribuya a su preservación.

### **Objetivos específicos**

Recopilar información geométrica y de propiedades de mampostería del Puente del Centenario para desarrollar un modelo numérico de elementos finitos en SAP2000.

Caracterizar experimentalmente el comportamiento dinámico del Puente del Centenario mediante el análisis modal operacional (OMA) para obtener sus frecuencias fundamentales en un estado de servicio.

Calibrar el modelo numérico mediante el uso de los resultados de las medidas de vibración ambiental (OMA).

Identificar mediante el modelo numérico calibrado, zonas críticas y posibles modos de falla, con el fin de encontrar la alternativa más óptima para su preservación.

## **Metodología**

La investigación seguirá un enfoque metodológico mixto, que incluirá una investigación documental y de campo, recopilando datos históricos, geométricos y de propiedades de materiales, un modelado y simulación computacional, para la construcción y análisis del modelo de elementos finitos y un análisis experimental, para la caracterización dinámica in situ mediante valores obtenidos a partir de OMA.

Las fuentes para la recopilación de información se obtendrán de archivos históricos, tesis, normas técnicas y literatura científica sobre mampostería y modelado, las fuentes de información principales para la investigación serán las obtenidas del levantamiento topográfico y fotogramétrico del puente para obtener sus dimensiones exactas, se ejecutarán campañas de medición de vibraciones ambientales OMA, que posibilitarán la caracterización dinámica del puente.

Para el modelado y análisis estructural, se empleará un software de modelado de elementos finitos sólidos y el análisis modal y estático. Los equipos necesarios para adquirir los datos dinámicos serán: acelerómetros de alta sensibilidad, un sistema de adquisición de datos con canales suficientes para la configuración del array de sensores, cables de conexión y un ordenador portátil para el control en campo.

# Capítulo 1: Levantamiento de información y caracterización del Puente del Centenario

## 1.1 Introducción

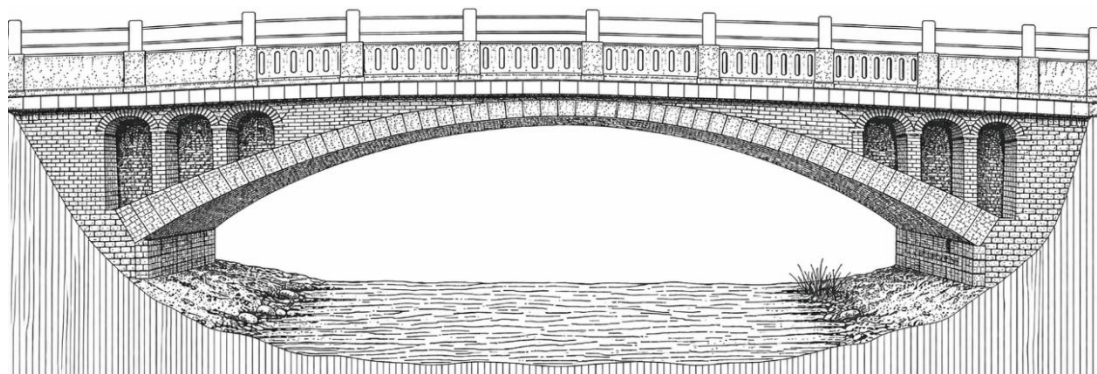
El análisis estructural de puentes históricos construidos en mampostería requiere una comprensión adecuada de las propiedades mecánicas de los materiales que los conforman, así como de su comportamiento bajo acciones estáticas y dinámicas. A diferencia de estructuras modernas de hormigón armado o acero, la mampostería presenta una respuesta mecánica altamente no lineal, una resistencia a tracción reducida y una marcada heterogeneidad, producto de la interacción entre unidades y mortero (Gómez et al., 2010).

El Puente del Centenario, construido entre 1920 y 1922, constituye una estructura patrimonial relevante dentro del Centro Histórico de Cuenca (Zeas Guzmán, 2013). Su sistema estructural se compone de una estructura de mampostería mixta, compuesta por machones de mampostería de piedra unidos con mortero de cal, sobre los cuales se desarrollan el resto de la estructura de mampostería de ladrillo de obra, también ligados con mortero de cal, materiales característicos de la construcción tradicional de inicios del siglo XX (Zeas Guzmán, 2013). Debido a su antigüedad, estado de conservación y valor patrimonial, no es viable la ejecución de ensayos destructivos directos sobre la estructura, lo que obliga a recurrir a información bibliográfica especializada y metodologías indirectas de caracterización.



*Figura 1.1: Vista general del Puente del Centenario.*

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 2.1: Esquema general del Puente del Centenario*

Fuente: Elaboración propia.

En este contexto, el objetivo del presente capítulo es recopilar y sistematizar información geométrica y mecánica del Puente del Centenario, con el fin de desarrollar un modelo numérico de elementos finitos en SAP2000 que represente adecuadamente su comportamiento en condiciones de servicio. Esta caracterización constituye la base para la posterior calibración del modelo mediante análisis modal operacional (OMA), permitiendo establecer una línea base del estado estructural actual del puente.

## **1.2 Importancia de la caracterización de la mampostería en estructuras históricas**

La mampostería es un material compuesto formado por unidades individuales y mortero, cuya respuesta mecánica depende de múltiples factores, entre ellos: resistencia y geometría de las unidades, propiedades del mortero, adherencia entre materiales, orientación de juntas y estado de degradación. En estructuras históricas, esta variabilidad se incrementa debido a la ausencia de normativas de diseño modernas y al envejecimiento de los materiales (Lourenço et al., 2020).

Diversos estudios han demostrado que una caracterización inadecuada de la mampostería puede generar errores significativos en la estimación de la rigidez global, frecuencias naturales y modos de vibración de una estructura (Gómez et al., 2010). En particular, Cabané Cañas (2023) señala que el uso de valores normativos modernos para modelar estructuras históricas conduce frecuentemente a sobreestimaciones de rigidez y capacidad resistente.

Por esta razón, resulta indispensable emplear valores mecánicos obtenidos a partir de estudios experimentales específicos, tanto de mampostería contemporánea como histórica, que permitan

definir rangos realistas y técnicamente justificables para el modelado numérico del Puente del Centenario.



*Figura 3.1: Detalle de la mampostería del Puente del Centenario.*

Fuente: Elaboración propia.

### **1.3 Propiedades mecánicas de referencia según García et al. (2024)**

El estudio desarrollado por García et al. (2024) constituye una referencia experimental relevante para la caracterización mecánica de mampostería en la ciudad de Cuenca. Si bien los materiales ensayados corresponden a unidades y morteros contemporáneos, su principal aporte para la presente investigación radica en la metodología experimental y en la obtención de valores mecánicos de referencia.

En este trabajo únicamente se consideran los resultados correspondientes a ladrillo macizo y mortero, sin realizar comparaciones con otros tipos de unidades, los valores presentados en la Tabla 1.1 corresponden a los valores tomados de la Tabla 4.3 de García et al. (2024).

*Tabla 1.1: Propiedades mecánicas del ladrillo macizo y mortero según García et al. (2024).*

<b>Material</b>	<b><math>f_c</math> (MPa)</b>	<b><math>f_t</math> (MPa)</b>	<b><math>E</math> (MPa)</b>	<b><math>\nu</math></b>
Ladrillo macizo	6.07	0.42	5058	0.17
Mortero	7.24	0.51	2633	0.20

Fuente: García et al. (2024).

La resistencia a compresión de la mampostería es una función de las características de sus materiales constitutivos. Las propiedades mecánicas de la mampostería con ladrillo macizo, se

presentan en la Tabla 1.1. Estos valores representan la capacidad resistente individual de los materiales y constituyen el punto de partida para procesos posteriores de homogenización.

Los módulos de elasticidad obtenidos experimentalmente valores presentados en la Tabla 1.1, evidencian la diferencia de rigidez entre ambos materiales y justifican la necesidad de considerar la mampostería como un medio compuesto equivalente en el modelado numérico.

Los valores de resistencia a tracción indirecta de la Tabla 1.1 confirman la limitada capacidad de los materiales para resistir esfuerzos de tracción, característica inherente a la mampostería.

Los coeficientes de Poisson determinados experimentalmente son valores adimensionales y coherentes con los reportados para materiales cuasi-frágiles, valores presentados en la Tabla 1.1.

#### 1.4 Propiedades de mampostería histórica según Cabané Cañas (2023)

La tesis doctoral de Cabané Cañas (2023) aborda la caracterización mecánica de mampostería en estructuras existentes mediante ensayos de laboratorio e in situ, con especial énfasis en mampostería histórica construida con ladrillo artesanal y morteros de cal, materiales representativos de estructuras patrimoniales.

*Tabla 2.1: Propiedades mecánicas típicas de mampostería histórica según Cabané Cañas (2023).*

<b>Propiedad</b>	<b>Rango Típico</b>
fc (MPa)	0.6 – 2.0
ft (MPa)	< 0.10
E (MPa)	300 – 1500
v	0.15 – 0.25
Densidad (kgf/m <sup>3</sup> )	1700 – 1900

Fuente: Cabané Cañas (2023).

La resistencia a compresión efectiva de la mampostería histórica presenta valores significativamente menores que los de mampostería contemporánea, estos valores presentados en Tabla 2.1, dependen directamente del estado de conservación y de la calidad del mortero de cal.

Los módulos de elasticidad efectivos en la Tabla 2.1, reportados para mampostería histórica se sitúan en rangos reducidos, reflejando un comportamiento más deformable, resultan adecuados para la modelación de estructuras antiguas.

La resistencia a tracción efectiva es extremadamente baja, como se muestra en la Tabla 2.1, este comportamiento explica la elevada susceptibilidad a fisuración bajo acciones laterales.

El coeficiente de Poisson para mampostería histórica se presenta en la Tabla 2.1, así mismo se presenta la densidad promedio reportada para mampostería de ladrillo con mortero de cal.

### **1.5 Contexto normativo y criterios simplificados para mampostería histórica con mortero de cal**

Mientras que los estudios de García et al. (2024) y Cabané Cañas (2023) se centran en la caracterización experimental y en la obtención de propiedades mecánicas homogenizadas de la mampostería, otros trabajos desarrollados en el ámbito de la conservación del patrimonio han abordado el problema desde una perspectiva normativa y de evaluación estructural simplificada. Estos enfoques no buscan determinar propiedades específicas de un material particular mediante ensayos directos, sino establecer rangos de referencia y parámetros equivalentes aplicables a estructuras históricas construidas con materiales tradicionales, especialmente cuando no se dispone de información experimental detallada.

En este contexto se inscribe el informe elaborado por Lourenço et al. (2020), desarrollado en el marco del Proyecto de Estabilización Sismorresistente impulsado por el Getty Conservation Institute, con la participación de la Universidade do Minho, la Pontificia Universidad Católica del Perú y la Universidad Católica de Lovaina. Esta investigación está orientada al análisis estructural de construcciones históricas caracterizadas por una baja resistencia mecánica y un comportamiento cuasi-frágil, proponiendo procedimientos simplificados que permitan evaluar su respuesta estructural frente a acciones sísmicas y cargas gravitacionales.

El trabajo de Lourenço et al. (2020) no persigue la caracterización directa de materiales individuales ni la obtención de propiedades específicas mediante campañas experimentales propias, sino la definición de órdenes de magnitud representativos del comportamiento mecánico de fábricas históricas, a partir de la síntesis de resultados experimentales previamente reportados en la literatura especializada y de la experiencia acumulada en la evaluación de edificaciones patrimoniales existentes. Desde esta perspectiva, los valores propuestos deben

interpretarse como parámetros mecánicos equivalentes, coherentes con el comportamiento observado en estructuras históricas reales, entre ellas la mampostería de ladrillo macizo con mortero de cal.

En particular, los valores de resistencia a compresión, resistencia a tracción, módulo de elasticidad y otros parámetros elásticos presentados en la Tabla 3.1 corresponden a valores efectivos adoptados para el análisis global de la estructura, considerando explícitamente la baja capacidad resistente a tracción, la influencia del mortero de cal y el carácter heterogéneo e irregular del material. Estos valores no pretenden describir un material específico ni sustituir resultados experimentales locales, sino servir como referencias técnicas ampliamente utilizadas en el análisis estructural del patrimonio construido.

En el presente trabajo de titulación, los parámetros propuestos por Lourenço et al. (2020) se incorporan con un propósito complementario y contextual, permitiendo contrastar las propiedades homogenizadas obtenidas a partir de estudios experimentales más específicos como los de García et al. (2024) y Cabané Cañas (2023) con los rangos recomendados en documentos normativos y guías técnicas empleadas en la evaluación estructural de construcciones históricas. De esta manera, se refuerza la coherencia y validez de los valores adoptados para la modelación numérica del Puente del Centenario, sin incurrir en redundancias ni extrapolaciones inapropiadas.

Con el objetivo de sintetizar esta información y facilitar su interpretación, la Tabla 3.1 presenta una recopilación de los rangos mecánicos más representativos propuestos por distintas normativas y guías técnicas para mampostería histórica de ladrillo macizo con mortero de cal. Estos valores se emplean exclusivamente como elementos de validación y contextualización de los parámetros seleccionados para el modelo numérico, y no como criterios de diseño estructural.

*Tabla 3.1: Propiedades mecánicas de mampostería de ladrillo macizo con mortero de cal según distintas normativas*

<b>Norma</b>	<b>fc (MPa)</b>	<b>E (MPa)</b>	<b>ft (MPa)</b>	<b>v</b>
Lourenço et al. (2020)	0.5 – 2.5	500 – 2000	< 0.10	0.15 – 0.25

Fuente: Elaboración propia a partir de Lourenço et al. (2020).

## **1.6 Curva esfuerzo–deformación de Kaushik y su aporte al análisis de mampostería histórica**

Una vez definidas las propiedades mecánicas de la mampostería a partir de estudios experimentales y criterios normativos, resulta necesario incorporar un marco conceptual que permita interpretar el comportamiento del material más allá del rango estrictamente elástico. En este sentido, la curva esfuerzo-deformación propuesta por Kaushik et al. (2007) se introduce en este capítulo no como una herramienta de modelación directa, sino como un referente teórico para la comprensión del comportamiento mecánico global de la mampostería histórica.

En este contexto, la curva esfuerzo-deformación propuesta por Kaushik et al. (2007) constituye una referencia fundamental para comprender el comportamiento en compresión de la mampostería de ladrillo unida con mortero. Dicha curva se deriva de ensayos experimentales de compresión uniaxial realizados sobre prismas de mampostería y describe de forma simplificada pero representativa la evolución del material desde el estado elástico inicial hasta la degradación post-pico.

La curva de Kaushik se compone de una fase inicial aproximadamente lineal, asociada al comportamiento elástico del material, seguida de una etapa de transición donde se inicia la microfisuración interna, principalmente en las juntas de mortero y en la interfaz ladrillo con mortero. Posteriormente, una vez alcanzado el esfuerzo máximo de compresión, se observa una pérdida progresiva de resistencia acompañada de una disminución significativa de la rigidez, reflejando el carácter frágil del material y su escasa capacidad de redistribución de esfuerzos.

Este comportamiento resulta especialmente representativo de la mampostería histórica, en la cual el mortero de cal, la irregularidad geométrica de las unidades y la presencia de discontinuidades internas intensifican la degradación post-pico. En consecuencia, la curva de Kaushik permite establecer órdenes de magnitud realistas tanto para el módulo de elasticidad inicial como para las deformaciones asociadas al inicio del daño, proporcionando un marco conceptual adecuado para la interpretación de resultados estructurales (Kaushik et al., 2007).

En el presente trabajo, la curva esfuerzo-deformación de Kaushik no se implementa directamente como una ley constitutiva en el modelo numérico desarrollado en SAP2000. El software emplea una idealización elástica lineal del material, definida a partir de propiedades mecánicas equivalentes como el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson y la densidad. No obstante, la información proporcionada por Kaushik et al. (2007) resulta fundamental como

herramienta de validación teórica, ya que permite verificar que los valores adoptados para la rigidez de la mampostería corresponden al tramo inicial del comportamiento real del material.

Adicionalmente, la curva de Kaushik permite contextualizar los resultados del análisis estructural, especialmente en la identificación de zonas donde las tensiones y deformaciones calculadas podrían aproximarse a niveles asociados al inicio del daño. De esta forma, aunque el análisis se desarrolla dentro del rango elástico, la interpretación de los resultados se realiza considerando las limitaciones inherentes al material, evitando conclusiones que sobrestimen su capacidad resistente.

Desde una perspectiva metodológica, la inclusión de la curva de Kaushik refuerza la coherencia del enfoque adoptado en esta investigación, al establecer un vínculo conceptual entre las propiedades homogenizadas obtenidas a partir de estudios experimentales, como los de García et al. (2024) y Cabané Cañas (2023), y los criterios de evaluación estructural de mampostería histórica. En particular, permite reconocer que la calibración modal mediante vibraciones ambientales se realiza en un régimen de pequeñas deformaciones, donde el comportamiento elástico resulta una aproximación válida del comportamiento real del puente.

En consecuencia, la curva esfuerzo-deformación de Kaushik se incorpora en este trabajo de titulación como un elemento de respaldo teórico que contribuye a una interpretación más rigurosa del comportamiento mecánico de la mampostería del Puente del Centenario, fortaleciendo la justificación de las hipótesis de modelación adoptadas y delimitando claramente el alcance del análisis estructural realizado.

### **1.7 Información geométrica del Puente del Centenario**

La definición precisa de la geometría del Puente del Centenario constituye un insumo fundamental para el desarrollo del modelo numérico de elementos finitos. En estructuras de mampostería, la geometría influye directamente en la distribución de esfuerzos, la rigidez global y los modos de vibración.

Ante la inexistencia de planos estructurales originales y debido a las restricciones propias de una estructura patrimonial, la información geométrica se obtiene a partir de documentación histórica confiable.

### **1.7.1 Fuente de información geométrica**

La tesis desarrollada por Zeas Guzmán (2013) constituye la principal fuente documental para la caracterización geométrica del Puente del Centenario. En dicho trabajo se presentan planos arquitectónicos, cortes longitudinales, elevaciones y detalles constructivos que permiten identificar la configuración estructural y las dimensiones generales del puente; sin embargo, presenta impresiones en cuanto a su forma real, que influye en el modelo numérico para su análisis.

### **1.7.2 Configuración estructural general**

De acuerdo con Zeas Guzmán (2013), el Puente del Centenario corresponde a una estructura de mampostería conformada por arcos principales de ladrillo, apoyados sobre estribos y machones de mampostería de piedra. El sistema estructural se completa con muros laterales, rellenos internos y un tablero superior destinado al tránsito vehicular y peatonal.

Este tipo estructural transmite las cargas principalmente por compresión hacia los apoyos, lo que otorga una elevada capacidad resistente frente a cargas verticales, pero una mayor vulnerabilidad frente a acciones horizontales y dinámicas (Heyman, 1995).

### **1.7.3 Uso de la información geométrica en el modelo numérico**

La información geométrica recopilada será utilizada para:

Definir la geometría base del modelo 3D del puente en SAP2000.

Identificar los volúmenes estructurales a modelar mediante elementos sólidos.

Establecer la relación geométrica entre arcos, muros, rellenos y apoyos.

Garantizar coherencia entre el modelo numérico y la configuración real del puente.

La geometría será refinada en etapas posteriores una vez se defina el método definitivo de levantamiento in situ.

## **1.8 Aplicación de la información recopilada en el modelado numérico**

La información mecánica y geométrica recopilada en este capítulo permitirá definir un modelo de elementos finitos del Puente del Centenario en SAP2000 con un comportamiento representativo de la realidad estructural.

Los valores reportados por García et al. (2024) se emplearán como referencia metodológica, mientras que los rangos obtenidos de Cabané Cañas (2023) serán prioritarios para representar la mampostería histórica del puente. La geometría definida a partir de Zeas Guzmán (2013), será útil para un premoldeado que nos dé una comprensión sobre el sistema estructural.

Esta base permitirá realizar el análisis modal preliminar y la posterior calibración del modelo mediante OMA, identificando posibles zonas críticas y mecanismos de daño.

## Capítulo 2: Modelado numérico con elementos finitos

### 2.1. Fundamentos del método de los elementos finitos y su aplicación en SAP2000

El Método de los Elementos Finitos (FEM) es una técnica matemática y numérica ampliamente utilizada en ingeniería para resolver problemas complejos de comportamiento estructural, térmico y dinámico. Su origen se remonta a mediados del siglo XX y desde entonces ha evolucionado como una herramienta fundamental para la modelación de sistemas estructurales sometidos a cargas diversas, especialmente cuando las geometrías son complejas y las soluciones analíticas no son viables (Zienkiewicz & Taylor, 2005).

En términos generales, el FEM se basa en la discretización de un dominio continuo en un conjunto de subdominios más simples denominados elementos finitos. Cada elemento representa un pequeño volumen de la estructura que se comporta según relaciones matemáticas de equilibrio, compatibilidad y leyes constitutivas del material. Al ensamblar las ecuaciones de todos los elementos, se obtiene un sistema que aproxima el comportamiento global de la estructura ante cargas, desplazamientos y condiciones de contorno aplicadas (Turner et al., 1956).

Este método ha sido desarrollado y refinado a lo largo de décadas, siendo documentado tanto desde sus fundamentos históricos (Turner et al., 1956) como en su formulación moderna y generalizada (Zienkiewicz & Taylor, 2005). Revisiones contemporáneas del método destacan no solo su importancia teórica, sino también su adaptabilidad para diferentes fenómenos físicos, incluyendo el análisis estático, dinámico y no lineal de estructuras (Liu et al., 2022).

En el contexto del análisis estructural computacional, SAP2000 implementa el Método de los Elementos Finitos para representar y resolver el comportamiento de estructuras tridimensionales complejas. A través de la definición de nodos, elementos y propiedades de material, SAP2000 construye matrices de rigidez y masa que son utilizadas para obtener desplazamientos, esfuerzos y modos de vibración. Esto permite a los ingenieros analizar estructuras bajo diversas condiciones de carga, así como realizar estudios dinámicos y modales (Computers and Structures, Inc., 2023).

Emplear FEM en un software como SAP2000 permite modelar geometrías reales con un alto grado de detalle, representando tanto la forma global de la estructura como las variaciones locales de rigidez y carga. En el presente trabajo, el empleo de elementos sólidos

tridimensionales permite capturar la respuesta volumétrica del Puente del Centenario, integrando la información geométrica y las propiedades mecánicas de la mampostería homogénea recopiladas anteriormente.

La formulación de FEM en SAP2000 se basa en el tramo elástico inicial de la curva constitutiva, representado por parámetros como el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson. Esta simplificación es adecuada para los análisis modales y elásticos que constituyen el objetivo principal de esta investigación, permitiendo comparar las propiedades dinámicas del modelo con los resultados obtenidos mediante Análisis Modal Operacional (OMA), lo que hace que SAP2000 sea un pilar metodológico para la modelación numérica del Puente del Centenario, proporcionando una plataforma robusta para la evaluación estructural bajo cargas estáticas y dinámicas, y sirviendo como base para los procesos de calibración y validación que se presentan desarrollan más adelante.

## **2.2. Obtención de la geometría del puente**

La definición geométrica del modelo numérico constituye una etapa fundamental en el análisis mediante elementos finitos, ya que la geometría de la estructura influye directamente en la distribución de rigidez, masa y respuesta dinámica del sistema. En el caso del Puente del Centenario, la obtención de la geometría se desarrolló a partir de una metodología combinada de levantamiento directo en campo y procesamiento digital de información geométrica, con el objetivo de generar una base confiable para la construcción del modelo tridimensional en SAP2000.

En primer lugar, se realizaron mediciones directas en sitio, empleando dimensiones y puntos de referencia tomados sobre la estructura real. Esta información permitió disponer de valores geométricos base para el ajuste posterior del modelo, así como verificar la correspondencia entre la estructura existente y su representación digital. De acuerdo con la metodología planteada en el protocolo de investigación, el levantamiento geométrico constituye una de las fuentes principales de información para el desarrollo del modelo numérico del puente.

Como complemento al levantamiento directo, se contó con un registro fotogramétrico del puente, desarrollado en el marco del apoyo técnico del Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador (IERSE), de la Universidad del Azuay, con participación del ingeniero Ricardo Rodas y el arquitecto Andrés Delgado. A partir de este procedimiento se obtuvo un

modelo geométrico tridimensional inicial del puente, que sirvió como referencia para la reconstrucción de su configuración general.

Posteriormente, la información geométrica obtenida fue procesada en un software especializado de reconstrucción fotogramétrica y, con base en las dimensiones reales levantadas en campo, se procedió a su ajuste y trazado en un software CAD. En esta etapa se definieron las líneas y contornos principales del puente, corrigiendo la escala y simplificando la geometría cuando fue necesario, con el fin de obtener una representación estructuralmente modelable.

La geometría finalmente utilizada en SAP2000 no corresponde a una reproducción detallada de cada unidad constructiva del puente, sino a una idealización geométrica simplificada orientada a representar de manera adecuada la configuración estructural global de la obra. Esta simplificación resulta necesaria debido a que el objetivo del modelo no es reproducir ladrillo por ladrillo ni junta por junta, sino representar el comportamiento general del puente mediante un modelo continuo de elementos sólidos. En consecuencia, la geometría adoptada conserva las características esenciales de la estructura visible, particularmente su arco principal, los elementos extremos y la volumetría general del puente, permitiendo desarrollar un modelo tridimensional coherente con el análisis estructural propuesto.

La construcción del modelo geométrico en SAP2000 se realizó, por tanto, a partir de esta base simplificada, respetando las dimensiones levantadas en campo y la configuración estructural general obtenida mediante el proceso fotogramétrico y su posterior interpretación geométrica. Este procedimiento es consistente con el enfoque metodológico del presente trabajo, en el que se busca desarrollar un modelo numérico de elementos finitos sólidos calibrable con resultados de vibración ambiental, más que una reconstrucción detallada de carácter arquitectónico.

### **2.3. Definición del modelo estructural**

Para representar el comportamiento estructural del Puente del Centenario se construye un modelo numérico tridimensional basado en el Método de los Elementos Finitos. Un modelo estructural constituye una idealización matemática del sistema físico real, cuyo propósito es simular su respuesta frente a distintas acciones mediante ecuaciones discretizadas y resueltas numéricamente (Oñate, 2009; Zienkiewicz & Taylor, 2005).

### 2.3.1. Modelo 3D y uso de elementos sólidos

Un modelo 3D permite considerar simultáneamente las tres dimensiones espaciales de la estructura, lo que resulta esencial cuando se analizan sistemas con geometría irregular, distribución compleja de masas y trayectorias no uniformes de esfuerzos, como es el caso de los puentes de mampostería históricos (Oñate, 2009). La representación tridimensional posibilita una descripción más fiel de la rigidez global, de la interacción entre componentes estructurales y de los modos de vibración que gobiernan su comportamiento dinámico.

En lo que se basa este trabajo, es en la discretización de la estructura mediante elementos sólidos tridimensionales, los cuales representan volúmenes completos del material y permiten que los esfuerzos y deformaciones se desarrollen en todas las direcciones del espacio. Cada elemento sólido posee grados de libertad asociados a los desplazamientos en los ejes  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , lo que permite reproducir adecuadamente estados y fenómenos volumétricos (Zienkiewicz & Taylor, 2005; Oñate, 2009).

Con base en la geometría definida y en los supuestos adoptados para la modelación estructural, se desarrolló un modelo tridimensional del Puente del Centenario utilizando elementos sólidos en el software SAP2000. Este modelo permite representar el volumen estructural de la mampostería y capturar la distribución espacial de rigidez y masa del sistema. Como se observa en la Figura 4.2, la estructura fue discretizada mediante una malla de elementos finitos que reproduce la configuración general del puente.



Figura 4.2: Modelo tridimensional del Puente del Centenario discretizado mediante elementos sólidos en SAP2000.

Fuente: Elaboración propia.

### **2.3.2. Supuestos adoptados en el modelo estructural**

Comportamiento elástico lineal del material.

En la etapa de análisis modal se asume que la mampostería trabaja dentro del rango elástico, donde la relación entre esfuerzos y deformaciones es lineal. Este supuesto es apropiado cuando el objetivo principal es obtener frecuencias naturales y modos de vibración de la estructura sin considerar daño o plastificación (Chopra, 2017; Zienkiewicz & Taylor, 2005). La mampostería asumida para la primera iteración del modelado, serán las planteadas por Cabané Cañas (2023) en la Tabla 2.1.

Homogeneización del material.

La mampostería se representa como un medio continuo homogéneo equivalente, cuyas propiedades mecánicas globales resumen el comportamiento conjunto del ladrillo y el mortero. Este enfoque evita la modelación explícita de cada unidad y junta, reduciendo el costo computacional sin comprometer la precisión del análisis global (Lourenço et al., 2020; García et al., 2024).

Pequeñas deformaciones y geometría invariable.

Se desprecia la no linealidad geométrica y los efectos de grandes desplazamientos, ya que el análisis se centra en la respuesta vibratoria dentro del rango de servicio. Este supuesto es habitual en análisis modales de estructuras existentes (Chopra, 2017).

Condiciones de frontera idealizadas.

Los apoyos y restricciones se definen de manera que representen adecuadamente la interacción del puente con el terreno y los elementos de fundación, simplificando los mecanismos de contacto real para hacer viable el análisis numérico (Oñate, 2009).

### **2.4. Propiedades del material**

La definición de las propiedades del material constituye una etapa esencial en la construcción del modelo numérico, debido a que dichas propiedades controlan la rigidez, la masa y, en consecuencia, la respuesta dinámica global de la estructura. En el caso del Puente del Centenario, el material estructural predominante corresponde a mampostería de ladrillo de obra unida con mortero de cal, propia de la configuración constructiva del puente.

Dado que el objetivo de esta etapa es desarrollar un modelo numérico inicial del puente mediante elementos sólidos, no se realiza una modelación detallada de cada unidad de ladrillo

ni de las juntas de mortero de forma individual. En su lugar, la estructura se representa mediante un material homogéneo equivalente, capaz de reproducir el comportamiento global de la mampostería como un medio continuo. Esta idealización resulta coherente con el enfoque de modelación adoptado en la presente investigación, ya que permite reducir la complejidad geométrica y computacional del modelo sin perder representatividad en el análisis estructural global.

La utilización de propiedades equivalentes para mampostería histórica también se justifica por las limitaciones propias del estudio de estructuras patrimoniales, en las que no resulta viable realizar ensayos destructivos directos sobre el puente. Por ello, las propiedades mecánicas adoptadas para el modelo se establecen a partir de los rangos de referencia previamente recopilados y discutidos en el Capítulo 1, correspondientes a mampostería histórica de ladrillo macizo con mortero de cal. En particular, se consideran como parámetros relevantes el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson y la densidad.

Para el modelo numérico inicial, se adopta el siguiente conjunto de propiedades mecánicas equivalentes:

- módulo de elasticidad:  $E = 2500\text{MPa}$
- coeficiente de Poisson: 0.25
- densidad:  $1900\text{kgf/m}^3$

El módulo de elasticidad representa la rigidez global del material equivalente y tiene una influencia directa en la estimación de las frecuencias naturales del puente. El coeficiente de Poisson permite definir la relación entre las deformaciones longitudinales y transversales del material, mientras que la densidad determina la masa estructural asociada al modelo, parámetro igualmente relevante en el análisis modal.

En SAP2000, los elementos sólidos requieren la asignación de propiedades de material que permitan formular el comportamiento mecánico del volumen tridimensional modelado. En este trabajo, dichas propiedades se asignan a un único material equivalente para todo el puente, con el propósito de construir un modelo base coherente y funcional para el análisis modal inicial. Posteriormente, en la etapa de calibración, estos parámetros podrán ajustarse en función de la comparación entre los resultados numéricos y las frecuencias obtenidas experimentalmente mediante análisis modal operacional.

## 2.5 Discretización y malla

La discretización en FEM consiste en transformar el dominio estructural continuo en un conjunto de elementos interconectados mediante nodos, proceso que permite aproximar la solución de las ecuaciones diferenciales que gobiernan el comportamiento de la estructura (Zienkiewicz & Taylor, 2005; Oñate, 2009). La configuración resultante, conocida como malla, influye de forma directa en la precisión y estabilidad de los resultados numéricos.

En modelos tridimensionales de estructuras complejas, como puentes de mampostería, se emplean preferentemente elementos sólidos que permiten representar el volumen del material y capturar la distribución tridimensional de esfuerzos y deformaciones (Oñate, 2009). La elección del tipo de elemento y de su formulación influye en la convergencia del modelo y en la calidad de la solución obtenida (Zienkiewicz & Taylor, 2005).

El tamaño de los elementos constituye uno de los factores más influyentes en la exactitud del análisis. Un mallado más fino incrementa la resolución espacial y reduce el error de aproximación, pero también aumenta el costo computacional. Bracamonte et al. (2023) demuestran que variaciones en el tamaño de malla pueden producir cambios significativos en los parámetros mecánicos estimados mediante FEM, lo que justifica la necesidad de realizar estudios de sensibilidad y convergencia.

El refinamiento de malla se aplica de manera local en regiones donde se esperan gradientes elevados de tensiones y deformaciones, como zonas cercanas a apoyos, cambios geométricos o concentraciones de esfuerzos. Esta estrategia permite mejorar la precisión del modelo sin incrementar innecesariamente el número total de elementos (Dlupal, 2022). De este modo se logra un equilibrio entre confiabilidad numérica y eficiencia computacional, aspecto fundamental para el análisis modal y la posterior calibración del modelo estructural del Puente del Centenario.

En el caso del presente estudio, la discretización del Puente del Centenario se realiza mediante elementos sólidos tridimensionales en SAP2000, ya que este tipo de elemento permite representar de forma más adecuada la geometría volumétrica del puente y la distribución espacial de rigidez y masa en una estructura de mampostería. De acuerdo con el manual de referencia del programa, los elementos sólidos son apropiados para modelar volúmenes tridimensionales continuos, en los que los esfuerzos y deformaciones pueden desarrollarse en las tres direcciones del espacio (Computers and Structures, Inc., 2017).

La malla adoptada para esta primera etapa del modelo corresponde a una discretización inicial de carácter moderado, planteada con el objetivo de obtener un modelo base funcional que permita ejecutar análisis modales preliminares sin generar una demanda computacional excesiva. Esta decisión responde a que, en una fase inicial, el propósito principal no es alcanzar el máximo refinamiento posible, sino establecer una representación numérica estable y coherente del comportamiento global del puente, que posteriormente pueda ajustarse durante la etapa de calibración.

Considerando que el espesor aproximado del arco principal varía a lo largo del mismo, se prevé emplear un tamaño de elemento compatible con una discretización suficientemente representativa de la geometría estructural, pero al mismo tiempo manejable desde el punto de vista computacional. No obstante, el valor definitivo del tamaño de malla no se fija de manera rígida en esta etapa, ya que su ajuste dependerá del desempeño del modelo y de la capacidad de reproducir de manera razonable las frecuencias naturales identificadas experimentalmente.

En consecuencia, la malla utilizada en el modelo inicial debe entenderse como una primera aproximación dentro de un proceso iterativo de modelación. Su función es servir como base para el análisis modal del puente y para la posterior comparación con los resultados obtenidos mediante vibración ambiental. En etapas posteriores, y de ser necesario, podrá refinarse la discretización en función de la sensibilidad del modelo, la convergencia numérica y la correspondencia entre la respuesta experimental y la respuesta calculada.

## **2.6 Condiciones de borde y apoyos**

Las condiciones de borde y la definición de los apoyos estructurales constituyen uno de los aspectos más influyentes en la formulación de modelos numéricos por elementos finitos, ya que controlan de forma directa la rigidez global de la estructura, la distribución de esfuerzos y sus propiedades dinámicas. Una representación adecuada de estas condiciones es esencial para obtener resultados coherentes con el comportamiento real del sistema estructural (Zienkiewicz & Taylor, 2005; Chopra, 2017; Martins & Romão, 2022).

En el presente trabajo de titulación, el Puente del Centenario se modela considerando apoyos empotrados en ambos extremos, lo que implica la restricción de los desplazamientos y rotaciones en dichas zonas. Esta idealización constituye una aproximación numérica que permite representar una elevada rigidez en los estribos de mampostería, facilitando una

adecuada transferencia de cargas hacia las fundaciones y evitando la aparición de mecanismos locales no representativos dentro del modelo estructural (Oñate, 2009).



Figura 5.2: Detalle de apoyos y estribos del Puente del Centenario, representativos de las condiciones de borde.

Fuente: Elaboración propia.

Diversos estudios aplicados a puentes han demostrado que la forma en que se representan los apoyos influye directamente en la respuesta estructural obtenida mediante modelos de elementos finitos, afectando tanto la distribución de esfuerzos como las características dinámicas del sistema, en particular las frecuencias naturales y los modos de vibración (Hester et al., 2019).

En esta investigación, el modelo numérico se enfoca exclusivamente en el comportamiento estructural de la superestructura del puente, sin considerar de forma explícita la interacción con el terreno. La influencia de las fundaciones y del entorno se incorpora únicamente a través de las condiciones de borde impuestas en los apoyos.

Esta decisión metodológica responde al objetivo central del estudio, que es la calibración y el análisis estructural del Puente del Centenario mediante un modelo de elementos finitos, permitiendo evaluar su respuesta mecánica global bajo diferentes escenarios de carga, sin extender el alcance del trabajo hacia el análisis geotécnico del sistema suelo-estructura.

De esta manera, las condiciones de borde adoptadas establecen un marco de referencia claro para el comportamiento del modelo numérico, garantizando estabilidad computacional y coherencia estructural, y permitiendo que los resultados obtenidos representen de forma adecuada el desempeño del puente dentro de los límites definidos para la investigación.

En términos de implementación numérica, esta idealización se traduce en la asignación de restricciones en los nodos ubicados en las zonas extremas del modelo, definiendo así los grados de libertad impedidos en los puntos de apoyo. En SAP2000, la definición de apoyos y restricciones nodales forma parte esencial de la formulación del modelo estructural, ya que condiciona la estabilidad del sistema y la manera en que se desarrolla la respuesta del conjunto ante las acciones aplicadas. El manual de referencia del programa señala que los grados de libertad restringidos en los apoyos forman parte de la definición básica del modelo de análisis y afectan directamente la respuesta en desplazamientos, reacciones y comportamiento global del sistema (Computers and Structures, Inc., 2017).

Bajo este criterio, la condición de apoyo empotrado adoptada en el presente estudio constituye una hipótesis inicial razonable para representar la superestructura del puente dentro del alcance definido para la investigación. Su validez se verificará posteriormente de manera indirecta durante la etapa de calibración modal, mediante la comparación entre las frecuencias naturales y formas modales obtenidas numéricamente y aquellas identificadas experimentalmente a partir de las mediciones de vibración ambiental. De este modo, las condiciones de borde no se consideran parámetros absolutamente rígidos o definitivos, sino parte del conjunto de supuestos iniciales del modelo numérico, susceptibles de revisión en caso de que la comparación con la respuesta experimental así lo requiera.

## **2.7. Configuración del análisis numérico**

Con el modelo estructural definido, discretizado y con las condiciones de borde establecidas, se procede a configurar el análisis numérico que será aplicado al Puente del Centenario. En esta investigación se adopta un análisis modal elástico, cuyo propósito es identificar las frecuencias naturales y las formas modales de la estructura, parámetros indispensables para la comparación posterior con los resultados experimentales obtenidos mediante análisis modal operacional (OMA).

El análisis modal se basa en la resolución del problema de autovalores del sistema estructural, permitiendo describir el comportamiento dinámico de la estructura a partir de un conjunto

reducido de modos de vibración dominantes (Zienkiewicz & Taylor, 2005; Chopra, 2017). Este tipo de análisis resulta especialmente adecuado para estructuras históricas de mampostería, ya que sus frecuencias naturales están fuertemente influenciadas por la rigidez global y el estado de conservación del material, lo que lo convierte en una herramienta eficiente para la evaluación estructural y la calibración de modelos numéricos (Gentile & Saisi, 2013; Martins & Romão, 2022).

Como resultado del análisis modal realizado en SAP2000, se obtienen las formas modales asociadas a las frecuencias naturales del sistema estructural. Estas formas modales permiten identificar los patrones de deformación dinámica predominantes del puente y constituyen un parámetro fundamental para la calibración del modelo mediante vibración ambiental. Un ejemplo de una de las formas modales obtenidas se presenta en la Figura 6.2, donde se observa la deformación amplificada del modelo estructural.



Figura 6.2 Forma modal del modelo numérico del Puente del Centenario obtenida mediante análisis modal en SAP2000.

Fuente: Elaboración propia.

Para el modelado se asume el supuesto de comportamiento lineal elástico, coherente con los objetivos de identificación dinámica y calibración, ya que permite establecer una relación directa entre las propiedades mecánicas del modelo y la respuesta vibratoria observada en la estructura real (Foti et al., 2018). Bajo este enfoque, no se incorporan efectos no lineales ni mecanismos de daño, puesto que el interés principal se centra en la representación del comportamiento global del puente en su estado actual.

La implementación del análisis se realiza en el software SAP2000, el cual permite la obtención eficiente de los modos propios y sus correspondientes frecuencias, constituyendo la base técnica

para la fase de ajuste y validación del modelo estructural (Computers and Structures, Inc., 2023).

En esta etapa inicial del estudio, el análisis modal se orienta a la identificación de los modos de vibración predominantes del puente en las tres direcciones principales del sistema global: vertical (eje Z), transversal (eje X) y longitudinal (eje Y). Esta elección responde a que dichas direcciones concentran la información dinámica más relevante para la comparación entre el modelo numérico y los resultados obtenidos experimentalmente mediante vibración ambiental, constituyendo una base suficiente para la evaluación preliminar de la coherencia del modelo estructural.

Las frecuencias naturales determinadas experimentalmente mediante OMA servirán como referencia para contrastar la respuesta del modelo y valorar el nivel de correspondencia entre la rigidez y la masa representadas numéricamente y el comportamiento real de la estructura. En este sentido, la configuración del análisis numérico no se limita únicamente a la obtención de autovalores y autovectores, sino que forma parte de una estrategia de calibración progresiva, en la que el modelo inicial podrá ajustarse posteriormente a partir de la comparación con los resultados experimentales obtenidos por el Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador (IERSE), de la Universidad del Azuay.

Desde el punto de vista computacional, SAP2000 resuelve el análisis modal a partir de la formulación matricial del sistema estructural, considerando la matriz de rigidez y la matriz de masa del modelo discretizado. El manual de referencia del programa indica que el análisis modal permite obtener períodos, frecuencias, factores de participación modal y razones de masa participante, parámetros que resultan fundamentales para la interpretación del comportamiento dinámico global de la estructura y para la selección de los modos más representativos del sistema (Computers and Structures, Inc., 2017).

En consecuencia, la configuración del análisis numérico adoptada en esta investigación constituye la base sobre la cual se desarrollará la comparación posterior entre el modelo de elementos finitos y la respuesta dinámica identificada experimentalmente. De esta manera, el análisis modal no se entiende como un resultado aislado, sino como una herramienta de diagnóstico y ajuste que permitirá avanzar, en las etapas siguientes del trabajo, hacia la calibración del modelo estructural del Puente del Centenario.

## **2.8. Criterios de validación del modelo numérico**

Una vez definido el modelo estructural tridimensional del Puente del Centenario mediante el método de los elementos finitos, resulta indispensable establecer criterios técnicos que permitan verificar la confiabilidad y coherencia de los resultados obtenidos. La validación del modelo numérico constituye una etapa esencial del proceso de análisis, ya que garantiza que la representación computacional reproduzca de forma adecuada el comportamiento estructural real del sistema.

De acuerdo con Zienkiewicz y Taylor (2005), un modelo de elementos finitos no puede considerarse correcto únicamente por su correcta formulación matemática, sino que debe ser contrastado mediante criterios físicos, mecánicos y experimentales que aseguren su consistencia con el fenómeno real que se desea representar. En estructuras históricas de mampostería, esta necesidad se vuelve aún más crítica debido a la elevada incertidumbre asociada a las propiedades del material y a las condiciones constructivas originales (Foti et al., 2018).

La validación del modelo se realizará principalmente a través de la comparación entre los parámetros dinámicos obtenidos numéricamente y aquellos medidos experimentalmente mediante el Análisis Modal Operacional (OMA). Esta metodología de validación ha sido ampliamente empleada en la evaluación de estructuras patrimoniales, ya que permite verificar el nivel de correspondencia entre el comportamiento dinámico real de la estructura y su representación numérica (Gentile & Saisi, 2013).

### **2.8.1. Los principales criterios de validación considerados serán:**

Frecuencias naturales:

Se evaluará la diferencia relativa entre las frecuencias naturales obtenidas del modelo numérico y las identificadas experimentalmente. Diversos autores recomiendan que esta discrepancia se mantenga dentro de rangos reducidos, generalmente inferiores al 10%, como indicador de una adecuada representación de la rigidez global de la estructura (Chopra, 2017; Foti et al., 2018).

Formas modales:

Además de la coincidencia en valores de frecuencia, se analizará la similitud entre las formas modales numéricas y las experimentales, verificando que los modos principales de vibración reproduzcan los mecanismos de deformación observados en el puente. La correspondencia

modal es un criterio fundamental para confirmar la validez estructural del modelo (Gentile & Saisi, 2013).

Sensibilidad del modelo:

Se evaluará la sensibilidad del modelo ante variaciones controladas de los parámetros mecánicos más influyentes, principalmente el módulo de elasticidad y la densidad de la mampostería. Este análisis permite identificar el grado de robustez del modelo y los parámetros que ejercen mayor influencia sobre la respuesta dinámica (Zienkiewicz & Taylor, 2005; Martins & Romão, 2022).

En conjunto, estos criterios permitirán valorar el grado de correspondencia entre el modelo numérico y el comportamiento dinámico real del Puente del Centenario, estableciendo una base objetiva para su ajuste posterior. De esta manera, la validación no se entiende únicamente como una verificación puntual de resultados, sino como un proceso técnico orientado a garantizar que el modelo estructural reproduzca de forma razonable las características mecánicas y dinámicas del puente, dentro del alcance definido para la presente investigación.

## Capítulo 3: Calibración y análisis estructural

### 3.1 Introducción

La calibración del modelo numérico constituye la etapa en la que la representación tridimensional desarrollada en SAP2000 deja de ser una idealización puramente geométrica y pasa a convertirse en una herramienta de interpretación estructural sustentada en evidencia experimental. En el caso del Puente del Centenario, esta fase resulta indispensable porque la respuesta dinámica de una estructura histórica de mampostería depende de variables con incertidumbre significativa, entre ellas la rigidez efectiva del material, la densidad global equivalente, la forma en que se idealizan los apoyos y el grado de restricción que proporcionan los elementos en contacto con los estribos y muros laterales. Debido a ello, un modelo inicial puede ser geoméricamente correcto y, al mismo tiempo, no representar de manera adecuada la respuesta vibratoria real del puente.

Conforme al enfoque planteado en el protocolo de investigación, el objetivo de este capítulo es contrastar el modelo de elementos finitos con los resultados obtenidos mediante análisis modal operacional, ajustar los parámetros más influyentes y, a partir del modelo calibrado, desarrollar el análisis estructural del puente en su estado actual. Esta secuencia responde de forma directa al objetivo general del trabajo y a los objetivos específicos relacionados con la caracterización dinámica, la calibración del modelo y la identificación de zonas críticas para la preservación del bien patrimonial.

Metodológicamente, el capítulo se organiza en cuatro bloques. En primer lugar, se presentan los resultados experimentales obtenidos mediante OMA, con énfasis en frecuencias naturales y formas modales identificadas. En segundo lugar, se exponen los resultados del modelo numérico inicial y se establece una comparación preliminar frente a la evidencia experimental. En tercer lugar, se desarrolla la estrategia de calibración, definida como un proceso iterativo de ajuste de parámetros físicamente justificables. Finalmente, una vez verificada la coherencia dinámica del modelo, se emplea la versión calibrada para interpretar la respuesta estructural del puente y localizar sectores potencialmente vulnerables, siguiendo una lógica de análisis compatible con estudios previos en puentes históricos modelados mediante macro-modelado tridimensional (Çubuk et al., 2022; Gómez et al., 2010).

Para esta primera fase de modelación, el material equivalente de la mampostería fue definido con un módulo de elasticidad de 2500 MPa, coeficiente de Poisson de 0.25 y densidad de 1900 kg/m<sup>3</sup>. Estos valores se adoptaron como punto de partida para la comparación inicial y el

análisis de sensibilidad posterior, al encontrarse dentro de rangos reportados en la literatura para mampostería histórica. No obstante, debe tenerse presente que, en estructuras existentes, dichos valores constituyen una aproximación inicial, cuya validez final no depende únicamente de su coherencia bibliográfica, sino de su capacidad para reproducir el comportamiento dinámico observado en sitio mediante el proceso de calibración.

### 3.2 Caracterización modal experimental del puente mediante OMA

#### 3.2.1 Instrumentación y disposición de sensores

La caracterización dinámica experimental del Puente del Centenario se efectuó a partir de mediciones de vibración ambiental registradas en condición de servicio. Este enfoque es apropiado para estructuras patrimoniales debido a que permite identificar sus propiedades dinámicas sin alterar el uso normal de la obra ni recurrir a excitaciones artificiales de magnitud elevada, aspecto especialmente relevante en elementos de mampostería con valor histórico y cultural (Gómez et al., 2010). Las acciones que excitan la estructura corresponden principalmente al tránsito vehicular y peatonal, a la interacción con el entorno urbano inmediato y a la acción continua del río Tomebamba, todas ellas compatibles con la filosofía del OMA aplicada a estructuras en servicio.



Figura 7.3: Acelerómetro utilizado para la medición de vibraciones en el Puente del Centenario.

Fuente: Elaboración propia.

La identificación modal experimental se realizó a partir de tres puntos instrumentados, denominados P1, P2 y P3, ubicados sobre la vereda derecha del puente. El punto P1 se localizó

en el inicio del puente, el punto P2 en el extremo opuesto y el punto P3 en la zona central del tablero. En cuanto al tipo de instrumentación, P1 correspondió a un acelerómetro monoaxial, P2 a un acelerómetro biaxial y P3 a un acelerómetro triaxial; Esta disposición permitió registrar la respuesta dinámica global del puente en sus extremos y en la parte central.

Figura 8.3 presenta la disposición general de los puntos instrumentados y el sistema de coordenadas empleado para la interpretación de la respuesta modal experimental.

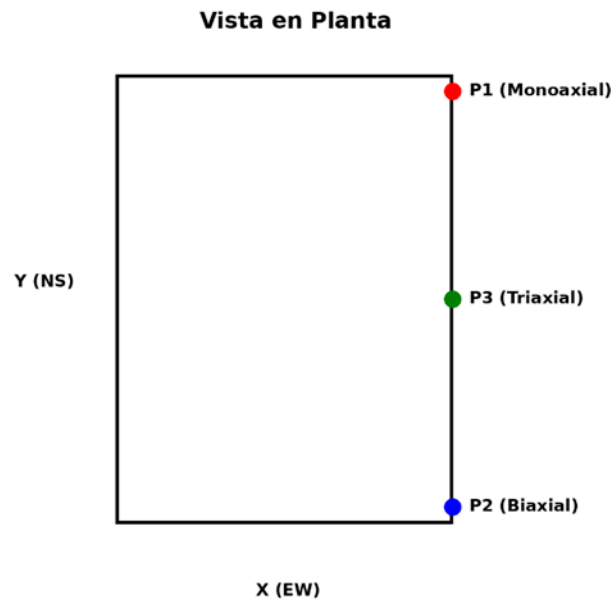


Figura 8.3. Disposición de sensores y sistema de coordenadas utilizado en la campaña OMA.

Fuente: Elaboración propia con base en resultados experimentales de la campaña OMA.

La primera campaña OMA se ejecutó el viernes 13 de febrero de 2026, con registros de aproximadamente 1 hora y 30 minutos. El levantamiento se desarrolló mediante los tres acelerómetros expuestos anteriormente; La segunda campaña OMA se ejecutó el viernes 6 de marzo de 2026, con registros de aproximadamente 2 horas con la misma disposición antes expuesta.

### 3.2.2 Frecuencias naturales identificadas

A partir del procesamiento modal se identificaron los primeros modos globales del puente. En la Tabla 4.3 se organizan las frecuencias naturales correspondientes a los primeros cuatro modos.

Tabla 4.3 Resultados modales experimentales identificados mediante OMA.

Modo	Frecuencia natural $f_{OMA}$ (Hz)
1	7.416
2	9.563
3	11.884
4	13.582

Fuente: elaboración propia con base en los resultados experimentales suministrados.

### 3.2.3 Análisis e interpretación de las formas modales experimentales

La interpretación de las formas modales experimentales no debe limitarse únicamente a mostrar las flechas de desplazamiento en los gráficos. En el caso del Puente del Centenario, estas formas modales son útiles porque permiten identificar hacia qué dirección se deforma principalmente la estructura, cómo se relaciona el movimiento entre los puntos donde se colocaron los sensores y si existe algún tipo de comportamiento combinado, como torsión o mezcla de desplazamientos verticales, longitudinales y transversales. Por esta razón, cada modo debe describirse considerando el comportamiento global de la estructura y no solo lo que ocurre en un punto específico (Chopra, 2017).

Con base en los primeros modos se muestran deformaciones globales diferenciadas, con predominio de componentes verticales en algunos casos y de desplazamientos horizontales en otros.

Modo 1. Corresponde a una deformación predominantemente vertical, en la que la respuesta observada en los puntos P1, P2 y P3 permite interpretar un movimiento global del puente en dirección vertical, con mayor participación en la zona central, lo que sugiere un comportamiento asociado a flexión vertical del sistema estructural, evidenciado en Figura 9.

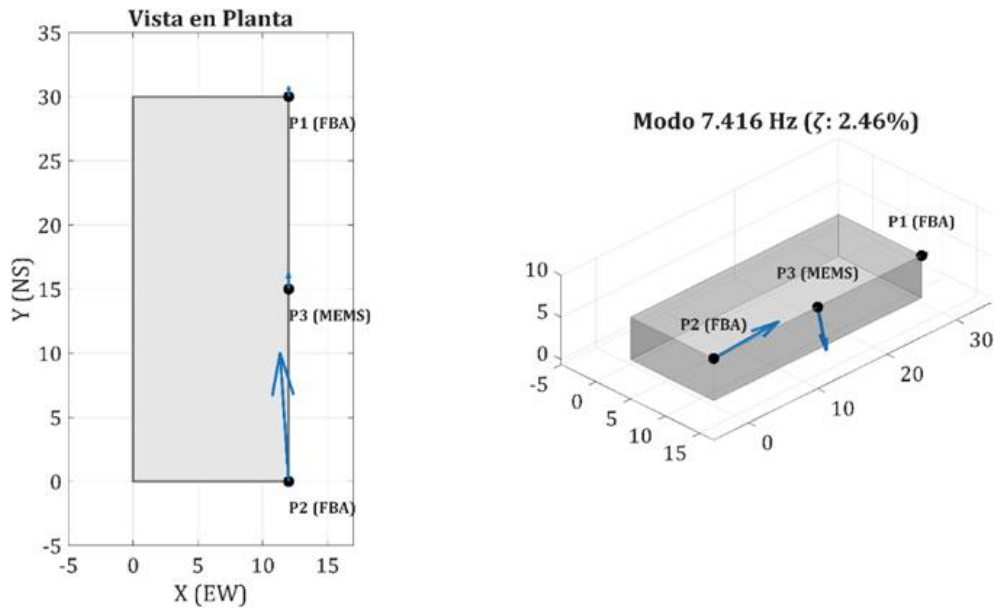


Figura 9.3: Forma modal experimental correspondiente al modo 1 obtenido mediante OMA.

Fuente: elaboración propia con base en resultados experimentales de la campaña OMA.

Modo 2. Corresponde a una deformación predominantemente horizontal en dirección transversal, en la que la respuesta observada en los puntos P1, P2 y P3 permite interpretar un desplazamiento lateral del puente, perpendicular a su eje longitudinal, con indicios de una leve componente acoplada en otras direcciones, observado en Figura 10.3.

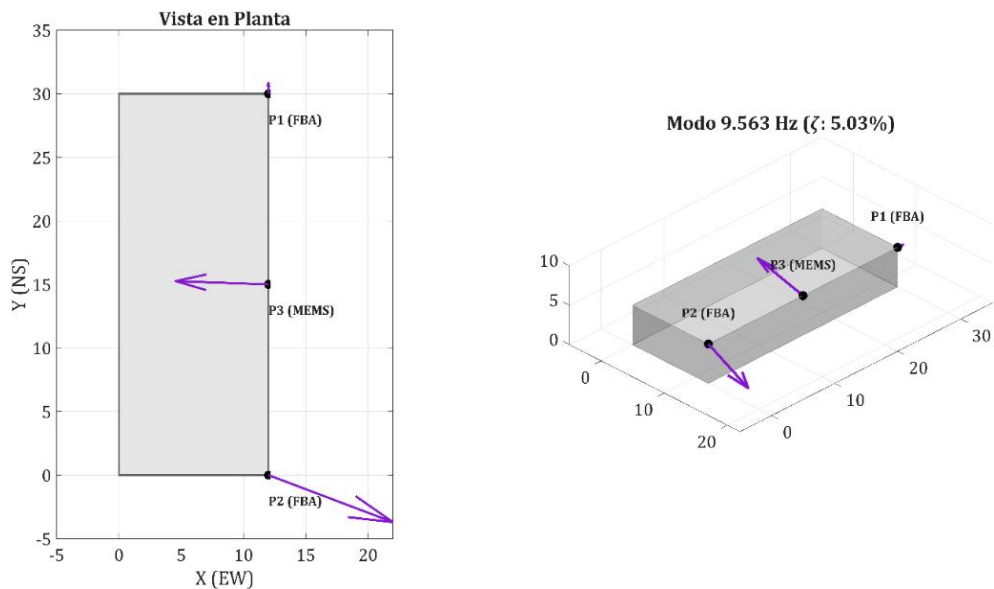


Figura 10.3: Forma modal experimental correspondiente al modo 2 obtenido mediante OMA.

Fuente: elaboración propia con base en resultados experimentales de la campaña OMA.

Modo 3. Corresponde a una deformación predominantemente vertical de orden superior, en la que la respuesta observada en los puntos P1, P2 y P3 permite interpretar un patrón de deformación más complejo que el modo fundamental, sugiriendo la presencia de variaciones en la curvatura a lo largo del puente, como se muestra en Figura 11.3.

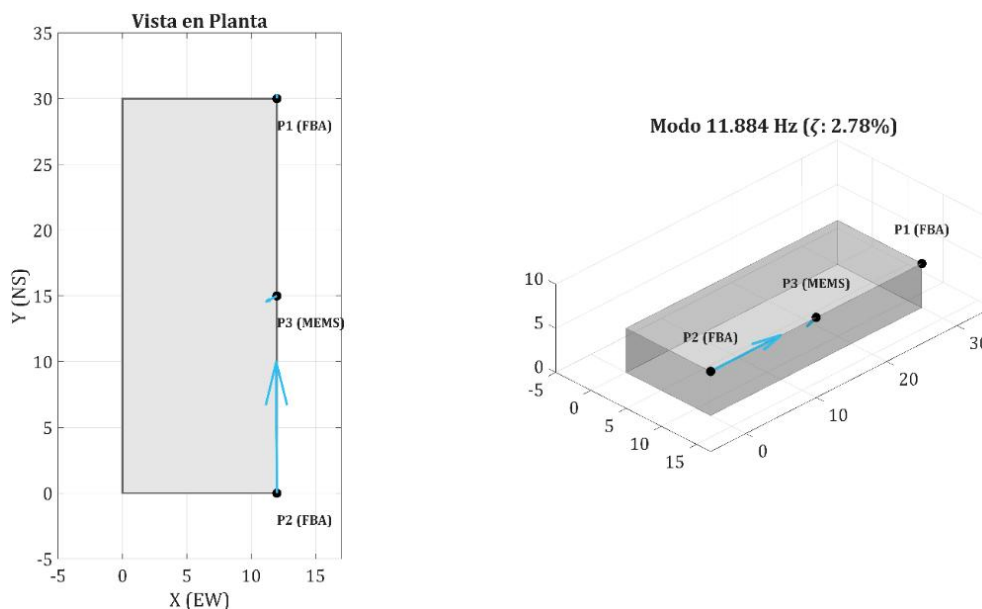


Figura 11.3: Forma modal experimental correspondiente al modo 3 obtenido mediante OMA.

Fuente: elaboración propia con base en resultados experimentales de la campaña OMA.

Modo 4. Corresponde a una deformación predominantemente longitudinal, en la que la respuesta observada en los puntos P1, P2 y P3 permite interpretar un desplazamiento en la dirección del eje del puente, acompañado de una componente vertical, lo que evidencia un comportamiento acoplado del sistema, esto se puede evidenciar en Figura 12

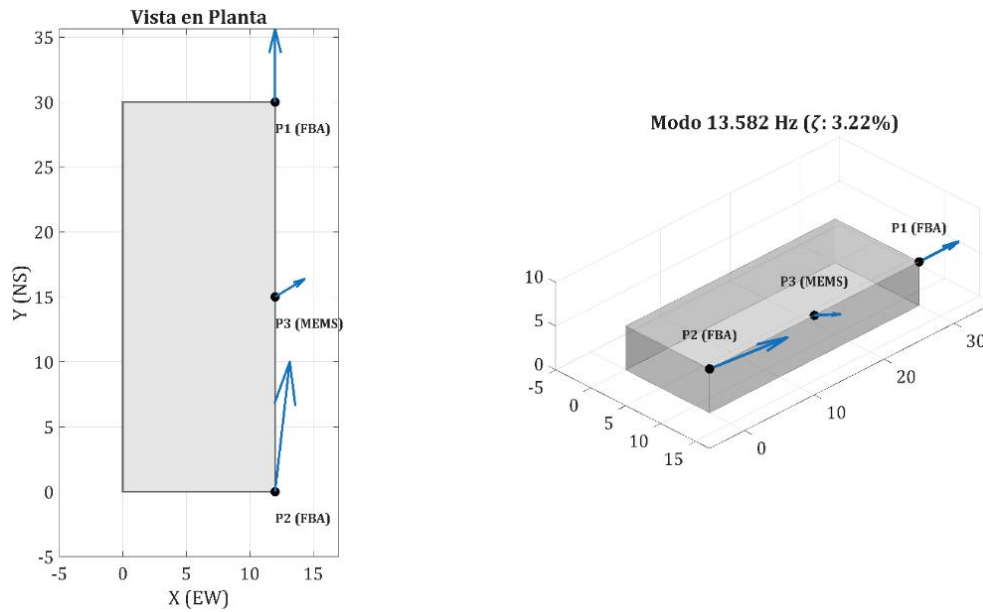


Figura 12.3: Forma modal experimental correspondiente al modo 4 obtenido mediante OMA.

Fuente: elaboración propia con base en resultados experimentales de la campaña OMA.

### 3.3 Resultados del modelo numérico inicial (FEM)

#### 3.3.1 Análisis modal en SAP2000

El modelo numérico inicial fue resuelto mediante análisis modal en SAP2000, bajo la hipótesis de comportamiento lineal elástico y empleando elementos sólidos tridimensionales. Esta formulación es coherente con el objetivo de capturar el comportamiento dinámico global del puente y con el enfoque de macro-modelado adoptado para estructuras históricas, en el que la mampostería se representa como un medio equivalente homogéneo a escala estructural (Çubuk et al., 2022; García et al., 2024).

Como parámetros iniciales del material equivalente se utilizaron un módulo de elasticidad de 2500 MPa, un coeficiente de Poisson de 0.25 y una densidad de 1900 kgf/m<sup>3</sup>. En cuanto a las restricciones, el primer corrido del modelo se ejecutó considerando empotramiento en ambos lados, en la base y en los bordes en contacto con los muros. Desde el punto de vista ingenieril, esta idealización representa un escenario de alta rigidez en el apoyo y, por tanto, es razonable anticipar que tenderá a elevar las frecuencias naturales calculadas respecto a la respuesta real del puente. Eso no invalida la corrida inicial, pero sí obliga a tratarla como una referencia de partida y no como una representación ya validada.

### 3.3.2 Frecuencias naturales del modelo

La obtención de las frecuencias naturales del modelo inicial en la Tabla 5.3 permite establecer la primera medida de coherencia entre la rigidez y masa representadas numéricamente y la respuesta experimental del puente. En esta etapa no se busca coincidencia exacta, sino identificar la magnitud y tendencia del desajuste. Si el modelo subestima las frecuencias, la interpretación más probable será una subestimación de rigidez global o una representación no representativa de los apoyos.

Tabla 5.3. Resultados modales del modelo numérico inicial.

Modo	Frecuencia natural, $f_{FEM,ini}$ (Hz)	Período, T (s)
1	5.1198	0.195
2	6.593	0.151
3	8.501	0.118
4	9.432	0.106

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.3 Formas modales numéricas

Además de las frecuencias, el modelo inicial debe evaluarse mediante sus formas modales. Esta verificación es esencial porque una cercanía numérica entre frecuencias no garantiza por sí misma que el patrón de deformación calculado represente adecuadamente la respuesta física del puente. En estructuras históricas, dos modelos pueden arrojar frecuencias similares y, sin embargo, diferir de manera importante en la dirección dominante de sus deformaciones o en la participación relativa de los sectores extremos y del tramo central.

Las figuras del modelo inicial que se comparan con el OMA corresponden a las frecuencias fundamentales del puente. En términos cualitativos, la respuesta modal inicial se caracteriza por su dirección predominante, y el emparejamiento entre modos experimentales y numéricos se efectuó con base en valores obtenidos en la bibliografía expuesta en Tabla 1.1 y Tabla 2.1.

### 3.4 Comparación inicial OMA vs FEM

#### 3.4.1 Comparación de frecuencias

La primera evaluación del ajuste del modelo se realiza comparando las frecuencias naturales obtenidas experimentalmente con aquellas calculadas en SAP2000. Para ello, se adopta como indicador básico el error porcentual absoluto definido por la Ecuación 1.

Ecuación 1.3. Expresión utilizada para determinar el error porcentual entre las frecuencias naturales obtenidas del modelo numérico (FEM) y las identificadas experimentalmente mediante OMA.

$$\text{Error}(\%) = \frac{[f_{\text{FEM}} - f_{\text{OMA}}]}{f_{\text{OMA}}} * 100$$

Fuente: Elaboración propia a partir del concepto de error relativo.

Tabla 6.3: Comparación inicial de frecuencias entre OMA y modelo numérico.

Modo	$f_{\text{OMA}}$ (Hz)	$f_{\text{FEM,ini}}$ (Hz)	Error (%)
1	7.416	5.1198	30.963
2	9.563	6.593	31.057
3	11.884	8.501	28.467
4	13.582	9.432	30.555

Fuente: elaboración propia.

Desde un punto de vista ingenieril, el primer corrido no tiene por qué coincidir con precisión con los resultados experimentales. De hecho, en un modelo inicial es esperable encontrar discrepancias relevantes, especialmente cuando las propiedades mecánicas equivalentes provienen de rangos bibliográficos y cuando las condiciones de borde se han idealizado de forma conservadora. Lo importante en esta fase no es ocultar el error, sino demostrar que el desajuste tiene una explicación física y que el proceso de ajuste posterior se apoya en variables con significado estructural.

#### 3.4.2 Comparación de formas modales

La comparación entre formas modales constituye la verificación más importante después de la coincidencia en frecuencia. Un modelo puede aproximar razonablemente una frecuencia y, aun

así, fallar en la reproducción del modo correspondiente si la deformada numérica no guarda relación con el patrón observado experimentalmente. Por esa razón, el emparejamiento modal debe sustentarse en la dirección dominante de la deformada, en la relación de fase entre sensores.

A pesar de las discrepancias observadas en las frecuencias naturales del modelo inicial (Tabla 6.3), el análisis cualitativo de las formas modales muestra una adecuada correspondencia entre los modos experimentales identificados mediante OMA y los obtenidos en el modelo numérico. Esto indica que, si bien la rigidez global del modelo no está correctamente calibrada, la representación de la geometría estructural y la distribución de masa permiten reproducir de forma consistente los mecanismos de deformación del puente.

La correspondencia entre los modos experimentales y numéricos del modelo inicial se resume de la siguiente manera.

Modo 1. Se identifica una coincidencia clara en un comportamiento de flexión predominantemente vertical, donde tanto el modelo numérico como los resultados experimentales muestran una deformación global en dirección vertical, con mayor participación en la zona central del puente.

Modo 2. Ambos resultados evidencian un modo predominantemente lateral en dirección transversal, con desplazamientos perpendiculares al eje longitudinal del puente. La relación de movimiento entre los puntos instrumentados es consistente entre el modelo y el OMA, lo que permite establecer una correspondencia confiable.

Modo 3. Se observa una correspondencia en un modo de flexión vertical de orden superior, en el cual la deformación presenta un patrón más complejo que el modo fundamental, reflejando variaciones en la curvatura a lo largo de la estructura.

Modo 4. El modelo y los resultados experimentales coinciden en un modo predominantemente longitudinal, en el que el desplazamiento se desarrolla en la dirección del eje del puente, con una componente vertical asociada.

### **3.4.3 Evaluación preliminar**

Con base en la comparación inicial, el modelo preliminar debe calificarse de manera explícita. Si las frecuencias calculadas resultan sistemáticamente mayores que las experimentales, la interpretación técnica más consistente será una sobrestimación de rigidez global, posiblemente asociada al valor adoptado de  $E$ , al esquema de empotramiento o a ambos factores

simultáneamente. Si, además, la forma modal inicial no reproduce las deformadas observadas, el problema deja de ser únicamente cuantitativo y pasa a involucrar la forma de idealización estructural.

En síntesis, El modelo inicial subestima la respuesta dinámica del puente, con errores porcentuales comprendidos entre 28.467% a 31.057%. Este comportamiento se atribuye principalmente a una subestimación de la elasticidad y una sobreestimación de la densidad.

### **3.5 Estrategia de calibración del modelo**

#### **3.5.1 Parámetros de calibración**

La calibración debe centrarse únicamente en parámetros con influencia física demostrable sobre la respuesta dinámica del puente (Tabla 7.3). En esta investigación, los parámetros de ajuste prioritarios son el módulo de elasticidad equivalente, la densidad global equivalente y la representación de las condiciones de borde. El módulo de elasticidad controla de manera directa la rigidez del sistema y, por tanto, las frecuencias naturales; la densidad modifica la matriz de masa y altera la relación entre masa y rigidez; y las restricciones en apoyos y contactos con muros afectan significativamente tanto la rigidez global como la forma de las deformadas (Chopra, 2017; Zienkiewicz & Taylor, 2005; Martins & Romão, 2022).

No es técnicamente recomendable calibrar modificando simultáneamente demasiadas variables sin una secuencia definida, porque ello puede conducir a una coincidencia numérica sin significado estructural. Por esta razón, el ajuste debe seguir un orden lógico: en primer término, revisar la representación de apoyos y restricciones; en segundo término, analizar la sensibilidad del módulo de elasticidad; y, en tercer término, ajustar la densidad solo si el comportamiento observado no puede explicarse con los dos parámetros anteriores. Esta jerarquía evita utilizar la masa como variable de compensación indebida frente a errores de rigidez.

Tabla 7.3. Parámetros considerados en la estrategia de calibración.

Parámetro	Valor inicial	Rango o alternativas de ajuste	Justificación estructural
Módulo de elasticidad, E	2500 MPa	2500-3500 MPa	Controla la rigidez global y las frecuencias naturales
Densidad, $\rho$	1900 kgf/m <sup>3</sup>	1000-2000 kgf/m <sup>3</sup>	Modifica la matriz de masa del sistema
Coefficiente de Poisson, $\nu$	0.25	Se mantiene constante salvo justificación contraria	Influencia secundaria respecto a E y $\rho$
Condiciones de borde	Empotramiento en base y bordes inferiores en contacto con muros	Empotramiento en base y bordes en contacto con muros	Controlan la rigidez global y la forma modal

Fuente: elaboración propia.

### 3.5.2 Criterio de ajuste

El modelo calibrado no debe evaluarse únicamente por cercanía entre frecuencias. Para considerar aceptable el ajuste, deben cumplirse tres condiciones simultáneas. La primera es que el error en frecuencia se reduzca a un rango compatible con estudios de calibración modal en estructuras existentes, como umbral máximo de error, no se admitirán valores mayores al 5%. La segunda es que exista correspondencia cualitativa entre las formas modales experimentales y numéricas. La tercera es que los valores ajustados mantengan coherencia con la naturaleza constructiva del puente y con el rango mecánico razonable para mampostería histórica, evitando correcciones numéricas que carezcan de sustento físico.

### 3.6 Modelo calibrado

#### 3.6.1 Parámetros finales adoptados

Una vez concluido el proceso iterativo, el modelo calibrado debe definirse mediante un único conjunto de parámetros finales. Estos valores representan la mejor aproximación lograda entre respuesta experimental y respuesta numérica. En consecuencia, el conjunto final no debe presentarse como una caracterización exacta del material, sino como una identificación estructural equivalente válida para reproducir el comportamiento global del puente en el rango de vibración analizado.

*Tabla 8.3. Parámetros iniciales y calibrados del modelo estructural.*

Parámetro	Valor inicial	Valor calibrado
Módulo de elasticidad, E	2500 MPa	2942 MPa
Densidad, $\rho$	1900 kgf/m <sup>3</sup>	1150 kgf/m <sup>3</sup>
Coefficiente de Poisson, $\nu$	0.25	0.25
Condiciones de borde	Empotramiento inicial	Se empotra bordes en contacto con el muro

Fuente: elaboración propia.

#### 3.6.2 Resultados modales calibrados

La validación principal del modelo calibrado se sustenta en la mejora de correspondencia frente al OMA. Tabla 9.3 muestra de forma explícita la reducción de los errores respecto al modelo inicial, dejando evidencia de que el ajuste no fue cosmético, sino que produjo una aproximación efectiva entre el comportamiento observado y el calculado.

Tabla 9.3. Comparación entre las frecuencias naturales obtenidas experimentalmente mediante OMA y las calculadas en el modelo calibrado (FEM), junto con el error porcentual y la mejora respecto al modelo inicial.

Modo	$f_{OMA}$ (Hz)	$f_{FEM,cal}$ (Hz)	Error calibrado (%)	Error inicial (%)	Mejora (%)
1	7.416	7.182	3.155	30.963	89.81
2	9.563	9.281	2.949	31.057	90.51
3	11.884	11.915	0.261	28.467	99.08
4	13.582	13.235	2.555	30.555	91.64

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la correspondencia obtenida entre las frecuencias experimentales y numéricas, se procede a analizar las formas modales del modelo calibrado, con el fin de verificar que la similitud no se limite únicamente a valores de frecuencia, sino que también represente adecuadamente los patrones de deformación de la estructura. En este sentido, la interpretación modal se centra en identificar la dirección predominante del movimiento, la coherencia entre los puntos de control y la posible presencia de componentes acopladas.

A continuación, se presentan las formas modales correspondientes a los primeros cuatro modos del modelo calibrado.

Modo 1. Corresponde a un modo fundamental de flexión vertical global, en el cual el puente experimenta una deformación predominante en dirección vertical. Este comportamiento es característico de estructuras tipo arco, donde la respuesta dinámica inicial está dominada por la rigidez global del sistema en sentido vertical. La deformación es continua a lo largo del vano, con mayor participación en la zona central.

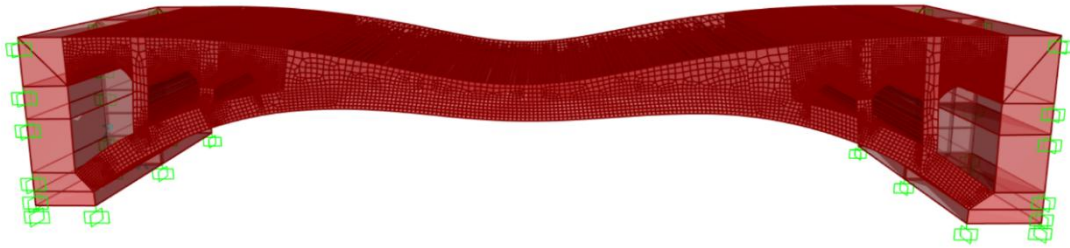


Figura 13.3: Forma modal numérica correspondiente al modo 1.

Fuente: Salida de SAP2000, elaboración propia.

Modo 2. Puede interpretarse como un modo predominantemente lateral, en dirección perpendicular al eje longitudinal del puente, con una componente vertical acoplada. Este comportamiento sugiere una respuesta combinada en la que intervienen tanto la flexibilidad transversal del sistema como la interacción geométrica del arco, generando una deformación espacial donde el movimiento lateral induce simultáneamente desplazamientos verticales.

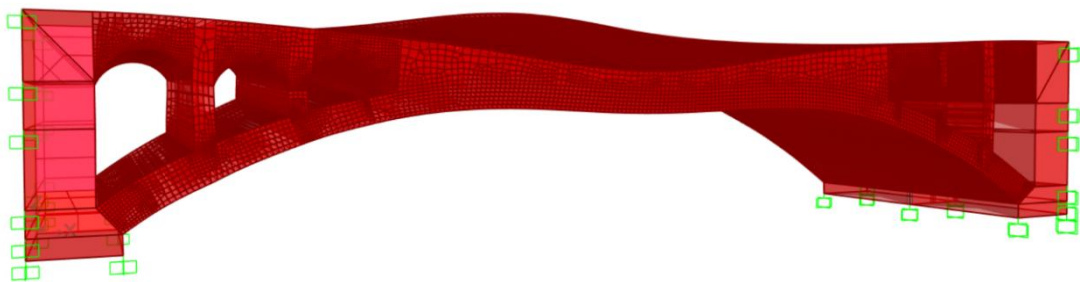


Figura 14.3: Forma modal numérica correspondiente al modo 2.

Fuente: Salida de SAP2000, elaboración propia.

Modo 3. Corresponde a un modo de flexión vertical de orden superior, caracterizado por una deformación tipo doble curvatura a lo largo del puente. En este caso, la estructura presenta más de un punto de inflexión, lo que indica una distribución más compleja de deformaciones. Este modo mantiene una clara predominancia vertical, pero refleja una mayor participación de la rigidez local y de la geometría estructural en comparación con el modo fundamental.

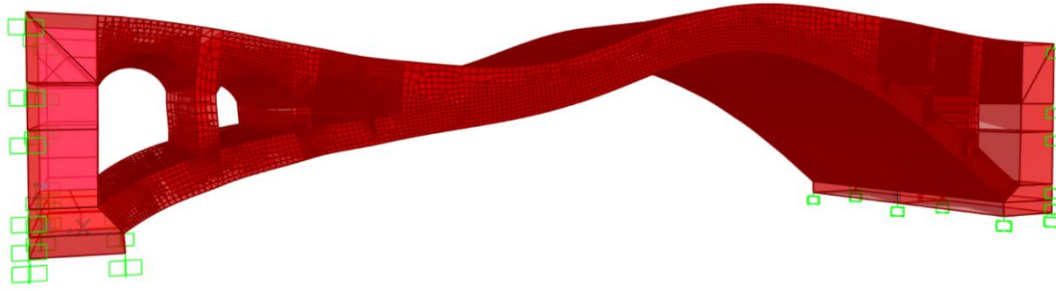


Figura 15.3: Forma modal numérica correspondiente al modo 3.

Fuente: Salida de SAP2000, elaboración propia.

Modo 4. Se identifica como un modo traslacional en dirección longitudinal, es decir, a lo largo del eje del puente, con una componente vertical asociada. Este comportamiento evidencia la participación de la rigidez axial del sistema y de las condiciones de borde, generando un desplazamiento global en sentido longitudinal que no es puramente rígido, sino que se encuentra acoplado con deformaciones verticales del arco.

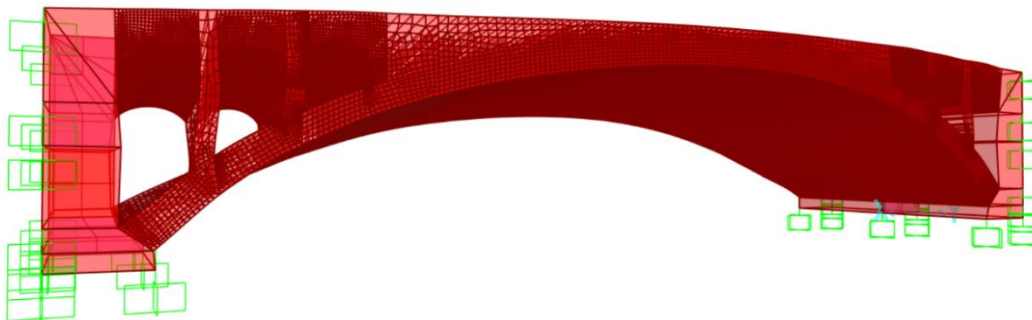


Figura 16.3: Forma modal numérica correspondiente al modo 4.

Fuente: Salida de SAP2000, elaboración propia.

### 3.6.3 Validación del modelo

La aceptación del modelo calibrado debe formularse con prudencia. Un buen ajuste modal valida la representación global del sistema en el rango dinámico analizado, pero no implica, por sí solo, que el modelo describa adecuadamente mecanismos locales de daño, redistribuciones no lineales de esfuerzos ni la respuesta ante demandas extremas. En otras palabras, el modelo calibrado es apto para interpretar el comportamiento estructural global del puente en condición de servicio y para servir como línea base de monitoreo, pero no debe extrapolarse a conclusiones para las que no fue construido.

En términos globales, el modelo calibrado reproduce de manera consistente las frecuencias y formas modales dominantes del puente, por lo que puede emplearse como base para el análisis estructural desarrollado en las secciones siguientes.

### **3.7 Análisis estructural del modelo calibrado**

#### **3.7.1 Análisis estático**

Una vez calibrado el modelo numérico, se realizó el análisis estático del puente considerando la acción conjunta del peso propio y la carga de tráfico, con el fin de evaluar la distribución de esfuerzos en una condición representativa del estado de servicio de la estructura. Este análisis adquiere especial relevancia debido a que el Puente del Centenario no solo constituye una obra funcional, sino también un bien de alto valor histórico, urbano y patrimonial para la ciudad de Cuenca, por lo que la interpretación de su respuesta estructural resulta fundamental para comprender su comportamiento actual y contribuir a su conservación, ya que este análisis permite identificar sectores donde podrían manifestarse procesos de deterioro o fisuración en el largo plazo (Çubuk et al., 2022; Tuirán, 2024).

Desde el punto de vista estructural, la respuesta del puente no debe entenderse como la de un solo arco aislado. El sistema está conformado por el arco principal, los arcos secundarios, los machones, el tablero y los bloques extremos, de modo que la trayectoria resistente y la redistribución de esfuerzos dependen de la interacción tridimensional de todos estos componentes.

Con fines de interpretación, los resultados del análisis estático se presentan de manera separada para los estados de compresión y tensión, siguiendo un criterio similar al empleado en estudios previos sobre puentes históricos de mampostería modelados mediante elementos finitos, donde los contornos de esfuerzo se analizan por separado para reconocer con mayor claridad las zonas de mayor exigencia estructural.

La distribución de compresión obtenida en el modelo calibrado evidencia un comportamiento global coherente con la tipología estructural del puente, en la que las cargas gravitacionales y de servicio se transmiten predominantemente a través de trayectorias compresivas. En términos generales, el puente presenta una respuesta dominada por compresión, lo cual es consistente con el funcionamiento esperado de una estructura histórica de mampostería en arco.

Se observa en la Figura 17.3 que los arcos secundarios se encuentran claramente sometidos a compresión, lo que evidencia su participación en la redistribución de cargas hacia las zonas laterales del puente. De igual manera, los machones presentan un estado compresivo marcado, acorde con su función estructural de recibir y conducir las cargas hacia los apoyos.

En el arco principal, la compresión se desarrolla principalmente en la cara inferior del anillo, donde se aprecia una franja continua de material comprimido. Este comportamiento resulta compatible con el mecanismo resistente característico de los arcos de mampostería, en los cuales la estabilidad estructural depende en gran medida de la transmisión de cargas por compresión.

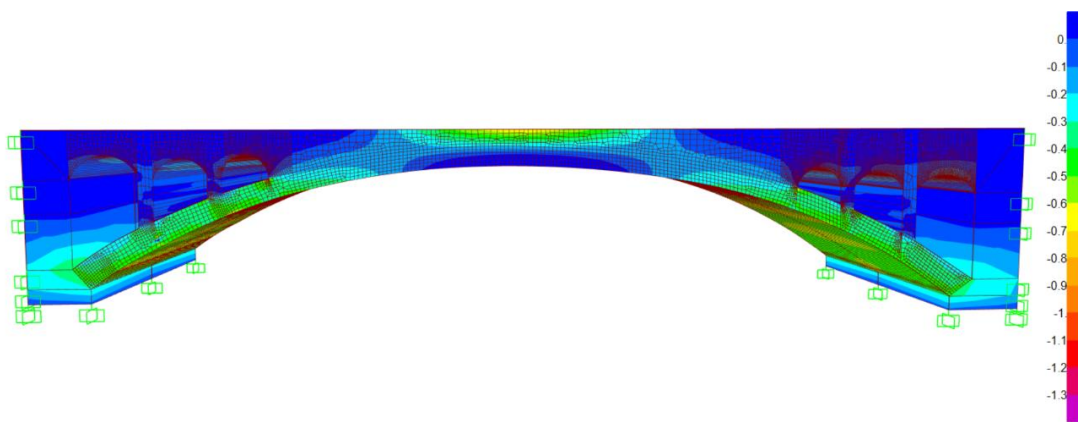


Figura 17.3: Distribución de compresión en el modelo calibrado del Puente del Centenario bajo carga estática.

Fuente: Salida de SAP2000, elaboración propia.

La distribución de tensión muestra un comportamiento distinto al observado en compresión, tanto en su localización como en su magnitud. A diferencia del estado compresivo, que domina en la mayor parte del sistema resistente, la tensión aparece de forma más localizada, concentrándose principalmente en sectores específicos del tablero.

En particular en la Figura 18.3, se identifica una zona sometida a tensión en la parte superior del tablero, localizada hacia uno de los extremos del puente. Esta concentración tensional destaca respecto al resto de la superficie superior, donde los valores de tensión son menores o prácticamente nulos. La presencia de esta zona sugiere que, bajo la combinación de peso propio y carga de tráfico, el tablero no trabaja exclusivamente a compresión, sino que desarrolla también esfuerzos de tracción localizados asociados a la redistribución interna de cargas y a la geometría tridimensional del sistema.

En contraste, gran parte del resto de la estructura presenta niveles bajos de tensión, lo que confirma que este estado de esfuerzo no gobierna globalmente el comportamiento del puente, sino que aparece de manera puntual en regiones concretas. Este aspecto resulta especialmente importante en una estructura de mampostería histórica, debido a la limitada capacidad resistente del material frente a esfuerzos de tracción.

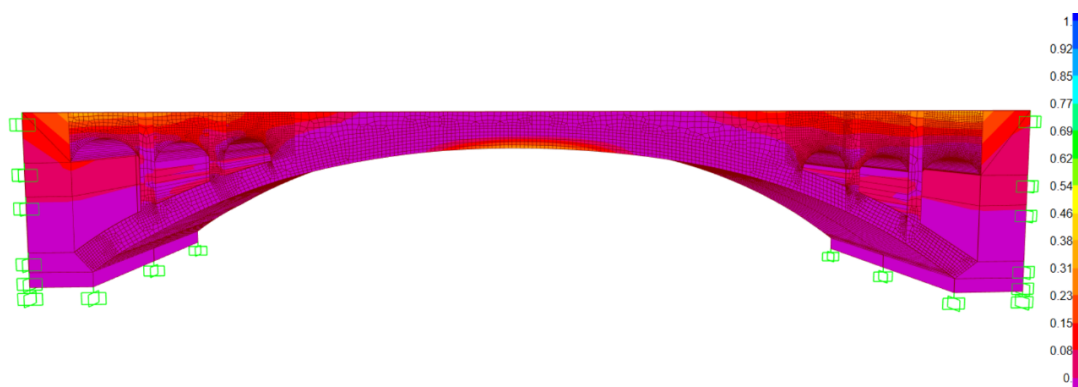


Figura 18.3: Distribución de tensión en el modelo calibrado del Puente del Centenario bajo carga estática.

Fuente: Salida de SAP2000, elaboración propia.

En conjunto, la interpretación separada de los estados de compresión y tensión permite comprender de manera más completa la respuesta estática del modelo calibrado. Mientras la compresión confirma el mecanismo resistente principal del puente, la tensión permite identificar sectores localizados que merecen atención particular dentro de la evaluación estructural, especialmente desde una perspectiva de preservación patrimonial.

A partir de los resultados obtenidos en el análisis estático, los contornos de esfuerzos indican que la máxima compresión alcanzada en la estructura es de 1.239 MPa, mientras que la máxima tensión registrada es de 0.72 MPa. Estos valores permiten cuantificar el nivel de sollicitación del puente y constituyen una referencia clave para la identificación de zonas críticas y la interpretación del comportamiento estructural global.

### 3.7.3 Análisis dinámico

Con el modelo numérico previamente calibrado, se desarrolló el análisis dinámico del Puente del Centenario mediante un procedimiento de historia en el tiempo (time history), utilizando como entrada un registro sísmico real correspondiente a un evento ocurrido en la ciudad de Cuenca. Este enfoque permite representar de manera más realista la respuesta estructural del puente frente a excitaciones dinámicas, al considerar la variación temporal de las aceleraciones

y su efecto directo sobre la estructura. El análisis fue implementado en el software SAP2000, donde se definió una función de tipo time history a partir de los registros acelerográficos del sismo, incorporando de manera simultánea sus tres componentes ortogonales (X, Y, Z). La inclusión de estas tres direcciones expuestas en Figura 19.3, Figura 20.3 y Figura 21.3, resulta fundamental para capturar el comportamiento tridimensional del puente, ya que permite considerar tanto las acciones horizontales en dos direcciones perpendiculares como la componente vertical del movimiento sísmico, la cual puede influir de manera significativa en estructuras de mampostería.

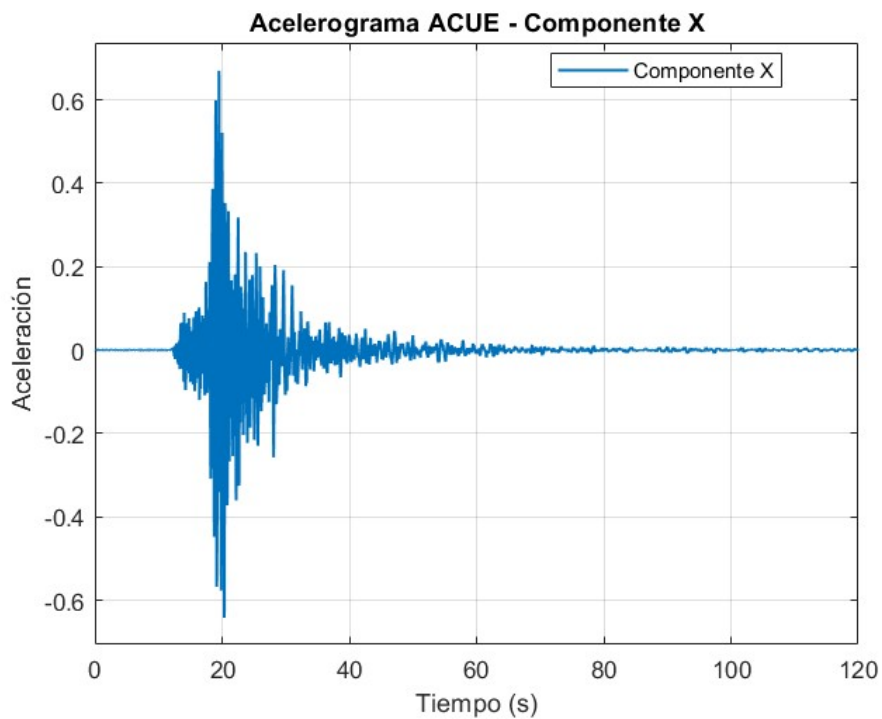


Figura 19.3: Acelerograma del sismo utilizado en el análisis dinámico, componente X.

Fuente: Registro sísmico procesado, elaboración propia.

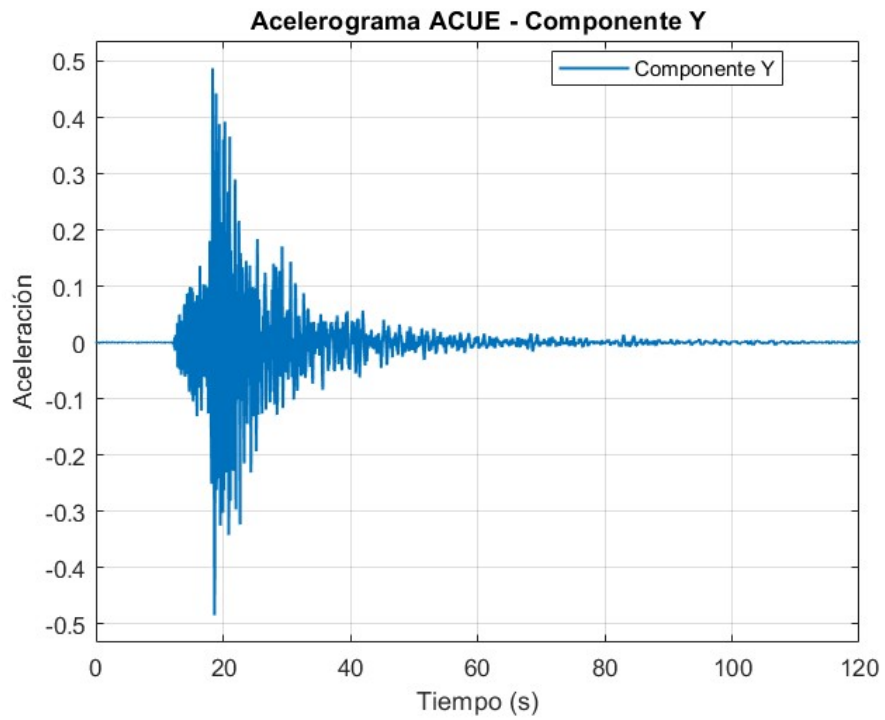


Figura 20.3: Acelerograma del sismo utilizado en el análisis dinámico, componente Y.

Fuente: Registro sísmico procesado, elaboración propia.

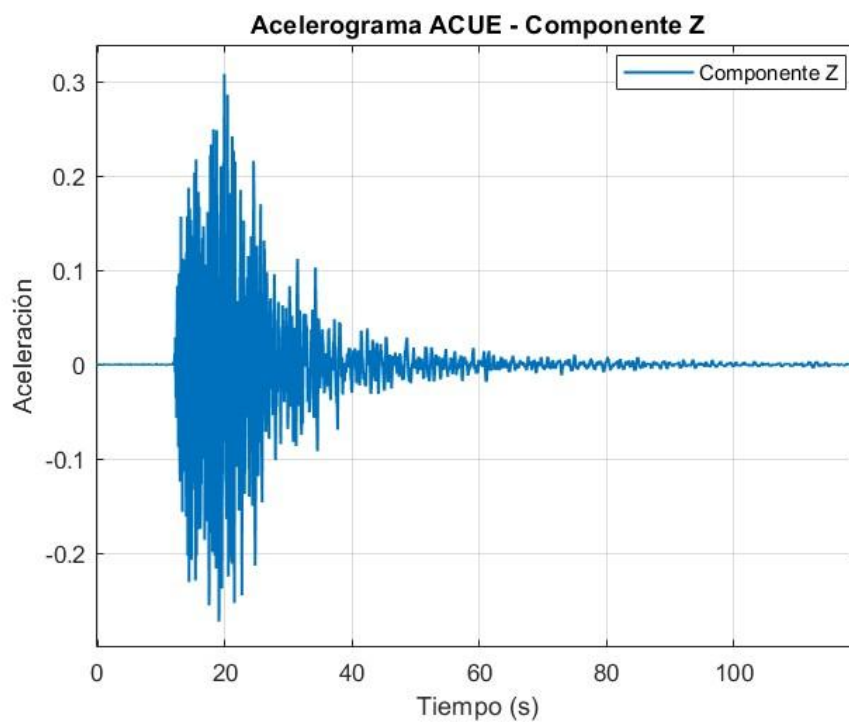


Figura 21.3: Acelerograma del sismo utilizado en el análisis dinámico, componente Z.

Fuente: Registro sísmico procesado, elaboración propia.

Los acelerogramas utilizados muestran que la mayor intensidad del movimiento se concentra en un intervalo de tiempo aproximado entre los 15 y 30 segundos, periodo en el cual se registran los picos máximos de aceleración en las tres componentes. Posteriormente, la señal presenta una disipación progresiva, reflejando el carácter transitorio del evento sísmico. Esta información fue directamente empleada en el análisis dinámico, permitiendo que el modelo estructural responda de forma coherente con la excitación real.

El comportamiento dinámico del modelo numérico fue definido incorporando el efecto del amortiguamiento mediante un modelo viscoso proporcional de Rayleigh, en el cual la matriz de amortiguamiento se expresa como una combinación lineal de la matriz de masa y la matriz de rigidez del sistema estructural. Este enfoque permite representar la disipación de energía en estructuras sometidas a excitaciones dinámicas.

En este contexto, el amortiguamiento es definido como la capacidad del sistema estructural para disipar energía, la cual se incorpora en la ecuación de equilibrio dinámico mediante la matriz de amortiguamiento (Cabrera Vélez, 2022). Asimismo, el modelo de Rayleigh permite representar este fenómeno como una combinación proporcional de la masa y la rigidez estructural, lo cual constituye una aproximación ampliamente utilizada en el análisis dinámico de estructuras (Cabrera Vélez, 2022).

A diferencia de los enfoques convencionales que adoptan valores típicos de amortiguamiento, en la presente investigación se empleó un valor del 1.5% del amortiguamiento crítico, determinado a partir de resultados experimentales obtenidos mediante OMA. Este valor corresponde al promedio de los coeficientes de amortiguamiento modales asociados a los primeros modos de vibración del puente, identificados a partir de mediciones con acelerómetros.

Este procedimiento es coherente con lo expuesto por Cabrera Vélez (2022), quien indica que los coeficientes del modelo de Rayleigh pueden determinarse a partir de las propiedades dinámicas del sistema, considerando aquellas frecuencias que movilizan la mayor parte de la masa estructural. En este sentido, el valor adoptado permite representar de forma más realista la disipación de energía del sistema, al estar directamente basado en la respuesta dinámica medida en la estructura existente.

En consecuencia, el modelo numérico no solo reproduce adecuadamente las frecuencias naturales mediante el proceso de calibración, sino que también incorpora un nivel de

amortiguamiento coherente con el comportamiento dinámico real del puente, mejorando la confiabilidad de los resultados obtenidos en el análisis sísmico.

A partir del análisis en el dominio del tiempo, se obtuvieron las envolventes máxima y mínima de esfuerzos, con el fin de identificar las zonas más exigidas del puente durante toda la duración del sismo.

La envolvente máxima de esfuerzos permite identificar las regiones donde la acción sísmica genera las mayores demandas en la estructura. Se observa en la Figura 22.3 que las zonas más solicitadas se concentran principalmente en el tablero del puente, destacando los extremos a tensión y el centro del puente a compresión, lo que indica una respuesta significativa de la superestructura frente a la excitación dinámica.

Adicionalmente, el arco principal presenta sectores donde se alcanzan valores elevados dentro de esta envolvente, evidenciando que, bajo acción sísmica, este elemento no trabaja exclusivamente a compresión, sino que también puede desarrollar estados tensionales localizados. De igual forma, los arcos secundarios muestran concentraciones de tensión, lo que confirma su participación activa en la respuesta global del sistema.

Esta distribución es particularmente relevante debido a la naturaleza del material, ya que la mampostería presenta una capacidad muy limitada frente a esfuerzos de tracción, por lo que la presencia de estas zonas representa un aspecto crítico en la evaluación estructural.

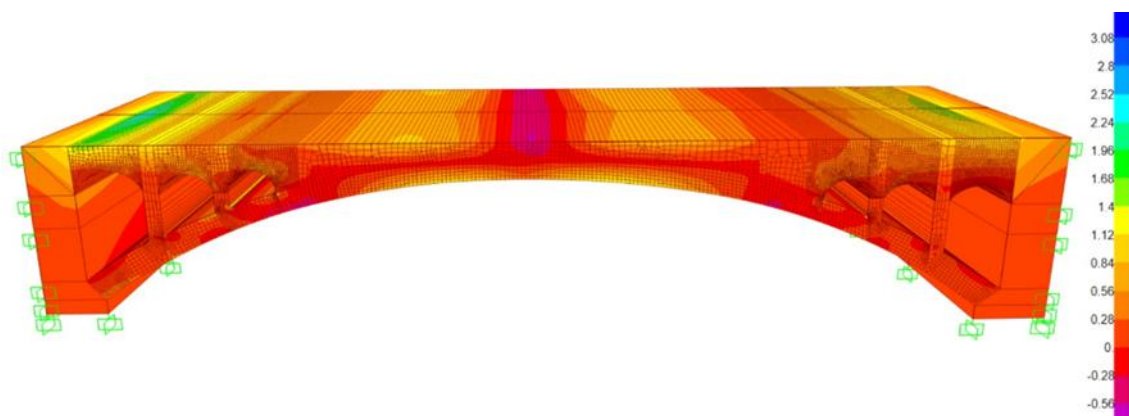


Figura 22.3: Envolvente máxima de esfuerzos del modelo calibrado bajo acción sísmica.

Fuente: Salida de SAP2000, elaboración propia.

Por su parte en Figura 23.3, la envolvente mínima de esfuerzos permite identificar las zonas donde se desarrollan las mayores demandas durante la respuesta sísmica. En este caso, se

observa que el arco principal concentra una parte importante de los esfuerzos compresivos, lo cual es consistente con su función estructural como elemento principal de transferencia de cargas.

Los arcos secundarios también presentan zonas claramente comprimidas, indicando que durante el evento sísmico estos elementos contribuyen a la redistribución de esfuerzos hacia las zonas laterales del puente. Asimismo, el tablero y la región central muestran niveles de compresión relevantes, aunque con una distribución distinta a la observada en la envolvente máxima.

Esta diferencia en la distribución de esfuerzos entre ambas envolventes pone en evidencia que la respuesta dinámica del puente es altamente variable en el tiempo, alternando entre estados de tracción y compresión en distintos sectores de la estructura.

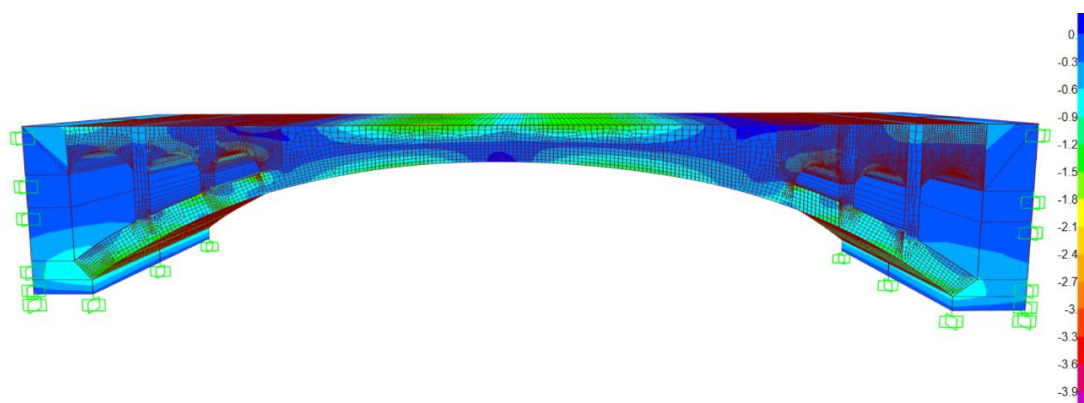


Figura 23.3: Envolvente mínima de esfuerzos del modelo calibrado bajo acción sísmica.

Fuente: Salida de SAP2000, elaboración propia.

El análisis dinámico mediante historia en el tiempo, utilizando las tres componentes del sismo real de Cuenca, permite concluir que el Puente del Centenario presenta una respuesta estructural compleja bajo excitación sísmica, caracterizada por la aparición simultánea de zonas críticas de tensión y compresión en diferentes partes del modelo.

Mientras que la envolvente máxima y mínima permiten identificar los sectores más vulnerables asociados a esfuerzos de tracción y compresión. Esta dualidad resulta fundamental en estructuras de mampostería, donde la estabilidad depende del adecuado equilibrio entre ambos estados de esfuerzo.

A partir de los resultados obtenidos en el análisis dinámico, los contornos de esfuerzos indican que la máxima tensión alcanzada en la estructura es de 3.183 MPa, mientras que la máxima

compresión registrada es de  $-4.056$  MPa. Estos valores evidencian un incremento significativo en las sollicitaciones respecto al análisis estático y constituyen una referencia fundamental para la identificación de zonas críticas y la evaluación del comportamiento estructural del puente bajo condiciones dinámicas.

Finalmente, los resultados obtenidos no solo complementan el análisis estático previo, sino que aportan información clave para la identificación de zonas críticas, contribuyendo a la evaluación estructural y a la preservación de un elemento patrimonial de alta relevancia para la ciudad de Cuenca.

## Capítulo 4: Interpretación de resultados

### 4.1 Introducción

La interpretación de los resultados obtenidos en esta investigación debe realizarse considerando que el Puente del Centenario no constituye únicamente una estructura portante sometida a acciones estáticas y dinámicas, sino un bien de alta importancia histórica, patrimonial, cultural y urbana para la ciudad de Cuenca. Su valor trasciende la función de conexión vial, ya que forma parte del paisaje del río Tomebamba, de la memoria colectiva de la ciudad y de la identidad del espacio urbano en el que se emplaza. En consecuencia, el análisis estructural desarrollado en este trabajo de titulación no se orienta únicamente a describir el comportamiento mecánico del puente, sino también a aportar criterios técnicos que contribuyan a su preservación.

En este contexto, el modelo calibrado debe entenderse como una herramienta de interpretación estructural del estado actual del puente. La calibración modal permitió ajustar la representación numérica a partir de la comparación entre frecuencias y formas modales obtenidas experimentalmente mediante OMA y las calculadas en SAP2000, logrando una mejora sustancial respecto al modelo inicial. Los errores porcentuales finales para los cuatro primeros modos se redujeron a valores comprendidos entre 0.261 % y 3.155 %, lo que permite afirmar que el modelo calibrado reproduce de manera consistente el comportamiento dinámico global del puente dentro del rango de vibración analizado.

No obstante, esta aceptación debe formularse con prudencia. Tal como se señala en el propio documento, un buen ajuste modal valida la representación global del sistema en condición de servicio, pero no implica por sí mismo que el modelo describa con exactitud mecanismos locales de daño, redistribuciones no lineales de esfuerzo o la respuesta ante demandas extremas. Por ello, la interpretación desarrollada en el presente capítulo se centra en reconocer tendencias de comportamiento, localizar sectores sensibles y discutir el significado estructural de los resultados, sin sobreextender el alcance del modelo más allá de aquello para lo que fue construido.

Desde esta perspectiva, el valor principal de los resultados no radica únicamente en la coincidencia modal alcanzada, sino en que dicha coincidencia permite disponer de una base técnicamente defendible para interpretar el comportamiento del puente y orientar futuras acciones de monitoreo, estudio y conservación. En otras palabras, el modelo calibrado no

constituye un fin en sí mismo, sino una línea base estructural para un puente patrimonial cuya preservación resulta prioritaria para la ciudad de Cuenca.

#### **4.2 Identificación de zonas críticas**

La identificación de zonas críticas constituye una de las principales aportaciones del modelo calibrado, ya que permite reconocer aquellos sectores del puente donde la respuesta estructural presenta mayores exigencias relativas y, por tanto, donde podrían concentrarse procesos de deterioro o daño en el largo plazo. En este trabajo, dichas zonas no deben interpretarse como puntos de falla inminente, sino como regiones estructuralmente más sensibles dentro del comportamiento global del sistema.

A partir del análisis estático, se observa que el puente presenta una respuesta dominada por compresión, coherente con su tipología estructural de mampostería en arco. Esto indica que, bajo peso propio y carga de tráfico, las trayectorias resistentes principales se desarrollan mediante esfuerzos compresivos, lo cual resulta consistente con el funcionamiento esperado de un puente histórico de mampostería. Sin embargo, esta compresión no se distribuye de manera completamente uniforme, sino que se concentra en determinados sectores de la estructura, particularmente en aquellos donde la geometría, la continuidad material y la interacción entre componentes condicionan la transmisión de cargas.

Desde una lectura global, el comportamiento del puente no debe entenderse como el de un solo arco aislado. Tal como se expone en el análisis estructural del modelo calibrado, el sistema está conformado por el arco principal, los arcos secundarios, los machones, el tablero y los bloques extremos, de modo que la trayectoria resistente depende de la interacción tridimensional de todos estos elementos. Esta observación resulta especialmente relevante, ya que confirma que las zonas de mayor exigencia no responden únicamente a la geometría visible del arco principal, sino al modo en que el conjunto estructural redistribuye rigidez, masa y esfuerzos.

Bajo acción sísmica, la interpretación se vuelve más exigente, pues la respuesta del puente ya no se encuentra gobernada exclusivamente por trayectorias estables de compresión. La envolvente máxima de esfuerzos muestra que la acción dinámica induce estados tensionales en sectores donde la mampostería, por su propia naturaleza, es más vulnerable debido a su baja capacidad resistente frente a tracción. En este sentido, las regiones donde aparecen mayores tensiones deben ser consideradas zonas críticas prioritarias, ya que constituyen sectores potencialmente propensos a procesos de fisuración, apertura de juntas o degradación progresiva

si las demandas estructurales aumentan o si la estructura experimenta pérdida adicional de continuidad material.

Si bien el valor máximo de tensión obtenido en el análisis dinámico alcanza los 3.183 MPa, es importante señalar que este resultado no se distribuye de manera uniforme en la estructura. Durante la revisión detallada del modelo, no fue posible identificar con precisión un punto claramente definido que concentre este valor, lo que sugiere que podría tratarse de una concentración localizada asociada a efectos numéricos o a singularidades propias de la discretización del modelo. En términos generales, la mayoría de los elementos presenta niveles de tensión considerablemente menores, por lo que este valor máximo no resulta representativo del comportamiento global del puente. No obstante, su presencia permite identificar posibles zonas críticas que requieren atención particular dentro del análisis estructural.

De forma complementaria, la envolvente mínima de esfuerzos confirma que el arco principal conserva un rol dominante en la transferencia de cargas, pero también evidencia que los arcos secundarios participan activamente en la respuesta global del puente. Esto refuerza la idea de que la vulnerabilidad estructural no puede evaluarse de manera aislada sobre un único componente, sino que debe comprenderse desde la interacción entre todos los elementos resistentes. En consecuencia, las zonas críticas identificadas en esta investigación pueden agruparse en tres conjuntos: los sectores del arco principal donde se concentran esfuerzos relevantes, las regiones asociadas al trabajo estructural de los arcos secundarios y las transiciones entre tablero, bloques extremos y zonas de apoyo, donde la compatibilidad de deformaciones puede generar concentraciones locales de respuesta.

La importancia de esta identificación no es únicamente técnica. En un puente patrimonial como el Puente del Centenario, reconocer estos sectores sensibles permite orientar mejor futuras inspecciones visuales, levantamientos de fisuras, campañas de auscultación y decisiones de conservación. Así, la localización de zonas críticas adquiere sentido no solo como resultado del análisis numérico, sino como un criterio práctico para la gestión estructural de un bien histórico de alta relevancia para Cuenca.

### **4.3 Interpretación del comportamiento estructural global**

Los resultados modales y estructurales obtenidos permiten concluir que el Puente del Centenario conserva un comportamiento global coherente con su tipología de mampostería, en la que predomina la transmisión de cargas por compresión y la respuesta dinámica está fuertemente condicionada por la rigidez global del sistema, la distribución de masa y las

condiciones de borde adoptadas en el modelo. La calibración permitió reproducir de forma consistente los primeros cuatro modos de vibración, identificando un modo fundamental de flexión vertical global, un modo predominantemente lateral con componente vertical acoplada, un modo de flexión vertical de orden superior y un modo traslacional longitudinal también acoplado con deformación vertical. Esta secuencia confirma que el puente no responde de manera puramente unidireccional, sino mediante un comportamiento espacial en el que intervienen simultáneamente componentes verticales, transversales y longitudinales.

Desde el punto de vista ingenieril, esta observación es significativa porque demuestra que la respuesta del puente no puede interpretarse únicamente a partir de una lectura bidimensional del arco principal. La presencia de modos acoplados y la participación de distintos componentes estructurales indican que el sistema trabaja tridimensionalmente, condición que justifica plenamente el uso de un modelo de elementos sólidos y refuerza la pertinencia del enfoque adoptado en la investigación.

Asimismo, el proceso de calibración deja una lectura metodológica importante: un modelo numérico geoméricamente correcto no necesariamente representa de manera adecuada la respuesta vibratoria real de una estructura histórica. En este caso, fue necesario ajustar las propiedades equivalentes del material y las condiciones de borde hasta alcanzar una mejor correspondencia con los resultados experimentales. Los parámetros finales adoptados fueron un módulo de elasticidad de 3000 MPa, una densidad de 1150 kgf/m<sup>3</sup>, un coeficiente de Poisson de 0.25 y la consideración de empotramientos en los bordes en contacto con el muro. Estos valores no deben interpretarse como una caracterización exacta del material, sino como una identificación estructural equivalente válida para reproducir el comportamiento global del puente en el rango de vibración analizado.

En términos de preservación, esta interpretación resulta particularmente valiosa porque permite pasar de una representación numérica idealizada a una herramienta más cercana al comportamiento observado en sitio. Para una estructura patrimonial, este avance tiene implicaciones directas: mejora la comprensión de su estado actual, permite reconocer los sectores de mayor sensibilidad y establece una línea base útil para futuras evaluaciones comparativas.

#### **4.4 Implicaciones para la preservación del puente**

El Puente del Centenario ocupa un lugar singular dentro de la ciudad de Cuenca, no solo por su función urbana, sino por su condición de símbolo histórico y elemento patrimonial integrado al paisaje del río Tomebamba. En consecuencia, cualquier interpretación de su comportamiento estructural debe ser compatible con una visión de conservación integral, en la que la seguridad estructural y el respeto por el valor histórico del bien no se entiendan como objetivos separados, sino complementarios.

En este marco, los resultados de la investigación aportan una base técnica útil para orientar futuras acciones de preservación. La identificación de zonas críticas, la validación modal del modelo y la caracterización de la respuesta global del puente permiten establecer prioridades de observación e intervención desde un enfoque preventivo. Esto es especialmente importante en estructuras históricas de mampostería, donde el deterioro puede avanzar de manera gradual y donde la detección temprana de cambios en rigidez, fisuración o respuesta dinámica puede ser decisiva para evitar pérdidas mayores.

Por otra parte, los resultados también sugieren que cualquier intervención futura sobre el puente debería procurar compatibilidad con su lógica resistente original. En una estructura patrimonial de mampostería, intervenciones excesivamente rígidas, alteraciones geométricas innecesarias o soluciones ajenas al comportamiento histórico del sistema pueden modificar las trayectorias de carga y generar redistribuciones desfavorables de esfuerzos. Desde esa perspectiva, el aporte principal de este trabajo de titulación no consiste en proponer una intervención específica, sino en proporcionar una línea base de comportamiento que permita que futuras decisiones de conservación se sustenten en criterios estructurales técnicamente argumentados.

Así, el modelo calibrado y su interpretación deben entenderse como un insumo para la gestión del patrimonio construido de Cuenca. Su utilidad trasciende el caso particular del Puente del Centenario, pues demuestra la viabilidad de integrar modelado numérico y vibración ambiental como herramientas aplicables al estudio de otras estructuras patrimoniales de la ciudad.

#### 4.5 Alcances y limitaciones del modelo

Los resultados del presente estudio deben leerse a la luz de las limitaciones propias tanto del modelo numérico como del proceso de adquisición experimental. La primera limitación corresponde al número y tipo de sensores utilizados durante la campaña principal de OMA, en la que se dispuso de un acelerómetro uniaxial, uno biaxial y uno triaxial. Aunque esta configuración permitió identificar los modos globales predominantes del puente y calibrar el modelo con un nivel satisfactorio de ajuste, también restringe la posibilidad de reconstruir con mayor detalle las formas modales completas de toda la estructura. Por ello, la correspondencia lograda entre modelo y respuesta experimental debe interpretarse principalmente en términos de comportamiento global, más que como una descripción exhaustiva de deformaciones locales.

Una segunda limitación importante se relaciona con una campaña adicional de medición realizada al finalizar casi toda la investigación. En dicha campaña se implementó una metodología de tipo *multisetup*, desplazando el acelerómetro triaxial a lo largo del puente y efectuando mediciones sucesivas con una duración aproximada de veinte minutos por posición. El sensor fue ubicado inicialmente junto al acelerómetro biaxial y, posteriormente, en distintas posiciones a lo largo del puente. Este procedimiento permitió captar una distribución espacial más amplia de la respuesta dinámica y, por tanto, constituye una mejora metodológica respecto a la configuración inicial.

Sin embargo, debido a que esta campaña fue ejecutada en una etapa muy avanzada del desarrollo del trabajo, no fue posible incorporar sus resultados dentro del proceso de calibración ni dentro del análisis final presentado en ese trabajo de titulación. Por tal motivo, se deja constancia de su realización como una base experimental valiosa para futuras líneas de investigación orientadas a refinar el modelo numérico, mejorar la reconstrucción de las formas modales y profundizar en la caracterización dinámica del puente.

Finalmente, debe señalarse que el modelo numérico adoptado corresponde a una representación elástica lineal de un material homogéneo equivalente. Esta idealización resulta adecuada para el objetivo de calibración modal y para la interpretación global de la respuesta estructural en condición de servicio, pero no permite reproducir de manera explícita fenómenos como fisuración, apertura de juntas, aplastamientos locales, degradación progresiva del material o mecanismos no lineales de daño. En consecuencia, las zonas críticas identificadas en este capítulo deben entenderse como sectores de mayor exigencia mecánica relativa dentro del rango elástico analizado, y no como una predicción directa de falla.

#### **4.6 Síntesis del capítulo**

La interpretación desarrollada en este capítulo permite concluir que el Puente del Centenario presenta un comportamiento estructural global coherente con su tipología histórica de mampostería, dominado por trayectorias de compresión en condición estática y por una respuesta dinámica tridimensional en la que intervienen componentes verticales, transversales y longitudinales. La calibración modal permitió reproducir de manera consistente las frecuencias y formas modales dominantes del puente, proporcionando una línea base confiable para la lectura estructural del sistema.

A partir de dicha base fue posible identificar zonas críticas en sectores del arco principal, en los arcos secundarios y en regiones de transición entre componentes estructurales, lo que aporta criterios concretos para la observación, el monitoreo y la conservación del puente. De este modo, el análisis no solo describe el comportamiento mecánico de la estructura, sino que contribuye a su preservación como bien patrimonial de alto valor para la ciudad de Cuenca.

## Conclusiones generales

La presente investigación permitió desarrollar un modelo numérico tridimensional del Puente del Centenario mediante elementos finitos sólidos en SAP2000, sustentado en información geométrica, referencias bibliográficas sobre mampostería histórica y resultados experimentales obtenidos mediante análisis modal operacional. En este sentido, se cumplió el objetivo de construir una representación estructural del puente coherente con su configuración real y apta para su posterior calibración dinámica.

La caracterización experimental mediante OMA permitió identificar los primeros cuatro modos globales de vibración del puente, con frecuencias naturales de 7.416 Hz, 9.563 Hz, 11.884 Hz y 13.582 Hz. Estos resultados proporcionaron la base experimental necesaria para contrastar y ajustar el modelo numérico, demostrando la utilidad del análisis modal operacional como herramienta no destructiva para el estudio de estructuras patrimoniales en servicio.

El proceso de calibración permitió mejorar de forma sustancial la correspondencia entre el modelo de elementos finitos y la respuesta vibratoria medida en sitio. Los errores porcentuales, que en el modelo inicial se ubicaban alrededor del 28 % al 31 %, se redujeron en el modelo calibrado a valores entre 0.261 % y 3.155 %, lo que evidencia una mejora efectiva y no meramente cosmética en la representación del comportamiento dinámico global del puente.

Los parámetros finales adoptados en el modelo calibrado fueron un módulo de elasticidad equivalente de 3000 MPa, una densidad de 1150 kgf/m<sup>3</sup>, un coeficiente de Poisson de 0.25 y condiciones de borde consistentes con empotramientos en los bordes en contacto con el muro. Estos valores no deben interpretarse como una caracterización exacta de la mampostería del puente, sino como parámetros equivalentes válidos para reproducir su comportamiento global en el rango de vibración analizado.

El análisis estructural del modelo calibrado mostró que, bajo acciones estáticas, el comportamiento del puente está gobernado predominantemente por compresión, lo cual resulta coherente con su tipología estructural de mampostería en arco. Sin embargo, bajo acción dinámica se evidenció la aparición de estados tensionales en sectores específicos, aspecto de particular relevancia en una estructura de mampostería debido a su limitada capacidad resistente frente a tracción. Esta observación permitió identificar zonas críticas asociadas al arco principal, a los arcos secundarios y a las transiciones entre distintos componentes estructurales.

Una conclusión central del trabajo es que el comportamiento del Puente del Centenario no puede interpretarse adecuadamente a partir de una lectura simplificada o bidimensional del arco principal. Tanto la identificación modal como el análisis estructural muestran que el puente responde como un sistema tridimensional en el que intervienen de manera conjunta el arco principal, los arcos secundarios, los machones, el tablero y los bloques extremos. Esto justifica el enfoque de modelación adoptado y resalta la importancia de considerar la interacción global entre componentes en el estudio de puentes históricos.

Los resultados obtenidos permiten afirmar que el modelo calibrado constituye una línea base estructural útil para el seguimiento futuro del puente. Si bien no reproduce mecanismos locales de daño ni comportamientos no lineales, sí ofrece una base técnicamente defendible para interpretar la respuesta global del sistema, orientar futuras campañas de auscultación y apoyar criterios de conservación estructural.

Finalmente, esta investigación adquiere un significado que supera lo estrictamente numérico, ya que se desarrolla sobre un puente de alta importancia histórica, cultural, patrimonial y urbana para la ciudad de Cuenca. En ese sentido, el principal aporte del trabajo no radica únicamente en haber calibrado un modelo, sino en haber generado una herramienta de interpretación estructural que puede contribuir a la preservación de un elemento emblemático del patrimonio construido de la ciudad.

## Recomendaciones

Se recomienda que futuras investigaciones incorporen de manera completa los resultados de la campaña adicional de medición OMA realizada mediante metodología *multisetup*, en la cual el acelerómetro triaxial fue desplazado a lo largo de distintas posiciones del puente. Esta información puede mejorar la reconstrucción espacial de las formas modales y permitir una calibración más robusta del modelo numérico.

Se recomienda ampliar la instrumentación en futuras campañas experimentales, tanto en número de sensores como en uniformidad de sus capacidades de medición. La utilización de una mayor cantidad de acelerómetros triaxiales permitiría captar con mayor precisión la respuesta tridimensional del puente y reducir las limitaciones asociadas a una red de medición compuesta por sensores uniaxiales, biaxiales y triaxiales combinados.

Se recomienda considerar, en etapas posteriores, el desarrollo de modelos numéricos no lineales o modelos capaces de incorporar de manera más explícita el comportamiento frágil de la mampostería, incluyendo fisuración, apertura de juntas, degradación del material y posibles mecanismos locales de daño. Esto permitiría complementar la línea base global obtenida en este trabajo de titulación con análisis más avanzados de vulnerabilidad estructural.

Se recomienda realizar campañas periódicas de monitoreo dinámico del puente, de manera que los parámetros modales identificados en esta investigación puedan utilizarse como referencia para detectar posibles cambios en rigidez, masa o condiciones de borde a lo largo del tiempo. Este seguimiento resultaría especialmente valioso dentro de una estrategia preventiva de conservación patrimonial.

Se recomienda que cualquier futura intervención estructural sobre el Puente del Centenario se formule a partir de criterios de compatibilidad con su comportamiento resistente original, evitando soluciones que alteren de manera significativa la lógica compresiva de la mampostería o introduzcan rigideces incompatibles con la respuesta actual del sistema.

Finalmente, se recomienda extender la metodología empleada en esta investigación al estudio de otras estructuras patrimoniales de la ciudad de Cuenca, ya que la integración entre modelado numérico y vibración ambiental ha demostrado ser una vía técnicamente viable para generar líneas base estructurales orientadas a la conservación del patrimonio construido.

Como recomendación para futuros trabajos, se sugiere que el modelo estructural del puente incorpore una representación más detallada de la mampostería, considerando explícitamente la

disposición y orientación de sus unidades. Asimismo, se propone una discretización más refinada del modelo, mediante la segmentación de la estructura en grupos de elementos de menor tamaño, diferenciando componentes como los arcos secundarios, el arco principal, el cuerpo del puente y otros elementos relevantes. Este enfoque permitiría capturar con mayor precisión las variaciones locales de rigidez y mejorar la representación del comportamiento estructural global, especialmente en el análisis de concentraciones de esfuerzo.

## Referencias

Bracamonte, A. J., Mercado-Puche, V., Martínez-Arguelles, G., Pumarejo, L. F., Ortiz, A. R., & Herazo, L. C. S. (2023). Effect of finite element method (FEM) mesh size on the estimation of concrete stress–strain parameters. *Applied Sciences*, *13*(4), 2352. <https://doi.org/10.3390/app13042352>

Effect of finite element method (FEM) mesh size on the estimation of concrete stress–strain parameters. *Applied Sciences*, *13*(4), 2352.

<https://doi.org/10.3390/app13042352>

Cabrera Vélez, E. M. (2022). *Metodología para estimación del daño sísmico en edificios en base a modelos numéricos avanzados y monitorizaciones RAR* [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya]. <http://upcommons.upc.edu/handle/2117/370156>

Cabané Cañas, A. (2023). *Mechanical characterisation of masonry in existing structures by means of laboratory and in-situ experimental techniques* [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya].

Chopra, A. K. (2017). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering* (5th ed.). Pearson Education.

Computers and Structures, Inc. (2017). *CSI analysis reference manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSiBridge* (Rev. 18). Computers and Structures, Inc.

Computers and Structures, Inc. (2023). *Analysis reference manual: Finite element formulation*. Computers and Structures, Inc.

Çubuk, E. G., Sayin, E., & Özmen, A. (2022). Dynamic analysis of historical masonry arch bridges under different earthquakes: The case of Murat Bey Bridge. *Turkish Journal of Science & Technology*, *17*(2), 461–473. <https://doi.org/10.55525/tjst.1105998>

Dlubal Software. (2022). Boundary conditions in finite element analysis. Dlubal Software GmbH. <https://www.dlubal.com>

Foti, D., Gattulli, V., & Potenza, F. (2018). Output-only identification and model updating of historical masonry structures. *Engineering Structures*, *155*, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.10.064>

García, H., Jiménez-Pacheco, J., & Ulloa, F. (2024). Mechanical properties and homogenization of masonry materials for numerical modeling. *Results in Engineering*, 23, 102546. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102546>

Gentile, C., & Saisi, A. (2013). Operational modal testing of historic structures at different levels of excitation. *Construction and Building Materials*, 48, 1273–1285. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.090>

Gómez, I., Maldonado, E., & Chio, G. (2010). Pruebas de vibración ambiental en puentes. *UIS Ingenierías*, 9(1), 55–68. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=553756877004>

Hester, D., Koo, K., Xu, Y., Brownjohn, J., & Bocian, M. (2019). Boundary condition focused finite element model updating for bridges. *Engineering Structures*, 198, 109514. [https://pureadmin.qub.ac.uk/ws/portalfiles/portal/198222056/ManuscriptRevA\\_for\\_Pure.pdf](https://pureadmin.qub.ac.uk/ws/portalfiles/portal/198222056/ManuscriptRevA_for_Pure.pdf)

Heyman, J. (1995). *The stone skeleton: Structural engineering of masonry architecture*. Cambridge University Press.

Kaushik, H. B., Rai, D. C., & Jain, S. K. (2007). Stress–strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(9), 728–739. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:9\(728\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:9(728))

Liu, W. K., Li, S., & Park, H. S. (2022). *Eighty years of the finite element method: Birth, evolution, and future*. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29, 4431–4453. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09740-9>

Lourenço, P. B., Pereira, J. M., & Torrealva, D. (2020). *Proyecto de estabilización sismorresistente: Cálculos simplificados para el análisis estructural de las construcciones históricas de tierra* [Informe de investigación]. Getty Conservation Institute; Universidade do Minho; Pontificia Universidad Católica del Perú; Universidad Católica de Lovaina.

Martins, J. P., & Romão, X. (2022). Finite element modeling of masonry arch bridges: Influence of boundary conditions and material properties. *Construction and Building Materials*, 325, 126778. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126778>

Oñate, E. (2009). *Structural analysis with the finite element method: Linear statics*. Springer.

Osorio Guerrero, P. E., Hermida Palacios, M. A., & Neira, M. (2017). Historic relationship between urban dwellers and the Tomebamba River. *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*, 7(2), 192–209. <https://doi.org/10.1108/JCHMSD-02-2016-0013>

Randiligama, S. M. C. M., Jayathilake, R. G. S. N., & Wijesundara, K. K. (2021). *Applications of finite element method in structural engineering* [Undergraduate thesis, University of Moratuwa]. <https://dl.lib.uom.lk/items/98cab71f-2f8e-402e-8e6f-e1af777938ac>

Tuirán, L. (2024). Análisis del comportamiento estructural del puente histórico Guayaquil en Medellín bajo cargas estáticas y sísmicas [Trabajo de grado, Universidad EIA].

Turner, M. J., Clough, R. W., Martin, H. C., & Topp, L. J. (1956). Stiffness and deflection of complex structures. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 23(9), 805–823. <https://doi.org/10.2514/8.3664>

UNESCO World Heritage Centre. (s. f.). *Historic Centre of Santa Ana de los Ríos de Cuenca*. <https://whc.unesco.org/en/list/863/>

Zeas Guzmán, K. (2013). *Los puentes del centro histórico de Cuenca* [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional Universidad de Cuenca.

Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2005). *The finite element method: Its basis and fundamentals* (6th ed.). Butterworth-Heinemann.