

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA**  
**ESCUELA DE POSTGRADO**  
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN**  
**ESTRUCTURAS**



**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL MEDIANTE EL**  
**MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS PARA LA DETERMINACIÓN**  
**DEL AGRIETAMIENTO DEL PUENTE COLONIAL DE NUÑO,**  
**PUNO - 2025**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

**Presentado por:**

**Bach. Edgar Torres Yampara**

**ORCID: 0009-0000-0474-7521**

**Bach. Linzes Willi Cajia Cajia**

**ORCID: 0009-0001-8775-3587**

**Asesor:**

**Dr. Dennys Geovanni Calderón Paniagua**

**ORCID: 0000-0002-6569-0634**

**Para obtener el Grado Académico de:**  
**MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS**

**TACNA - PERÚ**  
**2026**



**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA**

**ESCUELA DE POSTGRADO**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN  
ESTRUCTURAS**

**Trabajo de Investigación**

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL  
MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS PARA  
LA DETERMINACIÓN DEL AGRIETAMIENTO DEL  
PUENTE COLONIAL DE NUÑO A, PUNO – 2025**

**Presentada por:**

**Bach. Edgar Torres Yampara**

**Bach. Linzes Willi Cajia Cajia**

**Trabajo de investigación sustentada y aprobada el 17 de julio de 2026; ante el  
siguiente jurado examinador:**

**PRESIDENTE: Dr. Pedro Valerio MAQUERA CRUZ**

**SECRETARIO: Dr. Genner Alvarito VILLARREAL CASTRO**

**VOCAL: Dr. Samuel HUAQUISTO CÁCERES**

**ASESOR: Dr. Dennys Geovanni CALDERÓN PANIAGUA**

## **Declaración jurada de originalidad**

Nosotros, **Edgar Torres Yampara** identificado con DNI N° 70778066 y **Linzes Willi Cajia Cajia** identificada con DNI N° 70776221, en calidad de egresados de la **Maestría en Ingeniería Civil con mención en Estructuras**, de la Escuela de Postgrado de la Universidad Privada de Tacna.

Somos autores del trabajo de investigación titulada:

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL AGRIETAMIENTO DEL PUENTE COLONIAL DE NUÑO, PUNO – 2025**, con asesor: Dr. Dennys Geovanni Calderón Paniagua.

DECLARAMOS BAJO JURAMENTO

Ser los únicos autores del texto entregado para obtener el grado académico de **MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS**, y que tal texto no ha sido entregado ni total ni parcialmente para obtención de un grado académico en ninguna otra universidad o instituto, ni ha sido publicado anteriormente para cualquier otro fin.

Así mismo, declaramos no haber transgredido ninguna norma universitaria con respecto al plagio ni a las leyes establecidas que protegen la propiedad intelectual.

Declaramos, que después de la revisión del trabajo de investigación con el software Turnitin se declara 04% de similitud, además que el archivo entregado en formato PDF corresponde exactamente al texto original que presentamos junto al mismo.

Por último, declaramos que para la recopilación de datos se ha solicitado la autorización respectiva a la empresa u organización, evidenciándose que la información presentada es real y somos conocedores de las sanciones penales en caso de infringir las leyes del plagio y de falsa declaración, y firmamos la presente con pleno uso de nuestras facultades y asumiendo todas las responsabilidades de ella derivadas.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo frente a LA UNIVERSIDAD cualquier responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido del trabajo de investigación, así como por los derechos sobre la obra o invención presentada. En consecuencia, nos hacemos responsables frente a LA UNIVERSIDAD y a terceros, de cualquier daño que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo declarado o

que pudiera encontrar como causa del trabajo presentado, asumiendo todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse de ello en favor de tercero con motivos de acciones, reclamaciones o conflicto derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontrasen causa en el contenido del trabajo de investigación, libro o invento.

De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumimos las consecuencias y sanciones que de nuestra acción se deriven, sometiéndonos a la normatividad vigente de la Universidad Privada de Tacna.

Lugar y fecha: Tacna, 17 de julio de 2026.



**Edgar Torres Yampara**

**DNI N° 70778066**



**Linzes Willi Cajia Cajia**

**DNI N° 70776221**

## **Dedicatoria**

Dedicada a quienes estuvieron presentes en cada etapa de este camino académico. A mi familia, por su paciencia, confianza y constante motivación que hicieron posible continuar aun en los momentos más exigentes y a todas las personas que, de una u otra manera, brindaron palabras de aliento, apoyo y orientación durante este proceso, contribuyendo a que este esfuerzo se convierta hoy en un logro alcanzado.

***Edgar***

Dedico este trabajo a mi familia, por su apoyo constante y por ser la motivación que impulsó cada esfuerzo realizado durante este proceso académico. Asimismo, a quienes confiaron en mí y alentaron la culminación de este logro profesional.

***Linzes Willi***

## **Agradecimientos**

Expreso mi agradecimiento a Dios por brindarme la fortaleza, la guía y la sabiduría necesarias para culminar satisfactoriamente esta investigación. Asimismo, agradezco a la Universidad Privada de Tacna por la formación académica brindada y por las oportunidades de aprendizaje que contribuyeron a mi desarrollo profesional.

De igual manera, manifiesto mi reconocimiento a mi docente asesor por su orientación, apoyo y acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

***Edgar***

Expreso mi sincero agradecimiento a la Universidad Privada de Tacna por la formación académica recibida; de manera especial, agradezco a mi docente asesor por su orientación y acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación. Asimismo, agradezco a todas las personas que contribuyeron con su apoyo para la culminación de este trabajo.

***Linzes Willi***

## Índice de contenidos

|                                         | Pág. |
|-----------------------------------------|------|
| Declaración jurada de originalidad..... | iv   |
| Dedicatoria.....                        | vi   |
| Agradecimientos.....                    | vii  |
| Índice de contenidos .....              | viii |
| Índice de tablas .....                  | xi   |
| Índice de figuras .....                 | xii  |
| Índice de apéndices.....                | xiii |
| Resumen .....                           | xiv  |
| Abstract.....                           | xv   |
| Introducción.....                       | 1    |

## CAPÍTULO I: EL PROBLEMA

|                                           |    |
|-------------------------------------------|----|
| 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA           |    |
| 1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....       | 8  |
| 1.2.1. <i>Problema principal</i> .....    | 8  |
| 1.2.2. <i>Problemas secundarios</i> ..... | 8  |
| 1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA .....     | 8  |
| 1.4. OBJETIVOS .....                      | 10 |
| 1.4.1. <i>Objetivo general</i> .....      | 10 |
| 1.4.2. <i>Objetivos específicos</i> ..... | 10 |



## **CAPÍTULO II: MARCO REFERENCIAL**

|      |                                       |    |
|------|---------------------------------------|----|
| 2.1. | ANTECEDENTES DEL PROBLEMA.....        | 12 |
| 2.2. | NORMATIVA VIGENTE.....                | 20 |
| 2.3. | DEFINICIÓN DE CONCEPTOS BÁSICOS ..... | 23 |

## **CAPÍTULO III: METODOLOGÍA Y DISEÑO DEL PROYECTO**

|        |                                                 |    |
|--------|-------------------------------------------------|----|
| 3.1.   | DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN APLICADA .....  | 35 |
| 3.1.1. | <i>Tipo de investigación</i> .....              | 35 |
| 3.1.2. | <i>Nivel de investigación</i> .....             | 35 |
| 3.1.4. | <i>Justificación del enfoque aplicado</i> ..... | 36 |
| 3.2.   | DISEÑO DE PROYECTO .....                        | 37 |
| 3.2.1. | <i>Etapas del proyecto</i> .....                | 37 |
| 3.2.2. | <i>Herramientas utilizadas</i> .....            | 39 |
| 3.2.3. | <i>Software utilizados</i> .....                | 41 |
| 3.3.   | EVALUACIÓN TÉCNICA Y FACTIBILIDAD .....         | 42 |
| 3.3.1. | <i>Modelado estructural</i> .....               | 43 |
| 3.3.2. | <i>Simulación de impacto ambiental</i> .....    | 45 |
| 3.4.   | PLANIFICACIÓN Y EJECUCIÓN .....                 | 47 |
| 3.4.1. | <i>Cronograma de actividades</i> .....          | 47 |
| 3.4.2. | <i>Asignación de recursos</i> .....             | 48 |
| 3.4.3. | <i>Costos y financiamientos</i> .....           | 49 |

## **CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

|      |                                                                            |     |
|------|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1. | DESARROLLO DEL PROYECTO Y VALIDACIÓN DEL DISEÑO....                        | 50  |
| 4.2. | ANÁLISIS DE IMPACTO, BENEFICIOS Y COMPARACIÓN CON<br>CASOS SIMILARES ..... | 96  |
| 4.3. | LIMITACIONES DEL ESTUDIO Y MEJORAS IDENTIFICADAS ...                       | 100 |
| 4.4. | DESCRIPCIÓN DE SOLUCIÓN PROPUESTA Y SU<br>IMPLEMENTACIÓN .....             | 102 |
| 4.5. | EVALUACIÓN DE COSTOS, SOSTENIBILIDAD Y VIABILIDAD A<br>LARGO PLAZO.....    | 104 |
|      | CONCLUSIONES.....                                                          | 106 |
|      | RECOMENDACIONES .....                                                      | 108 |
|      | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                           | 110 |
|      | APÉNDICE .....                                                             | 119 |

## Índice de tablas

|                                                                                     | Pág. |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Tabla 1 <i>Plan de ejecución del proyecto</i> .....                                 | 47   |
| Tabla 2 <i>Costo estimado para la investigación</i> . ....                          | 49   |
| Tabla 3 <i>Propiedades geométricas del puente</i> .....                             | 64   |
| Tabla 4 <i>Propiedades del material, datos de tracción y compresión</i> . ....      | 66   |
| Tabla 5 <i>Descripción de los elementos finitos utilizados</i> . ....               | 68   |
| Tabla 6 <i>Periodos fundamentales</i> . ....                                        | 69   |
| Tabla 7 <i>Datos para la curva de capacidad en dirección X</i> . ....               | 72   |
| Tabla 8 <i>Datos para la curva de capacidad en dirección Y</i> . ....               | 74   |
| Tabla 9 <i>Factores de Zona “Z”</i> . ....                                          | 78   |
| Tabla 10 <i>Factores de Suelo “S”</i> .....                                         | 79   |
| Tabla 11 <i>Periodos “Tp” y “TL”</i> . ....                                         | 79   |
| Tabla 12 <i>Datos para cálculo del espectro</i> .....                               | 80   |
| Tabla 13 <i>Datos obtenidos para cálculo del punto de desempeño</i> . ....          | 85   |
| Tabla 14 <i>Evolución del agrietamiento estructural en la dirección X</i> .....     | 92   |
| Tabla 15 <i>Evolución del agrietamiento estructural en la dirección Y</i> .....     | 94   |
| Tabla 16 <i>Propuesta de costos para el mantenimiento del Puente Colonial</i> ..... | 104  |

## Índice de figuras

|                                                                                   | Pág. |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figura 1 <i>Ablandamiento exponencial a tracción</i> .....                        | 25   |
| Figura 2 <i>Curva de compresión parabólica</i> .....                              | 27   |
| Figura 3 <i>Curva Esfuerzo de cohesión – Apertura de grieta</i> . ....            | 31   |
| Figura 4 <i>Fractura de materiales cuasifrágiles bajo carga uniaxial</i> . ....   | 32   |
| Figura 5 <i>Vistas laterales del puente colonial de Nuñoa</i> . ....              | 57   |
| Figura 6 <i>Vista frontal y posterior del puente colonial de Nuñoa</i> . ....     | 58   |
| Figura 7 <i>Geometría del modelo estructural</i> . ....                           | 62   |
| Figura 8 <i>Vista aérea del Puente Colonial de Nuñoa</i> . ....                   | 63   |
| Figura 9 <i>Modelado en 3D del Puente Colonial de Nuñoa</i> . ....                | 65   |
| Figura 10 <i>Curva de capacidad resultante en la dirección X</i> . ....           | 74   |
| Figura 11 <i>Curva de capacidad resultante en la dirección Y</i> . ....           | 76   |
| Figura 12 <i>Espectro calculado del puente de Nuñoa</i> . ....                    | 82   |
| Figura 13 <i>Punto de desempeño calculado en la dirección X</i> . ....            | 85   |
| Figura 14 <i>Punto de desempeño calculado en la dirección Y</i> .....             | 86   |
| Figura 15 <i>Bilinealización de la curva de capacidad en la dirección X</i> ..... | 87   |
| Figura 16 <i>Bilinealización de la curva de capacidad en la dirección Y</i> ..... | 88   |
| Figura 17 <i>Sectorización del desempeño en la dirección X</i> . ....             | 90   |
| Figura 18 <i>Sectorización del desempeño en la dirección Y</i> . ....             | 91   |

## Índice de apéndices

|                                                                | Pág. |
|----------------------------------------------------------------|------|
| Apéndice 1. <i>Matriz de Consistencia</i> .....                | 120  |
| Apéndice 2. <i>Solicitud de autorización</i> .....             | 121  |
| Apéndice 3. <i>Plano de ubicación del puente</i> .....         | 122  |
| Apéndice 4. <i>Estado del puente – año 2008</i> .....          | 124  |
| Apéndice 5. <i>Propuesta de puesta de valor año 2008</i> ..... | 126  |
| Apéndice 6. <i>Fotografías antiguas del lugar</i> .....        | 130  |
| Apéndice 7. <i>Fotografías actuales del lugar</i> .....        | 132  |
| Apéndice 8. <i>Códigos Python</i> .....                        | 134  |

## Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño estructural mediante el método de elementos finitos para determinar el agrietamiento del Puente Colonial de Nuñoa - 2025. Se empleó una metodología de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo, nivel explicativo y diseño cuasi experimental de corte transversal, utilizando el método hipotético–deductivo. En los resultados se evidenció que la curva de capacidad en la dirección X presenta mayor rigidez y fragilidad, mientras que en la dirección Y muestra un comportamiento más flexible y dúctil; los desplazamientos en el punto de desempeño fueron de 1.83 mm (X) y 4.6 mm (Y), asociados a un nivel de daño muy bajo; según los criterios de la SEAOC Visión 2000, la estructura se clasifica como funcional en la dirección X ( $\Delta y \approx 0.000746$  m;  $\Delta u \approx 0.1748$  m) y completamente funcional en la dirección Y ( $\Delta y \approx 0.010445$  m;  $\Delta u \approx 0.1283$  m); el agrietamiento máximo en el punto de desempeño alcanzó 0.3 mm en tablero y pilares en la dirección X, y en la dirección Y, 1.98 mm en pilares y 0.25 mm en el tablero. Se concluye que la evaluación estructural permite determinar de manera confiable el desempeño sísmico, evidenciando un comportamiento funcional y bajo nivel de daño, lo cual sustenta la toma de decisiones en conservación y reforzamiento estructural.

**Palabras clave:** Agrietamiento, análisis no lineal, desempeño estructural, elementos finitos, mampostería.

## Abstract

This study aimed to evaluate the structural performance of the Nuñoa Colonial Bridge in 2025 using the finite element method to determine cracking. An applied methodology with a quantitative approach, explanatory level, and quasi-experimental cross-sectional design was employed, utilizing the hypothetico-deductive method. The results showed that the capacity curve in the X direction exhibits greater stiffness and brittleness, while in the Y direction it displays more flexible and ductile behavior. Displacements at the performance point were 1.83 mm (X) and 4.6 mm (Y), associated with a very low level of damage. According to the SEAOC Vision 2000 criteria, the structure is classified as functional in the X direction ( $\Delta y \approx 0.000746$  m;  $\Delta u \approx 0.1748$  m) and fully functional in the Y direction ( $\Delta y \approx 0.010445$  m;  $\Delta u \approx 0.1283$  m). The maximum cracking at the performance point reached 0.3 mm in the deck and piers in the X direction, and in the Y direction, 1.98 mm in piers and 0.25 mm in the deck. It is concluded that the structural evaluation allows for a reliable determination of seismic performance, demonstrating functional behavior and a low level of damage, which supports decision-making in conservation and structural reinforcement.

**Keywords:** Cracking, nonlinear analysis, structural performance, finite elements, masonry.

## **Introducción**

La presente investigación tuvo por finalidad evaluar el desempeño estructural del Puente Colonial de Nuñoa, ubicado en la región de Puno, mediante el método de elementos finitos, con el propósito de determinar el proceso de agrietamiento que presenta esta estructura, por lo tanto, este estudio surge ante la necesidad de comprender el comportamiento estructural de infraestructuras históricas construidas principalmente con materiales de mampostería de piedra, las cuales, debido al paso del tiempo, la exposición a condiciones ambientales adversas, el incremento de las cargas de tránsito y la ocurrencia de eventos sísmicos, pueden experimentar deterioro progresivo reflejado en fisuras y grietas que comprometen su integridad estructural. En ese contexto, el uso de herramientas avanzadas de modelación numérica permite analizar de manera más precisa la respuesta estructural de este tipo de construcciones patrimoniales, identificando zonas críticas de daño y estimando la evolución del agrietamiento bajo diferentes condiciones de carga.

En el caso específico del Puente Colonial de Nuñoa, se evidencia la presencia de grietas visibles y posibles procesos de degradación estructural que requieren una evaluación técnica más profunda que trascienda las inspecciones visuales tradicionales, por ello, el empleo del método de elementos finitos constituye una alternativa metodológica adecuada, debido a que permite simular el comportamiento estructural del puente mediante modelos computacionales capaces



de representar la distribución de esfuerzos, deformaciones y niveles de daño en la estructura y de esta manera, la investigación busca aportar información técnica que permita comprender la capacidad estructural del puente, así como su desempeño frente a solicitaciones sísmicas, contribuyendo a la toma de decisiones orientadas a su conservación, mantenimiento o eventual reforzamiento estructural.

Al respecto, el desarrollo de esta investigación considera en su primer capítulo la descripción de la problemática de estudio, donde se presentan el planteamiento del problema, las preguntas de investigación, los objetivos y la justificación del estudio. Posteriormente, en el segundo capítulo se desarrollan los antecedentes internacionales y nacionales relacionados con las variables de investigación, así como las bases teóricas y definiciones conceptuales necesarias para comprender el desempeño estructural de estructuras de mampostería y los procesos de agrietamiento evaluados mediante el método de elementos finitos.

En el tercer capítulo se describe el marco metodológico de la investigación, en el cual se detallan el tipo, enfoque, nivel y diseño del estudio, así como los procedimientos empleados para la recopilación de información, la modelación estructural y el análisis de resultados, asimismo, se presenta los instrumentos y herramientas empleadas para el procesamiento de la información y el desarrollo del modelo estructural.

Por su parte, el cuarto capítulo contempla la presentación y análisis de los resultados obtenidos a partir de la modelación estructural y el análisis no lineal de la estructura, incluyendo la obtención de la curva de capacidad, la evaluación de la respuesta sísmica del puente y la identificación de los patrones de agrietamiento. El quinto capítulo desarrolla la discusión de resultados, donde se contrastan los resultados obtenidos con investigaciones previas y fundamentos teóricos, para posteriormente establecer las conclusiones y recomendaciones orientadas a mejorar la evaluación y conservación estructural de puentes históricos similares, así como las referencias bibliográficas que sustentan la investigación.

## **CAPÍTULO I: EL PROBLEMA**

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

A nivel internacional, la conservación estructural de los puentes históricos y patrimoniales se ha convertido en un tema prioritario para la ingeniería civil y la gestión del patrimonio cultural, debido al deterioro progresivo que sufren por factores ambientales, sísmicos y antrópicos. Según Karalar & Çufalı (2023), las estructuras de mampostería antiguas presentan fisuras y pérdida de rigidez a lo largo del tiempo, lo que compromete su capacidad portante y estabilidad frente a cargas dinámicas, asimismo, en diversos países europeos, como Italia y España, se han desarrollado metodologías avanzadas basadas en el Método de Elementos Finitos (MEF) para evaluar el desempeño estructural y determinar los niveles de agrietamiento en puentes históricos, lo que ha permitido realizar diagnósticos más precisos y restauraciones seguras (Clemente et al., 2023), sumado a ello, Shabani et al. (2023), destacan que los análisis sísmicos no lineales basados en el MEF

permiten determinar la respuesta estructural, estableciendo curvas de capacidad y límites de desempeño en estructuras patrimoniales.

En este contexto, uno de los principales desafíos a nivel global radica en las evaluaciones estructurales que permitan cuantificar el daño acumulado y predecir la evolución del agrietamiento en puentes antiguos frente a cargas sísmicas, sumado a ello, según Clemente et al. (2023), la mayoría de estas estructuras fueron diseñadas sin criterios modernos de resistencia sísmica, por lo que presentan vulnerabilidades críticas ante eventos naturales recurrentes.

A nivel nacional, el Perú cuenta con una importante cantidad de puentes patrimoniales distribuidos en diversas regiones, muchos de los cuales datan del periodo colonial y presentan daños estructurales visibles producto del tiempo, la humedad, la acción sísmica y la falta de mantenimiento, en ese sentido, el Ministerio de Cultura (2024), ha identificado más de 150 estructuras históricas de este tipo en estado de vulnerabilidad, destacando la necesidad urgente de evaluaciones técnicas que permitan planificar su restauración y conservación, de igual manera, advierte que en los últimos años se han registrado fallas estructurales en varios puentes rurales debido al incremento del tránsito vehicular y al envejecimiento de los materiales, sin perjuicio de ello, gran parte de las evaluaciones realizadas se basan únicamente en inspecciones visuales o ensayos empíricos, sin incorporar herramientas modernas como el MEF que faciliten

comprender el comportamiento real de la estructura bajo cargas estáticas y dinámicas.

Bajo esta perspectiva, en el ámbito nacional surge la necesidad de aplicar modelos de simulación estructural que permitan determinar la capacidad resistente de los puentes históricos frente a la acción sísmica y estimar la evolución de las grietas existentes, ahora bien, Noel (2020) en su investigación evidencian que el análisis mediante elementos finitos proporciona resultados más confiables en la estimación de tensiones, deformaciones y puntos críticos de falla, por lo que, se evidencia la necesidad de aplicar métodos de análisis estructural más precisos, que permitan evaluar el desempeño y determinar el nivel de agrietamiento de la estructura, a fin de comprender su comportamiento ante cargas estáticas y dinámicas y contribuir a su conservación y refuerzo estructural.

A nivel local, en Puno, la situación es particularmente preocupante, ya que diversas estructuras históricas de piedra y mampostería, incluidos puentes coloniales, presentan daños acumulados por factores climáticos y sísmicos, según Zevallos (2023), la región se caracteriza por su alta sismicidad moderada, bajas temperaturas y ciclos intensos de humedad y sequedad, los cuales aceleran los procesos de deterioro, estas condiciones, sumadas al incremento del tránsito vehicular y a la falta de intervenciones técnicas adecuadas, han provocado la degradación progresiva de las uniones y del mortero en muchos de estos puentes, generando fisuras visibles y pérdida de rigidez estructural, además, la ausencia de

un registro actualizado sobre el estado de conservación de los puentes patrimoniales en Puno dificulta la planificación de estrategias de mantenimiento y conservación.

En ese mismo sentido, los estudios estructurales en la región altiplánica son escasos y se concentran principalmente en edificaciones coloniales religiosas o monumentales, dejando de lado las infraestructuras viales históricas dicha situación limita la capacidad de las autoridades locales para priorizar intervenciones de emergencia o proyectos de restauración, en consecuencia, resulta necesario realizar estudios integrales que combinen análisis numéricos con observaciones empíricas del daño, con el fin de generar propuestas de conservación sostenibles y técnicamente fundamentadas.

En este escenario, la presente investigación propone evaluar el desempeño estructural del Puente Colonial de Nuñoa, una estructura de piedra que constituye un legado histórico y arquitectónico de gran relevancia, mediante el Método de Elementos Finitos, con el fin de establecer la curva de capacidad del puente, evaluar su respuesta frente al sismo acorde a la norma ASCE 41-23, analizar su desempeño conforme al SEAOC Visión 2000, determinar el tamaño de grieta para los límites de desempeño y estimar la evolución del agrietamiento, esta evaluación técnica permitirá conocer el estado real de la estructura y proponer criterios de conservación y reforzamiento que garanticen tanto la seguridad de los usuarios como la preservación del patrimonio cultural del distrito de Nuñoa.

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.2.1. Problema principal**

¿De qué manera la evaluación del desempeño estructural mediante el método de elementos finitos permite determinar el agrietamiento del Puente Colonial de Nuñoa, Puno – 2025?

### **1.2.2. Problemas secundarios**

- a) ¿Cómo se representa la curva de capacidad, basado en las propiedades mecánicas del Puente Colonial de Nuñoa, Puno – 2025?
- b) ¿Cuál es la respuesta dentro de la curva de capacidad frente al sismo, acorde al ASCE 41-23, del Puente Colonial de Nuñoa, Puno – 2025?
- c) ¿Cuál es nivel de desempeño que presenta acorde al SEAOC Visión 2000, del Puente Colonial de Nuñoa, Puno – 2025?
- d) ¿Cuál es el tamaño de la grieta para los límites de desempeño y para la respuesta frente al sismo, del Puente Colonial de Nuñoa, Puno – 2025?
- e) ¿De qué manera se muestra la evolución del agrietamiento del Puente Colonial de Nuñoa, Puno – 2025?

## **1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

La justificación técnica se basa en la necesidad de ampliar el conocimiento existente sobre el comportamiento estructural de los puentes históricos ante cargas

sísmicas, por lo que en las últimas décadas, el análisis mediante el MEF ha demostrado ser una herramienta eficaz para la modelación del daño en estructuras patrimoniales, permitiendo determinar tensiones, deformaciones y la evolución del agrietamiento (Karakuş, 2021), sin embargo, en el contexto peruano, los estudios de este tipo son escasos y generalmente se limitan a inspecciones visuales, sin integrar simulaciones avanzadas de comportamiento no lineal (Lipa et al., 2024), por lo que esta investigación aportará un modelo de referencia para futuras investigaciones que busquen relacionar la evolución del agrietamiento con los límites de desempeño estructural.

Por su parte, la justificación social de esta investigación es porque permitirá preservar el patrimonio cultural e histórico, contribuyendo a la seguridad de los usuarios y al desarrollo sostenible de la comunidad local, el deterioro progresivo de los puentes patrimoniales afecta la conectividad vial, la identidad cultural y turística de las regiones andinas del Perú (Cacciuttolo et al., 2025); además, la protección de estas estructuras fortalece el sentido de pertenencia y promueve la valorización del patrimonio arquitectónico nacional (Vargas et al., 2021), de esta forma, los resultados de este estudio beneficiarán directamente a la sociedad al garantizar la funcionalidad y seguridad de un bien histórico de uso público.

Adicional a ello, la justificación metodológica radica en la aplicación del Método de Elementos Finitos como herramienta de simulación y análisis estructural, lo que permitirá desarrollar un modelo numérico preciso del Puente



Colonial de Nuñoa, basado en sus propiedades geométricas y mecánicas reales, esta metodología posibilitará la obtención de curvas de capacidad, la identificación de zonas críticas de daño y la estimación del tamaño de grietas bajo diferentes niveles de carga sísmica (Remus et al., 2025), por otro lado, a diferencia de los métodos tradicionales de inspección, el uso del MEF permite realizar análisis tridimensionales, estudiar la interacción entre materiales y determinar el desempeño estructural frente a diversos escenarios de sollicitación (Chácara et al., 2023).

#### **1.4. OBJETIVOS**

##### ***1.4.1. Objetivo general***

Evaluar el desempeño estructural mediante el método de elementos finitos para la determinación del agrietamiento del Puente Colonial de Nuñoa, Puno – 2025.

##### ***1.4.2. Objetivos específicos***

- a) Establecer la curva de capacidad basado en las propiedades mecánicas del Puente Colonial de Nuñoa, Puno – 2025.
- b) Determinar la respuesta dentro de la curva de capacidad frente al sismo, acorde al ASCE 41-23 del Puente Colonial de Nuñoa, Puno – 2025.
- c) Analizar el desempeño acorde al SEAOC Visión 2000 del Puente Colonial de Nuñoa, Puno – 2025.

- d) Evaluar el tamaño de la grieta para los límites de desempeño y para la respuesta frente al sismo del Puente Colonial de Nuñoa, Puno – 2025.
- e) Estimar la evolución del agrietamiento del Puente Colonial de Nuñoa, Puno – 2025.

## **CAPÍTULO II:**

### **MARCO REFERENCIAL**

La investigación centra en este capítulo el desarrollo de los antecedentes necesarios para comprender las variables de investigación, asimismo contempla el desarrollo de los postulados teóricos, que es como sigue:

#### **2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA**

A continuación, se detallan los antecedentes del estudio, seleccionados por su importancia y aporte a las variables de estudio.

##### **2.1.1 *Antecedentes internacionales***

###### **a) Tesis y artículos de investigación**

En la investigación titulada “Seismic assessment and strengthening of a historical masonry bridge considering soil–structure interaction”, de Shabani & Kioumars (2023), publicada en la revista Engineering Structures, donde se buscó evaluar la vulnerabilidad sísmica de un puente histórico de mampostería

mediante modelación avanzada por elementos finitos. Con una metodología basada en el levantamiento geométrico utilizando escaneo láser, fotogrametría y sensores de vibración, además de la calibración modal del modelo en DIANA FEA considerando la interacción suelo–estructura. Llegando a los resultados que, a través de análisis no lineales tipo multi-stripe, se identificó que las mayores concentraciones de daño se producen en los arcos y en el pilar central, donde las tensiones principales alcanzaron valores próximos a 0.65–0.80 MPa, generando agrietamientos en el intradós del arco. Asimismo, se determinó que el puente presenta una probabilidad de 48 % de alcanzar daño moderado bajo un sismo con aceleración pico del terreno (PGA) de 0.25 g, y una probabilidad superior al 70 % de daño severo para PGA de 0.35 g. De igual forma, se comprobó que la inclusión de la interacción suelo–estructura incrementa entre 15 % y 22 % las deformaciones laterales máximas en comparación con un modelo con apoyos fijos. Concluyendo que la implementación de sistemas de refuerzo como FRCM y textiles PBO aumenta la capacidad sísmica hasta en 35 %, reduciendo la propagación de grietas en los elementos más críticos sin afectar la apariencia histórica del puente. Lo antes expuesto denota la relevancia que tiene la evaluación estructural detallada mediante modelos numéricos calibrados, ya que permiten diagnosticar con precisión el estado real de vulnerabilidad de estructuras patrimoniales, facilitar la toma de decisiones para su conservación y orientar la selección adecuada de intervenciones de refuerzo.

En la investigación titulada “Ancient Mesopotamian Stone Bridge: Numerical Modeling”, de Hamad (2022), publicada en la revista *Advances in Civil Engineering*, donde se buscó analizar el estado de esfuerzo, deformación y energía en un puente antiguo de piedra natural mediante modelado numérico tridimensional. Con una metodología que recrea la geometría de cada bloque pétreo (usando 70 elementos 3D para el arco del puente) y los modela en un software de elementos finitos para calcular tensiones principales y energía de deformación. Llegando a los resultados donde las tensiones principales positivas máximas fueron aproximadamente 1.4 MPa para  $\sigma_1$ , 0.51 MPa para  $\sigma_2$ , y 0.09 MPa para  $\sigma_3$ , mientras que los valores negativos (compresión) llegaron hasta -13 MPa, -6.8 MPa y -3.4 MPa respectivamente, lo que indica zonas de compresión muy altas entre los bloques de piedra; además, la densidad de energía de deformación (SED) mostró una dispersión muy grande, desde 0.0011 J/m<sup>3</sup> hasta 4416 J/m<sup>3</sup>, lo que sugiere una distribución no uniforme de esfuerzos y posibles concentraciones de energía en ciertos bloques, sumado a ellos, la evaluación de la seguridad según la teoría de St. Venant indica un factor de seguridad de 4 en el estado actual del puente, es decir, que el arco podría resistir un aumento de carga significativo antes de fallar según ese criterio y el desplazamiento máximo vertical calculado fue de 3.4 mm, un valor bastante bajo, lo que sugiere buena rigidez estructural bajo las condiciones modeladas. Concluyendo que, aunque el puente actual parece seguro según los criterios estudiados, su geometría no es óptima para distribuir uniformemente la energía de deformación, lo que podría conllevar concentraciones de daño;

por lo tanto, el estudio resalta la utilidad del modelado numérico detallado para evaluar puentes históricos de piedra y proponer intervenciones en diseño o refuerzo si fuera necesario. Lo antes expuesto denota la relevancia de usar un modelado numérico muy detallado para estructuras patrimoniales: permite estimar tensiones y desplazamientos e identificar zonas críticas (por ejemplo, bloques con alta densidad de energía de deformación) que podrían ser puntos de inicio de agrietamiento o falla.

En la investigación titulada “Numerical Analysis of an FRP-Strengthened Masonry Arch Bridge”, de Simoncello et al. (2020), publicada en la revista *Frontiers in Built Environment*, donde se buscó analizar el comportamiento estructural de un puente de arco de mampostería sometido a cargas estáticas, evaluando además la efectividad del refuerzo con polímeros reforzados con fibra (FRP). La metodología empleada fue un análisis numérico mediante el software DIANA FEA, utilizando modelos no lineales basados en el Total Strain Crack Model para representar la fisuración y el aplastamiento de la mampostería, así como un modelo bond-slip para simular la adherencia entre la mampostería y las láminas de FRP. En los resultados, a partir de la modelación del Puente Prestwood (de 6.55 m de luz, 1.43 m de flecha y 0.22 m de espesor), se determinó que la aplicación de FRP en el intradós produjo un incremento aproximado del 43 % en la capacidad resistente respecto al puente sin refuerzo, asimismo, al compararse con los ensayos experimentales disponibles, el modelo reforzado mostró un aumento cercano al 33 % en la

carga última, evidenciando una mejora sustancial en la respuesta estructural, de igual modo, se registró una reducción en la deformación vertical máxima, pasando de 3.44 mm en el modelo no reforzado a 2.42 mm en el reforzado, lo cual indica un aumento notable de la rigidez global del arco. Concluyendo, los autores señalan que, si bien el refuerzo incrementa significativamente la capacidad y rigidez estructural, el modo de falla final del puente reforzado estuvo dominado por el aplastamiento de la mampostería, demostrando que la resistencia última del sistema continúa estando limitada por las propiedades originales del material. Lo antes expuesto evidencia la importancia de considerar modelos no lineales avanzados y el comportamiento real de la mampostería al evaluar o rehabilitar puentes históricos, resaltando la utilidad del análisis numérico mediante DIANA FEA para este tipo de estructuras.

### **2.1.2 Antecedentes nacionales**

#### **a) Tesis y artículos de investigación**

En la investigación titulada “Problemática en la preservación del patrimonio arquitectónico: el caso puente colonial de Lampa, Perú”, de Aquize et al. (2022), publicada en Revista de Arquitectura y Urbanismo Taypi, donde se buscó identificar los factores estructurales, naturales y administrativos que llevaron al colapso del puente colonial de Lampa. Con una metodología de análisis documental, entrevistas con actores institucionales y revisión histórica

del puente, los autores reconstruyeron cómo las crecientes lluvias y el aumento del caudal del río socavaron los pilares y cimientos, sumado a una gestión institucional deficiente. Llegando a los resultados que evidencian que la falta de mantenimiento adecuado, junto con la inacción de las autoridades locales y la exposición a fenómenos naturales, fueron determinantes en la pérdida estructural del puente. Concluyendo que es urgente implementar un plan de conservación patrimonial que responda a criterios técnicos y a una gobernanza efectiva, con participación institucional para prevenir futuros desastres. Lo antes expuesto denota la relevancia de considerar la integridad física y los aspectos administrativos y políticos en la preservación de puentes históricos coloniales en Perú.

En la tesis denominada “Evaluación de la sensibilidad del comportamiento sísmico de puentes de mampostería de piedra abovedados en arco: caso de estudio del Puente Trujillo”, presentada por Huallpa (2020), para optar el grado de Magíster en Ingeniería Civil en la Pontificia Universidad Católica del Perú, se tuvo como objetivo analizar el comportamiento sísmico de un puente histórico construido en mampostería de piedra mediante el método de elementos finitos, evaluando cómo la variación de parámetros mecánicos y geométricos influye en su desempeño estructural. Con una metodología cuantitativa aplicada mediante el modelamiento estructural, desarrollando un análisis de sensibilidad que consideró variaciones en el módulo de elasticidad, la fricción entre dovelas, las características del relleno



y las resistencias mecánicas propias del arco de piedra. Llegando a los resultados que la disminución del módulo de elasticidad incrementa los desplazamientos del arco hasta en un 40 %, y que la reducción del confinamiento del relleno genera aperturas de juntas superiores al 25 %, identificándose mecanismos de daño en los riñones y en las impostas del puente; asimismo, se determinó que el modo fundamental de vibración se encuentra alrededor de 4.2 Hz y que la rigidez global se reduce de forma progresiva conforme aumenta la demanda sísmica. Concluyendo que el Puente Trujillo presenta un comportamiento sísmico altamente sensible a las propiedades mecánicas de la mampostería, por lo que es necesario considerar análisis paramétricos detallados en la evaluación de estructuras históricas para prevenir fallas y orientar intervenciones de conservación. Lo antes descrito denota la importancia de utilizar métodos numéricos avanzados para comprender la vulnerabilidad sísmica de puentes patrimoniales, permitiendo establecer criterios adecuados de preservación y reforzamiento estructural.

#### **b) Proyectos similares**

En el proyecto denominado: “Recuperación de puente colonial Uchumayo, distrito de Uchumayo - Arequipa - Arequipa”, con CUI N° 2182957, de la Municipalidad Distrital de Uchumayo (2025), realizando en el Puente Colonial Uchumayo bajo la modalidad de administración directa, cuyo objetivo fue generar adecuadas condiciones estructurales para recuperar la

herencia histórica e identidad cultural. Contando como metodología realizar la identificación de piezas dañadas, realizar el desmontaje y emboquillado, así como la limpieza en general e iluminación ornamental. Obteniendo como resultado el mejoramiento arquitectónico y estructural del puente. Concluyendo que, para evitar el deterioro total en el tiempo, era necesario realizar la recuperación, con una inversión de S/ 1,157,797.79. Lo antes expuesto permite ver que es necesario la recuperación de puentes coloniales para conservar la identidad cultural de cada lugar.

En el proyecto denominado: “Reconstrucción del Puente Colonial Señor de Acoria, distrito de Acoria - Huancavelica - Huancavelica”, con CUI N° 2143201, del Gobierno Regional de Huancavelica (2017), realizando en el Puente Colonial Señor de Acoria bajo la modalidad de administración directa, cuyo objetivo fue recuperar el Puente Colonial, para la identidad cultural del lugar. Contando como metodología realizar la construcción de un puente arco de tímpanos llenos; de concreto armado, con una luz de diseño de 22 metros, de una vía con veredas más muros de encausamiento con gaviones antes y después del puente carrozable, con acabado arquitectónico colonial. Obteniendo como resultado que la construcción realizada no modificará el ecosistema del lugar, así también, contribuirá al desarrollo sociocultural en todo el ámbito del área de influencia del proyecto, dinamizando el intercambio comercial y mejorando los ingresos económicos de la población beneficiada. Concluyendo que la intervención ejecutada logró preservar el valor histórico y

cultural del puente, garantizando a la vez mejores condiciones de conectividad y seguridad vial para la población, evidenciando que una adecuada planificación y metodología constructiva permiten armonizar la conservación patrimonial con el desarrollo territorial sostenible, teniendo una inversión de S/ 1,628,237.69. Lo antes expuesto permite ver cómo la reconstrucción del Puente Colonial Señor de Acoria respondió a una necesidad estructural y a un compromiso con la conservación del patrimonio cultural y el fortalecimiento del tejido social de la comunidad.

## **2.2. NORMATIVA VIGENTE**

### **2.2.1. *Manual de Puentes – MTC***

- a) Brinda las pautas necesarias para el planeamiento, el análisis y el diseño, de puentes carreteros.
- b) Establece criterios de cargas, combinaciones de carga y estados límite de servicio y resistencia.

#### **Limitación normativa en puentes históricos de piedra**

- c) En el contexto peruano, la normativa técnica específica para puentes de mampostería o piedra de carácter histórico es limitada.

### **2.2.2. NTP E.030 – Diseño Sismorresistente**

- d) Esta norma permite establecer los parámetros sísmicos oficiales del Perú, tales como espectros, zonas sísmicas y coeficientes requeridos para definir las cargas sísmicas en el análisis Pushover.
- e) Sirve como base para contrastar el desempeño real del puente frente a las exigencias sísmicas vigentes.
- f) Proporciona criterios de seguridad que facilitan la evaluación de la vulnerabilidad estructural del puente ante los escenarios sísmicos correspondientes al contexto peruano.

### **2.2.3. NTP E.020 – Cargas**

- a) La NTP E.020 define las cargas gravitacionales fundamentales, tales como el peso propio y las cargas vivas, indispensables para la correcta configuración del modelo estructural en el método de elementos finitos.
- b) Gracias a esta norma, es posible garantizar la consistencia de las cargas verticales antes de aplicar el análisis sísmico.

#### **2.2.4. ASCE/SEI 41-23**

- a) La ASCE/SEI 41-23 ofrece la metodología formal para el análisis de desempeño estructural, incluyendo niveles objetivo de desempeño estructural (Operacional=1-A, Ocupación inmediata=1-B, Seguridad de vida=3-C y Prevención del colapso=5-D), los cuales constituyen la base del proceso de evaluación del puente.
- b) Asimismo, proporciona lineamientos precisos para la ejecución del análisis Pushover, directamente aplicables al método de elementos finitos utilizado en la investigación.

#### **2.2.5. FEMA 356 y FEMA 440**

- a) Los documentos FEMA 356 y FEMA 440 permiten justificar técnicamente el uso del análisis no lineal estático (Pushover) en estructuras existentes.
- b) Ambos ofrecen modelos, parámetros y procedimientos necesarios para estimar la curva de capacidad, uno de los resultados centrales del estudio.

#### **2.2.6. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications**

- a) Las especificaciones AASHTO LRFD permiten comparar la respuesta estructural del puente colonial de piedra con los criterios modernos de diseño de puentes, aportando un valor ingenieril adicional al estudio.

#### **2.2.7. SEAOC Vision 2000**

- a) El documento SEAOC Vision 2000 define los niveles de desempeño estructural y los objetivos de diseño basado en desempeño, lo cual resulta especialmente relevante para el análisis efectuado en el puente.
- b) Esta guía permite contextualizar y estructurar la evaluación del desempeño en relación con estándares internacionales ampliamente aceptados.

### **2.3. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS BÁSICOS**

Seguidamente, se precisan definiciones necesarias para comprender el desarrollo de la investigación como parte de los conceptos básicos alineados a las variables y dimensiones del estudio.

### **2.3.1. Desempeño estructural mediante el método de elementos finitos**

El desempeño estructural es la capacidad que posee la estructura para cumplir sus funciones bajo condiciones previstas de carga con suficiente seguridad, integridad y durabilidad, de tal manera que mantenga su capacidad de servicio y soporte de cargas límite sin fallos ni agrietamientos excesivos (Aguas et al., 2024).

#### **Modelos constitutivos utilizados**

Para describir el comportamiento no lineal de la mampostería de piedra, se eligió una ley constitutiva basada en el modelo de fisuración por deformación total (Total Strain Crack Model), basado en el modelo de fisuración rotatoria isotrópica.

Se consideraron funciones de ablandamiento exponencial y endurecimiento parabólico para el comportamiento a tensión y compresión, respectivamente.

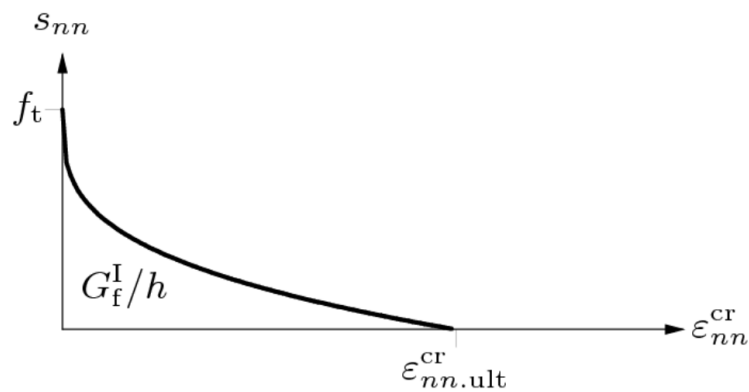
#### **Comportamiento a tensión**

El comportamiento a tensión de la piedra se representa mediante una curva de ablandamiento de tipo exponencial, debido a su capacidad para describir de forma realista la pérdida progresiva de resistencia después de alcanzar la tensión máxima; en el presente estudio se adopta este tipo de diagrama, ya que permite obtener zonas de agrietamiento más localizadas, este enfoque mejora la estabilidad

numérica y refleja con mayor precisión el proceso de fractura frágil de la piedra bajo esfuerzos de tracción.

**Figura 1**

*Ablandamiento exponencial a tracción.*



En el ablandamiento exponencial, la relación de la tensión de la grieta viene dada por:

$$\frac{\sigma_{nn}^{cr}(\epsilon_{nn}^{cr})}{f_t} = \exp\left(-\frac{\epsilon_{nn}^{cr}}{\epsilon_{nn.ult}^{cr}}\right)$$

Donde:

$\sigma_{nn}^{cr}$  es la tensión normal en dirección de la grieta;

$\epsilon_{nn}^{cr}$  es la deformación normal en la dirección de la grieta;

$f_t$  es la resistencia a tracción del material.

Lo que resulta en una deformación última de agrietamiento dada por:

$$\epsilon_{nn.ult}^{cr} = \frac{G_f^I}{h_{cr} f_t}$$

Donde:



$\varepsilon_{nn,ult}^{cr}$  es la deformación última asociada al ablandamiento completo.

Asimismo, la resistencia a tracción reducida se expresa como:

$$f_t = \sqrt{\frac{G_f^I E}{h_{cr}}}$$

Donde:

$G_f^I$  es la energía de fractura en modo I;

$h_{cr}$  es la longitud equivalente o ancho de banda de grieta;

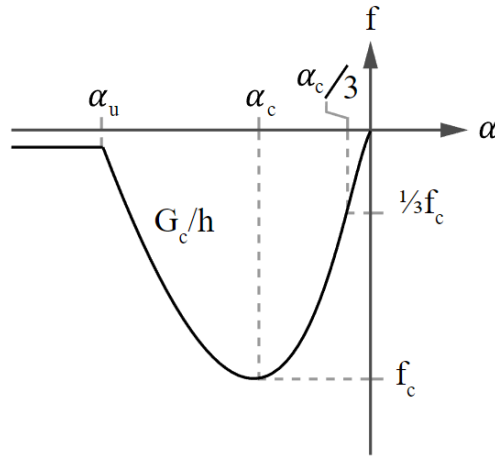
$E$  es el módulo de elasticidad del material.

### **Comportamiento a compresión**

Este comportamiento se representa mediante un diagrama tensión–deformación curvilíneo tipo parabólico, que incluye una fase de ablandamiento posterior a la carga máxima, dicho ablandamiento se basa en la energía de fractura a compresión, parámetro que refleja la capacidad del material para disipar energía después del pico de resistencia (RTD, 2022).

**Figura 2**

*Curva de compresión parabólica.*



La curva parabólica es una formulación basada en la energía de fractura.

La deformación  $\alpha_{c/3}$ , en la que se alcanza en un tercio de la resistencia máxima a compresión  $f_c$  está definida por la siguiente ecuación:

$$\alpha_{c/3} = -\frac{1}{3} \frac{f_c}{E}$$

La deformación  $\alpha_c$ , en la que se alcanza la resistencia máxima a compresión, está definida por la siguiente ecuación:

$$\alpha_c = -\frac{5}{3} \frac{f_c}{E} = 5\alpha_{c/3}$$

Vemos que  $\alpha_{c/3}$  y  $\alpha_c$  se determinan independientemente del tamaño del elemento o de la energía de fractura por compresión.

$$\alpha_u = \min \left( \alpha_c - \frac{3}{2} \frac{G_c}{hf_c}, 2.5\alpha_c \right)$$

La curva de compresión parabólica se describe ahora mediante la siguiente ecuación:

$$f_c = \begin{cases} -f_c \frac{1}{3} \frac{\alpha_j}{\alpha_{c/3}} & \text{if } \alpha_{c/3} < \alpha_j \leq 0 \\ -f_c \frac{1}{3} \left( 1 + 4 \left( \frac{\alpha_j - \alpha_{c/3}}{\alpha_c - \alpha_{c/3}} \right) - 2 \left( \frac{\alpha_j - \alpha_{c/3}}{\alpha_c - \alpha_{c/3}} \right)^2 \right) & \text{if } \alpha_c < \alpha_j \leq \alpha_{c/3} \\ -f_c \left( 1 - \left( \frac{\alpha_j - \alpha_c}{\alpha_u - \alpha_c} \right)^2 \right) & \text{if } \alpha_u < \alpha_j \leq \alpha_c \\ 0 & \text{if } \alpha_j \leq \alpha_u \end{cases}$$

Donde:

$\alpha_j$  es la deformación compresiva en un punto genérico;

$\alpha_{c/3} < \alpha_j \leq 0$  es el tramo con comportamiento inicial casi lineal con pendiente E;

$\alpha_c < \alpha_j \leq \alpha_{c/3}$  es el tramo de rango no lineal parabólico ascendente hasta el máximo  $f_c$ ;

$\alpha_u < \alpha_j \leq \alpha_c$  es el tramo de rango descendente (ablandamiento), donde interviene la energía de fractura  $G_c$ ;

$\alpha_j \leq \alpha_u$  es el tramo final del comportamiento resistente, cuando el material ya no soporta carga.

Asimismo, se presentan las definiciones de cada dimensión de la mencionada variable.

### **a) Capacidad estructural**

La capacidad estructural es la máxima resistencia que puede alcanzar una estructura frente a cargas laterales o verticales antes de entrar en un estado de falla, por lo que según Clemente et al. (2023), esta capacidad está asociada a la rigidez, la ductilidad y a la degradación de resistencia que experimenta una estructura bajo demandas sísmicas crecientes.

### **b) Curva de capacidad**

Kuria & Kegyes (2023) indican que la curva de capacidad es una representación gráfica fuerza – desplazamiento obtenida mediante análisis Pushover y a su vez permite identificar la rigidez inicial, el punto de fluencia y la resistencia última, proporcionando información primordial para estimar el comportamiento no lineal de la estructura durante un sismo.

### **c) Respuesta sísmica**

La respuesta sísmica es el comportamiento que presenta una estructura bajo la excitación producida por un movimiento sísmico, a su vez, Shabani et al. (2023), indica que esta respuesta incluye desplazamientos, aceleraciones, deformaciones y fuerzas internas que dependen de las propiedades dinámicas del sistema estructural, tales como periodos, amortiguamiento y modos de vibración.

#### **d) Niveles de desempeño**

Los niveles de desempeño estructural describen grados de daño aceptables ante diferentes intensidades sísmicas, los cuales permiten evaluar si la estructura permanece funcional, reparable o cercana al colapso (ASCE/SEI 41-23, 2023).

#### **2.3.2. Agrietamiento**

El agrietamiento es una discontinuidad visible o interna en elementos estructurales, caracterizada por un plano o trayectoria en la que la continuidad material se ha interrumpido, produciendo separación parcial o total entre las superficies de dicha discontinuidad (Golewski, 2023).

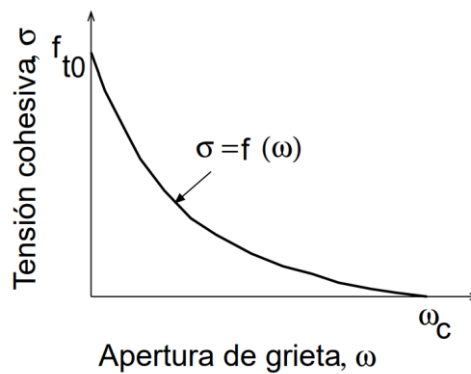
#### **Total Strain Crack Model**

En materiales cuasifrágiles como la piedra, la falla por tracción se caracteriza por la aparición y evolución progresiva de microgrietas y procesos de ablandamiento, que conducen a la pérdida de rigidez y resistencia del material, estas microgrietas tienden a coalescer hasta formar una discontinuidad geométrica conocida como grieta (Barbhuiya et al., 2024); para representar adecuadamente este fenómeno, se han desarrollado distintos enfoques numéricos; entre ellos, el Modelo de Fractura de Deformación Total (Total Strain Crack Model, TSCM) que describe la degradación del material mediante la relación entre el esfuerzo cohesivo ( $\sigma$ ) y la

apertura de grieta ( $\omega$ ), dicha ley ilustra cómo el esfuerzo máximo  $f_{t0}$  disminuye gradualmente hasta anularse cuando la apertura alcanza un valor crítico  $\omega_c$ , permitiendo determinar la energía de fractura  $G_f$ , parámetro primordial para la calibración del comportamiento no lineal (DIANA FEA, 2023).

### Figura 3

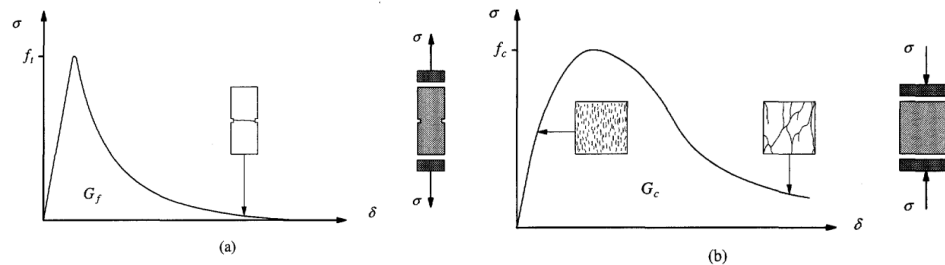
*Curva Esfuerzo de cohesión – Apertura de grieta.*



Este proceso de ablandamiento ha sido documentado en tracción (Hordijk, 1991), y en menor medida, en compresión, donde depende de la geometría y de las condiciones de frontera (Wang et al., 2023); en ambos casos, la energía de fractura, a tracción  $G_f$  y a compresión  $G_c$ , se interpreta como una propiedad material derivada de los diagramas esfuerzo–desplazamiento, lo que permite unificar la descripción del proceso de daño como un crecimiento progresivo de microgrietas (Pokorska et al., 2023; Fages et al., 2022).

#### Figura 4

*Fractura de materiales cuasifrágiles bajo carga uniaxial.*



*Nota:* (a) En tracción, donde  $f_t$  denota la resistencia a la tracción; (b) En compresión, donde  $f_c$  representa la resistencia a la compresión.

En los modelos de fractura, se distinguen dos enfoques fundamentales: el discreto y el distribuido. Los modelos discretos tratan el agrietamiento como una discontinuidad explícita dentro del dominio numérico, lo que permite representar con precisión la trayectoria y apertura de grietas, sin embargo, esto implica un alto costo computacional (Gudžulić & Meschke, 2025). Por otro lado, los modelos distribuidos incorporan el agrietamiento en las leyes constitutivas del material, representando la pérdida progresiva de rigidez de manera continua; dentro de estos últimos, Rots & Blaauwendraad (1989) introdujeron el Multi-Directional Fixed Crack Model, mientras que Weihe y Kröplin desarrollaron el Total Strain Crack Model (TSCM), basado en la relación esfuerzo–deformación y con dos variantes principales: el Fixed Orthogonal Crack Model (FCM) y el Coaxial Rotating Crack Model (RCM); este enfoque permite simular el comportamiento no lineal de la piedra bajo cargas cíclicas o sísmicas, especialmente al permitir una mejor

representación del ablandamiento y la redistribución de esfuerzos (Sousamli et al., 2022).

Asimismo, la energía de fractura  $G_f$ , definida como el área bajo la curva esfuerzo–deformación, constituye un parámetro para cuantificar la resistencia del material frente a la propagación de grietas.

Lourenço (1997) demostró que la calibración adecuada de  $G_f$  permite reproducir con alta precisión el comportamiento experimental del material bajo diferentes modos de carga, por lo que el enfoque energético unifica la descripción del ablandamiento tanto en tracción como en compresión, reconociendo que el mecanismo de falla en ambos casos es el crecimiento progresivo de grietas microscópicas.

Asimismo, se presentan las definiciones de cada dimensión de la mencionada variable.

#### **a) Tamaño de grieta**

El tamaño de una grieta, su ancho, largo y profundidad, es un indicador de la severidad del daño, asimismo, la amplitud de la grieta es un parámetro fundamental para determinar si afecta la resistencia o la durabilidad del elemento estructural (Robuschi et al., 2023).



### **b) Distribución del agrietamiento**

Nhu & Binh (2024) explican que la distribución del agrietamiento se refiere a la forma en que las grietas aparecen y se extienden en un elemento y que los patrones de grietas permiten identificar los mecanismos de falla, las zonas de concentración de esfuerzos y el comportamiento inelástico de la estructura.

### **c) Evolución del agrietamiento**

La evolución del agrietamiento consiste en la progresión del número, tamaño y severidad de grietas en función de cargas crecientes o en el tiempo, por lo que permite comprender la propagación de fracturas y los procesos de degradación del material (Pereira et al., 2024).

### **d) Severidad del agrietamiento**

La severidad indica el nivel de afectación estructural asociado al agrietamiento, de acuerdo con Golewski (2023), la severidad depende de la apertura, profundidad y localización de las grietas, pudiendo clasificarse desde microfisuras hasta grietas estructuralmente críticas que comprometen la seguridad del elemento.

### **CAPÍTULO III:**

#### **METODOLOGÍA Y DISEÑO DEL PROYECTO**

#### **3.1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN APLICADA**

##### ***3.1.1. Tipo de investigación***

El estudio se realizó en el marco del tipo aplicada (Hernández et al., 2014), debido a que tuvo como propósito utilizar los conocimientos científicos y técnicos disponibles para analizar el comportamiento estructural de un bien patrimonial como el Puente Colonial de Nuñoa y proponer recomendaciones que contribuyan a su conservación y reforzamiento.

##### ***3.1.2. Nivel de investigación***

La presente investigación se ubica en un nivel explicativo (Hernández et al., 2014), ya que se buscó identificar las causas y efectos del comportamiento estructural del Puente Colonial de Nuñoa frente a solicitudes sísmicas, cabe agregar que, a través del análisis de los resultados obtenidos del modelamiento numérico, se explica cómo las propiedades mecánicas de los materiales y las

características geométricas influyen en la aparición y propagación de grietas, permitiendo así comprender de manera integral el desempeño estructural del puente.

### **3.1.3. *Diseño de investigación***

En cuanto al diseño de investigación, el estudio fue de tipo no experimental, dado que no se manipularon directamente las variables estructurales del puente, sino que se observaron y evaluaron mediante el modelamiento y análisis no lineal estático basado en el Método de Elementos Finitos (Hernández et al., 2014), del mismo modo, el estudio se desarrolló con un corte transversal, ya que los datos y resultados se obtuvieron en un periodo de tiempo determinado, correspondiente al año 2025 (Hernández et al., 2014).

### **3.1.4. *Justificación del enfoque aplicado***

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo (Hernández et al., 2014), fundamentándose en la recolección y análisis de datos numéricos obtenidos a partir de simulaciones computacionales, ensayos y modelos matemáticos para explicar el desempeño estructural del puente frente a cargas sísmicas.

Este enfoque permitió medir de manera objetiva variables estructurales como desplazamientos, esfuerzos internos, deformaciones y niveles de daño, facilitando la evaluación precisa del comportamiento del sistema ante diferentes

escenarios sísmicos, por otro lado, el uso de herramientas de modelado numérico hizo posible reproducir condiciones reales de carga y considerar parámetros relevantes como las propiedades de los materiales, las condiciones de apoyo y la interacción suelo-estructura; de igual forma, el análisis cuantitativo permitió comparar resultados bajo distintos niveles de intensidad sísmica, contribuyendo a la validación del modelo estructural y a la identificación de posibles vulnerabilidades; en ese sentido, este enfoque resulta adecuado para estudios de ingeniería estructural, ya que proporciona resultados verificables, replicables y basados en evidencia, permitiendo formular conclusiones confiables orientadas a mejorar el diseño y la seguridad del puente.

### **3.2. DISEÑO DE PROYECTO**

#### ***3.2.1. Etapas del proyecto***

Para efectuar el desarrollo del presente proyecto, se ha considerado las siguientes etapas:

##### **a. Primero:**

Una vez obtenida la información estructural y geométrica correspondiente al Puente Colonial de Nuñoa, los datos fueron organizados en hojas de cálculo de

Microsoft Excel, donde se registraron las propiedades mecánicas de los materiales, las características geométricas, las cargas de análisis y las condiciones de apoyo.

**b. Segundo:**

Posteriormente, esta información fue incorporada al software de análisis estructural basado en el Método de Elementos Finitos (MEF), donde se elaboró el modelo tridimensional del puente y se configurarán las condiciones de carga y frontera necesarias para el estudio.

**c. Tercero:**

Con el modelo estructural definido, se realizó el análisis no lineal estático (Pushover) con el propósito de determinar la curva de capacidad del puente, la cual permitió identificar su resistencia máxima, rigidez inicial y punto de fluencia, sumado a ellos, los resultados numéricos obtenidos fueron procesados para determinar los niveles de desempeño estructural, de acuerdo con los criterios establecidos en las normas ASCE 41-23 y SEAOC Visión 2000.

**d. Cuarto:**

Los resultados fueron representados mediante gráficos de curvas de capacidad, mapas de deformaciones y patrones de agrietamiento, lo que permitió

observar de forma general la aparición, tamaño y evolución de las grietas bajo distintos niveles de carga.

**e. Quinto:**

Finalmente, los datos obtenidos fueron analizados e interpretados a partir de los criterios técnicos de desempeño estructural y del comportamiento del material en régimen no lineal, y los resultados permitieron identificar los puntos críticos de daño, las zonas de mayor vulnerabilidad y el comportamiento global del puente, formulando conclusiones y recomendaciones técnicas orientadas al refuerzo y preservación estructural del Puente Colonial de Nuñoa, de acuerdo con su valor histórico y las condiciones reales observadas.

**3.2.2. Herramientas utilizadas**

**Cinta métrica y distanciómetro láser**

Estos instrumentos fueron utilizados para realizar la medición directa de longitudes, anchos, alturas, espesores y secciones de los elementos estructurales del puente, la cinta métrica permitió obtener medidas precisas en zonas accesibles, mientras que el distanciómetro láser facilitó mediciones a mayores distancias o en puntos elevados, proporcionando resultados con errores mínimos (generalmente

inferiores a  $\pm 2$  mm). La combinación de ambos instrumentos garantizó un levantamiento geométrico detallado y confiable.

### **Cámara fotográfica digital**

Se empleó para el registro fotográfico detallado de la estructura, documentando su estado actual, las patologías visibles (fisuras, desprendimientos, erosiones, etc.) y los elementos constructivos relevantes, dichas imágenes permitieron la identificación visual de zonas críticas, así como la verificación comparativa durante la fase de análisis y la elaboración del diagnóstico estructural.

### **Equipo de protección personal (EPP)**

Se utilizó casco, guantes, chaleco reflectante, botas de seguridad y lentes protectores, por lo que su uso garantizó la seguridad del investigador durante las labores de campo, especialmente en zonas de tránsito vehicular o estructuras antiguas con accesos restringidos.

### **Planos originales y documentación histórica**

Los planos estructurales y arquitectónicos originales del Puente Colonial de Nuñoa fueron fundamentales para contrastar las dimensiones levantadas en campo con los valores de diseño; del mismo modo, la revisión de documentación histórica

permitió comprender las técnicas constructivas empleadas, los materiales originales y las modificaciones estructurales que el puente había experimentado con el tiempo.

### **3.2.3. *Software utilizados***

#### **AutoCAD**

El software AutoCAD fue empleado para la elaboración y digitalización de planos estructurales y geométricos del puente, partiendo de las mediciones de campo y de los planos originales. Esta herramienta posibilitó la creación de planos de planta, elevaciones y secciones con alta precisión, que posteriormente sirvieron como base geométrica para el modelo tridimensional en el software de elementos finitos. Asimismo, el software permitió realizar análisis geométricos previos (simetría, esbeltez, proporciones de carga, etc.), que contribuyeron a una mejor interpretación del comportamiento estructural; para la presente investigación se empleó la versión académica.

#### **Microsoft Office**

Estas herramientas fueron utilizadas para la redacción, sistematización y presentación de los resultados de la investigación, así como para organizar, procesar y analizar los datos recolectados. Microsoft Word permitió elaborar el informe técnico con redacción académica, tablas, figuras y referencias normativas.



PowerPoint facilitó la presentación visual de los hallazgos mediante gráficos de curvas de capacidad, mapas de deformaciones y fotografías de campo. Microsoft Excel permitió elaborar hojas de cálculo con las propiedades mecánicas de los materiales (módulo de elasticidad, resistencia a la compresión, densidad, etc.), dimensiones de los elementos estructurales, cargas aplicadas y condiciones de apoyo.

### **3.3. EVALUACIÓN TÉCNICA Y FACTIBILIDAD**

En relación con la evaluación técnica, la presente investigación resulta técnicamente viable y sustentada, ya que se apoya en metodologías comprobadas de ingeniería estructural y en el uso de herramientas especializadas de análisis por elementos finitos, ampliamente utilizadas en la evaluación de estructuras patrimoniales. El estudio considera una etapa de levantamiento de campo que permitirá obtener información geométrica y material precisa del Puente Colonial de Nuñoa, la cual servirá como base para la modelación tridimensional y el análisis no lineal estático, además, la aplicación de normativas internacionales reconocidas, como la ASCE 41-23 y la SEAOC Visión 2000, garantiza la validez técnica de los procedimientos empleados y la confiabilidad de los resultados obtenidos, por tanto, desde el punto de vista metodológico y operativo, el estudio presenta consistencia técnica y factibilidad de ejecución dentro del marco de los recursos disponibles.

Por su parte, en relación con la factibilidad, se precisa que el proyecto es viable en términos logísticos, económicos y de recursos humanos, dado que las actividades planteadas como el levantamiento de datos en campo, modelamiento estructural y análisis de resultados, se desarrollarán con equipos e instrumentos accesibles.

Asimismo, los investigadores cuentan con los conocimientos técnicos necesarios en análisis estructural, modelamiento computacional y normativa sísmica, lo que asegura el adecuado desarrollo del estudio; por otro lado, la localización del puente dentro del ámbito provincial de Nuñoa facilita el acceso al sitio, reduciendo costos y tiempo de desplazamiento; en consecuencia, la investigación se considera técnica, operativa y económicamente factible, permitiendo alcanzar los objetivos propuestos con los medios disponibles.

### **3.3.1. Modelado estructural**

El modelado estructural del Puente Colonial de Nuñoa se desarrolló a partir de un levantamiento geométrico detallado de la estructura, complementado con la revisión de planos históricos y el registro fotográfico in situ.

A partir de esta información, se definió la geometría tridimensional del puente, considerando sus principales elementos estructurales, tales como el arco de mampostería, el tablero, los estribos y las aletas laterales, asimismo, la

discretización del modelo se realizó mediante elementos finitos sólidos, permitiendo representar de manera adecuada la configuración real del puente y capturar su comportamiento estructural frente a diferentes condiciones de carga.

En cuanto a la caracterización de los materiales, se asignaron propiedades mecánicas representativas de la mampostería de piedra, considerando parámetros como el módulo de elasticidad, la resistencia a compresión y la densidad, en concordancia con valores reportados en la literatura técnica y normativa aplicable, también se incorporó un modelo constitutivo no lineal capaz de simular el comportamiento inelástico del material, incluyendo la aparición y propagación de grietas bajo cargas crecientes. Las condiciones de frontera fueron definidas en función del comportamiento esperado de los apoyos del puente, asumiendo restricciones en los estribos que simulan su interacción con el terreno.

Se procedió a la aplicación de las cargas sobre el modelo estructural, incluyendo el peso propio de la estructura y cargas equivalentes asociadas a solicitaciones externas y, se ejecutó un análisis estático no lineal tipo Pushover, mediante el cual se incrementaron progresivamente las cargas laterales para evaluar la respuesta global del puente.

Este procedimiento permitió obtener la curva de capacidad, identificar los puntos críticos de daño y analizar la evolución del agrietamiento en la estructura,

proporcionando una representación aproximada del comportamiento real del puente frente a acciones sísmicas.

### **3.3.2. *Simulación de impacto ambiental***

El presente estudio se enmarca dentro de un enfoque preventivo y evaluativo, considerando que la investigación no contempla intervenciones físicas directas sobre el Puente Colonial de Nuñoa ni alteraciones del entorno natural; en ese sentido, el análisis se orienta a identificar los posibles efectos indirectos asociados al desarrollo del proyecto, principalmente durante las etapas de levantamiento de información, registro fotográfico y modelación estructural.

Estas actividades se caracterizan por ser de baja incidencia ambiental, ya que no implican excavaciones, generación de residuos significativos ni modificación de las condiciones del sitio.

Asimismo, se ha considerado la evaluación de posibles impactos vinculados al tránsito de los investigadores y al uso de equipos de medición en campo, tales como distanciómetros láser y cámaras fotográficas; estos impactos son de carácter mínimo y temporal, limitándose a la presencia puntual de personal técnico en la zona de estudio.

De igual manera, se ha tenido en cuenta la importancia de preservar el valor patrimonial del puente, evitando cualquier acción que pueda generar daño físico o alteración en sus elementos estructurales o arquitectónicos, por lo tanto, la simulación ambiental permite confirmar que las actividades desarrolladas son compatibles con la conservación del entorno y del bien histórico.

Cabe indicar que el proyecto presenta un impacto ambiental no significativo, con predominio de efectos positivos asociados a la generación de información técnica para la conservación del puente.

En particular, el estudio contribuye a la protección del patrimonio cultural y a la gestión sostenible de infraestructuras históricas, al proporcionar herramientas que permiten evaluar su estado estructural sin recurrir a métodos invasivos.

### 3.4. PLANIFICACIÓN Y EJECUCIÓN

#### 3.4.1. Cronograma de actividades

**Tabla 1**

*Plan de ejecución del proyecto.*

| Actividades                                                                                            | 2025      |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   | 2026  |   |   |   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---|---|---|-------|---|---|---|---------|---|---|---|-------|---|---|---|-------|---|---|---|
|                                                                                                        | Diciembre |   |   |   | Enero |   |   |   | Febrero |   |   |   | Marzo |   |   |   | Abril |   |   |   |
|                                                                                                        | 1         | 2 | 3 | 4 | 1     | 2 | 3 | 4 | 1       | 2 | 3 | 4 | 1     | 2 | 3 | 4 | 1     | 2 | 3 | 4 |
| <b>CAPITULO I: EL PROBLEMA</b>                                                                         |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| • Desarrollo de la problemática, preguntas y objetivos de estudio.                                     |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| <b>CAPITULO II: MARCO REFERENCIAL</b>                                                                  |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| • Recopilación de datos necesarios para plantear los antecedentes y bases del estudio.                 |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| <b>CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO Y DISEÑO DEL PROYECTO</b>                                          |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| • Generación de los instrumentos de estudio                                                            |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| • Desarrollo de la descripción de procedimientos y cálculos que se emplearán.                          |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| <b>CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>                                                             |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| • Aplicación de instrumento y procesamiento de resultados                                              |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| • Análisis de resultados y presentación de datos                                                       |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| • Interpretación de datos, para desarrollar la discusión de resultados                                 |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>                                                                  |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| • Elaboración de conclusiones e informe final del trabajo.                                             |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| <b>REFERENCIAS Y PRESENTACIÓN DE INFORME</b>                                                           |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| • Revisión de estilos y verificación de incorporar la totalidad de referencias empleadas en el trabajo |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| <b>REVISIÓN Y SUSTENTACIÓN</b>                                                                         |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| • Observaciones de jurado calificador al informe final.                                                |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| • Levantamiento de observaciones de jurado calificador                                                 |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| • Entrega del informe final, mediante sistema para programar fecha y hora de sustentación.             |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |

*Nota:* Elaboración Propia.

### **3.4.2. Asignación de recursos**

En relación a la asignación de recursos, seguidamente se detallan la cantidad de recursos humanos y materiales para el desarrollo de la investigación:

#### **Recursos humanos:**

- 02 tesistas, a cargo de la investigación.
- 01 asesor.

#### **Recursos materiales:**

- 02 laptops i7.
- Útiles de escritorio.
- 01 dispositivo de almacenamiento digital.
- 01 impresora multifuncional.
- 01 plotter A0.
- 01 distanciómetro láser.
- 01 cámara fotográfica digital.
- Equipos de protección personal – EPPs.
- Software AutoCAD – versión académica.

### 3.4.3. Costos y financiamientos

**Tabla 2**

*Costo estimado para la investigación.*

| <b>Ítem</b>              | <b>Actividad</b>                                                                   | <b>Costo</b>        |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| <b>1</b>                 | Recopilación de datos para la investigación                                        | s/. 1,500.00        |
| <b>2</b>                 | Procedimiento para la obtención del grado académico                                | s/. 1,500.00        |
| <b>3</b>                 | Generación de instrumentos para ser aplicados a la muestra de estudio              | s/. 2,500.00        |
| <b>4</b>                 | Proceso de validación de instrumentos                                              | s/. 500.00          |
| <b>5</b>                 | Aplicación de instrumentos a la unidad de estudio seleccionada de la investigación | s/. 1,000.00        |
| <b>6</b>                 | Desarrollo de la discusión de la investigación                                     | s/. 500.00          |
| <b>7</b>                 | Elaboración y formato del informe final                                            | s/. 300.00          |
| <b>8</b>                 | Revisión de Estilos                                                                | s/. 1,000.00        |
| <b>Presupuesto total</b> |                                                                                    | <b>s/. 8,800.00</b> |

*Nota:* Elaboración Propia.



## **CAPÍTULO IV:**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1. DESARROLLO DEL PROYECTO Y VALIDACIÓN DEL DISEÑO**

##### **4.1.1. Estado situacional**

Dentro de la Región Puno, existen innumerables muestras del Patrimonio Cultural Inmueble; como los Conjuntos o Sitios Arqueológicos y los Monumentos histórico artísticos. Sin embargo, estos últimos testimonios histórico culturales, como hechos Arquitectónicos se vienen deteriorando por el inexorable paso de los años, la falta de proyectos e intervenciones de restauración acertadas, y en más de los casos por la carencia de mantenimiento a consecuencia de los factores anteriores, sumando al problema, la falta de recursos económicos por parte de los pobladores usuarios, y de los Gobiernos Locales para la conservación y mantenimiento constante.

Dentro del amplio espectro que conforma el Patrimonio Cultural Inmueble, ubicado en una zona muy singular, donde en un momento dado de nuestra historia

la actividad económica posibilitó una economía floreciente, se encuentra el Puente Colonial de Nuñoa, asentado en la cordillera occidental de los andes. cuyo desarrollo es espontáneo, integrándose al paisaje natural; en épocas pasadas fue un centro complementario lugar de paso marcado por la intensa actividad económica relacionada con el arrieraje, en la que la actividad de compra y transporte de productos para su venta en otras poblaciones determinó el apogeo económico de esta región, y que posteriormente decae en los siglos recientes.

El puente Colonial de Nuñoa se encuentra en pleno centro urbano; asentada sobre el río Nuñoa, se caracteriza por su arquitectura sencilla propia de la zona rural, construido en el año 1898, ha sufrido deterioro por el paso del tiempo, y la falta de un acertado manejo de mantenimiento; su importancia está dada por la antigüedad de su construcción y las características arquitectónicas y artísticas tan peculiares, donde la mano de obra supo adecuarse a los materiales del lugar, los mismos que aún mantienen la mayor parte de sus estructuras originales.

### **Entorno Geográfico**

El poblado de Nuñoa está asentado en plano inclinado de 1.5% de pendiente aproximadamente, atravesada de noroeste a sur oeste, por el río Nuñoa que lo divide en la zona antigua y la zona actualmente conocida como "La Banda", sus límites por el lado norte con rural Nuñoa, por el sur con la comunidad de Orccorara, por el este con Queñachamaca, cerro Huayraypata, Jorjecucho y comunidad Juan Velasco

Alvarado, y por el oeste con la comunidad de Orccorara y cerro Quelluwantira. (Municipalidad Distrital de Nuñoa, 2006).

### **Aspectos Demográficos**

El Distrito de Nuñoa cuenta con 13,293 habitantes, población estimada a julio del 2002, de los cuales el 66.6% es rural.

### **Servicios Existentes**

El poblado de Nuñoa cuenta con sistema de agua potable administrado por la Municipalidad de Nuñoa, dicho servicio se distribuye desde el reservorio Quellahuantira que funciona actualmente el 50% de su capacidad, el sistema de desagüe no funciona adecuadamente carente de tratamiento especial de aguas servidas, el servicio de energía eléctrica abastece al 98% de la población, así como el alumbrado público proveniente de la Central de Machupicchu. Además, cuenta con servicio de telefonía rural pública e Internet rural, servicio de radio comunicación y comunicación a través de celulares.

### **Actividad Económica**

La actividad principal es la ganadera (producción de alpacas), seguido por la actividad agrícola, comercio, servicios y por último por la artesanía y turismo.

### **Potencialidad**

Es la agricultura de papas nativas (por ser un producto ecológico), la ganadería como productor de alpacas, a parte tiene atractivos turísticos como los conjuntos arqueológicos y arquitectónicos importantes como: Templo de Nuñoa, Sitio Arqueológico de Mauka Llagta, caminos Inca, fuentes de agua termominerales de Qoñi uno y Pasanoccollo, y sus tradicionales fiestas costumbristas.

### **Antecedentes históricos**

El proceso de desarrollo de la ciudad de Nuñoa en cuanto a su configuración como aldea, pueblo y ciudad, así como su desarrollo social, económico, político y religioso ha sido lento

En las épocas Pre Inca e Inca Nuñoa fue asiento de la cultura Tiahuanaco, cuyo vestigio se encuentra la ciudadela de Mauka Llagta, el hijo del Inca Tupaq Yupanqui conquista esta zona habitada por numerosos ayllus, logrando la formación de un núcleo poblacional para la producción agropecuaria, en las pampas de Unamanga, Quenachamaca, Nuñoa, Orcorara, Kitampari, Nasapalla, etc. (Cronista Padre Bemabé Cobo).

En la época colonial Nuñoa fue la base de una encomienda que fue asignada al conquistador Don Gonzalo de los Nidos, en el siglo XVII al haberse constituido

en la zona un gran cacicazgo, éste es reconocido por los españoles, nombrándose como Cacique de Nuñoa a Don Diego Tapara, posteriormente su descendiente el noble Cacique Huamán Tapara se revela contra los españoles un año después del ajusticiamiento de Tupaq Amaru II. Consta en las partes de guerra que obran en el archivo de las Indias de Sevilla España, que Huamán Tapara, en la primera acción de armas de una caballería netamente peruana derrotó a las fuerzas realistas en la batalla de Nuñoa el 06 de mayo de 1782 al pie del peñón de Ccacsille.

El 12 de octubre de cada año se festeja su aniversario el distrito de Nuñoa, provincia de Melgar, Región Puno, en cumplimiento a la orden del Libertador Simón Bolívar de crear la primera demarcación política del Perú y en base a un antiguo cacicazgo, se crea el año 1825 el distrito republicano de Nuñoa.

En la época republicana, Nuñoa perteneció a la provincia de Lampa y luego a partir del 25 de octubre de 1901 a la recién creada provincia de Ayaviri, hoy Provincia de Melgar.

### **Del Puente de Nuñoa**

La construcción del Puente de Nuñoa data del año 1898, que se terminó de construir el 28 de julio, tal como aparece en el grabado en piedra en una de las aletas del puente.

La construcción seguramente haya sido para la consolidación del eje vial importante de Santa Rosa - Nuñoa - Macusani. Su uso trascendió durante la época republicana y hasta la actualidad, posteriormente fue refaccionada sin ningún criterio técnico restaurativo, alterando su originalidad adicionando las barandas laterales de concreto, así mismo los emboquillados con cemento en los muros laterales y en el intradós de las bóvedas, que obviamente contribuye al proceso de deterioro.

### **Análisis arquitectónico**

El Histórico Puente de Nuñoa es una obra vial que sirvió para cruzar el caudaloso río Nuñoa siendo parte integrante de la red del camino Santa Rosa — Nuñoa — Macusani.

El puente fue construido con tecnología española de influencia árabe, similar al puente colonial de Combapeta (Cusco).

El puente de topología colonial consta de cuatro arcos de medio punto apoyados en dos estribos externos y tres pilares centrales adicionado en la parte de aguas arriba los elementos a manera de rompeolas.

La planta de distribución longitudinal con plataforma de un ancho de 3.30 metros con una longitud de 39.90 metros lineales, la textura del piso ha sido alterado

con la presencia de concreto en mal estado de conservación, igualmente las barandas laterales han sido alteradas con la adición de elementos de concreto a manera de pasamanos, la baranda original se observa según la evidencia existente en una de las aletas del puente.

Los cuatro arcos de medio punto están definidos con radio de 3.62 metros exactamente proporcionados y compartidos. Las dovelas están armadas según la trayectoria del arco de medio punto, y en la altura de la clave del arco se ubican las gárgolas que tenía la función de evacuación de aguas pluviales.

Por ambas márgenes del río tiene una rampa de acceso con tratamiento de piso en base al canto rodado finamente colocadas, según testimonio de los pobladores notables en el piso había figuras de un jinete con su caballo.

El material utilizado es la piedra de color rojizo, que tiene la propiedad de fácil corrosión por acción de los fenómenos de la naturaleza y la acción del hombre. A continuación, en la figura 5 y figura 6, se puede observar el puente en su estado actual y real.

**Figura 5**

*Vistas laterales del puente colonial de Nuñoa.*



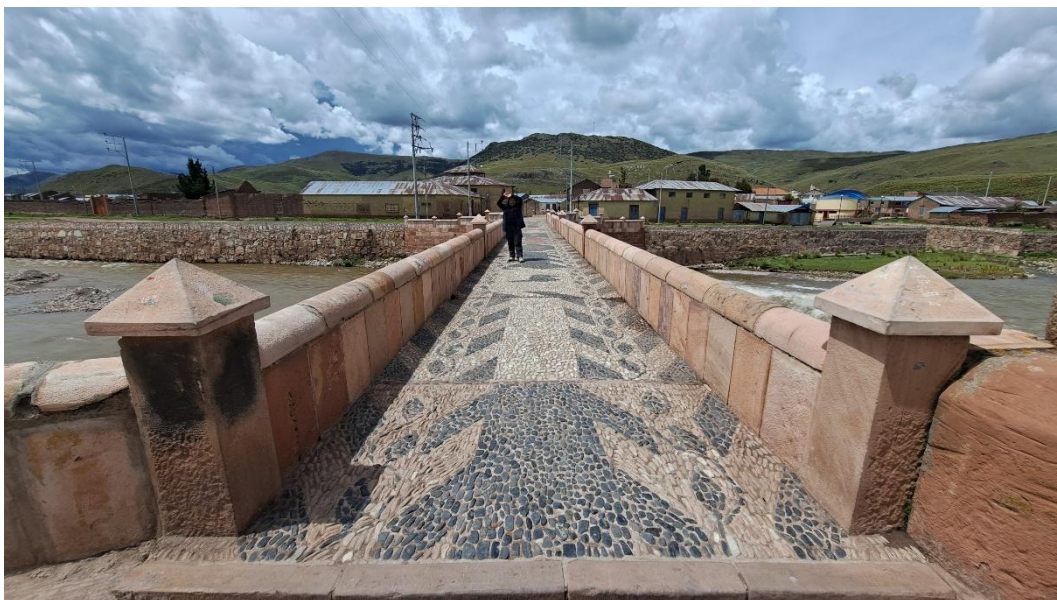
*Nota:* Vistas laterales izquierda y derecha del puente de piedra de mampostería, donde se aprecia su sistema estructural y estado general de conservación. La fotografía fue tomada el 13 de febrero de 2026 y se ubica en el centro de la ciudad, en un entorno urbano con tránsito vehicular y peatonal.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 6**

*Vista frontal y posterior del puente colonial de Nuñoa.*



*Nota:* Vistas frontal y posterior del puente de piedra de mampostería, la fotografía fue tomada el 13 de febrero de 2026. Fuente: Elaboración propia.

### **Intervenciones anteriores**

Se evidencia la añadidura de la baranda de concreto armado, que en algún momento ha sido construido, posiblemente por la propia municipalidad, no existen registros de lo mencionado.

Sin embargo, en el año 2008, se tiene registro que se realizó un Expediente Técnico del Proyecto: “Puesta en Valor del Puente Nuñoa”, siendo alcalde el Sr. Atilio Rodo Huamán Tapara, que posteriormente se ejecutó la intervención, que se mantiene hasta el día de hoy.

### **Calificación del estado actual de arquitectura**

De acuerdo con los registros y evaluaciones técnicas disponibles, el Puente Colonial de Nuñoa presentaba, antes de la intervención realizada en el año 2008, un estado de conservación clasificado entre regular y deficiente en determinados sectores, situación asociada principalmente al envejecimiento natural de la estructura, a la falta de mantenimiento adecuado y a intervenciones constructivas incompatibles con el sistema original de mampostería de piedra.

Uno de los principales problemas identificados se encontraba en el piso de la plataforma del puente, el cual carecía de un sistema adecuado de impermeabilización, esta condición favorecía la infiltración de humedad hacia los

elementos estructurales, generando procesos de deterioro progresivo en la mampostería y en los materiales de unión; dicho problema se veía agravado por la presencia de tránsito vehicular, el cual inducía vibraciones dinámicas en la estructura al momento del paso de los vehículos, incrementando las solicitaciones sobre el sistema estructural y contribuyendo potencialmente al desarrollo de fisuras y grietas en los elementos portantes.

Asimismo, se observaba que las barandas laterales construidas en concreto no ofrecían condiciones adecuadas de seguridad ni compatibilidad estructural con el puente original, evidenciando un notable estado de deterioro y una ejecución constructiva deficiente, estas intervenciones alteraban la configuración arquitectónica del puente e introducían materiales con comportamiento mecánico diferente al de la mampostería histórica.

En cuanto a los elementos de acceso y contención, las aletas y accesos ubicados en ambos márgenes del puente presentaban un avanzado estado de deterioro, evidenciando pérdida de material, fisuración y debilitamiento estructural en algunos sectores, lo que representaba un riesgo potencial para la estabilidad funcional de la infraestructura.

Por otra parte, los muros laterales y el intradós de las bóvedas presentaban emboquillados realizados con morteros a base de cemento, material que resulta incompatible con los sistemas tradicionales de mampostería de piedra; este tipo de

mortero tiende a generar rigidez excesiva y retención de humedad, lo que favorece procesos de degradación en los elementos líticos que forman parte del sistema estructural del puente.

Cabe destacar que, antes de la intervención del año 2008, el puente soportaba tránsito vehicular y peatonal de manera continua, debido a que constituía uno de los principales accesos hacia uno de los sectores del poblado de Nuñoa y esta condición incrementaba significativamente las cargas actuantes sobre la estructura, acelerando los procesos de deterioro asociados al uso y a las condiciones ambientales.

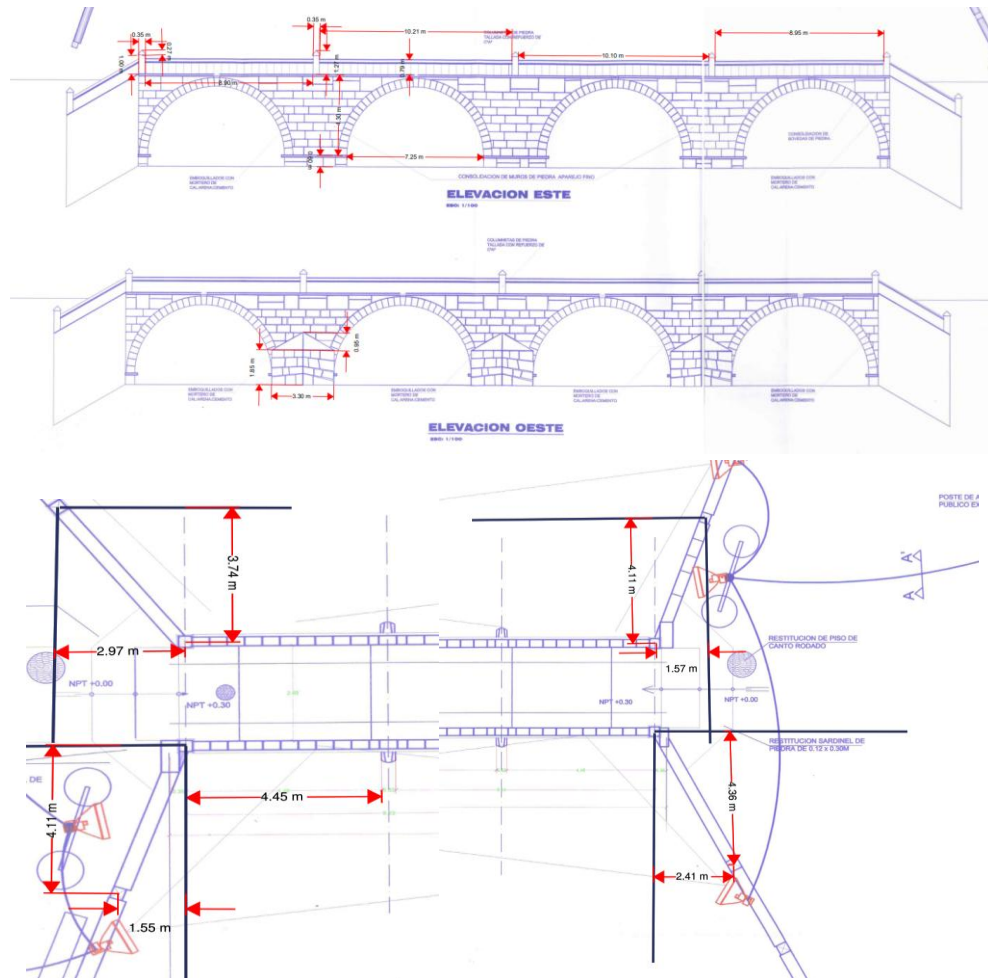
Posteriormente, en el año 2008 se realizaron trabajos de intervención, mantenimiento y puesta en valor del puente, orientados principalmente a mejorar su estado de conservación y su integración dentro del circuito turístico local.

Como resultado de estas acciones, en la actualidad el puente se encuentra destinado exclusivamente al tránsito peatonal, restringiéndose el tráfico vehicular con el objetivo de reducir las solicitaciones estructurales y preservar la integridad de esta infraestructura histórica.

#### 4.1.2. Modelamiento estructural del Puente Colonial de Nuñoa

**Figura 7**

*Geometría del modelo estructural.*



*Nota:* Extraído de los archivos originales de la Municipalidad Distrital de Nuñoa.

La figura 7 muestra la geometría del modelo estructural del Puente Colonial de Nuñoa, obtenida a partir de los archivos originales proporcionados por la Municipalidad Distrital de Nuñoa, esta información fue utilizada como base para la idealización geométrica del puente en el proceso de modelamiento estructural.

Las dimensiones principales fueron verificadas en campo mediante mediciones directas en la estructura real, lo que permitió validar la coherencia entre el plano y la condición existente, asimismo, se determinaron las medidas características de los elementos estructurales con el fin de representar con mayor precisión la configuración del puente en el software de análisis, asegurando así una adecuada aproximación del comportamiento estructural del modelo.

### Figura 8

*Vista aérea del Puente Colonial de Nuñoa.*



*Nota:* Extraído de Google Maps.

La figura 8 presenta una vista aérea del Puente Colonial de Nuñoa obtenida de Google Maps, la cual permite identificar su emplazamiento dentro del entorno

urbano y partir de esta perspectiva, se observa la alineación del puente respecto al cauce que cruza, así como la configuración general de accesos y conexiones en ambos extremos.

**Tabla 3**

*Propiedades geométricas del puente.*

|                                 | <b>Longitud</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Sub-total</b> |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| <b>Extremos</b>                 | 0.49m           | 2               | 0.98m            |
| <b>Circunferencias</b>          | 7.24m           | 4               | 28.96m           |
| <b>Distancia entre círculos</b> | 3.32m           | 3               | 9.96m            |
| <b>Total</b>                    |                 |                 | <b>39.9m</b>     |

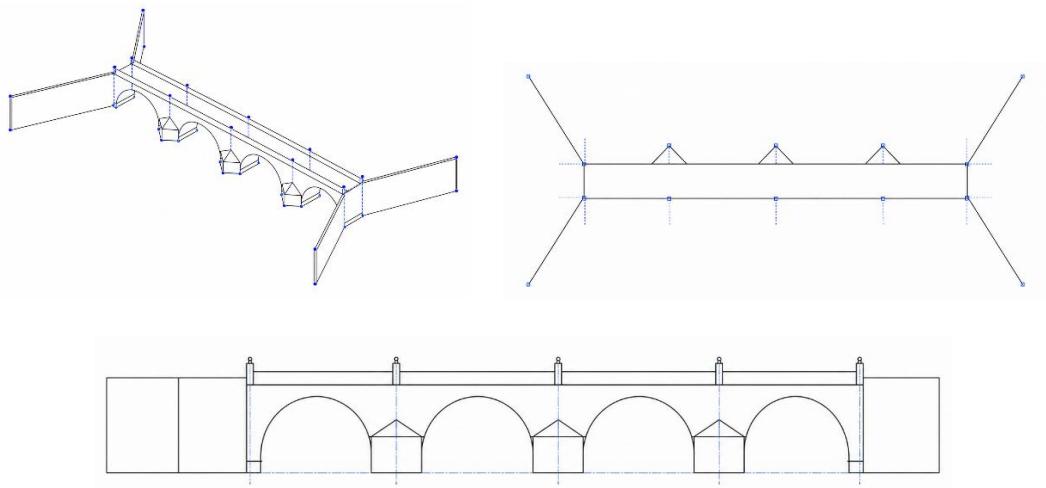
*Nota:* Datos obtenidos en campo.

La tabla 3 presenta las propiedades geométricas principales del Puente Colonial de Nuñoa, obtenidas a partir de mediciones en campo. Se observa que la longitud total del elemento estructural es de 39.9 m, resultado de la suma de los tramos extremos, las circunferencias y las distancias entre estas, la distribución geométrica evidencia una configuración repetitiva en los elementos circulares, lo que sugiere una modulación regular en la estructura del puente, y esta información permite establecer con mayor precisión la idealización geométrica utilizada en el modelamiento estructural, como muestra la figura 9.



**Figura 9**

*Modelado en 3D del Puente Colonial de Nuñoa.*



*Nota:* Arriba a la izquierda, vista isométrica. Arriba a la derecha, vista superior. Abajo, vista frontal.

#### **4.1.3. Propiedades mecánicas de los materiales**

Se presentan las características mecánicas y parámetros constitutivos del material considerado en el modelo estructural, el cual corresponde a mampostería de piedra, propia de estructuras de carácter patrimonial, éstos valores han sido adoptados a partir de información brindada por Briceño et al. (2019), correspondiente a una investigación reconocida en el área de estructuras históricas, dada la imposibilidad de realizar ensayos in situ debido a las restricciones de intervención en bienes de valor cultural.

Cabe señalar que, en el contexto nacional, los estudios relacionados con la mampostería de piedra son limitados, siendo aún reducida la producción científica



en el Perú sobre este tipo de material estructural en edificaciones patrimoniales. Los parámetros empleados permiten representar el comportamiento del sistema estructural del puente bajo condiciones de análisis lineales y no lineales, considerando distintos estados de esfuerzo; asimismo, los valores utilizados se contrastan con la información presentada en la Tabla 4, asegurando coherencia con la tipología estructural analizada.

**Tabla 4**

*Propiedades del material, datos de tracción y compresión.*

| <b>Propiedades lineales de la mampostería de piedra</b> |                            |
|---------------------------------------------------------|----------------------------|
| Módulo de Young, $E$                                    | $800.00 \text{ N/mm}^2$    |
| Coefficiente de Poisson                                 | 0.3                        |
| Densidad de Masa                                        | $2.2e - 09 \text{ T/mm}^3$ |
| <b>Comportamiento a tracción</b>                        |                            |
| Curva de Tensión                                        | Exponencial                |
| Resistencia a tracción                                  | $0.2 \text{ N/mm}^2$       |
| Modo I Energía de fractura por tracción                 | $0.01 \text{ N/mm}^2$      |
| Grieta de ancho de banda                                | Govindjee                  |
| Resistencia residual de tracción                        | $0.04 \text{ N/mm}^2$      |
| <b>Comportamiento a compresión</b>                      |                            |
| Curva de Compresión                                     | Parabólico                 |
| Resistencia a Compresión                                | $2 \text{ N/mm}^2$         |
| Energía de fractura por compresión                      | $3.2 \text{ N/mm}^2$       |
| Resistencia residual de tracción                        | $0.4 \text{ N/mm}^2$       |

#### 4.1.4. Condiciones de borde

En caso de las condiciones de borde definidas para el modelo estructural del Puente Colonial de Nuñoa, las cuales representan las restricciones cinemáticas impuestas en los apoyos, fueron definidas de la siguiente forma:

- En la base de la estructura se consideró una condición de empotramiento total, aplicando traslaciones fijas en T1, T2 y T3, así como rotaciones fijas en R1, R2 y R3, lo que restringe completamente los desplazamientos y giros.
- Por otro lado, en los laterales en contacto con el suelo se modelaron restricciones parciales, aplicando traslaciones fijas en T1 y T2, mientras que no se restringieron las rotaciones, permitiendo así una mayor representación de la interacción con el suelo en dichas zonas.

La base del modelo se ha considerado como empotramiento total, debido a que no se ha desarrollado un análisis de interacción suelo-estructura, adoptándose esta idealización para representar el comportamiento global del puente de manera conservadora.

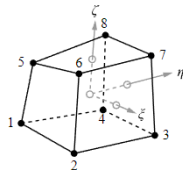
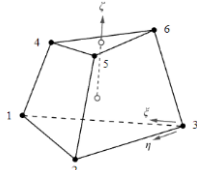
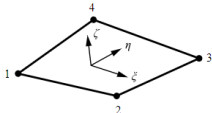
Asimismo, al tratarse de una estructura patrimonial, no es posible realizar intervenciones invasivas como calicatas para la caracterización del suelo de fundación, lo que limita la obtención de información geotécnica directa.

#### 4.1.5. Mallado del modelo de elementos finitos

En la tabla 5, se presentan los tipos de elementos finitos utilizados en el modelado y análisis estructural, cada uno de ellos posee una geometría, formulación y número de nodos específicos que determinan su comportamiento y aplicación dentro del dominio analizado.

**Tabla 5**

*Descripción de los elementos finitos utilizados.*

| Tipo                                                                         | Imagen                                                                              | Descripción                                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>HX24L</p> <p>Elemento hexaédrico<br/>(brick)</p> <p>8 nodos</p>           |  | <p>El elemento HX24L es un elemento sólido isoparamétrico de ocho nodos, se basa en la interpolación lineal y la integración gaussiana.</p>                                                                                               |
| <p>TP18L</p> <p>Elemento tipo cuña<br/>(wedge)</p> <p>6 nodos</p>            |  | <p>El elemento TP18L es un elemento sólido isoparamétrico de cuña de seis nodos, se basa en la interpolación lineal de área en el dominio triangular y en una interpolación isoparamétrica lineal en la dirección <math>\zeta</math>.</p> |
| <p>Q20SH</p> <p>Elemento cuadrilátero<br/>(quadrilateral)</p> <p>4 nodos</p> |  | <p>El elemento Q20SH es un elemento de lámina curva isoparamétrica cuadrilátero de cuatro nodos.</p>                                                                                                                                      |

#### 4.1.6. Análisis modal

El análisis modal permitió determinar los periodos fundamentales de vibración. Se analizaron con 10 modos de vibración.

**Tabla 6**

*Periodos fundamentales.*

| <b>Modo</b> | <b>Frecuencia</b> | <b>Periodo</b> |
|-------------|-------------------|----------------|
| Modo 1      | 8.128 Hz          | 0.123 s.       |
| Modo 2      | 8.778 Hz          | 0.114 s.       |
| Modo 3      | 10.423 Hz         | 0.096 s.       |
| Modo 4      | 10.524 Hz         | 0.095 s.       |
| Modo 5      | 11.901 Hz         | 0.084 s.       |
| Modo 6      | 14.077 Hz         | 0.071 s.       |
| Modo 7      | 14.742 Hz         | 0.068 s.       |
| Modo 8      | 15.887 Hz         | 0.063 s.       |
| Modo 9      | 16.016 Hz         | 0.062 s.       |
| Modo 10     | 16.673 Hz         | 0.060 s.       |

*Nota:* Elaboración propia.

El análisis modal realizado permitió identificar los 10 primeros modos de vibración del Puente Colonial de Nuñoa, obteniéndose frecuencias comprendidas entre 8.128 Hz y 16.673 Hz, con periodos asociados entre 0.123 s y 0.060 s.

El primer modo de vibración presentó una frecuencia de 8.128 Hz y un periodo fundamental de 0.123 s, siendo este el modo más representativo del

comportamiento dinámico global de la estructura, ya que concentra la mayor participación modal en la respuesta estructural frente a acciones dinámicas.

Por lo que, los resultados muestran que el puente posee periodos relativamente bajos y frecuencias elevadas, lo cual indica que la estructura presenta una alta rigidez global, característica típica de puentes de mampostería de piedra con geometrías compactas y elementos estructurales masivos, asimismo, conforme aumenta el número de modos de vibración, se observa una disminución progresiva de los periodos y un incremento de las frecuencias, evidenciando modos superiores asociados a deformaciones más localizadas y de menor participación estructural.

Desde el punto de vista estructural, estos resultados permiten inferir que el puente tiene una respuesta dinámica relativamente rígida frente a solicitaciones sísmicas moderadas; sin embargo, debido a la naturaleza frágil de la mampostería, la elevada rigidez no necesariamente implica un mejor desempeño sísmico, ya que la estructura puede desarrollar concentraciones de esfuerzos y agrietamientos en zonas críticas ante deformaciones reducidas.

### **Carga viva**

Según el Manual de Puentes (MTC, 2016), los puentes para uso peatonal deberán ser diseñados para una carga viva uniformemente repartida de 90 psf., esto en la plataforma del puente.

$$1psf = 4.88243 \frac{Kg}{m^2}$$

$$90psf = 439.42 \frac{Kg}{m^2} \cong 440 \frac{Kg}{m^2}$$

#### 4.1.7. Análisis estático no lineal – Pushover

El análisis estructural permite evaluar el comportamiento de una estructura mediante su representación matemática, considerando su geometría, propiedades de los materiales y cargas aplicadas, por lo que los resultados ayudan a determinar la seguridad estructural, las causas del daño y las posibles estrategias de reforzamiento (Stavroulaki et al., 2024). Existen dos enfoques principales de análisis: lineal y no lineal. El análisis lineal asume un comportamiento elástico de la estructura durante un sismo, sin considerar la redistribución de fuerzas ni los mecanismos de falla (Pettorruso & Quaglini, 2024), en cambio, el Análisis no Lineal, incorpora el daño progresivo, las deformaciones plásticas y la disipación de energía, ofreciendo una descripción más realista del comportamiento sísmico. Los métodos más empleados son el Análisis Estático No Lineal (Pushover) y el Análisis Dinámico No Lineal, siendo el primero más práctico por su menor demanda computacional (Marikannan, 2024; Ruggieri & Uva, 2024).

El Análisis Pushover evalúa la capacidad lateral de la estructura aplicando cargas laterales crecientes que simulan las fuerzas de inercia sísmicas (Kuria & Kegyes, 2023), este método permite identificar la secuencia de grietas, formación

de rótulas plásticas y el colapso estructural, obteniendo la curva de capacidad o Curva Pushover, que relaciona desplazamiento y fuerza; aunque el enfoque tradicional supone que la respuesta está dominada por el modo fundamental de vibración, su precisión disminuye cuando intervienen modos superiores o cuando el daño altera las propiedades dinámicas (Lherminier et al., 2024).

#### 4.1.8. Determinación de la curva de capacidad del puente

Para la determinación de la curva de capacidad, se necesita datos de los desplazamientos y datos de la cortante en la dirección X y Y.

**Tabla 7**

*Datos para la curva de capacidad en dirección X.*

| <b>Desplazamiento<br/>(mm)</b> | <b>Cortante basal<br/>(tonf)</b> |
|--------------------------------|----------------------------------|
| 0.207162                       | 299.1620084                      |
| 0.493723                       | 492.6839545                      |
| 0.73041                        | 588.8137584                      |
| 0.96855                        | 667.8898169                      |
| 1.19526                        | 733.400754                       |
| 1.43199                        | 775.99807                        |
| 1.69113                        | 803.4545675                      |
| 1.94716                        | 835.0169977                      |
| 2.22507                        | 856.086968                       |
| 2.52083                        | 878.5970046                      |
| 2.87326                        | 893.0189688                      |
| <b>3.31434</b>                 | <b>903.0443597</b>               |
| 12.607                         | 853.0863091                      |
| 20.4145                        | 808.7475974                      |
| 28.7736                        | 779.5149416                      |
| 37.1513                        | 769.3499902                      |
| 43.6335                        | 788.4258194                      |

---

|         |             |
|---------|-------------|
| 50.7801 | 788.9098114 |
| 61.2061 | 742.4232216 |
| 68.1591 | 752.4444873 |
| 75.0548 | 761.2967311 |
| 85.6931 | 722.8639774 |
| 92.219  | 729.5011652 |
| 100.81  | 724.3805917 |
| 107.999 | 732.1658356 |
| 116.446 | 730.9892385 |
| 123.008 | 727.9025749 |
| 128.987 | 710.6212732 |
| 133.553 | 700.6264408 |
| 137.873 | 690.969002  |
| 141.178 | 690.3967729 |
| 143.317 | 626.994119  |
| 147.362 | 653.8852404 |
| 154.27  | 643.3923769 |
| 159.776 | 658.7629662 |
| 167.543 | 627.3094048 |
| 174.777 | 632.7318657 |

---

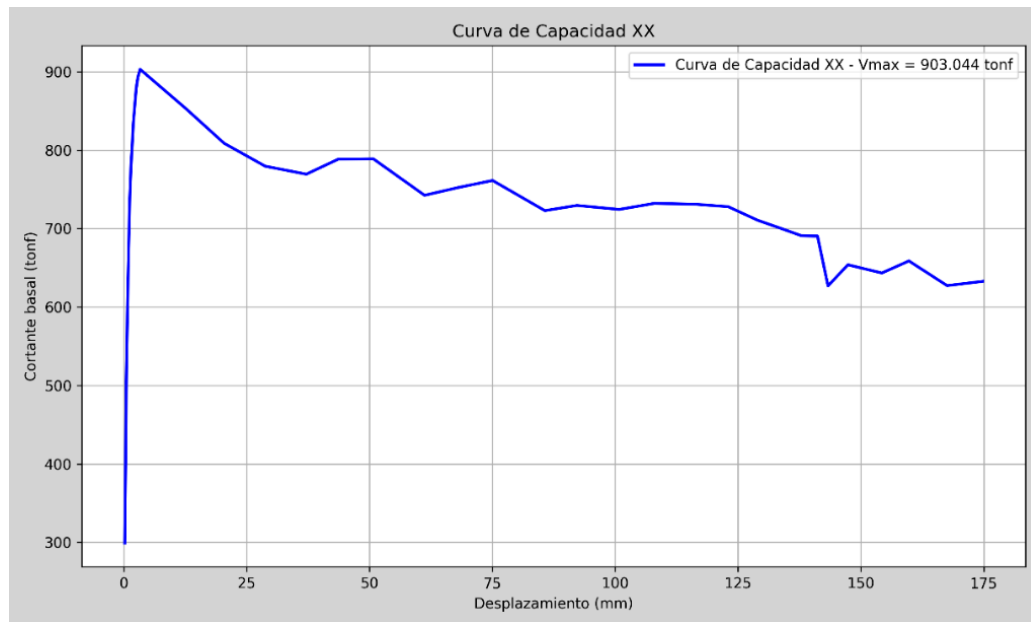
*Nota:* Procesada en MS Excel. Elaboración Propia.

La tabla 7 presenta los datos correspondientes a la curva de capacidad del Puente Colonial de Nuñoa en la dirección X, relacionando el desplazamiento lateral con el cortante basal. Para un desplazamiento de 3.31 mm se obtiene un cortante basal de 903.04 tonf, lo cual representa la respuesta inicial del sistema estructural ante cargas laterales.



**Figura 10**

*Curva de capacidad resultante en la dirección X.*



*Nota:* Generado mediante Python. Ver código en la sección APÉNDICE.

En la dirección XX, la respuesta es similar a la de un sistema tipo pórtico, donde los pilares y el tablero trabajan de manera conjunta, generando una mayor rigidez inicial pero también una degradación más pronunciada de la resistencia una vez alcanzada la capacidad máxima, por lo que este comportamiento conlleva a una respuesta más frágil, debido a que el sistema tiende a agrietarse y perder capacidad en etapas tempranas del desplazamiento, en especial en el tablero.

**Tabla 8**

*Datos para la curva de capacidad en dirección Y.*

| <b>Desplazamiento<br/>(mm)</b> | <b>Cortante basal<br/>(tonf)</b> |
|--------------------------------|----------------------------------|
| 2.64604                        | 264.058796                       |

|                |                    |
|----------------|--------------------|
| 5.3185         | 362.0716056        |
| 8.12055        | 376.1751631        |
| 10.9577        | 405.3162695        |
| 13.7738        | 439.075736         |
| 16.6028        | 459.1869791        |
| 19.4237        | 469.4629121        |
| 22.2433        | 477.535168         |
| 25.0668        | 481.4722906        |
| 27.9127        | 480.6524616        |
| 30.7805        | 477.8315473        |
| 33.6414        | 479.2615045        |
| <b>36.6156</b> | <b>487.1339069</b> |
| 40.6607        | 474.5068304        |
| 43.7395        | 476.9556089        |
| 46.7016        | 475.9196553        |
| 49.6369        | 473.6652384        |
| 51.8262        | 467.6730663        |
| 54.7101        | 466.9141724        |
| 57.5095        | 465.6171622        |
| 60.3291        | 458.5243515        |
| 62.8027        | 459.6255068        |
| 65.6423        | 454.0124967        |
| 68.4883        | 448.6325154        |
| 72.7763        | 417.9415973        |
| 78.5126        | 418.0081868        |
| 84.2211        | 413.770434         |
| 89.9498        | 406.8571749        |
| 95.775         | 399.6242523        |
| 101.521        | 399.9323563        |
| 107.269        | 399.6898914        |
| 112.971        | 398.9702722        |
| 118.604        | 396.3165193        |
| 124.176        | 389.7557356        |
| 128.265        | 296.9207018        |

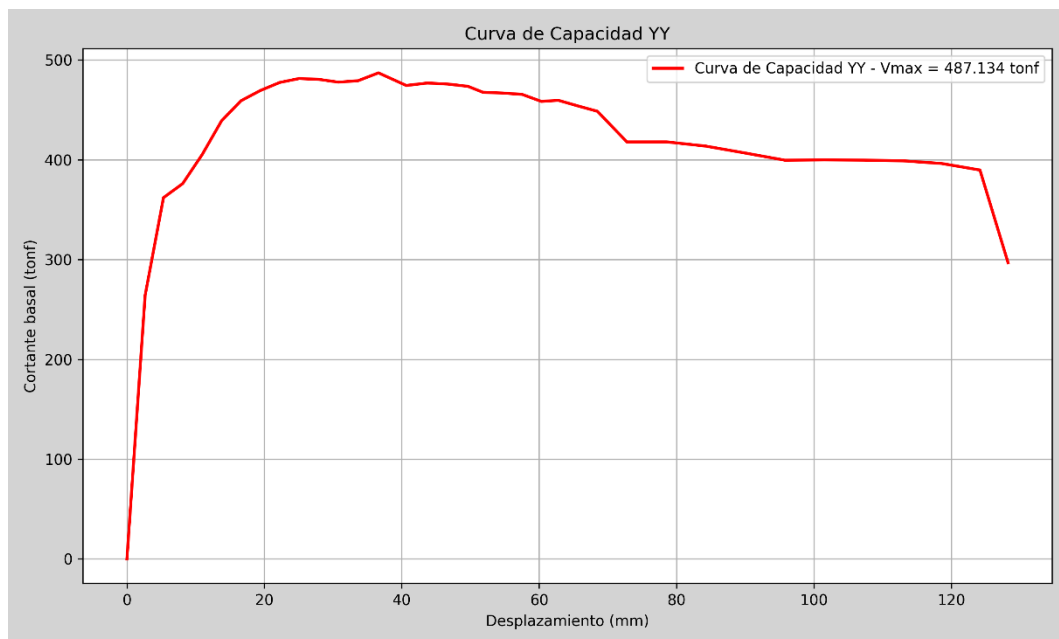
*Nota:* Procesada en MS Excel. Elaboración Propia.

La tabla 8 presenta los datos correspondientes a la curva de capacidad del Puente Colonial de Nuñoa en la dirección Y, relacionando el desplazamiento lateral con el cortante basal. Para un desplazamiento de 36.62 mm se obtiene un cortante

basal de 487.13 tonf, lo cual representa la respuesta inicial del sistema estructural ante cargas laterales.

**Figura 11**

*Curva de capacidad resultante en la dirección Y.*



*Nota:* Generado mediante Python. Ver código en la sección APÉNDICE.

En la dirección YY, los pilares trabajan de manera más independiente, asemejándose a elementos en voladizo, por lo que esta condición permite una mayor capacidad de deformación antes de la degradación significativa de la resistencia, evidenciando un comportamiento más dúctil. En esta dirección, la curva presenta una meseta más prolongada, lo que indica una mayor capacidad de disipación de energía y una degradación más gradual.

En conjunto tanto en X como en Y, se concluye que la estructura presenta una respuesta distinta, siendo más rígida pero más frágil en la dirección XX, y más flexible, pero con mayor ductilidad en la dirección YY, lo cual tiene implicancias importantes en la identificación de posibles mecanismos de falla predominantes.

#### **4.1.9. Evaluación del nivel de desempeño estructural**

##### **Cálculo del espectro**

El factor “Z” es un parámetro fundamental para calcular el espectro de diseño sísmico, ya que influye directamente en la estimación de las fuerzas sísmicas que debe resistir una estructura.

La Tabla 9 presenta los valores del factor de zona sísmica “Z” establecidos por la Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente. Este factor representa el nivel de peligrosidad sísmica asignado a cada zona del territorio, expresado como una fracción de la aceleración de la gravedad. Esto significa que, a medida que aumenta el número de zona, también aumenta la exigencia sísmica que debe considerarse en el diseño estructural.

En relación con el área de estudio, el distrito de Nuñoa se encuentra ubicado en la Zona Sísmica 2, por lo que le corresponde un factor de zona  $Z = 0.25$ , esto indica que Nuñoa presenta una peligrosidad sísmica moderada en comparación con

las zonas de mayor amenaza, como la Zona 3 y la Zona 4. Por tanto, para el diseño estructural de edificaciones en este distrito, se debe considerar dicho valor como parte del cálculo del espectro sísmico y de las fuerzas sísmicas de diseño.

**Tabla 9**

*Factores de Zona “Z”.*

| ZONA | Z    |
|------|------|
| 4    | 0.45 |
| 3    | 0.35 |
| 2    | 0.25 |
| 1    | 0.10 |

*Nota:* Extraído de la Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente.

De acuerdo con la columna estratigráfica del cuadrángulo de Nuñoa, los depósitos superficiales corresponden principalmente a depósitos aluviales, glaciofluviales y morrénicos compuestos por gravas, arenas y limos. Estos materiales corresponden a suelos granulares medianamente densos (López, 1996).

Según la clasificación de perfiles de suelo de la Norma Técnica E.030 del Reglamento Nacional de Edificaciones, los depósitos de arena densa y grava arenosa con valores de SPT intermedios corresponden al perfil de suelo tipo S2 (suelos intermedios) (MVCS, 2018).

Por lo tanto, en ausencia de un estudio geotécnico específico del sitio, es razonable adoptar un perfil de suelo S2 para el análisis sísmico modal espectral, como se muestra en la Tabla 10.

**Tabla 10**

*Factores de Suelo “S”.*

| ZONA/SUELO | S0   | S1   | S2   | S3   |
|------------|------|------|------|------|
| Z4         | 0.80 | 1.00 | 1.05 | 1.10 |
| Z3         | 0.80 | 1.00 | 1.15 | 1.20 |
| Z2         | 0.80 | 1.00 | 1.20 | 1.40 |
| Z1         | 0.80 | 1.00 | 1.60 | 2.00 |

*Nota:* Extraído de la Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente.

**Tabla 11**

*Periodos “Tp” y “TL”.*

|        | Perfil del Suelo |     |     |     |
|--------|------------------|-----|-----|-----|
|        | S0               | S1  | S2  | S3  |
| Tp (s) | 0.3              | 0.4 | 0.6 | 1.0 |
| TL (s) | 3.0              | 2.5 | 2.0 | 1.6 |

*Nota:* Extraído de la Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente.

Para el cálculo del factor de Amplificación Sísmica (C), se calcula mediante las siguientes fórmulas:

$$T < T_p \quad C = 2.5$$

$$T_p < T < T_L \quad C = 2.5 \left( \frac{T_p}{T} \right)$$

$$T > T_L \quad C = 2.5 \left( \frac{T_P \cdot T_L}{T^2} \right)$$

Teniendo los datos anteriores, realizamos las operaciones en una hoja de cálculo (Tabla 12) para representar el espectro (Figura 12).

**Tabla 12**

*Datos para cálculo del espectro.*

| T      | Sa(g)  | C      |
|--------|--------|--------|
| 0.0000 | 0.7500 | 2.5000 |
| 0.1000 | 0.7500 | 2.5000 |
| 0.2000 | 0.7500 | 2.5000 |
| 0.3000 | 0.7500 | 2.5000 |
| 0.4000 | 0.7500 | 2.5000 |
| 0.5000 | 0.7500 | 2.5000 |
| 0.6000 | 0.7500 | 2.5000 |
| 0.7000 | 0.6429 | 2.1429 |
| 0.8000 | 0.5625 | 1.8750 |
| 0.9000 | 0.5000 | 1.6667 |
| 1.0000 | 0.4500 | 1.5000 |
| 1.1000 | 0.4091 | 1.3636 |
| 1.2000 | 0.3750 | 1.2500 |
| 1.3000 | 0.3462 | 1.1538 |
| 1.4000 | 0.3214 | 1.0714 |
| 1.5000 | 0.3000 | 1.0000 |
| 1.6000 | 0.2813 | 0.9375 |
| 1.7000 | 0.2647 | 0.8824 |
| 1.8000 | 0.2500 | 0.8333 |
| 1.9000 | 0.2368 | 0.7895 |

---

|        |        |        |
|--------|--------|--------|
| 2.0000 | 0.2250 | 0.7500 |
| 2.1000 | 0.2041 | 0.6803 |
| 2.2000 | 0.1860 | 0.6198 |
| 2.3000 | 0.1701 | 0.5671 |
| 2.4000 | 0.1563 | 0.5208 |
| 2.5000 | 0.1440 | 0.4800 |
| 2.6000 | 0.1331 | 0.4438 |
| 2.7000 | 0.1235 | 0.4115 |
| 2.8000 | 0.1148 | 0.3827 |
| 2.9000 | 0.1070 | 0.3567 |
| 3.0000 | 0.1000 | 0.3333 |
| 3.1000 | 0.0937 | 0.3122 |
| 3.2000 | 0.0879 | 0.2930 |
| 3.3000 | 0.0826 | 0.2755 |
| 3.4000 | 0.0779 | 0.2595 |
| 3.5000 | 0.0735 | 0.2449 |
| 3.6000 | 0.0694 | 0.2315 |
| 3.7000 | 0.0657 | 0.2191 |
| 3.8000 | 0.0623 | 0.2078 |
| 3.9000 | 0.0592 | 0.1972 |
| 4.0000 | 0.0563 | 0.1875 |

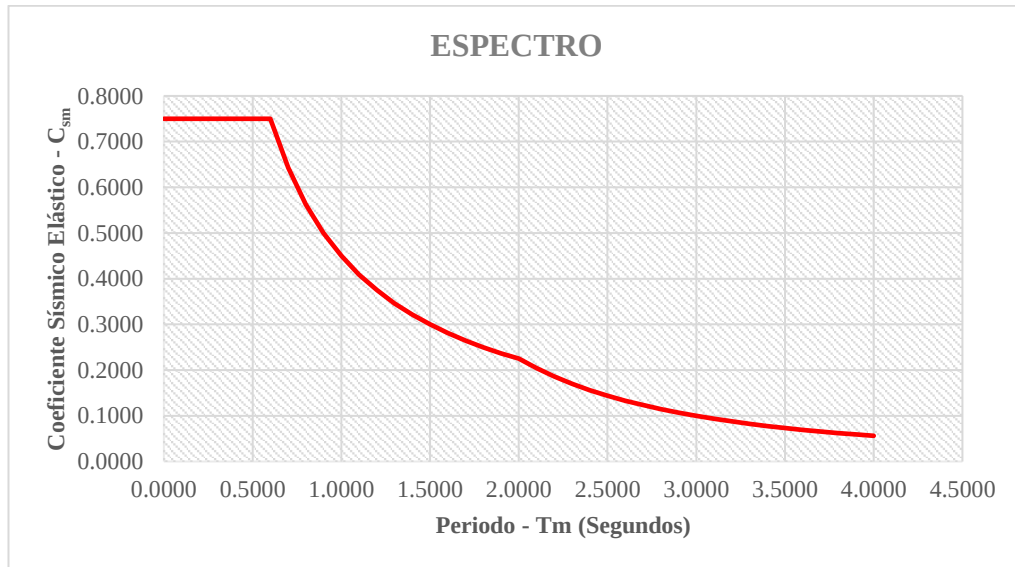
---

*Nota:* Elaboración propia.



**Figura 12**

*Espectro calculado del puente de Nuñoa.*



*Nota:* Generado mediante MS Excel. Elaboración propia.

### Punto de Desempeño

Asimismo, para calcular el punto de desempeño, se utilizará la norma ASCE/SEI 41-23 (2023), donde la fórmula para el desplazamiento límite es el siguiente:

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g$$

Donde:

$g$  es la aceleración de la gravedad;

$C_0$  es el factor de modificación que relaciona el desplazamiento espectral de un sistema equivalente de un grado de libertad (SDOF) con el desplazamiento real de la estructura, para un pilar es 1;

$C_1$  es el factor de modificación para relacionar los desplazamientos inelásticos máximos esperados con los desplazamientos calculados para la respuesta lineal-elástica.

$$C_1 = 1 + \frac{\mu_{strength} - 1}{aT_e^2}$$

Donde:

$a$  = es el factor de clase de sitio:

= 130 para sitio Clase A o B;

= 90 para sitio Clase C;

= 60 para sitio Clase D, E o F;

$T_e$  = Período fundamental efectivo en la dirección considerada, en segundos;

$\mu_{strength}$  = Relación entre la demanda de resistencia elástica y el coeficiente de resistencia a la fluencia.

$$\mu_{strength} = \frac{S_a}{V_y/W} \cdot C_m$$

Donde:

$S_a$  es la aceleración del espectro de respuesta en el período fundamental efectivo y la relación de amortiguamiento en la dirección considerada;

$V_y$  es la resistencia a la fluencia en la dirección considerada;

$W$  es el peso sísmico efectivo;

$C_m$  es el factor de masa efectivo, se considerará igual a 1,0 si el período fundamental,  $T$ , en la dirección de respuesta considerada es mayor que 1,0 s;

$C_2$  es el factor de modificación que representa el efecto de la forma de histéresis estrangulada, la degradación de la rigidez cíclica y el deterioro de la resistencia en la respuesta de desplazamiento máximo.

$$C_2 = 1 + \frac{1}{800} \left( \frac{\mu_{strength} - 1}{T_e} \right)^2$$

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}}$$

Donde:

$T_i$  es el período fundamental elástico (en segundos) en la dirección considerada;

$K_i$  es la rigidez lateral elástica en la dirección considerada;

$K_e$  es la rigidez lateral efectiva en la dirección considerada.

Reemplazando todas las fórmulas correspondientes, con los datos de la estructura en estudio, tenemos los resultados como se muestra en la tabla 13:

**Tabla 13**

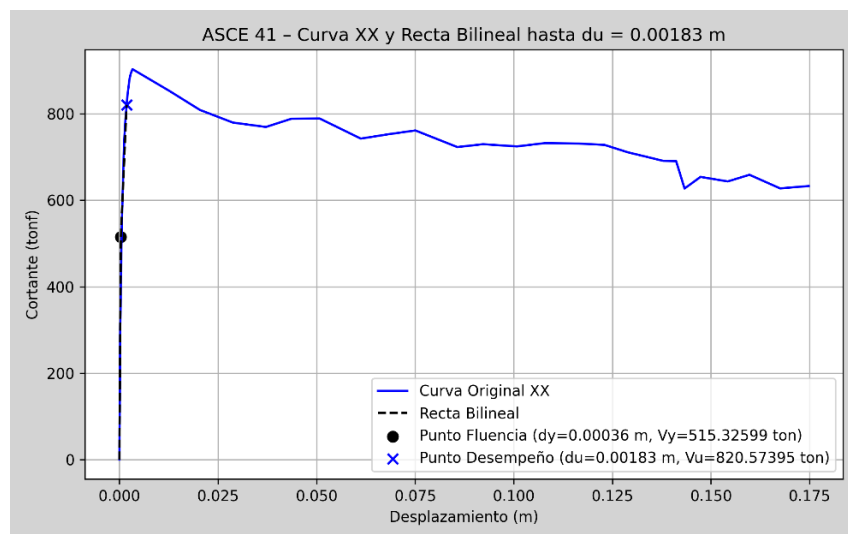
*Datos obtenidos para cálculo del punto de desempeño.*

| Dirección X    |            |                  |        |
|----------------|------------|------------------|--------|
| $C_0$          | 1.00       | $a$              | 90.00  |
| $C_1$          | 1.06       | $T_e$ (seg)      | 0.10   |
| $K_e$ (tonf/m) | 1444097.00 | $S_a$ (g)        | 0.75   |
| $K_i$ (tonf/m) | 1444097.00 | $V_y$ (tonf)     | 515.30 |
| $T_i$ (seg)    | 0.10       | $W$ (tonf)       | 840.20 |
| $C_2$          | 1.01       | $C_m$            | 1.00   |
| $\delta$ (cm)  | 0.18       | $\mu_{strength}$ | 1.22   |
| Dirección Y    |            |                  |        |
| $C_0$          | 1.00       | $a$              | 90.00  |
| $C_1$          | 1.39       | $T_e$ (seg)      | 0.12   |
| $K_e$ (tonf/m) | 99793.50   | $S_a$ (g)        | 0.75   |
| $K_i$ (tonf/m) | 99793.50   | $V_y$ (tonf)     | 262.58 |
| $T_i$ (seg)    | 0.12       | $W$ (tonf)       | 840.20 |
| $C_2$          | 1.16       | $C_m$            | 1.00   |
| $\delta$ (cm)  | 0.46       | $\mu_{strength}$ | 2.40   |

*Nota:* Cálculos obtenidos manualmente.

**Figura 13**

*Punto de desempeño calculado en la dirección X.*



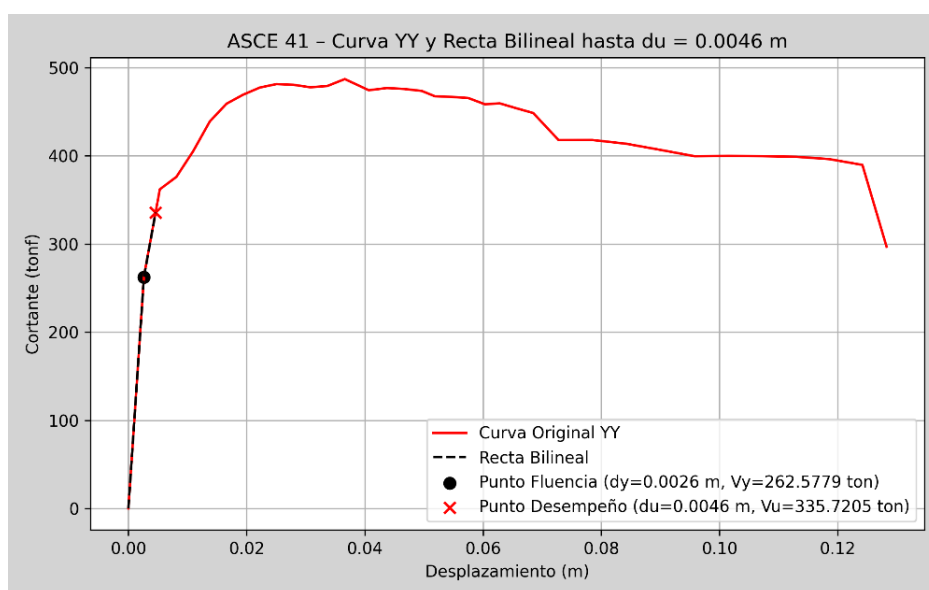
*Nota:* Generado mediante Python. Ver código en la sección APÉNDICE.

Del análisis de los puntos de desempeño obtenidos en ambas direcciones (XX y YY), se observa que los desplazamientos asociados son relativamente pequeños y se ubican muy cercanos al tramo inicial de la curva de capacidad, correspondiente a la pendiente elástica del sistema; esto indica que la estructura, bajo la demanda sísmica evaluada, no alcanza niveles significativos de no linealidad.

En la dirección XX, el punto de desempeño se presenta en un desplazamiento reducido ( $du \approx 1.83$  mm), manteniéndose dentro de una zona próxima al comportamiento elástico (Figura 13), mientras que en la dirección YY, aunque el desplazamiento es ligeramente mayor ( $du \approx 4.6$  mm), también permanece dentro de un rango bajo de deformaciones (Figura 14).

#### Figura 14

*Punto de desempeño calculado en la dirección Y.*



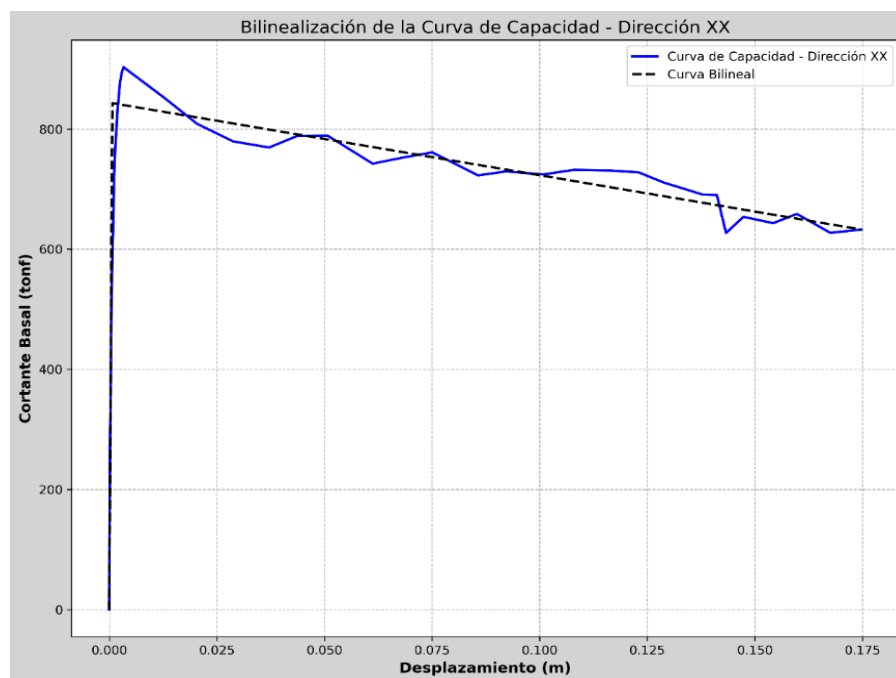
*Nota:* Generado mediante Python. Ver código en la sección APÉNDICE.

En consecuencia, el nivel de daño esperado en la estructura es muy bajo en ambas direcciones, ya que la respuesta se desarrolla principalmente dentro del rango elástico o con incursiones mínimas en el régimen inelástico; esto sugiere un adecuado desempeño sísmico del sistema estructural frente al escenario analizado, con una alta capacidad de mantener su integridad y funcionalidad sin presentar daños significativos.

#### 4.1.10. Bilinealización de la curva de capacidad

**Figura 15**

*Bilinealización de la curva de capacidad en la dirección X.*



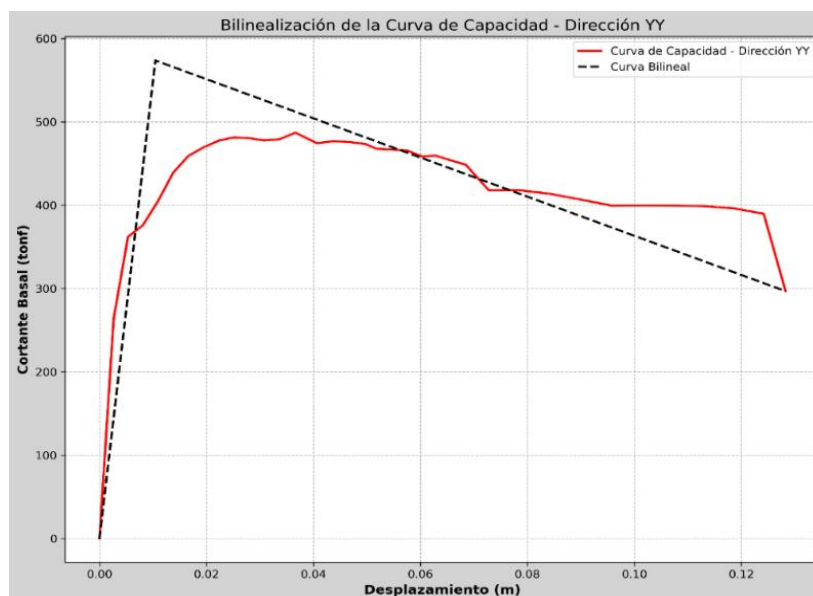
*Nota:* Generado mediante Python. Ver código en la sección APÉNDICE.

En la dirección X, la bilinealización de la curva de capacidad muestra que la estructura presenta una alta rigidez inicial, alcanzando rápidamente valores elevados de cortante basal con desplazamientos pequeños. La curva real llega a una resistencia de 903.04 tonf, para luego presentar una reducción progresiva de capacidad conforme aumenta el desplazamiento lateral, como se muestra en la Figura 15.

La curva bilineal permite idealizar este comportamiento mediante un primer tramo elástico y un segundo tramo inelástico, facilitando la identificación del punto de fluencia, la capacidad máxima y el desplazamiento último para la posterior sectorización de desempeño según el SEAOC Visión 2000.

### Figura 16

*Bilinealización de la curva de capacidad en la dirección Y.*



*Nota:* Generado mediante Python. Ver código en la sección APÉNDICE.

En la dirección Y, la curva de capacidad evidencia también una respuesta inicial rígida, aunque con una resistencia menor en comparación con la dirección X, alcanzando un valor de 487.13 tonf., luego de esta etapa, la estructura mantiene una zona de comportamiento casi estable y posteriormente muestra una disminución gradual del cortante basal hasta desplazamientos mayores.

#### **4.1.11. Sectorización del desempeño (SEAOC)**

El SEAOC Visión 2000 es una propuesta desarrollada por la Structural Engineers Association of California (SEAOC), orientada a la evaluación y diseño sísmico basado en desempeño, su enfoque permite relacionar la respuesta estructural de una edificación frente a un sismo con distintos niveles de desempeño, considerando el grado de daño esperado, la seguridad de los ocupantes y la funcionalidad posterior de la estructura.

Entre sus niveles más utilizados se encuentran: operacional, ocupación inmediata, seguridad de vida y prevención del colapso. Por ello, se emplea como referencia para sectorizar la curva de capacidad y determinar el comportamiento esperado ante diferentes demandas sísmicas.

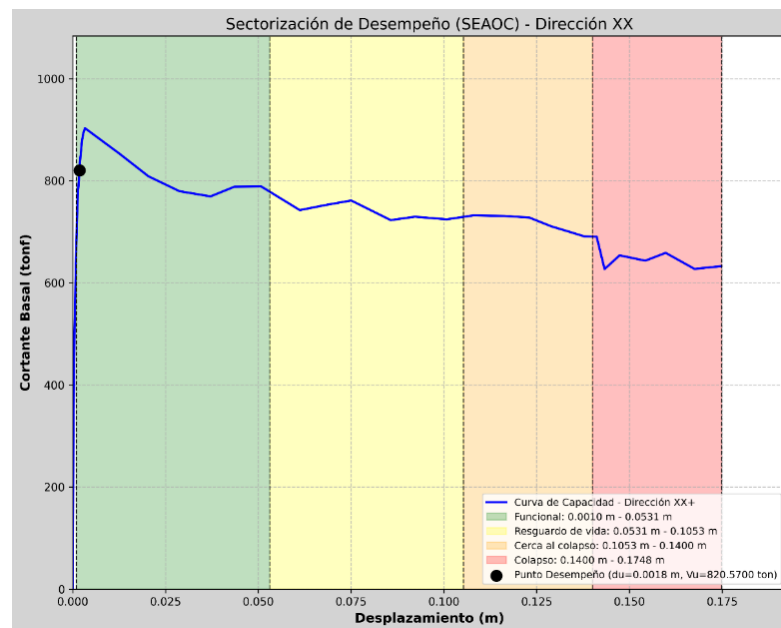
De acuerdo con la sectorización de desempeño establecida por el SEAOC Visión 2000 y considerando la bilinealización de las curvas de capacidad, se



evidencia un comportamiento diferenciado en cada dirección, el cual se sustenta tanto en la forma de las curvas como en los parámetros característicos obtenidos.

**Figura 17**

*Sectorización del desempeño en la dirección X.*



*Nota:* Generado mediante Python. Ver código en la sección APÉNDICE.

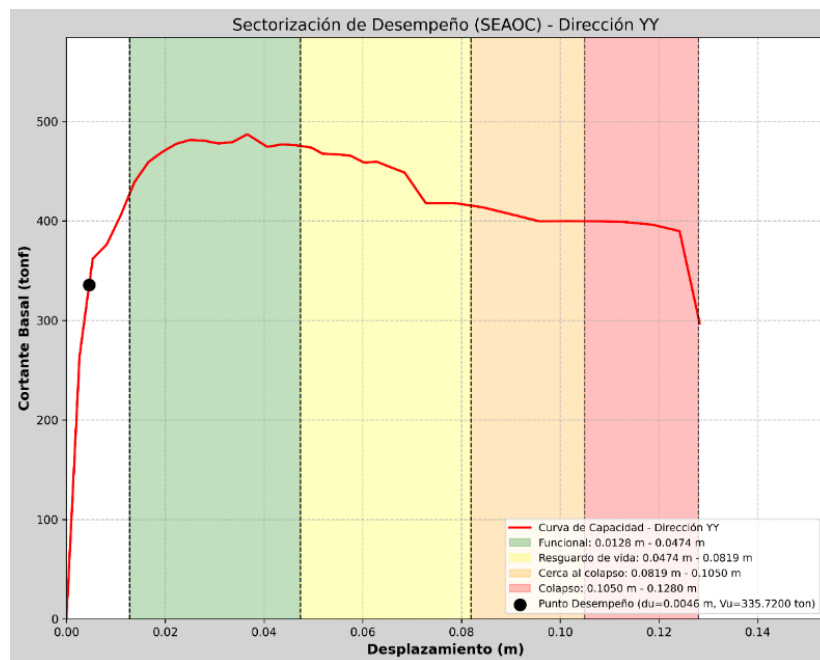
En la dirección XX, el punto de desempeño ( $du \approx 0.0018$  m) se ubica dentro del rango funcional definido entre 0.0010 m y 0.0531 m. (Figura 17).

La bilinealización muestra un punto de fluencia reducido ( $\Delta y \approx 0.000746$  m,  $V_y \approx 843.16$  ton) y una capacidad última de ( $\Delta u \approx 0.1748$  m,  $V_u \approx 632.73$  ton), este bajo desplazamiento de fluencia confirma un comportamiento más frágil, ya que la estructura ingresa rápidamente al régimen inelástico y pierde resistencia rápidamente; en consecuencia, aunque el desempeño es funcional, este se encuentra

condicionado por una menor ductilidad y una degradación más temprana de la resistencia.

**Figura 18**

*Sectorización del desempeño en la dirección Y.*



*Nota:* Generado mediante Python. Ver código en la sección APÉNDICE.

Por otro lado, en la dirección YY, el punto de desempeño ( $du \approx 0.0046$  m) se encuentra dentro del rango completamente funcional, definido entre 0.0128 m y 0.0474 m en términos de sectorización, ubicándose incluso por debajo del inicio del rango, lo cual evidencia un nivel de respuesta aún más favorable. (Figura 18).

La bilinealización presenta un mayor desplazamiento de fluencia ( $\Delta y \approx 0.010445$  m,  $V_y \approx 573.79$  ton) y una capacidad última de ( $\Delta u \approx 0.1283$  m,  $V_u \approx$

296.92 ton), lo que refleja una mayor capacidad de deformación antes de alcanzar el estado inelástico; esto indica un comportamiento claramente más dúctil, con mayor capacidad de disipación de energía y una degradación más progresiva.

Por lo tanto, bajo el criterio del SEAOC Visión 2000, la estructura presenta un desempeño funcional en la dirección XX, influenciado por su carácter más frágil y menor desplazamiento de fluencia, mientras que en la dirección YY alcanza un desempeño completamente funcional, sustentado en una mayor ductilidad, mayores desplazamientos de fluencia y una respuesta estructural más estable.

#### 4.1.12. Evolución del agrietamiento estructural

Se muestra la evolución del agrietamiento de la estructura en ambas direcciones.

##### **Evolución de las grietas en la dirección X**

**Tabla 14**

*Evolución del agrietamiento estructural en la dirección X.*

| <b>Desplazamiento</b> | <b>Ancho de Grieta</b> | <b>Descripción</b>                                             |
|-----------------------|------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 0.58 mm.              | $\approx 0.23$ mm.     | Las grietas se localizan principalmente en el tablero          |
| 20.79 mm.             | $\approx 25.16$ mm.    | Las grietas se concentran de forma ligera en la base del pilar |

|            |                      |                                                                                                                                           |
|------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 91.55 mm.  | $\approx 100.00$ mm. | Las grietas se presentan en el extremo del puente y extendiéndose progresivamente hacia otras zonas.                                      |
| 120.65 mm. | $\approx 100.00$ mm. | Las grietas se presencian en la base del pilar, los bordes del puente y algunas zonas del tablero.                                        |
| 175 mm.    | $\approx 100.00$ mm. | Las grietas se encuentran ampliamente distribuido, tanto como en zonas extendidas del tablero, la base del pilar y el extremo del puente. |

La Tabla 14 presenta la evolución del agrietamiento estructural en la dirección X en función del incremento del desplazamiento lateral. Se observa que, para un desplazamiento inicial de 0.58 mm, el ancho de grieta es reducido, aproximadamente 0.23 mm, localizándose principalmente en el tablero. Esto indica una etapa inicial de daño leve, donde las fisuras aparecen de manera puntual sin comprometer aún zonas críticas de la estructura.

A medida que el desplazamiento aumenta, el agrietamiento se vuelve más significativo y comienza a concentrarse en zonas estructuralmente sensibles. Para un desplazamiento de 20.79 mm, las grietas se concentran ligeramente en la base del pilar, mientras que, a partir de 91.55 mm, el daño se extiende hacia el extremo del puente y progresivamente hacia otras zonas. En los desplazamientos mayores, de 120.65 mm y 175 mm, el ancho de grieta alcanza valores aproximados de 100.00 mm, evidenciando una distribución amplia del daño en el tablero, la base del pilar y los bordes del puente.

En síntesis, se evidencia que el incremento del desplazamiento en la dirección X genera una progresión del daño estructural, pasando de fisuras localizadas en el tablero a un patrón de agrietamiento ampliamente distribuido. Este comportamiento refleja una pérdida gradual de capacidad resistente y permite identificar las zonas más vulnerables de la estructura frente a la demanda sísmica considerada.

### **Evolución de las grietas en la dirección Y**

**Tabla 15**

*Evolución del agrietamiento estructural en la dirección Y.*

| <b>Desplazamiento</b> | <b>Ancho de Grieta</b> | <b>Descripción</b>                                                                                                       |
|-----------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0.30 mm.              | $\approx 0.13$ mm.     | Las grietas son presentes en el tablero asociado principalmente a efectos gravitacionales.                               |
| 30.15 mm.             | $\approx 16.32$ mm.    | Las grietas se concentran en la base de los pilares, mientras que en el tablero se mantienen valores menores a 1 mm.     |
| 61.74 mm.             | $\approx 36.25$ mm.    | Las grietas se concentran en la base de los pilares, mientras que en el tablero se mantienen valores menores a 1 mm.     |
| 96.94 mm.             | $\approx 71.02$ mm.    | Las grietas se concentran en la base de los pilares, mientras que en el tablero aún se mantienen valores menores a 1 mm. |
| 138.3 mm.             | $\approx 114.92$ mm.   | Las grietas se concentran en la base de los pilares, mientras que en el tablero                                          |

---

aún se mantienen valores menores a 1 mm.

---

La Tabla 15 muestra la evolución del agrietamiento estructural en la dirección Y conforme se incrementa el desplazamiento lateral de la estructura. En la etapa inicial, correspondiente a un desplazamiento de 0.30 mm, se registra un ancho de grieta aproximado de 0.13 mm, asociado principalmente a los efectos gravitacionales en el tablero, lo que representa una condición de fisuración inicial de baja magnitud.

Con el aumento progresivo del desplazamiento, el daño comienza a concentrarse principalmente en la base de los pilares, evidenciando que estas zonas presentan una mayor demanda estructural frente a la acción lateral en la dirección Y. Para desplazamientos de 30.15 mm, 61.74 mm y 96.94 mm, los anchos de grieta aumentan de aproximadamente 16.32 mm a 71.02 mm, manteniéndose el tablero con fisuración menor a 1 mm, lo cual indica que el daño más significativo no se distribuye de manera uniforme, sino que se localiza en los elementos verticales de soporte.

Para un desplazamiento de 138.3 mm, el ancho de grieta alcanza aproximadamente 114.92 mm, concentrándose nuevamente en la base de los pilares. Este comportamiento evidencia una progresión importante del daño estructural en dichos elementos, mientras que el tablero continúa presentando grietas leves.

### **Grietas en el punto de desempeño XX y YY**

En el punto de desempeño, en la dirección XX, el agrietamiento máximo observado es de 0.3 mm, concentrado principalmente en zonas muy puntuales del tablero, mientras que en los pilares el mismo ancho de grieta, pero en zonas menos puntuales; por otro lado, en la dirección YY, el agrietamiento máximo en los pilares alcanza aproximadamente 1.98 mm, mientras que en el tablero se presentan grietas muy ligeras del orden de 0.25 mm.

#### **4.2. ANÁLISIS DE IMPACTO, BENEFICIOS Y COMPARACIÓN CON CASOS SIMILARES**

El desarrollo del presente estudio genera un impacto positivo relevante, a partir del análisis tipo Pushover, se obtuvo una curva de capacidad que evidencia un comportamiento no lineal caracterizado por una fase inicial elástica seguida de una reducción progresiva de rigidez, asociada a la formación de grietas en zonas muy puntuales del tablero, mientras que en los pilares el mismo ancho de grieta pero en zonas menos puntuales, también se identificaron concentraciones de esfuerzos principales de tracción que superan la resistencia del material en determinados puntos, lo cual explica la aparición de las grietas.

El punto de desempeño estructural, determinado mediante la intersección con el espectro de demanda, sugiere que la estructura se ubica en un rango funcional, por lo que este análisis permite una comprensión integral del

comportamiento estructural, contribuyendo directamente a la gestión técnica del patrimonio.

El principal beneficio del estudio radica en la obtención de parámetros cuantitativos del comportamiento estructural, tales como desplazamientos máximos, distribución de deformaciones, evolución del daño y capacidad resistente de la estructura.

Desde el punto de vista académico, el estudio contribuye al desarrollo de capacidades en análisis estructural avanzado y evaluación basada en desempeño.

La población beneficiaria directa está constituida por los habitantes del distrito de Nuñoa, quienes utilizan el puente como vía de tránsito peatonal, beneficiándose de una infraestructura evaluada técnicamente en términos de seguridad estructural, por lo tanto, a partir de los resultados obtenidos, se puede inferir que, bajo condiciones actuales de uso (tránsito exclusivamente peatonal), las solicitaciones estructurales se mantienen dentro de rangos admisibles, reduciendo significativamente el riesgo asociado a fallas estructurales.

Asimismo, las autoridades locales dispondrán de información técnica confiable para la toma de decisiones en materia de mantenimiento y conservación; por otro lado, de manera indirecta, el estudio beneficia al sector turístico, al contribuir a la preservación de un elemento patrimonial representativo, y a la



comunidad técnica, al proporcionar un caso de estudio aplicable al análisis de estructuras de mampostería sometidas a cargas sísmicas.

Los resultados obtenidos en la presente investigación muestran una alta concordancia con los estudios internacionales y nacionales analizados en los antecedentes, particularmente en lo referente al comportamiento no lineal y los mecanismos de daño en puentes de mampostería.

Asimismo, los resultados obtenidos presentan similitud con lo expuesto por Hamad (2022), en cuanto a la distribución no uniforme de esfuerzos y la presencia de concentraciones de energía de deformación en elementos específicos del puente, dado que, en el modelo desarrollado, se evidenció una distribución heterogénea de deformaciones y daño, con localización de zonas críticas que coinciden con los puntos de mayor demanda estructural, aunque los valores de desplazamiento en el punto de desempeño (1.83 mm. en X y 4.6 mm. en Y), son inferiores a los reportados por dicho autor (3.4 mm).

En comparación con el estudio de Simoncello et al. (2020), se observa coherencia en la representación del comportamiento no lineal mediante modelos constitutivos avanzados, así como en la identificación de la pérdida progresiva de rigidez asociada al agrietamiento, asimismo, en el presente caso no se evaluaron técnicas de reforzamiento como FRP, los resultados obtenidos permiten inferir que la capacidad estructural del puente podría incrementarse mediante intervenciones

similares, tal como se evidencia en dicho estudio, donde se reportan incrementos de hasta 43 % en la capacidad resistente, sugiriendo así que el modelo desarrollado es útil para diagnóstico y también como herramienta para futuras simulaciones de refuerzo estructural.

A nivel nacional, los resultados guardan relación directa con lo reportado por Huallpa (2020) quien identifica una alta sensibilidad del comportamiento estructural de puentes de mampostería frente a variaciones en sus propiedades mecánicas, por lo que en el presente estudio, la reducción progresiva de la rigidez observada en la curva de capacidad, así como la evolución del agrietamiento en zonas del arco, son consistentes con los mecanismos de daño descritos en dicho estudio, por otro lado, se confirma que el comportamiento estructural de este tipo de puentes está fuertemente condicionado por las características del material y la configuración geométrica.

En relación con las intervenciones reales, como el caso del puente colonial de Lampa, Aquize et al. (2022) y los proyectos de Uchumayo y Acoria, los resultados del presente estudio refuerzan la importancia de realizar evaluaciones estructurales detalladas antes de cualquier intervención, a diferencia de estos casos, donde se evidencian problemas asociados a falta de mantenimiento o decisiones constructivas, el análisis desarrollado permite anticipar posibles mecanismos de falla y orientar estrategias de conservación basadas en criterios técnicos, en este sentido, se evidencia que la modelación numérica constituye una herramienta

primordial para evitar intervenciones inadecuadas y garantizar la preservación estructural y patrimonial de este tipo de infraestructuras.

En relación con los criterios normativos, los resultados del análisis estructural han sido contrastados con lineamientos establecidos en normas como ASCE 41-23 y SEAOC Visión 2000, los cuales definen niveles de desempeño estructural en función de parámetros como derivas, deformaciones y estados de daño.

En el presente estudio, el punto de desempeño se ubica dentro de un rango compatible con el nivel “funcional”, considerando los desplazamientos obtenidos y la extensión del agrietamiento.

#### **4.3. LIMITACIONES DEL ESTUDIO Y MEJORAS IDENTIFICADAS**

Una de las principales limitaciones del presente estudio radica en la disponibilidad de la información técnica, dicha situación obligó a reconstruir la geometría estructural a partir de criterios técnicos y aproximaciones basadas en la evidencia existente.

Otra limitación importante corresponde a la caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales, particularmente de la mampostería de piedra, por lo que, en el presente estudio, dichos parámetros fueron definidos en

base a valores reportados en la literatura especializada y antecedentes de investigaciones similares.

En el modelo estructural se considera la idealización de las condiciones de apoyo como restricciones fijas, sin modelar explícitamente la interacción suelo–estructura, así como la homogeneización del material de mampostería, tratándolo como un medio continuo equivalente.

A partir de las limitaciones mencionadas, se identifican diversas oportunidades de mejora para futuras investigaciones:

- En primer lugar, se recomienda la realización de ensayos experimentales in situ, tales como pruebas de caracterización de materiales, monitoreo dinámico o ensayos de vibración ambiental, que permitan calibrar y validar el modelo numérico con mayor precisión.
- En segundo lugar, sería pertinente incorporar en el modelado la interacción suelo–estructura, así como desarrollar análisis dinámicos no lineales que representen de manera más realista la respuesta sísmica del puente.

#### **4.4. DESCRIPCIÓN DE SOLUCIÓN PROPUESTA Y SU IMPLEMENTACIÓN**

Como resultado del análisis, se ha encontrado que la estructura presenta un comportamiento no lineal con pérdida progresiva de rigidez, evidenciándose concentraciones de esfuerzos de tracción en el tablero y los pilares, donde se inicia el proceso de agrietamiento, por otro lado, el punto de desempeño estructural se ubica en un nivel cercano a funcional, lo cual indica que, la estructura mantiene estabilidad bajo condiciones actuales de uso (tránsito peatonal), por lo que del análisis realizado se obtiene que, para el sismo de diseño, la estructura presenta:

- Agrietamiento menor a 0.3 mm en dirección X.
- Agrietamiento de hasta 1.98 mm en dirección Y.

Entonces, estos valores corresponden a un nivel de daño bajo, compatible con un desempeño adecuado de la estructura; en ese sentido, no se requiere plantear medidas de reforzamiento estructural, ya que no se evidencian daños significativos que comprometan la seguridad o funcionalidad, por lo tanto, la solución propuesta es el siguiente plan de mantenimiento:

##### **Propuesta de mantenimiento**

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis estructural del Puente Colonial de Nuñoa, se propone un plan de mantenimiento orientado a controlar el

avance del agrietamiento y preservar la estabilidad estructural del puente, considerando principalmente las fisuras identificadas en el tablero y pilares.

- Mantener la restricción permanente del tránsito vehicular, permitiendo únicamente el tránsito peatonal para reducir las sollicitaciones dinámicas.
- Realizar inspecciones técnicas semestrales mediante registro fotográfico y medición de grietas con fisurómetros, especialmente en los pilares donde se identificaron aperturas máximas de hasta 1.98 mm.
- Ejecutar limpieza periódica del sistema de drenaje y del tablero del puente para evitar infiltraciones de humedad hacia la mampostería.
- Controlar la presencia de vegetación, sales y agentes erosivos que puedan acelerar el deterioro de los elementos pétreos y morteros.
- Realizar resanes y emboquillados en las zonas agrietadas para limitar el ingreso de humedad y la propagación del daño.
- Evaluar el reforzamiento localizado de los pilares donde se presentan grietas de mayor magnitud ( $\approx 1.98$  mm), sin alterar el valor patrimonial.

Se recomienda que las intervenciones sean supervisadas por especialistas en estructuras históricas y conservación patrimonial. Asimismo, se propone implementar un monitoreo estructural periódico que permita evaluar la evolución del agrietamiento y actualizar la evaluación estructural del puente a largo plazo.

En cuanto a la viabilidad de ejecución, la propuesta planteada resulta técnica y económicamente factible, debido a que prioriza intervenciones focalizadas y

compatibles con el carácter patrimonial del puente, evitando alteraciones significativas en su configuración original, además, al tratarse de una estructura actualmente destinada únicamente al tránsito peatonal, las acciones de intervención pueden ser implementadas sin afectar significativamente su funcionalidad, entonces, la aplicación de estas medidas permitiría mejorar la capacidad estructural del puente, reducir la propagación del agrietamiento y prolongar su vida útil, garantizando al mismo tiempo la conservación de su valor histórico y su aprovechamiento dentro del contexto turístico local.

#### **4.5. EVALUACIÓN DE COSTOS, SOSTENIBILIDAD Y VIABILIDAD A LARGO PLAZO**

La propuesta de intervención se caracteriza por priorizar acciones focalizadas y no invasivas y se proporciona una propuesta de costos referenciales para el mantenimiento del Puente Colonial de Nuñoa.

**Tabla 16**

*Propuesta de costos para el mantenimiento del Puente Colonial.*

| <b>Ítem</b> | <b>Descripción</b>                               | <b>Unidad</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Costo Unitario (S/.)</b> | <b>Costo Parcial (S/.)</b> |
|-------------|--------------------------------------------------|---------------|-----------------|-----------------------------|----------------------------|
| 1           | Inspección técnica y monitoreo de grietas        | Glb           | 1               | 3,500.00                    | 3,500.00                   |
| 2           | Limpieza y mantenimiento del sistema de drenaje  | Glb           | 1               | 2,000.00                    | 2,000.00                   |
| 3           | Limpieza superficial y eliminación de vegetación | Glb           | 1               | 1,500.00                    | 1,500.00                   |

|                                |                                                      |                |    |          |                  |
|--------------------------------|------------------------------------------------------|----------------|----|----------|------------------|
| 4                              | Sellado de fisuras menores en tablero (0.25–0.30 mm) | m <sup>2</sup> | 15 | 120.00   | 1,800.00         |
| 5                              | Emboquillado y resane                                | m <sup>2</sup> | 20 | 180.00   | 3,600.00         |
| 6                              | Reforzamiento localizado en pilares                  | Glb            | 1  | 8,500.00 | 8,500.00         |
| 7                              | Supervisión técnica especializada                    | Glb            | 1  | 4,000.00 | 4,000.00         |
| 8                              | Señalización y control de tránsito peatonal          | Glb            | 1  | 1,200.00 | 1,200.00         |
| <b>Costo total referencial</b> |                                                      |                |    |          | <b>26,100.00</b> |

*Nota.* Los costos presentados son referenciales y corresponden a una estimación preliminar basada en actividades de mantenimiento.

Desde el enfoque de sostenibilidad, la solución propuesta se alinea con criterios de conservación del patrimonio y uso responsable de recursos, al evitar intervenciones agresivas que alteren la configuración original del puente, además este enfoque también promueve la sostenibilidad social y cultural, al preservar un elemento histórico que forma parte de la identidad local y que puede seguir siendo aprovechado con fines turísticos y educativos.

La viabilidad se sustenta en la implementación de estrategias de mantenimiento preventivo y monitoreo periódico, orientadas a controlar la evolución del agrietamiento y el comportamiento estructural del puente, dado que el análisis ha evidenciado que la estructura presenta niveles de desempeño aceptables bajo condiciones actuales de uso, la continuidad de la restricción de tránsito vehicular resulta fundamental para garantizar su estabilidad futura.



## CONCLUSIONES

**Primera:** Se evaluó el desempeño estructural del Puente Colonial de Nuñoa mediante el método de elementos finitos, determinándose que la estructura presenta un comportamiento no lineal con degradación progresiva de rigidez, asociado a la aparición de esfuerzos de tracción en zonas críticas como el tablero y los pilares, evidenciando que, bajo condiciones actuales de servicio, el puente mantiene estabilidad estructural, aunque presenta baja vulnerabilidad frente a eventos sísmicos de mayor intensidad.

**Segunda:** Se estableció la curva de capacidad del puente, obteniéndose que la estructura presenta una característica más rígida pero más frágil en la dirección XX, y más flexible, pero con mayor ductilidad en la dirección YY, lo cual tiene implicancias importantes en la identificación de posibles mecanismos de falla predominantes.

**Tercera:** Se determinó la respuesta estructural dentro de la curva de capacidad frente a la demanda sísmica, conforme a los lineamientos del ASCE 41-23, ubicándose el punto de desempeño dentro de un rango bajo, lo cual indica que la estructura puede soportar solicitaciones sísmicas moderadas sin colapso, aunque con presencia de daño estructural mínimo.

- Cuarta:** Se analizó el desempeño estructural del puente de acuerdo con los criterios establecidos por SEAOC Visión 2000, clasificándose el comportamiento dentro de niveles de desempeño funcional, en los cuales se admite la presencia de agrietamiento sin pérdida total de la capacidad resistente.
- Quinta:** Se evaluó el tamaño de las grietas en función de los límites de desempeño y la respuesta sísmica, dando un valor de 0.3 mm. en tablero y pilares en la dirección X, y en la dirección Y, 1.98 mm. en pilares y 0.25 mm. en el tablero, lo que evidencia un nivel de daño mínimo coherente con el comportamiento no lineal observado.
- Sexta:** Se estimó la evolución del agrietamiento estructural, en ambas direcciones donde se incrementa con el desplazamiento; en XX evoluciona de 0.23 mm (0.58 mm) a 100 mm desde 91.55 mm, propagándose hacia el tablero, base de pilares y extremos hasta 175 mm, evidenciando colapso generalizado; mientras que en YY aumenta de 0.13 mm (0.3 mm) a 114.92 mm (138.3 mm), concentrándose en la base de los pilares, con fisuración en el tablero menor a 1 mm, indicando daño predominantemente localizado.

## RECOMENDACIONES

**Primera:** En función de los resultados obtenidos en la evaluación estructural del Puente Colonial de Nuñoa, se recomienda a las entidades competentes vinculadas a la gestión de infraestructura, conservación patrimonial e investigación académica, tales como la Municipalidad Distrital de Nuñoa, el Gobierno Regional de Puno, el Ministerio de Cultura, el Colegio de Ingenieros del Perú y las universidades, implementar acciones orientadas a la conservación y monitoreo estructural del puente. Entre estas acciones se sugiere desarrollar programas de mantenimiento preventivo periódico que incluyan inspecciones técnicas, control de infiltraciones y limpieza del sistema de drenaje, así como mantener la restricción del tránsito vehicular para conservar el patrimonio cultural.

**Segunda:** Asimismo, se recomienda realizar estudios complementarios de ingeniería, tales como ensayos de caracterización de materiales, monitoreo dinámico y evaluación de interacción suelo–estructura, con la finalidad de validar y mejorar la precisión del modelo numérico desarrollado mediante el método de elementos finitos.

**Tercera:** De igual manera, se sugiere evaluar la aplicación de técnicas de reforzamiento compatibles con estructuras históricas de mampostería

de piedra, intervenciones localizadas en zonas críticas, garantizando la preservación del valor arquitectónico y patrimonial del puente.

**Cuarta:** Se recomienda fortalecer la investigación y capacitación especializada en el análisis estructural de puentes históricos de mampostería, promoviendo el uso de metodologías avanzadas de modelación numérica y análisis no lineal para mejorar los criterios de evaluación, conservación y reforzamiento estructural de infraestructuras patrimoniales similares.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguas, I. A., Hernández, L. T., Solís, K. J., & Molina, M. M. (2024). Structural Evaluation of the Superstructure of an Existing Steel Beam - Slab Bridge. *Ciencia, Ingenierías y Aplicaciones*, 7(2), 143-170. <https://doi.org/https://doi.org/10.22206/cyap.2024.v7i2.3312>
- Aquize, C. M., Iturraran, L. F., & Aquize, J. (2022). Problemática en la preservación del patrimonio arquitectónico: el caso puente colonial de Lampa, Perú. *Revista de arquitectura y urbanismo Taypi*, 1(1), 12-22. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7111929>
- ASCE/SEI 41-23. (2023). *American Society of Civil Engineers & Structural Engineering Institute*. American Society of Civil Engineers. <https://www.asce.org/publications-and-news/codes-and-standards/asce-sei-41-23>
- Barbhuiya, S., Bhusan, B., & Kanavaris, F. (2024). review of fracture propagation in concrete: Fundamentals, experimental techniques, modelling and applications. *Magazine of Concrete Research*, 76(10), 482-514. <https://doi.org/https://doi.org/10.1680/jmacr.23.00143>
- Briceño, C., Moreira, S., Noel, M. F., Gonzales, M., Vila, E., & Aguilar, R. (2019). Seismic vulnerability assessment of a 17th century adobe church in the Peruvian Andes. *International Journal of Architectural Heritage*, 13(1), 140-152. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1497224>

- Cacciuttolo, C., Muñoz, E., & Sotil, A. (2025). echnological Evolution of Architecture, Engineering, Construction, and Structural Health Monitoring of Bridges in Peru: History, Challenges, and Opportunities. *Applied Sciences*, 15(2), 831. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app15020831>
- Chácará, C., Reátegui, R., Oré, Á., Suarez, P., & Aguilar, R. (2023). ntegration of NDT, 3D parametric modelling, and nonlinear numerical analysis for the seismic assessment of a vaulted stone-masonry historical building. *Journal of Building Engineering*, 70, 106347. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106347>
- Clemente, P., Saitta, F., Buffarini, G., & Ormando, C. (2023). Masonry arch bridges with finite compression strength subject to horizontal longitudinal seismic actions. *Applied Sciences*, 13(13), 1-15. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app13137509>
- Clemente, P., Saitta, F., Buffarini, G., & Ormando, C. (2023). Masonry Arch Bridges with Finite Compression Strength Subject to Horizontal Longitudinal Seismic Actions. *Appl. Sci.*, 13(13), 1-15. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app13137509>
- DIANA FEA, B. (2023). Manual de usuario del software DIANA FEA. (2023). Total Strain Crack Models – DIANA. *DIANA Finite Element Analysis B.V.* <https://manuals.dianafea.com/d107/en/1181807-1192485-total-strain-crack-models.html>

- Fages, J. M., Tarque, N., Rodríguez, J. D., & Solís, M. (2022). Calibration of a total strain crack model for adobe masonry based on compression and diagonal compression tests. *Construction and Building Materials*, 352, 128965. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128965>
- Golewski, G. L. (2023). The Phenomenon of Cracking in Cement Concretes and Reinforced Concrete Structures: The Mechanism of Cracks Formation, Causes of Their Initiation, Types and Places of Occurrence, and Methods of Detection—A Review. *Buildings*, 13(3), 1-34. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/buildings13030765>
- Gudžulić, V., & Meschke, G. (2025). Discrete modeling of cracking in reinforced concrete structures: formulation, size effect, and parameter sensitivity. *Materials and Structures*, 58(9), 1-23. <https://doi.org/https://doi.org/10.1617/s11527-025-02815-6>
- Hamad, F. S. (2022). Ancient Mesopotamian Stone Bridge: Numerical Modeling and Structural Assessment. *Shock and Vibration*(1), 1-11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2022/4255354>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. P. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw Hill.
- Hordijk, D. A. (1991). *Local approach to fatigue of concrete, doctor dissertation*. Delft University of Technology. [https://repository.tudelft.nl/file/File\\_0f0d2ecf-f2c2-432f-a0dc-fd5d7c5e88d3?preview=1](https://repository.tudelft.nl/file/File_0f0d2ecf-f2c2-432f-a0dc-fd5d7c5e88d3?preview=1)

- Huallpa, M. A. (2020). *Evaluación de la sensibilidad del comportamiento sísmico de puentes de mampostería de piedra abovedados en arco: caso de estudio del Puente Trujillo*. Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.  
<https://es.scribd.com/document/745574677/Huallpa-Mollinedo-Marco-Evaluacion-Sensibilidad-Comportamiento>
- Karakuş, F. (2021). Analysis of Historical Structures with Finite Elements Method. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 27, 22-35.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.31590/ejosat.928680>
- Karalar, M., & Çufalı, G. (2023). Structural Assessment of Historical Stone Bridges with the Finite Element Method under Dynamic Effects of Arch Shape: The Antik Iscehisar Bridge. *Appl. Sci.*, 13(19), 1-18.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app131910740>
- Kuria, K. K., & Kegyes, O. K. (2023). Pushover analysis in seismic engineering: A detailed chronology and review of techniques for structural assessment. *Applied Sciences*, 14(1), 151.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app14010151>
- Lherminier, O., Erlicher, S., Huguet, M., Civera, M., Ceravolo, R., & Barakat, M. (2024). The generalized E-DVA method: a new approach for multi-modal pushover analysis under multi-component earthquakes with local variables maximization. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22(1), 133-158.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10518-023-01790-z>



Lipa, L., Tarque, N., Pelà, L., & Goicolea, J. M. (2024). Seismic numerical analysis of an Inca stone wall in Sacsayhuaman using rigid body dynamics within a finite element framework. *Engineering Failure Analysis*, 161, 108254. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108254>

López, J. C. (1996). *Geología del cuadrángulo de Nuñoa, Hoja 29-u*. Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, INGEMMET.

Lourenço, P. J. (1997). *Computational strategies for masonry structures*. Portugal: Delft University Press. [https://www.researchgate.net/publication/27344834\\_Computational\\_Strategy\\_for\\_Masonry\\_Structures](https://www.researchgate.net/publication/27344834_Computational_Strategy_for_Masonry_Structures)

Marikannan, E. (2024). Nonlinear analysis of reinforced concrete structures: modeling techniques and performance evaluation. *Journal of Civil Engineering and Technology (JCIET)*, 10(1), 34-40. [https://www.researchgate.net/profile/Iaeme-Pub/publication/382276141\\_NONLINEAR\\_ANALYSIS\\_OF\\_REINFORCED\\_CONCRETE\\_STRUCTURES\\_MODELING\\_TECHNIQUES\\_AND\\_PERFORMANCE\\_EVALUATION/links/6696479d8dca9f441b80ab32/NONLINEAR-ANALYSIS-OF-REINFORCED-CONCRETE-STRUCTURES-MO](https://www.researchgate.net/profile/Iaeme-Pub/publication/382276141_NONLINEAR_ANALYSIS_OF_REINFORCED_CONCRETE_STRUCTURES_MODELING_TECHNIQUES_AND_PERFORMANCE_EVALUATION/links/6696479d8dca9f441b80ab32/NONLINEAR-ANALYSIS-OF-REINFORCED-CONCRETE-STRUCTURES-MO)

Ministerio de Cultura. (2024). *Resolución Ministerial N° 000102-2024-MC*.

MTC. (2016). *Manual de Puentes*.

- Municipalidad Distrital de Nuñoa. (2006). *Plan Director de Nuñoa*.
- MVCS. (2018). *Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente. Reglamento Nacional de Edificaciones*.
- Nhu, N. T., & Binh, T. A. (2024). Crack patterns in masonry structures using phase field method. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*, 18(3), 48-59. [https://doi.org/https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18\(3\)-04](https://doi.org/https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18(3)-04)
- Noel, M. F. (2020). *Evaluación de la sensibilidad del comportamiento sísmico de puentes de mampostería de piedra abovedados en arco: caso de estudio del Puente Trujillo*. Tesis de Posgrado, Lima. <https://tesis.pucp.edu.pe/items/9c81370f-4199-46bf-86e2-d82be31d78ff>
- Pereira, M., D'Altri, A. M., Miranda, S., & Glisic, B. (2024). Crack pattern-based machine learning prediction of residual drift capacity in damaged masonry walls. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 39(24), 3685-3699. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/mice.13212>
- Pettorruso, C., & Quaglini, V. (2024). Comparison of linear and nonlinear procedures for the analysis of the seismic performance of straight multi-span RC bridges. *Buildings*, 14(2), 464. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/buildings14020464>
- Pokorska, I., Poński, M., Kubissa, W., Libura, T., Brodecki, A., & Kowalewski, Z. (2023). Computational Fracture Evolution Analysis of Steel-Fiber-

Reinforced Concrete Using Concrete Continuous Damage and Fiber Progressive Models. *Materials*, 16(16), 5635.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma16165635>

Remus, A., Tezcan, S., Sun, J., Milani, G., & Perucchio, R. (2025). Seismic failure assessment using energy outputs of finite element analysis: a strategy for complex heritage masonry structures modeled with concrete damaged plasticity material. *Buildings*, 15(3), 318.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/buildings15030318>

Robuschi, S., Ivanov, O. L., Geiker, M., Fernandez, I., & Lundgren, K. (2023). Impact of cracks on distribution of chloride-induced reinforcement corrosion. *Materials and Structures*, 56(1), 1-22.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1617/s11527-022-02085-6>

Rots, J. G., & Blaauwendraad, J. (1989). *Crack models for concrete, discrete or smeared? Fixed, multi-directional or rotating?* The Netherlands: Delft University of Technology. [https://repository.tudelft.nl/file/File\\_9ebcbd29-5d83-42d2-ae51-473bdd6588ec?preview=1](https://repository.tudelft.nl/file/File_9ebcbd29-5d83-42d2-ae51-473bdd6588ec?preview=1)

RTD. (2022). *Guidelines for nonlinear finite element analysis of concrete structures*. Paises Bajos: Rijkswaterstaat Centre for Infrastructure.  
<https://stufib.nl/wp-content/uploads/2023/02/RTD-1016-12022-version-2.3-final-20221102-Guidelines-for-Nonlinear-Finite-Element-Analysis-of-Concrete-Structures.pdf>

- Ruggieri, S., & Uva, G. (2024). Extending the concepts of response spectrum analysis to nonlinear static analysis: Does it make sense? *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(7), 235. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s41062-024-01561-y>
- Shabani, A., & Kioumars, M. (2023). Seismic assessment and strengthening of a historical masonry bridge considering soil-structure interaction. *Engineering Structures*, 293, 1-18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116589>
- Shabani, A., Kioumars, M., & Plevris, V. (2023). Performance-based seismic assessment of a historical masonry arch bridge: Effect of pulse-like excitations. *Front. Struct. Civ. Eng.*, 17(6), 855–869. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11709-023-0972-z>
- Shabani, A., Kioumars, M., & Plevris, V. (2023). Performance-based seismic assessment of a historical masonry arch bridge: Effect of pulse-like excitations. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 17(6), 855-869. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11709-023-0972-z>
- Simoncello, N., Zampieri, P., Gonzalez, J., Perboni, S., & Pellegrino, C. (2020). Numerical analysis of an FRP-strengthened masonry arch bridge. *Frontiers in Built Environment*, 6(7), 1-11. <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.591985>
- Sousamli, M., Messali, F., & Rots, J. G. (2022). A total-strain based orthotropic continuum model for the cyclic nonlinear behavior of unreinforced brick

masonry structures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 123(8), 1813-1840.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/nme.6917>

Stavroulaki, M. E., Liofagos, I., & Darmarakis, P. (2024). Structural Behaviour and Strength Evaluation of a Venetian Church through Finite-Element Analysis. *Buildings*, 14(5), 1282.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/buildings14051282>

Vargas, C., Rodríguez, D., & Achahui, A. (2021). Patologías mecánicas en elementos líticos de las iglesias patrimoniales en la Plaza Mayor de Cusco. *Devenir-Revista de estudios sobre patrimonio edificado*, 8(16), 137-154.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.21754/devenir.v8i16.842>

Wang, Z., Zhang, W., & Huang, Y. (2023). Experimental and numerical analysis of the ribbed reinforced concrete fracture behavior based on the mesoscale FE model. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 17(42), 1-16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s40069-023-00609-0>

Zevallos, N. (2023). *Vulnerabilidad socioeconómica en la gestión de riesgo de desastres de poblaciones altoandinas: caso zona urbana de Puno*. Tesis doctoral.  
[https://repositorio.unfv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13084/7970/UNFV\\_EUPG\\_Zevallos\\_Quispe\\_Nancy\\_Doctorado\\_2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unfv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13084/7970/UNFV_EUPG_Zevallos_Quispe_Nancy_Doctorado_2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

# APÉNDICE

## Apéndice 1. Matriz de Consistencia

| <b>Título:</b> Evaluación del desempeño estructural mediante el método de elementos finitos para la determinación del agrietamiento del Puente Colonial de Nuñoa, Puno – 2025.<br><b>Autores:</b> Bach. Edgar Torres Yampara – Bach. Linzes Willi Cajia Cajia                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PROBLEMA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | OBJETIVOS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | VARIABLES E INDICADORES                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | METODOLOGÍA                                                                                                                                            |
| <b>1. Interrogante Principal</b><br>¿De qué manera la evaluación del desempeño estructural mediante el método de elementos finitos permite determinar el agrietamiento del Puente Colonial de Nuñoa, Puno – 2025?                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>1. Objetivo General</b><br>Evaluar el desempeño estructural mediante el método de elementos finitos para la determinación del agrietamiento del Puente Colonial de Nuñoa, Puno – 2025.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <b>Variable 1 (X)</b><br>Desempeño estructural mediante el método de elementos finitos<br><br><b>Dimensiones e Indicadores:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidad Estructural: El trabajo asociado a dicha dimensión conlleva emplear los indicadores de resistencia máxima, rigidez inicial y la deformación en el punto de fluencia.</li> <li>• Curva de Capacidad: El trabajo asociado a dicha dimensión conlleva emplear los indicadores de curva bilineal, punto de fluencia y punto de colapso.</li> <li>• Respuesta Sísmica: El trabajo asociado a dicha dimensión conlleva emplear los indicadores de deriva máxima y desplazamiento máximo.</li> <li>• Niveles de Desempeño: El trabajo asociado a dicha dimensión conlleva emplear los indicadores de desempeño funcional, resguardo de vida, cercano al colapso y colapso.</li> </ul>                                             | <b>Tipo de Investigación</b><br>Esta investigación considera un tipo de investigación aplicada con un método cuantitativo y de un alcance explicativo. |
| <b>2. Interrogantes Secundaria</b><br><br>a) ¿Cómo se representa la curva de capacidad, basado en las propiedades mecánicas del Puente Colonial de Nuñoa, Puno – 2025?<br>b) ¿Cuál es la respuesta dentro de la curva de capacidad frente al sismo, acorde al ASCE 41-23, del Puente Colonial de Nuñoa, Puno – 2025?<br>c) ¿Cuál es nivel de desempeño que presenta acorde al SEAOC Visión 2000, del Puente Colonial de Nuñoa, Puno – 2025?<br>d) ¿Cuál es el tamaño de la grieta para los límites de desempeño y para la respuesta frente al sismo, del Puente Colonial de Nuñoa, Puno – 2025?<br>e) ¿De qué manera se muestra la evolución del agrietamiento del Puente Colonial de Nuñoa, Puno – 2025? | <b>2. Objetivos Específicos</b><br><br>a) Establecer la curva de capacidad basado en las propiedades mecánicas del Puente Colonial de Nuñoa, Puno – 2025.<br>b) Determinar la respuesta dentro de la curva de capacidad frente al sismo, acorde al ASCE 41-23, del Puente Colonial de Nuñoa, Puno – 2025.<br>c) Analizar el desempeño acorde al SEAOC Visión 2000, del Puente Colonial de Nuñoa, Puno – 2025.<br>d) Evaluar el tamaño de la grieta para los límites de desempeño y para la respuesta frente al sismo, del Puente Colonial de Nuñoa, Puno – 2025.<br>e) Estimar la evolución del agrietamiento del Puente Colonial de Nuñoa, Puno – 2025. | <b>Variable 2 (Y)</b><br>Agrietamiento<br><br><b>Dimensiones e Indicadores:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tamaño de grieta: El trabajo asociado a dicha dimensión conlleva emplear los indicadores de longitud de la grieta y apertura de la grieta.</li> <li>• Distribución del agrietamiento: El trabajo asociado a dicha dimensión conlleva emplear los indicadores de localización en elementos críticos y porcentaje de área afectada.</li> <li>• Evolución del agrietamiento: El trabajo asociado a dicha dimensión conlleva emplear los indicadores de secuencia de aparición de grietas, incremento de tamaño frente a la carga y progresión según niveles de desempeño.</li> <li>• Severidad del agrietamiento: El trabajo asociado a dicha dimensión conlleva emplear los indicadores de porcentaje de sección transversal afectada y relación agrietamiento – desempeño.</li> </ul> | <b>Diseño de la Investigación</b><br>El estudio será de diseño no experimental de corte transversal.                                                   |
| <b>Ámbito de Estudio</b><br>Distrito de Nuñoa – Melgar – Puno.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                        |
| <b>Relevancia de la investigación:</b><br>La investigación se encuentra alineada a fortalecer el objetivo 11 “Ciudades y comunidades sostenibles” de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                        |

## Apéndice 2. Solicitud de autorización

**“Decenio de la Igualdad de Oportunidades para mujeres y hombres”**  
**“Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia”**



**SOLICITO: AUTORIZACIÓN PARA REALIZAR ESTUDIO DE INVESTIGACIÓN EN EL PUENTE COLONIAL DE NUÑO A Y ACCESO A LA DOCUMENTACIÓN EXISTENTE**

**SEÑOR:**

ING. LUIS EUDIS CONDORI MENDOZA

**ALCALDE DE LA MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE NUÑO A**

*Presente. -*

Nosotros, **EDGAR TORRES YAMPARA**, con DNI N° 70778066, y **LINZES WILLI CAJIA CAJIA**, con DNI N° 70776221, en calidad de Egresados de la Escuela de Posgrado de la Universidad Privada de Tacna, ante Ud. con el debido respeto nos presentamos y exponemos:

Que, siendo autores del proyecto de investigación titulada: **“Evaluación del desempeño estructural mediante el método de elementos finitos para la determinación del agrietamiento del Puente Colonial de Nuñoa, Puno – 2025”**, es que recurrimos a su digna Autoridad con la finalidad de **SOLICITAR LA AUTORIZACIÓN PARA REALIZAR EL ESTUDIO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y ACCESO A LA DOCUMENTACIÓN EXISTENTE**, del Puente Colonial de Nuñoa, esto con el fin de optar el Grado Académico de Maestro en Ingeniería Civil con mención en Estructuras.

**POR LO ESPUESTO:**

nuestra petición, por ser justa y legal.

Pedimos a Ud. Señor Alcalde, acceder a

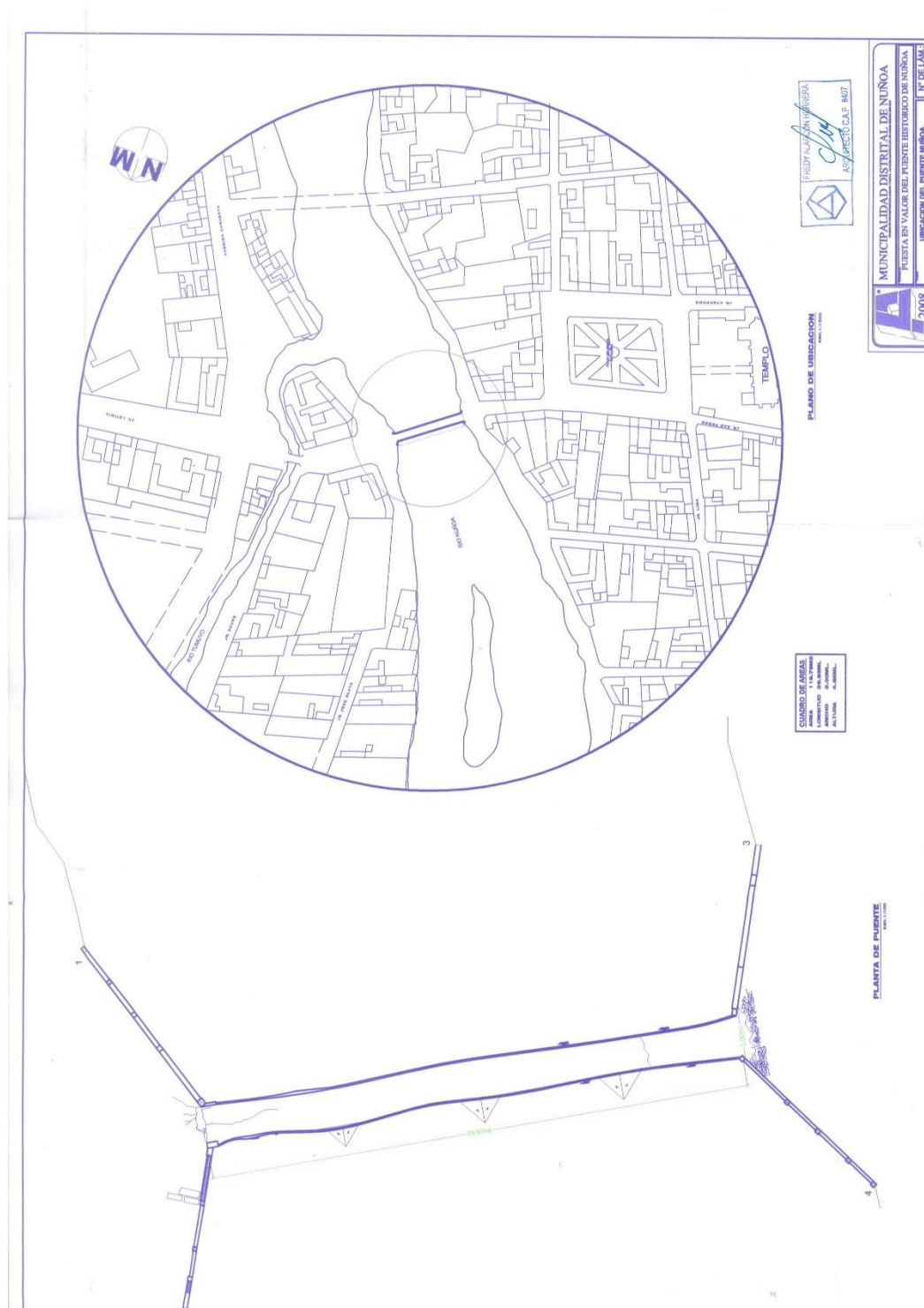
Nuñoa, 10 de Febrero del 2026.

  
**EDGAR TORRES YAMPARA**  
 DNI N° 70778066  
 953386260

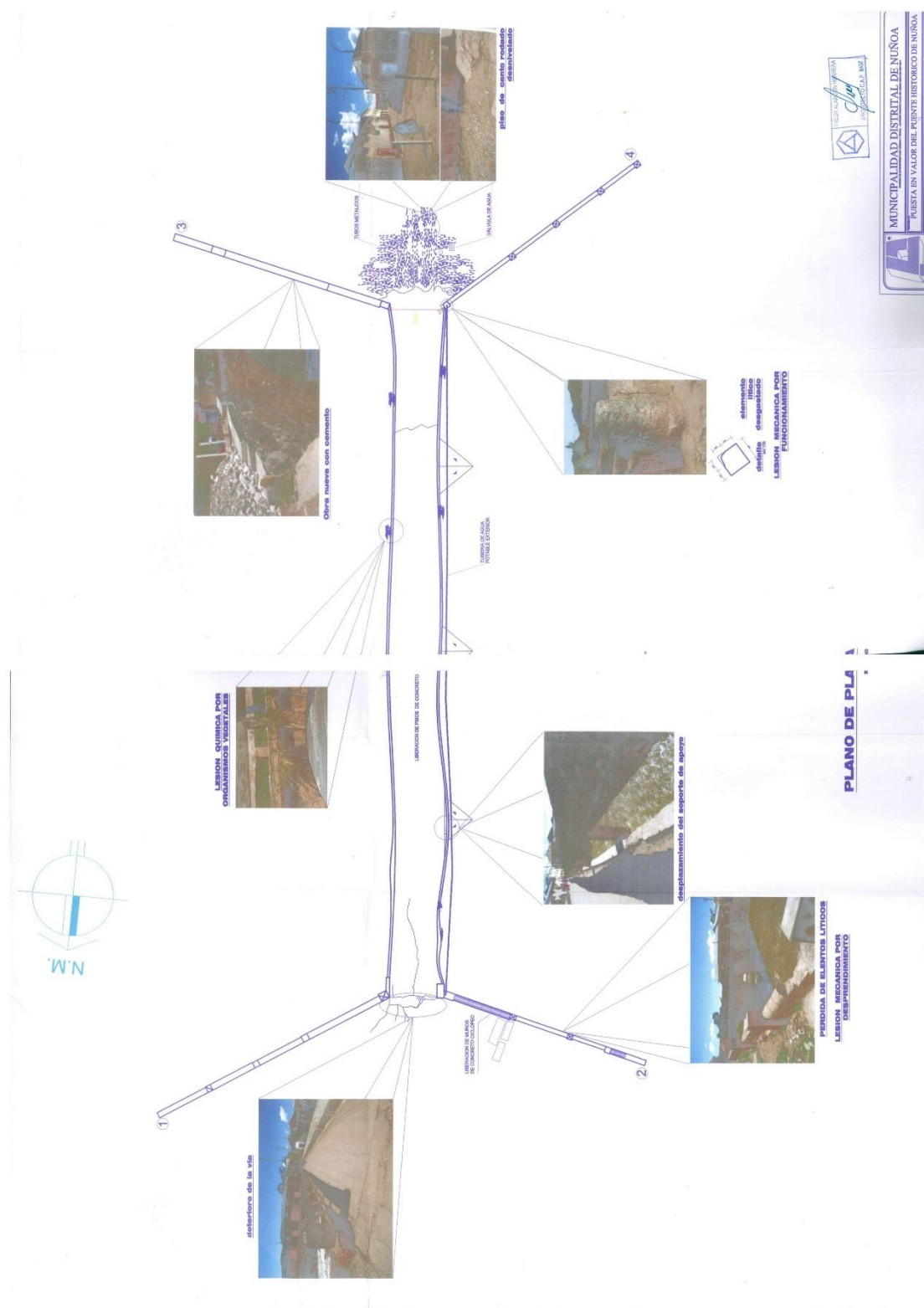
  
**LINZES WILLI CAJIA CAJIA**  
 DNI N° 70776221



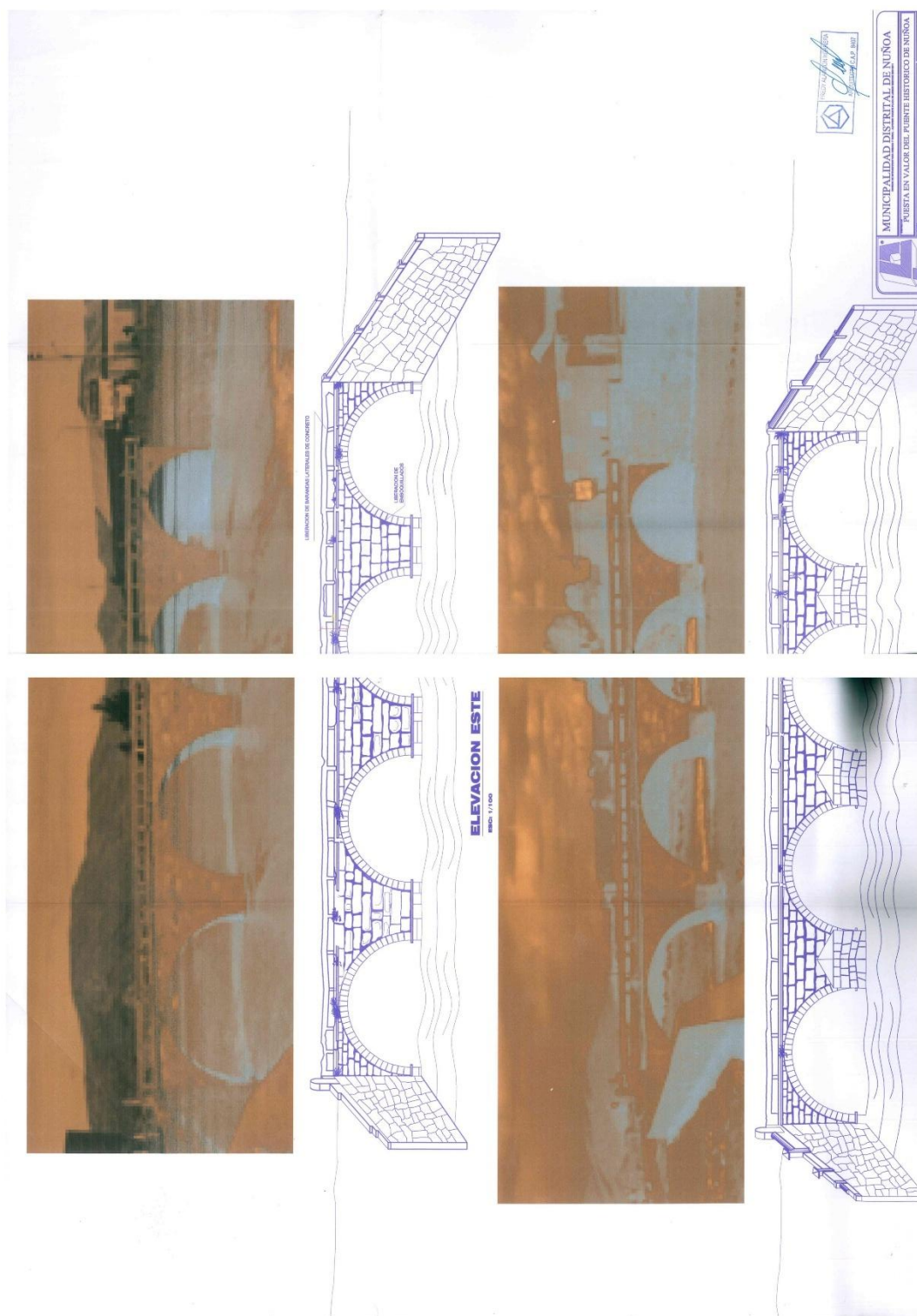




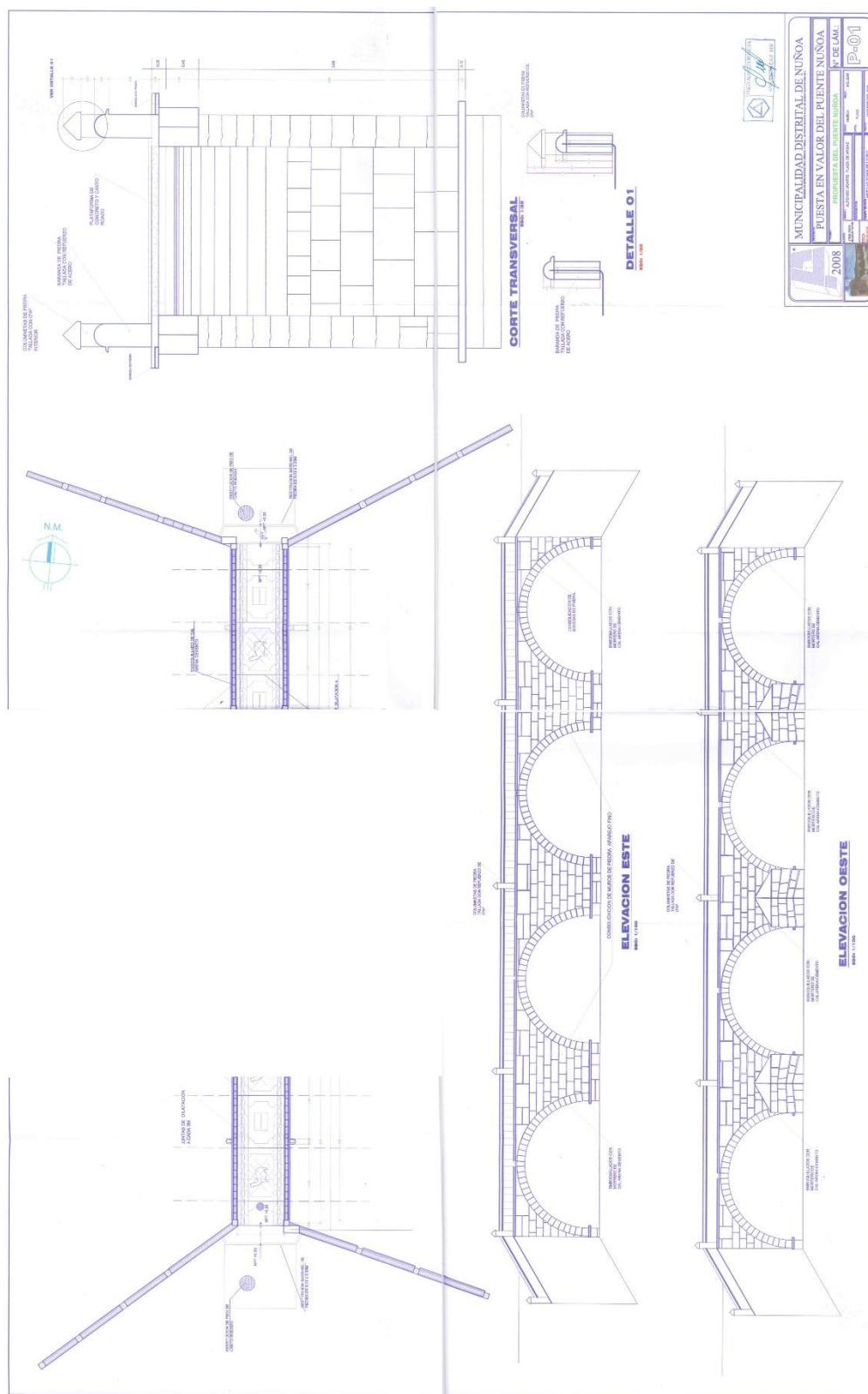
#### Apéndice 4. Estado del puente – Año 2008

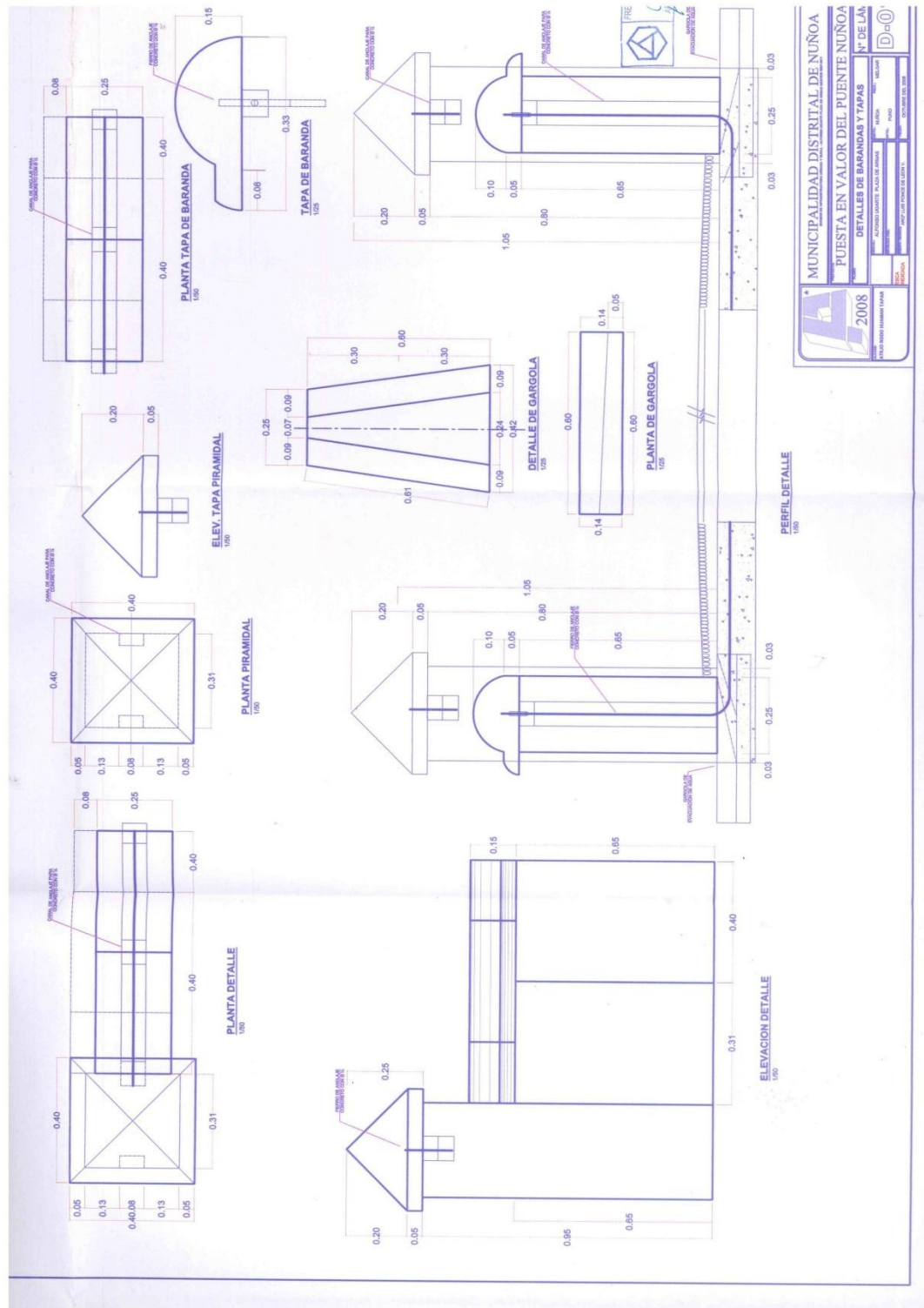


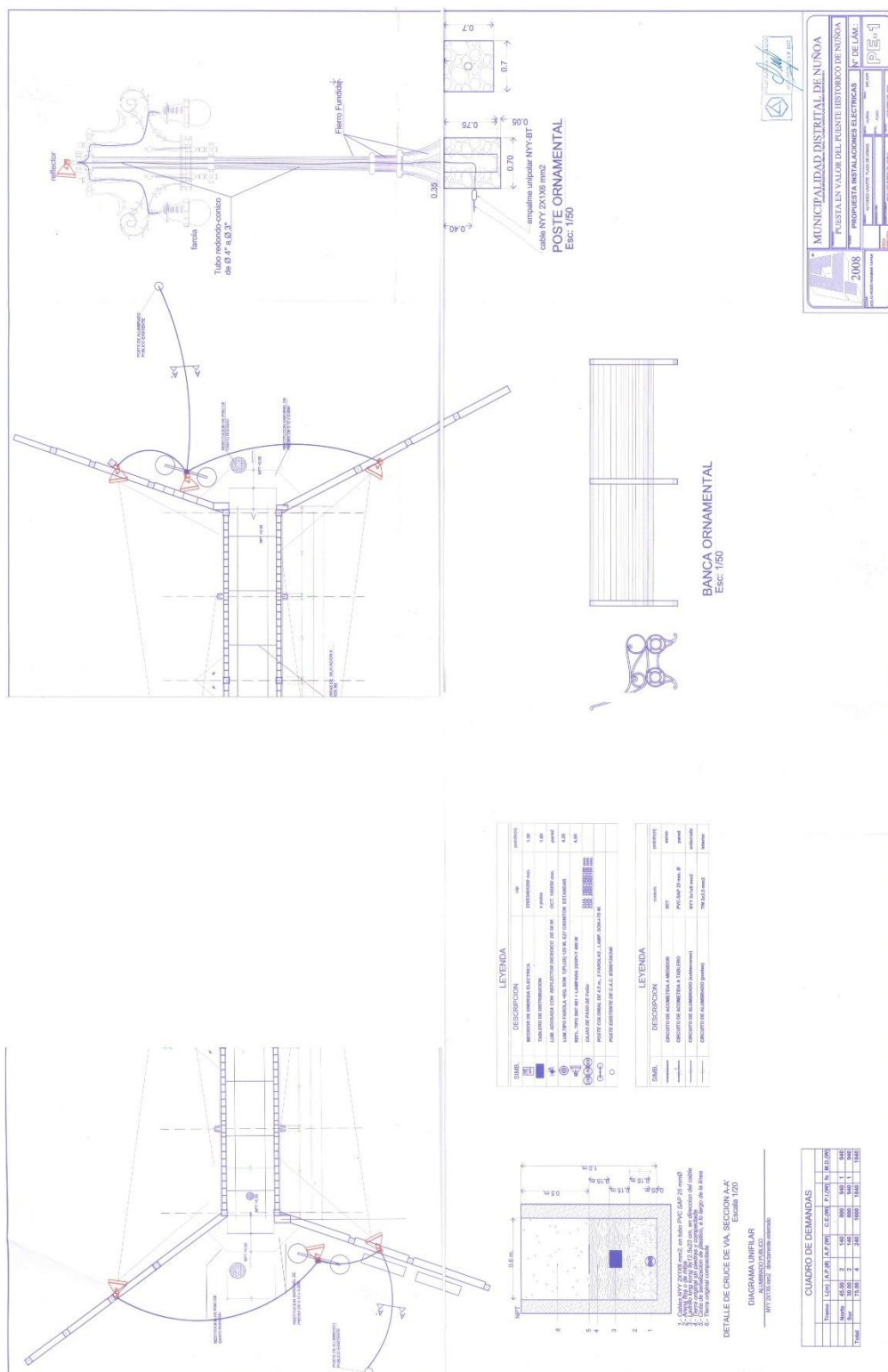




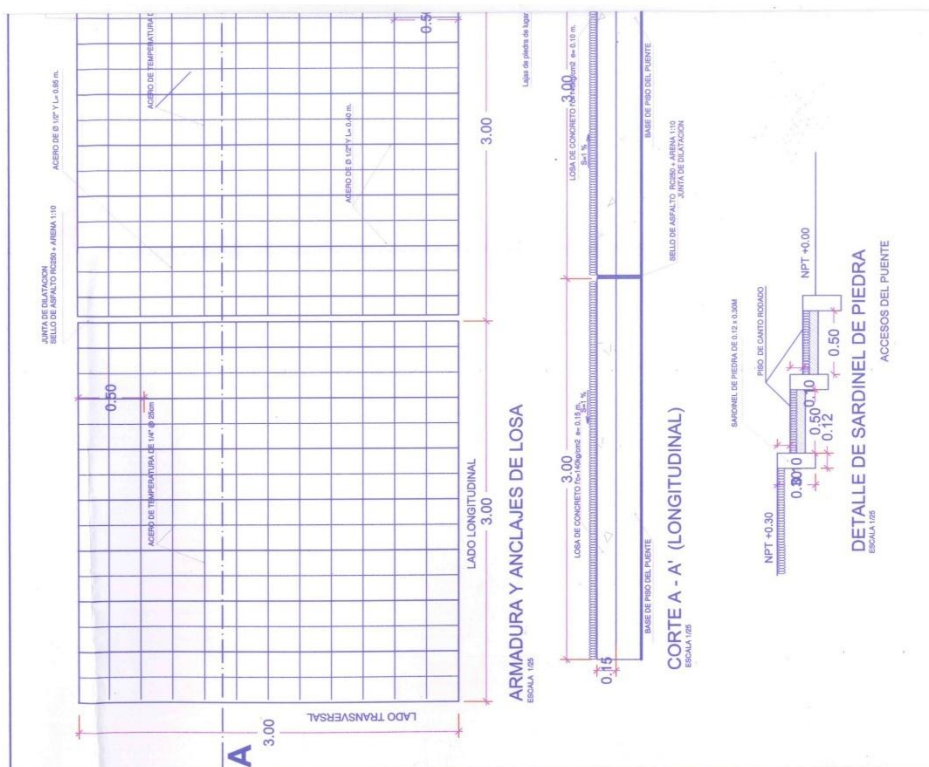
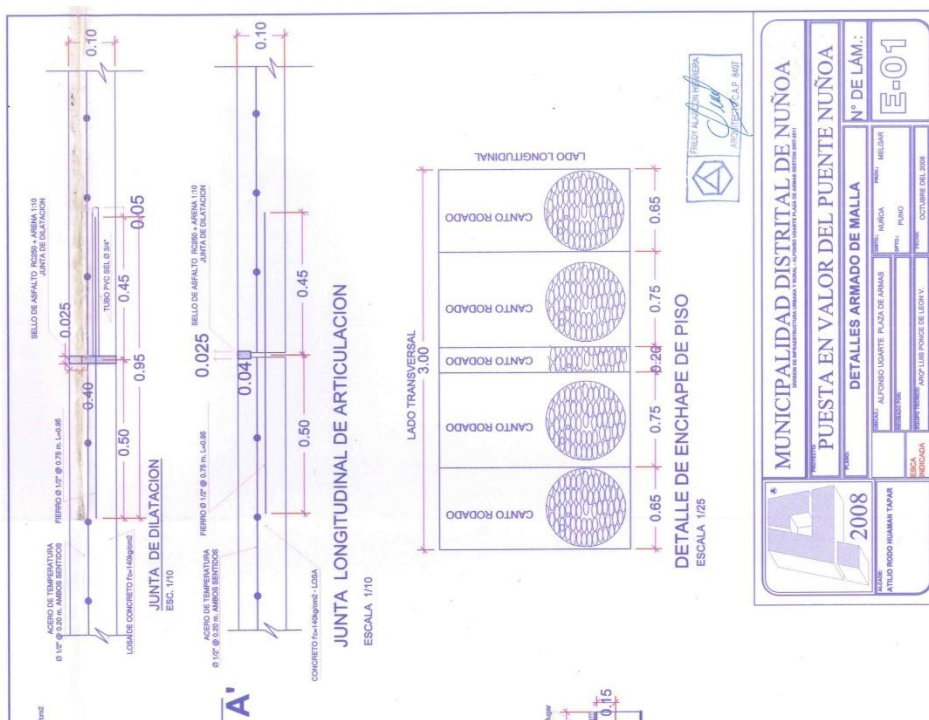
## Apéndice 5. Propuesta de puesta de valor año 2008





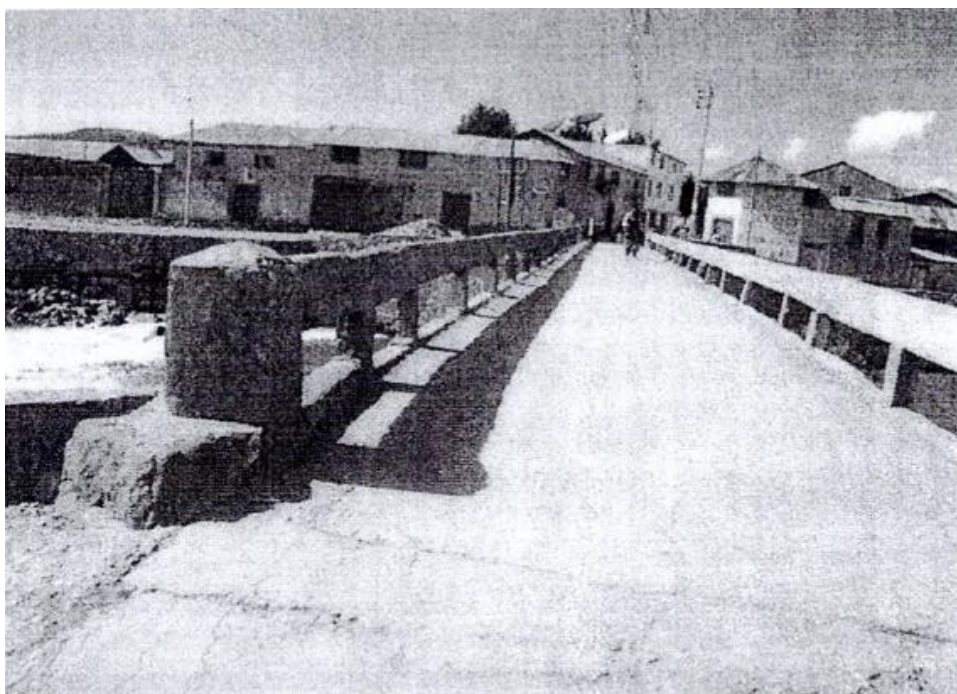
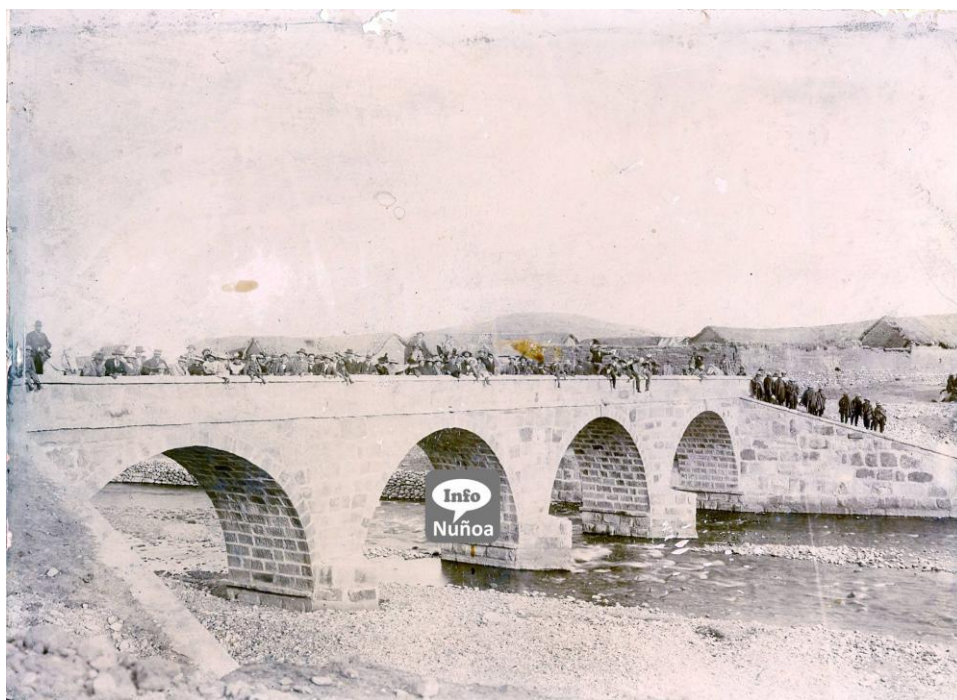








## Apéndice 6. Fotografías antiguas del lugar







### Apéndice 7. Fotografías actuales del lugar







## Apéndice 8. Códigos Python

*Código para generar la curva de capacidad en la dirección X.*

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Variable para la dirección y sentido
direccion_sentido = 'XX' # Cambia a 'X+', 'Y+', 'Y-' según
corresponda

# Nombre del archivo Excel de entrada
archivo = 'python1.xlsx'

# Cargar datos de desplazamiento desde 'Hoja2', columna número 3
hoja_desplazamiento = 'Hoja2'
df_desplazamiento = pd.read_excel(archivo,
sheet_name=hoja_desplazamiento)
desplazamiento_mm = df_desplazamiento.iloc[:, 2].values # Columna
número 3 (índice 2)
desplazamiento_mm = abs(desplazamiento_mm) # Aseguramos que sea
positivo

# Cargar datos de cortante basal desde 'Hoja1'
hoja_cortante = 'Hoja1'
df_cortante = pd.read_excel(archivo, sheet_name=hoja_cortante)
cortante_N = abs(df_cortante.sum(axis=1).values) # Sumar cada
fila para obtener el cortante basal en N (positivo)
cortante_tonf = cortante_N / 1000 # Convertir N a toneladas
fuerza

# Convertir a tipo float
desplazamiento_mm = desplazamiento_mm.astype(float)
cortante_tonf = cortante_tonf.astype(float)

#####
# Exportar datos a un nuevo archivo Excel
#####

# Crear DataFrame con los resultados
df_resultados = pd.DataFrame({
    'Desplazamiento (mm)': desplazamiento_mm,
    'Cortante basal (tonf)': cortante_tonf
})

# Nombre del archivo de salida
archivo_salida = f'{direccion_sentido}_Curva_Capacidad.xlsx'

# Guardar el DataFrame en Excel
df_resultados.to_excel(archivo_salida, index=False)

print(f"Archivo Excel exportado correctamente: {archivo_salida}")

#####
```

```

# Graficar los resultados
#####

# Obtener el cortante máximo
max_cortante_tonf = round(np.max(cortante_tonf), 3)

# Crear la figura y graficar
plt.figure(figsize=(10, 6), facecolor='blue')
plt.plot(desplazamiento_mm, cortante_tonf,
         label=f'Curva de Capacidad {direccion_sentido} - Vmax = {max_cortante_tonf} tonf',
         color='blue', linewidth=2)

plt.title(f'Curva de Capacidad {direccion_sentido}')
plt.xlabel('Desplazamiento (mm)')
plt.ylabel('Cortante basal (tonf)')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.tight_layout()

# Guardar y mostrar el gráfico
nombre_imagen = f'{direccion_sentido}_Curva_Capacidad.png'
plt.savefig(nombre_imagen, dpi=300)
plt.show()
plt.close()

```

*Código para generar la curva de capacidad en la dirección Y.*

```

import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Variable para la dirección y sentido
direccion_sentido = 'YY' # Cambia a 'X+', 'Y+', 'Y-' según corresponda

# Nombre del archivo Excel
archivo = 'python1.xlsx'

# Cargar datos de desplazamiento desde 'Hoja2', columna número 3
hoja_desplazamiento = 'Hoja2'
df_desplazamiento = pd.read_excel(archivo,
sheet_name=hoja_desplazamiento)
desplazamiento_mm = df_desplazamiento.iloc[:, 2].values # Columna
número 3 (índice 2)
desplazamiento_mm = abs(desplazamiento_mm) # Aseguramos que sea
positivo

# Cargar datos de cortante basal desde 'Hoja1'
hoja_cortante = 'Hoja1'
df_cortante = pd.read_excel(archivo, sheet_name=hoja_cortante)
cortante_N = abs(df_cortante.sum(axis=1).values) # Sumar cada
fila para obtener el cortante basal en N (positivo)

```



```

cortante_tonf = cortante_N / 1000 # Convertir KG a toneladas
fuerza

# Convertir a tipo float
desplazamiento_mm = desplazamiento_mm.astype(float)
cortante_tonf = cortante_tonf.astype(float)

# Crear DataFrame con ambos valores y exportar a Excel
df_exportar = pd.DataFrame({
    'Desplazamiento (mm)': desplazamiento_mm,
    'Cortante basal (tonf)': cortante_tonf
})
nombre_excel = f'{direccion_sentido}_Curva_Capacidad.xlsx'
df_exportar.to_excel(nombre_excel, index=False)

# Obtener el cortante máximo
max_cortante_tonf = round(np.max(cortante_tonf), 3)

# Crear la figura y graficar en color rojo
plt.figure(figsize=(10, 6), facecolor='lightgray')
plt.plot(desplazamiento_mm, cortante_tonf,
         label=f'Curva de Capacidad {direccion_sentido} - Vmax = {max_cortante_tonf} tonf',
         color='red', linewidth=2)

plt.title(f'Curva de Capacidad {direccion_sentido}')
plt.xlabel('Desplazamiento (mm)')
plt.ylabel('Cortante basal (tonf)')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.tight_layout()

# Guardar y mostrar el gráfico
nombre_imagen = f'{direccion_sentido}_Curva_Capacidad.png'
plt.savefig(nombre_imagen, dpi=300)
plt.show()
plt.close()

```

*Código para generar el punto de desempeño en la dirección X.*

```

import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

# 1. Carga de datos desde Excel para dirección XX
archivo = 'XX_Curva_Capacidad.xlsx'
datos = pd.read_excel(archivo, sheet_name='Sheet1')
delta_full = datos.iloc[:, 0].to_numpy() / 1000 # desplazamiento
(mm → m)
V_full = datos.iloc[:, 1].to_numpy() / 1 # fuerza (N → tonf)

# 2. Parámetro du elegido por el usuario
du = 0.00183 # modificar según necesidad

```

```

# 3. Interpolación de V_u en du
V_u = np.interp(du, delta_full, V_full)

# 4. Construcción de datos hasta du para cálculos (incluye punto
interpolado)
mask = delta_full < du
delta_calc = np.concatenate((delta_full[mask], [du]))
V_calc = np.concatenate((V_full[mask], [V_u]))

# 5. Cálculo de área real bajo la curva hasta du
area_real = np.trapz(V_calc, delta_calc)

# 6. Impresión de datos básicos
print("===== DATOS BÁSICOS XX =====")
print(f"du elegido = {du:.5f} m")
print(f"Valor interpolado Vu = {V_u:.5f} ton")
print(f"Área bajo la curva hasta du = {area_real:.5f} ton·m")
print()

# 7. Estimación de rigidez inicial Ki
Ki_aprox = (V_calc[2] / delta_calc[2]) * 1
print("===== RIGIDEZ INICIAL =====")
print(f"Ki ≈ V_calc[1]/delta_calc[1] * =
({V_calc[2]:.5f}/{delta_calc[2]:.6f}) * = {Ki_aprox:.5f} ton/m")
print()

# 8. Búsqueda iterativa del punto de fluencia hasta du
step = du / 1000
threshold = area_real / 1000
dy_sol = None

print("Iterando dy desde du/200 hasta |diferencia| ≤
area_real/100:")
for i in range(1, 601):
    dy = step * i
    Vy = Ki_aprox * dy
    area_tri = 0.5 * Ki_aprox * dy**2
    area_trap = 0.5 * (Vy + V_u) * (du - dy)
    area_bilin = area_tri + area_trap
    diferencia = abs(area_bilin - area_real)
    print(f" Iter {i:3d}: dy = {dy:.6f} m, area_tri =
{area_tri:.6f}, area_trap = {area_trap:.6f}, area_bilin =
{area_bilin:.6f}, diferencia = {diferencia:.6f}")
    if diferencia <= threshold:
        dy_sol = dy
        Vy_sol = Vy
        print(" → Condición cumplida (diferencia ≤
area_real/100)")
        break

if dy_sol is None:
    print("No se encontró dy que cumpla la condición en 600
iteraciones.")
    dy_sol = du
    Vy_sol = Ki_aprox * du

```



```

print()
print("===== RESULTADO DE FLUENCIA =====")
print(f"Desplazamiento de fluencia dy = {dy_sol:.5f} m")
print(f"Corte de fluencia Vy          = {Vy_sol:.5f} ton")
print()

# 9. Creación de la curva bilineal hasta du
delta_bilin = [0, dy_sol, du]
V_bilin      = [0, Vy_sol, V_u]

# 10. Gráfico: curva original (azul), recta bilineal (negro),
puntos con valores
plt.figure(figsize=(8, 5), facecolor='lightgray')
plt.plot(delta_full, V_full, color='blue', label='Curva
Original XX')
plt.plot(delta_bilin, V_bilin, '--', color='black', label='Recta
Bilineal')
plt.scatter([dy_sol], [Vy_sol], color='black', s=50,
            label=f'Punto Fluencia (dy={dy_sol:.5f} m,
Vy={Vy_sol:.5f} ton)')
plt.scatter([du], [V_u], color='blue', marker='x', s=50,
            label=f'Punto Desempeño (du={du:.5f} m, Vu={V_u:.5f}
ton)')
plt.title(f'ASCE 41 - Curva XX y Recta Bilineal hasta du =
{du:.5f} m')
plt.xlabel('Desplazamiento (m)')
plt.ylabel('Cortante (tonf)')
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.savefig('Desempeno_curva_XX.png', dpi=300)
plt.show()

```

*Código para generar el punto de desempeño en la dirección Y.*

```

import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

# 1. Carga de datos desde Excel (dirección YY)
archivo = 'YY_Curva_Capacidad.xlsx'
datos = pd.read_excel(archivo, sheet_name='Sheet1')

delta_full = datos.iloc[:, 0].to_numpy() / 1000 #
desplazamiento (mm → m)
V_full      = datos.iloc[:, 1].to_numpy() / 1 # fuerza (N → tonf)

# 2. Parámetro du elegido por el usuario
du = 0.0046 # modificar según necesidad

# 3. Interpolación de V_u en du
V_u = np.interp(du, delta_full, V_full)

```

```

# 4. Construcción de datos hasta du (para cálculos), incluyendo el
punto interpolado
mask = delta_full < du
delta_calc = np.concatenate((delta_full[mask], [du]))
V_calc     = np.concatenate((V_full[mask],    [V_u]))

# 5. Cálculo de área real bajo la curva hasta du
area_real = np.trapz(V_calc, delta_calc)

# 6. Impresión de datos básicos YY
print("==== DATOS BÁSICOS YY ====")
print(f"du elegido                = {du:.4f} m")
print(f"Valor interpolado Vu en du = {V_u:.4f} ton")
print(f"Área bajo la curva hasta du = {area_real:.4f} ton·m")
print()

# 7. Estimación de rigidez inicial Ki
Ki_aprox = (V_calc[2] / delta_calc[2]) * 1
print("==== RIGIDEZ INICIAL ====")
print(f"Ki ≈ V_calc[1]/delta_calc[1] * 0.9 =
({V_calc[1]:.4f}/{delta_calc[1]:.6f})*0.9 = {Ki_aprox:.4f} ton/m")
print()

# 8. Búsqueda iterativa del punto de fluencia hasta du
step      = du / 1000
threshold = area_real / 900
dy_sol    = None

print("Iterando dy desde du/200 hasta |diferencia| ≤
area_real/100:")
for i in range(1, 601):
    dy = step * i
    Vy = Ki_aprox * dy
    area_tri = 0.5 * Ki_aprox * dy**2
    area_trap = 0.5 * (Vy + V_u) * (du - dy)
    area_bilin = area_tri + area_trap
    diferencia = abs(area_bilin - area_real)
    print(f"  Iter {i:3d}: dy = {dy:.6f} m, area_tri =
{area_tri:.6f}, area_trap = {area_trap:.6f}, area_bilin =
{area_bilin:.6f}, diferencia = {diferencia:.6f}")
    if diferencia <= threshold:
        dy_sol = dy
        Vy_sol = Vy
        print("    → Condición cumplida (diferencia ≤
area_real/100)")
        break

if dy_sol is None:
    print("No se encontró dy que cumpla la condición en 600
iteraciones.")
    dy_sol = du
    Vy_sol = Ki_aprox * du

print()
print("==== RESULTADO DE FLUENCIA ====")
print(f"Desplazamiento de fluencia dy = {dy_sol:.6f} m")

```

```

print(f"Corte de fluencia Vy          = {Vy_sol:.4f} ton")
print()

# 9. Creación de la curva bilineal hasta du
delta_bilin = [0, dy_sol, du]
V_bilin     = [0, Vy_sol, V_u]

# 10. Gráfico: curva original (rojo), recta bilineal (negro),
puntos con valores
plt.figure(figsize=(8, 5), facecolor='lightgray')
plt.plot(delta_full, V_full, color='red', label='Curva
Original YY')
plt.plot(delta_bilin, V_bilin, '--', color='black', label='Recta
Bilineal')
plt.scatter([dy_sol], [Vy_sol], color='black', s=50,
            label=f'Punto Fluencia (dy={dy_sol:.4f} m,
Vy={Vy_sol:.4f} ton)')
plt.scatter([du], [V_u], color='red', marker='x', s=50,
            label=f'Punto Desempeño (du={du:.4f} m, Vu={V_u:.4f}
ton)')
plt.title(f'ASCE 41 - Curva YY y Recta Bilineal hasta du =
{du:.4f} m')
plt.xlabel('Desplazamiento (m)')
plt.ylabel('Cortante (tonf)')
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.savefig('Desempeno_curva_YY.png', dpi=300)
plt.show()

```

*Código para la bilinealización de la curva de capacidad en la dirección X.*

```

import numpy as np
import pandas as pd
from scipy.optimize import fsolve
import matplotlib.pyplot as plt

# =====
# 1. Carga de datos desde Excel
# =====
archivo = 'XX_Curva_Capacidad.xlsx'
datos = pd.read_excel(archivo, sheet_name='Sheet1')

# Se asume:
# columna 1 = desplazamiento
# columna 2 = cortante
delta_full = datos.iloc[:, 0].to_numpy(dtype=float)/1000
V_full = datos.iloc[:, 1].to_numpy(dtype=float)

# Si tus desplazamientos están en mm y deseas trabajar en m,
descomenta:
# delta_full = delta_full / 1000.0

delta_full = np.abs(delta_full)

```

```

V_full = np.abs(V_full)

# Eliminar filas con NaN
mask_validos = (~np.isnan(delta_full)) & (~np.isnan(V_full))
delta_full = delta_full[mask_validos]
V_full = V_full[mask_validos]

if len(delta_full) < 2:
    raise ValueError("Se necesitan al menos 2 puntos válidos en el Excel.")

# =====
# 2. Rigidez inicial
# =====
deltal, delta2 = delta_full[0], delta_full[1]
V1, V2 = V_full[0], V_full[1]

if np.isclose(delta2 - deltal, 0.0):
    raise ValueError("No se puede calcular Ki inicial porque delta2 - deltal = 0.")

Ki_inicial = (V2 - V1) / (delta2 - deltal)

if np.isclose(Ki_inicial, 0.0):
    raise ValueError("La rigidez inicial Ki resultó cero.")

# Intersección con eje X
delta0 = deltal - V1 / Ki_inicial

# Insertar punto inicial
delta = np.insert(delta_full, 0, delta0)
V = np.insert(V_full, 0, 0.0)

if len(delta) < 3:
    raise ValueError("Se requieren al menos 3 puntos luego de insertar el punto inicial.")

if np.isclose(delta[2] - delta[1], 0.0):
    raise ValueError("No se puede calcular Ki escalado porque delta[2] - delta[1] = 0.")

# =====
# 3. Definiciones generales
# =====
delta_u = delta[-1]
V_u = V[-1]
A_capacidad = np.trapezoid(V, delta)

# =====
# 4. Función de cálculo
# =====
def calcular(factor):
    try:
        Ki_base = (V[2] - V[1]) / (delta[2] - delta[1])
        Ki_escalado = Ki_base * factor

```

```

if np.isclose(Ki_escalado, 0.0):
    return [factor, np.nan, np.nan, np.nan, np.nan]

def eq(dy):
    return (
        0.5 * Ki_escalado * (dy - delta0) ** 2
        + ((Ki_escalado * (dy - delta0) + V_u) / 2.0) *
(delta_u - dy)
        - A_capacidad
    )

dy_inicial = (delta_u + delta0) / 2.0

# full_output=True para revisar si convergió
sol, info, ier, mesg = fsolve(eq, dy_inicial,
full_output=True)

if ier != 1:
    return [factor, np.nan, np.nan, np.nan, np.nan]

dy_sol = float(sol[0])

# Validaciones físicas básicas
if np.isnan(dy_sol) or np.isinf(dy_sol):
    return [factor, np.nan, np.nan, np.nan, np.nan]

Vy_sol = Ki_escalado * (dy_sol - delta0)

if np.isnan(Vy_sol) or np.isinf(Vy_sol):
    return [factor, np.nan, np.nan, np.nan, np.nan]

recta_Ke = Ki_escalado * (delta - delta0)

diferencias = np.abs(recta_Ke - V)

# Omitimos los dos primeros puntos
diferencias_util = diferencias[2:]

if len(diferencias_util) == 0:
    return [factor, np.nan, np.nan, np.nan, np.nan]

if np.all(np.isnan(diferencias_util)):
    return [factor, np.nan, np.nan, np.nan, np.nan]

idx_local = np.nanargmin(diferencias_util)
idx = idx_local + 2

delta_inter = delta[idx]
V_inter = V[idx]

if np.isclose(V_inter, 0.0) or np.isnan(V_inter):
    division = np.nan
else:
    division = (0.6 * Vy_sol) / V_inter

```

```

        return [factor, delta_inter, V_inter, 0.6 * Vy_sol,
division]

    except Exception:
        return [factor, np.nan, np.nan, np.nan, np.nan]

# =====
# 5. Búsqueda del mejor factor
# =====
factores = np.arange(0.5, 1.0001, 0.0001)
resultados = [calcular(f) for f in factores]

df_resultados = pd.DataFrame(resultados, columns=[
    'Factor',
    'Desplazamiento Intersección',
    'Cortante Intersección',
    '0.6 * Vy',
    'División'
])

# Forzar numéricos
for col in df_resultados.columns:
    df_resultados[col] = pd.to_numeric(df_resultados[col],
errors='coerce')

df_resultados['Error'] = np.abs(df_resultados['División'] - 1.0)

# Filtrar solo filas válidas
df_validos = df_resultados.dropna(subset=['Error']).copy()

print("Cantidad total de factores evaluados:", len(df_resultados))
print("Cantidad de factores válidos:", len(df_validos))
print("Cantidad de factores inválidos:", len(df_resultados) -
len(df_validos))

if df_validos.empty:
    print("\nNo se encontraron resultados válidos.")
    print("Revisa si la curva tiene forma adecuada o si la
ecuación del área no está generando soluciones.")
    print("\nPrimeras filas del DataFrame:")
    print(df_resultados.head(20))
    raise ValueError("Todos los resultados quedaron en NaN. No se
puede identificar el mejor factor.")

# Ojo: aquí usamos LOC, no ILOC
idx_mejor = df_validos['Error'].idxmin()
mejor = df_validos.loc[idx_mejor]

print("\n===== RESULTADOS DE LA BÚSQUEDA
=====")
print(df_validos.head(20))
print("\nEl mejor factor es: {:.4f}".format(mejor['Factor']))
print("Desplazamiento Intersección:
{:.6f}".format(mejor['Desplazamiento Intersección']))
print("Cortante Intersección: {:.6f}".format(mejor['Cortante
Intersección']))

```

```

print("0.6 * Vy: {:.6f}".format(mejor['0.6 * Vy']))
print("División: {:.6f}".format(mejor['División']))
print("Error: {:.6f}".format(mejor['Error']))

# =====
# 6. Cálculo final con el mejor factor
# =====
Ki_base = (V[2] - V[1]) / (delta[2] - delta[1])
Ki_mejor = Ki_base * mejor['Factor']

def eq_final(dy):
    return (
        0.5 * Ki_mejor * (dy - delta0) ** 2
        + ((Ki_mejor * (dy - delta0) + V_u) / 2.0) * (delta_u -
dy)
        - A_capacidad
    )

sol_final, info_final, ier_final, mesg_final = fsolve(
    eq_final,
    (delta_u + delta0) / 2.0,
    full_output=True
)

if ier_final != 1:
    raise ValueError(f"fsolve no convergió en el cálculo final:
(mesg_final)")

dy_sol = float(sol_final[0])
Vy_sol = Ki_mejor * (dy_sol - delta0)

delta_bilineal = [delta0, dy_sol, delta_u]
V_bilineal = [0.0, Vy_sol, V_u]

print("\n===== RESULTADOS FINALES =====")
print(f"Punto de fluencia: Δy = {dy_sol:.6f}, Vy = {Vy_sol:.6f}")
print(f"Punto final: Δu = {delta_u:.6f}, Vu = {V_u:.6f}")

# =====
# 7. Gráfico final
# =====
plt.figure(figsize=(10, 8), facecolor='lightgray')
plt.plot(delta, V, color='blue', linewidth=2, label='Curva de
Capacidad - Dirección XX')
plt.plot(delta_bilineal, V_bilineal, linestyle='--',
color='black', linewidth=2, label='Curva Bilineal')

plt.title('Bilinealización de la Curva de Capacidad - Dirección
XX', fontsize=14)
plt.xlabel('Desplazamiento (m)', fontsize=12, fontweight='bold')
plt.ylabel('Cortante Basal (tonf)', fontsize=12,
fontweight='bold')
plt.grid(True, which='both', linestyle='--', linewidth=0.7)
plt.legend(fontsize=10)
plt.tight_layout()

```



```
# =====
# 8. Guardar imagen
# =====
nombre_imagen = 'XX_BilinealizacionCapacidad.png'
plt.savefig(nombre_imagen, dpi=300, facecolor='lightgray',
            bbox_inches='tight')
plt.show()
plt.close()
```

*Código para la bilinealización de la curva de capacidad en la dirección Y.*

```
import numpy as np
import pandas as pd
from scipy.optimize import fsolve
import matplotlib.pyplot as plt

# =====
# 1. Carga de datos desde Excel
# =====
archivo = 'YY_Curva_Capacidad.xlsx'
datos = pd.read_excel(archivo, sheet_name='Sheet1')

# Se asume:
# columna 1 = desplazamiento
# columna 2 = cortante
delta_full = datos.iloc[:, 0].to_numpy(dtype=float)/1000
V_full = datos.iloc[:, 1].to_numpy(dtype=float)

# Si tus desplazamientos están en mm y deseas trabajar en m,
# descomenta:
# delta_full = delta_full / 1000.0

delta_full = np.abs(delta_full)
V_full = np.abs(V_full)

# Eliminar filas con NaN
mask_validos = (~np.isnan(delta_full)) & (~np.isnan(V_full))
delta_full = delta_full[mask_validos]
V_full = V_full[mask_validos]

if len(delta_full) < 2:
    raise ValueError("Se necesitan al menos 2 puntos válidos en el Excel.")

# =====
# 2. Rigidez inicial
# =====
delta1, delta2 = delta_full[0], delta_full[1]
V1, V2 = V_full[0], V_full[1]

if np.isclose(delta2 - delta1, 0.0):
    raise ValueError("No se puede calcular Ki inicial porque delta2 - delta1 = 0.")
```



```

Ki_inicial = (V2 - V1) / (delta2 - delta1)

if np.isclose(Ki_inicial, 0.0):
    raise ValueError("La rigidez inicial Ki resultó cero.")

# Intersección con eje X
delta0 = delta1 - V1 / Ki_inicial

# Insertar punto inicial
delta = np.insert(delta_full, 0, delta0)
V = np.insert(V_full, 0, 0.0)

if len(delta) < 3:
    raise ValueError("Se requieren al menos 3 puntos luego de
insertar el punto inicial.")

if np.isclose(delta[2] - delta[1], 0.0):
    raise ValueError("No se puede calcular Ki escalado porque
delta[2] - delta[1] = 0.")

# =====
# 3. Definiciones generales
# =====
delta_u = delta[-1]
V_u = V[-1]
A_capacidad = np.trapezoid(V, delta)

# =====
# 4. Función de cálculo
# =====
def calcular(factor):
    try:
        Ki_base = (V[2] - V[1]) / (delta[2] - delta[1])
        Ki_escalado = Ki_base * factor

        if np.isclose(Ki_escalado, 0.0):
            return [factor, np.nan, np.nan, np.nan, np.nan]

        def eq(dy):
            return (
                0.5 * Ki_escalado * (dy - delta0) ** 2
                + ((Ki_escalado * (dy - delta0) + V_u) / 2.0) *
(delta_u - dy)
                - A_capacidad
            )

        dy_inicial = (delta_u + delta0) / 2.0

        # full_output=True para revisar si convergió
        sol, info, ier, mesg = fsolve(eq, dy_inicial,
full_output=True)

        if ier != 1:
            return [factor, np.nan, np.nan, np.nan, np.nan]

        dy_sol = float(sol[0])

```

```

# Validaciones físicas básicas
if np.isnan(dy_sol) or np.isinf(dy_sol):
    return [factor, np.nan, np.nan, np.nan, np.nan]

Vy_sol = Ki_escalado * (dy_sol - delta0)

if np.isnan(Vy_sol) or np.isinf(Vy_sol):
    return [factor, np.nan, np.nan, np.nan, np.nan]

recta_Ke = Ki_escalado * (delta - delta0)

diferencias = np.abs(recta_Ke - V)

# Omitimos los dos primeros puntos
diferencias_util = diferencias[2:]

if len(diferencias_util) == 0:
    return [factor, np.nan, np.nan, np.nan, np.nan]

if np.all(np.isnan(diferencias_util)):
    return [factor, np.nan, np.nan, np.nan, np.nan]

idx_local = np.nanargmin(diferencias_util)
idx = idx_local + 2

delta_inter = delta[idx]
V_inter = V[idx]

if np.isclose(V_inter, 0.0) or np.isnan(V_inter):
    division = np.nan
else:
    division = (0.6 * Vy_sol) / V_inter

return [factor, delta_inter, V_inter, 0.6 * Vy_sol,
division]

except Exception:
    return [factor, np.nan, np.nan, np.nan, np.nan]

# =====
# 5. Búsqueda del mejor factor
# =====
factores = np.arange(0.5, 1.0001, 0.0001)
resultados = [calcular(f) for f in factores]

df_resultados = pd.DataFrame(resultados, columns=[
    'Factor',
    'Desplazamiento Intersección',
    'Cortante Intersección',
    '0.6 * Vy',
    'División'
])

# Forzar numéricos
for col in df_resultados.columns:

```

```

df_resultados[col] = pd.to_numeric(df_resultados[col],
errors='coerce')

df_resultados['Error'] = np.abs(df_resultados['División'] - 1.0)

# Filtrar solo filas válidas
df_validos = df_resultados.dropna(subset=['Error']).copy()

print("Cantidad total de factores evaluados:", len(df_resultados))
print("Cantidad de factores válidos:", len(df_validos))
print("Cantidad de factores inválidos:", len(df_resultados) -
len(df_validos))

if df_validos.empty:
    print("\nNo se encontraron resultados válidos.")
    print("Revisa si la curva tiene forma adecuada o si la
ecuación del área no está generando soluciones.")
    print("\nPrimeras filas del DataFrame:")
    print(df_resultados.head(20))
    raise ValueError("Todos los resultados quedaron en NaN. No se
puede identificar el mejor factor.")

# Ojo: aquí usamos LOC, no ILOC
idx_mejor = df_validos['Error'].idxmin()
mejor = df_validos.loc[idx_mejor]

print("\n===== RESULTADOS DE LA BÚSQUEDA
=====")
print(df_validos.head(20))
print("\nEl mejor factor es: {:.4f}".format(mejor['Factor']))
print("Desplazamiento Intersección:
{:.6f}".format(mejor['Desplazamiento Intersección']))
print("Cortante Intersección: {:.6f}".format(mejor['Cortante
Intersección']))
print("0.6 * Vy: {:.6f}".format(mejor['0.6 * Vy']))
print("División: {:.6f}".format(mejor['División']))
print("Error: {:.6f}".format(mejor['Error']))

# =====
# 6. Cálculo final con el mejor factor
# =====
Ki_base = (V[2] - V[1]) / (delta[2] - delta[1])
Ki_mejor = Ki_base * mejor['Factor']

def eq_final(dy):
    return (
        0.5 * Ki_mejor * (dy - delta0) ** 2
        + ((Ki_mejor * (dy - delta0) + V_u) / 2.0) * (delta_u -
dy)
        - A_capacidad
    )

sol_final, info_final, ier_final, mesg_final = fsolve(
    eq_final,
    (delta_u + delta0) / 2.0,
    full_output=True

```

```

)

if ier_final != 1:
    raise ValueError(f"fsolve no convergió en el cálculo final:
{mesq_final}")

dy_sol = float(sol_final[0])
Vy_sol = Ki_mejor * (dy_sol - delta0)

delta_bilineal = [delta0, dy_sol, delta_u]
V_bilineal = [0.0, Vy_sol, V_u]

print("\n===== RESULTADOS FINALES =====")
print(f"Punto de fluencia:  $\Delta y = \{dy\_sol:.6f\}$ ,  $V_y = \{Vy\_sol:.6f\}$ ")
print(f"Punto final:  $\Delta u = \{delta\_u:.6f\}$ ,  $V_u = \{V\_u:.6f\}$ ")

# =====
# 7. Gráfico final
# =====
plt.figure(figsize=(10, 8), facecolor='lightgray')
plt.plot(delta, V, color='red', linewidth=2, label='Curva de
Capacidad - Dirección YY')
plt.plot(delta_bilineal, V_bilineal, linestyle='--',
color='black', linewidth=2, label='Curva Bilineal')

plt.title('Bilinealización de la Curva de Capacidad - Dirección
YY', fontsize=14)
plt.xlabel('Desplazamiento (m)', fontsize=12, fontweight='bold')
plt.ylabel('Cortante Basal (tonf)', fontsize=12,
fontweight='bold')
plt.grid(True, which='both', linestyle='--', linewidth=0.7)
plt.legend(fontsize=10)
plt.tight_layout()

# =====
# 8. Guardar imagen
# =====
nombre_imagen = 'YY_BilinealizacionCapacidad.png'
plt.savefig(nombre_imagen, dpi=300, facecolor='lightgray',
bbox_inches='tight')
plt.show()
plt.close()

```

*Código para la sectorización del desempeño en la dirección X.*

```

import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

# =====
# Parámetros clave
# =====
# Punto de fluencia
dy_sol = 0.001013

```

```

Vy_sol = 843.39

# Punto de desempeño
delta_desempeno = 0.00272
V_desempeno = 886.75

# Punto final
delta_u = 0.17478
V_u = 632.73

# =====
# Cargar datos desde Excel (Dirección XX+)
# =====
archivo = 'XX_Curva_Capacidad.xlsx'
datos = pd.read_excel(archivo, sheet_name='Sheet1')
delta = datos.iloc[:, 0].to_numpy() / 1000 # convertir mm → m
V = datos.iloc[:, 1].to_numpy()           # ya en tonf
delta = np.abs(delta)
V = np.abs(V)

# =====
# Cálculo de los límites SEAO
# =====
dp = delta_u - dy_sol # desplazamiento plástico
limite1 = dy_sol
limite2 = dy_sol + 0.3 * dp
limite3 = dy_sol + 0.6 * dp
limite4 = dy_sol + 0.8 * dp
limite5 = delta_u

limites = [limite1, limite2, limite3, limite4, limite5]
colores = ['green', 'yellow', 'orange', 'red']
etiquetas = ['Funcional', 'Resguardo de vida', 'Cerca al colapso',
'Colapso']

# =====
# Gráfico
# =====
plt.figure(figsize=(10, 8), facecolor='lightgray')
plt.plot(delta, V, color='blue', linewidth=2, label='Curva de
Capacidad - Dirección XX+')

# Líneas verticales y franjas de desempeño
max_cortante = max(V) * 1.2
for i in range(len(limites) - 1):
    plt.axvline(x=limites[i], color='k', linestyle='--',
linewidth=1)
    plt.fill_betweenx(
        [0, max_cortante],
        limites[i],
        limites[i + 1],
        color=colores[i],
        alpha=0.25,
        label=f'{etiquetas[i]}: {limites[i]:.4f} m -
{limites[i+1]:.4f} m'
    )

```

```

plt.axvline(x=limites[-1], color='k', linestyle='--', linewidth=1)

# =====
# Punto de desempeño (único punto visible)
# =====
plt.scatter(delta_desempeno, V_desempeno, color='black', s=100,
            zorder=6,
            label=f'Punto Desempeño (du={delta_desempeno:.4f} m,
Vu={V_desempeno:.4f} tonf)')

# =====
# Configuración del gráfico
# =====
plt.title('Sectorización de Desempeño (SEAO) - Dirección XX',
          fontsize=14)
plt.xlabel('Desplazamiento (m)', fontsize=12, fontweight='bold')
plt.ylabel('Cortante Basal (tonf)', fontsize=12,
           fontweight='bold')
plt.xlim(0, delta_u * 1.1)
plt.ylim(0, max_cortante)
plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.7)
plt.legend(loc='lower right', fontsize=9)
plt.tight_layout()

# =====
# Guardar imagen
# =====
nombre_imagen = 'XX+ DesempenoSEAO.png'
plt.savefig(nombre_imagen, dpi=300, facecolor='lightgray',
           bbox_inches='tight')
plt.show()
plt.close()

```

*Código para la sectorización del desempeño en la dirección Y.*

```

import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

# =====
# Parámetros
# =====
# Punto de desempeño
delta_desempeno = 0.0046 # m
V_desempeno = 335.72 # tonf

# Punto de fluencia y último solo para cálculos de límites (no se
mostrarán)
dy_sol = 0.0128
delta_u = 0.128

# =====
# Cargar datos desde Excel (dirección YY)
# =====

```

```

archivo = 'YY_Curva_Capacidad.xlsx'
datos = pd.read_excel(archivo, sheet_name='Sheet1')
delta = datos.iloc[:, 0].to_numpy()/1000 # convertir mm → m
V = datos.iloc[:, 1].to_numpy()
delta = np.abs(delta)
V = np.abs(V)

# =====
# Cálculo del desplazamiento plástico y límites de desempeño
# =====
dp = delta_u - dy_sol
limite1 = dy_sol
limite2 = dy_sol + 0.3 * dp
limite3 = dy_sol + 0.6 * dp
limite4 = dy_sol + 0.8 * dp
limite5 = delta_u

limites = [limite1, limite2, limite3, limite4, limite5]
colores = ['green', 'yellow', 'orange', 'red']
etiquetas = ['Funcional', 'Resguardo de vida', 'Cerca al colapso',
             'Colapso']

# =====
# Gráfico de la curva
# =====
plt.figure(figsize=(10, 8), facecolor='lightgray')
plt.plot(delta, V, color='red', linewidth=2, label='Curva de
Capacidad - Dirección YY')

# Líneas verticales y relleno de franjas
max_cortante = max(V) * 1.2
for i in range(len(limites) - 1):
    plt.axvline(x=limites[i], color='k', linestyle='--',
                linewidth=1)
    plt.fill_betweenx(
        [0, max_cortante],
        limites[i],
        limites[i + 1],
        color=colores[i],
        alpha=0.25,
        label=f'{etiquetas[i]}: {limites[i]:.4f} m -
{limites[i+1]:.4f} m'
    )
plt.axvline(x=limites[-1], color='k', linestyle='--', linewidth=1)

# =====
# Punto de desempeño (único punto mostrado)
# =====
plt.scatter(delta_desempeno, V_desempeno, color='black', s=100,
            zorder=6,
            label=f'Punto Desempeño (du={delta_desempeno:.4f} m,
Vu={V_desempeno:.4f} ton)')

# =====
# Configuración del gráfico
# =====

```

```

plt.title('Sectorización de Desempeño (SEAO) - Dirección YY',
          fontsize=14)
plt.xlabel('Desplazamiento (m)', fontsize=12, fontweight='bold')
plt.ylabel('Cortante Basal (tonf)', fontsize=12,
           fontweight='bold')
plt.xlim(0, delta_u * 1.2)
plt.ylim(0, max_cortante)
plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.7)
plt.legend(loc='lower right', fontsize=9)
plt.tight_layout()

# =====
# Guardar imagen
# =====
nombre_imagen = 'YY_DesempenoSEAO.png'
plt.savefig(nombre_imagen, dpi=300, facecolor='lightgray',
            bbox_inches='tight')
plt.show()
plt.close()

```