

18

EDUCACIÓN EN INGENIERÍA CIVIL: EVALUACIÓN DE LA RIGIDEZ Y SIMETRÍA EN PUENTES DE SECCIÓN MIXTA

CIVIL ENGINEERING EDUCATION: STIFFNESS AND SYMMETRY EVALUATION OF MIXED-SECTION BRIDGES

Alonso Ulises Jaramillo Hidalgo¹

E-mail: alonso.jaramillo.58@est.ucacue.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3342-083X>

Juan Sebastián Maldonado Noboa¹

E-mail: jmaldonadon@ucacue.edu.ec

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

Cesar Humberto Maldonado Noboa¹

E-mail: cmaldonadon@ucacue.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0383-5460>

¹ Universidad Católica de Cuenca. Ecuador.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Jaramillo Hidalgo, A. U., Maldonado Noboa, J. S., y Maldonado Noboa, C. H. (2024). Educación en Ingeniería Civil: evaluación de la rigidez y simetría en puentes de sección mixta. *Revista Conrado*, 20(97), 207-217.

RESUMEN

Esta investigación se centra en la evaluación de la simetría estructural del puente Zamora-Loja, una infraestructura crucial para las áreas de Loja y Zamora. Dada la preocupación por vibraciones excesivas, se llevaron a cabo ensayos geofísicos meticulosos. El objetivo principal fue analizar la respuesta del puente a diversas condiciones de carga, especialmente su simetría, esencial para la seguridad y eficiencia. Se utilizó un camión de prueba para transitar por diferentes zonas del puente, registrando variaciones reveladoras en su comportamiento. Los resultados destacaron una variación del 17.93% en el comportamiento estructural cuando el camión transitó por el carril equipado con el geófono, indicando una distribución asimétrica de la carga. En contraste, el carril sin el geófono mostró una variación del 8.82%, sugiriendo una respuesta estructural diferente. Al transitar por el carril central, la variación fue del 16.30%, reflejando una respuesta intermedia a cargas centradas. Complementando estos hallazgos, se empleó un modelo computacional basado en elementos finitos, que incorporó datos reales del puente. La comparación entre resultados reales y computacionales proporciona una perspectiva integral del comportamiento del puente, siendo una herramienta invaluable para futuras intervenciones. Estos ensayos no solo ofrecen una visión clara de la integridad y seguridad del puente, sino que también establecen un precedente para el uso de tecnologías avanzadas en la evaluación de infraestructuras críticas.

Palabras clave:

Simetría estructural, vibraciones existentes, ensayos geofísicos, modelo computacional y cargas asimétricas.

ABSTRACT

This research focuses on the evaluation of the structural symmetry of the Zamora-Loja bridge, a crucial infrastructure for the Loja and Zamora areas. Given the concern for excessive vibrations, meticulous geophysical tests were carried out. The main objective was to analyze the bridge's response to various loading conditions, especially its symmetry, essential for safety and efficiency. A test truck was used to drive over different areas of the bridge, recording revealing variations in its behavior. The results highlighted a 17.93% variation in structural behavior when the truck traveled through the lane equipped with the geophone, indicating an asymmetrical load distribution. In contrast, the lane without the geophone showed a variation of 8.82%, suggesting a different structural response. When traveling in the center lane, the variation was 16.30%, reflecting an intermediate response to centered loads. Complementing these findings, a finite element based computational model was used, incorporating real bridge data. The comparison between actual and computational results provides a comprehensive perspective of the bridge behavior and is an invaluable tool for future interventions. These tests not only provide a clear view of the integrity and safety of the bridge, but also set a precedent for the use of advanced technologies in the evaluation of critical infrastructure.

Keywords:

Structural symmetry, excessive vibrations, geophysical tests, computational model, asymmetric loads.

INTRODUCCIÓN

Debido a las patologías previas identificadas (vibraciones excesivas, deterioro en la losa y baja corrosión en los elementos de acero) en el puente de vigas de acero, se harán ensayos enfocados en el análisis detallado de su geometría, evaluando los desplazamientos de cada viga mediante vibraciones ambientales y análisis computacional utilizando modelos finitos. Estos ensayos son fundamentales debido a las observaciones de vibraciones excesivas en un lado del carril, lo que plantea serias preocupaciones sobre la integridad estructural y la seguridad del puente. La relevancia de esta investigación radica no solo en su importancia inmediata en términos de seguridad e integridad estructural, sino también en su valiosa contribución al campo de la ingeniería civil, proporcionando conocimientos esenciales sobre las respuestas estructurales de los puentes de acero bajo cargas dinámicas. Como infraestructuras críticas, los puentes requieren un monitoreo constante y riguroso, y la aplicación de modelos finitos en este análisis representa un progreso significativo en la metodología de análisis estructural, permitiendo una comprensión detallada y precisa de cómo las estructuras responden a diferentes condiciones ambientales y de carga. La presencia de vibraciones anormalmente altas en una parte específica del puente sugiere posibles deficiencias en el diseño o en el proceso constructivo y también podría indicar un deterioro progresivo capaz de comprometer la seguridad a largo plazo. Esta situación demanda una evaluación integral de toda la superestructura para identificar áreas problemáticas y para entender la distribución global de esfuerzos y deformaciones, lo que es esencial para tomar decisiones informadas sobre reparaciones o refuerzos necesarios.

El estudio de este puente, con sus características particulares, ofrece comparaciones valiosas con casos históricos de fallas en puentes que mostraron síntomas similares. Hay numerosos ejemplos documentados donde las vibraciones excesivas o desplazamientos anormales precedieron a fallas estructurales significativas. Mediante un análisis comparativo con estos casos, se pueden identificar patrones y diferencias clave que ayudan a comprender mejor la situación actual del puente y a prevenir futuras incidencias. Este tipo de investigación es crucial para el desarrollo de prácticas de diseño y mantenimiento más robustas y confiables en la construcción de puentes de acero, contribuyendo así a la seguridad a largo plazo de estas estructuras esenciales. Además, el análisis detallado de casos de estudio como este puede influir en la actualización de normativas y estándares en la ingeniería civil, impulsando mejoras en los procesos de diseño y construcción de puentes para adaptarse a los

desafíos emergentes en términos de cargas ambientales y de tráfico.

Los puentes son estructuras esenciales para la conectividad y el transporte en muchas ciudades y países del mundo. Sin embargo, la falta de mantenimiento y supervisión adecuada puede llevar al desplome o al fracaso estructural de estos. A continuación, se presenta un resumen de algunos puentes que fracasaron, en parte, debido a la falta de mantenimiento o revisión de salud estructural:

El colapso de puentes es un fenómeno global que ha afectado a varios países, resaltando la importancia crítica del mantenimiento y la supervisión adecuada en la infraestructura. En Estados Unidos, el puente I-35W sobre el río Mississippi colapsó en 2007 debido al dimensionamiento inadecuado de placas de refuerzo y el peso adicional de obras en curso (Wilson y Eaton, 1995). En Italia, el puente Morandi se derrumbó en 2018 tras años de advertencias sobre su integridad estructural, posiblemente debido a cables de suspensión corroídos (Gómez Araujo et al., 2010; Villani, 2020). Vietnam también enfrentó una tragedia en 2007 cuando una sección del puente Can Tho colapsó durante su construcción, apuntando a fallos en procedimientos y diseño estructural (El Mundo, 2007). Estos incidentes en naciones pioneras en investigación estructural subrayan la vulnerabilidad de tales infraestructuras. Ecuador también ha sufrido estas catástrofes, como lo demuestra el colapso del puente San Francisco del Cabo en 2023, atribuido a la falta de mantenimiento (El Universo, 2023), el puente sobre el río Zamora en la parroquia Los Encuentros en 2020 también colapso por falta de mantenimiento (El Universo, 2020), mostrando que los problemas de integridad de puentes son un desafío global que requiere atención constante.

La provincia de Zamora Chinchipe es una de las provincias con mayor registro (11.11%) de puentes que han colapsado en El Ecuador en los últimos 23 años, seguidas de las provincias de Pichincha (13.89%) y Guayas (18.06%), entre las múltiples causas tenemos la falta de criterio técnico para la realización de monitoreo de manera frecuente para la ejecución de acciones preventivas y correctivas que eviten el colapso de estas estructuras (Martínez García, 2014; Marín y Maldonado, 2022). La salud estructural de un puente no solo garantiza la seguridad de quienes lo transitan, sino que también evita costos significativos relacionados con reparaciones

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología empleada en este estudio combinó enfoques bibliográficos y de campo para obtener una

comprensión integral del tema. La investigación bibliográfica consistió en revisar exhaustivamente fuentes académicas, libros, artículos y documentos relacionados con la investigación. Por otro lado, la metodología de campo incluyó la recopilación de datos directamente en el entorno de estudio. Se llevaron a cabo observaciones detalladas, estudios insitu, para obtener información específica y actualizada (Erazo, 2021).

La zona de estudio se resume en la Tabla 1.

Tabla 1. Ubicación geográfica.

Provincia	Zamora Chinchipe
Cantón	Zamora
Sector	Vía Zamora – Loja, sobre el río Sabanilla
Coordenadas	Este(X) = 720524.187 Norte(Y) =9552832.300

Fuente: Elaboración de autores

Para realizar una evaluación precisa de la condición actual del puente sobre el río Sabanilla en la provincia de Zamora Chinchipe, se empleará el análisis de vibración ambiental, una técnica moderna que permite obtener información detallada sobre la rigidez y comportamiento dinámico de la estructura. A través de este análisis, se busca evaluar si la carga se transmite de manera simétrica en el puente, especialmente cuando se consideran ambos carriles de tránsito.

Un aspecto crítico de este estudio será la evaluación simultánea de las vigas del puente. Al observar cómo reaccionan estas vigas ante cargas dinámicas, podemos deducir aspectos esenciales sobre la distribución de carga y la simetría en la transmisión de estas fuerzas. Para ello, se va a utilizar la siguiente metodología: hacer pasar un camión por el puente, sin intervención del tráfico regular, esta acción permitirá simular una carga en movimiento y evaluar cómo el puente transmite y distribuye esa carga en ambos sentidos. Con los resultados de esta evaluación, no solo podremos comprender mejor la salud actual del puente seleccionado, sino también establecer directrices para futuras intervenciones, monitoreos o mantenimientos (Parreño y Nieto, 2023).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se inspeccionó el lugar y se levantó información, se midió cada una de las dovelas que conforman las vigas para determinar su geometría. Los datos topográficos y geométricos obtenidos in situ se resumen en la Tabla 2, así como los materiales de sus elementos.

Tabla 2: Datos topográficos y geométricos.

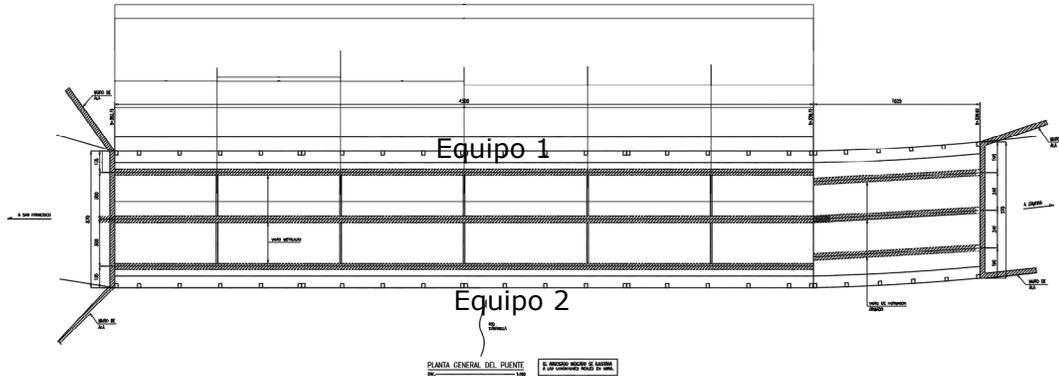
Ítem	Cantidad	Unidad	Ítem	Cantidad	Unidad
Luz	43.00	m	Diafragmas internos	5.00	u
Ancho de calzada	8.50	m	Ancho de carga VC	3.20	m
Ancho de vereda	0.75	m	f'c hormigón en losa	240.00	kg/cm ²
Nro. de carriles	2.00	u	concreto	2400.00	kg/m ³
Nro. de vigas	3.00	u	pavimento	2200.00	kg/m ³
Separación de vigas	3.20	m	Ec	234002.20	kg/cm ²
Gálibo	9.70	m	Es	2030000	kg/cm ²
Ancho total, puente	10.00	m	fy acero de refuerzo	4200.00	kg/cm ²
Ancho de losa	8.90	m	fy acero A-36	2536.92	kg/cm ²
Espesor losa maciza	0.20	m	Módulo de poisson	0.2	
Espesor pavimento	0.05	m	Relación modular n	0.12	

Fuente: Elaboración de autores

Planos del puente. - Con el propósito de lograr una comprensión integral y detallada de la estructura del puente, se llevó a cabo un análisis exhaustivo del desplazamiento y otros modelos estructurales relevantes.

Este análisis se basó y adaptó en función de los planos arquitectónicos y estructurales que se muestran en las Figuras 1 y 2. Dichos planos ofrecen una representación visual precisa de la infraestructura, y serán esenciales para validar y correlacionar nuestros hallazgos experimentales con las características geométricas y estructurales previstas en el diseño original del puente.

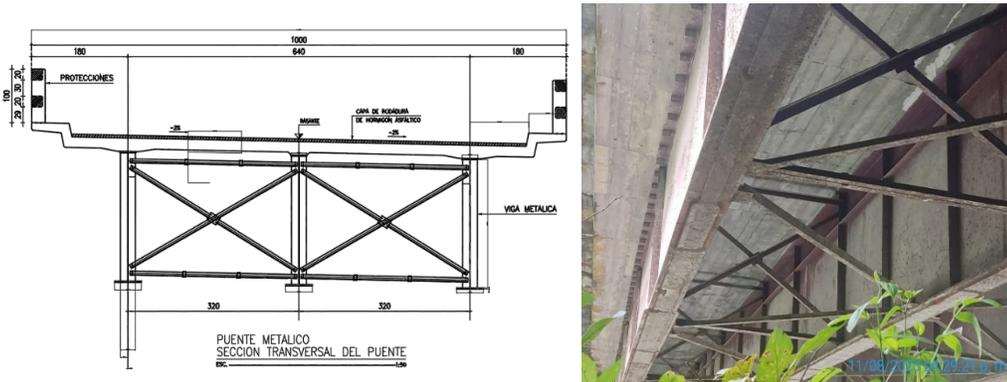
Fig. 1: Planta del puente.



Fuente: Elaboración de autores

Se desarrollará un modelo del puente utilizando el Método de Elementos Finitos (FEM)

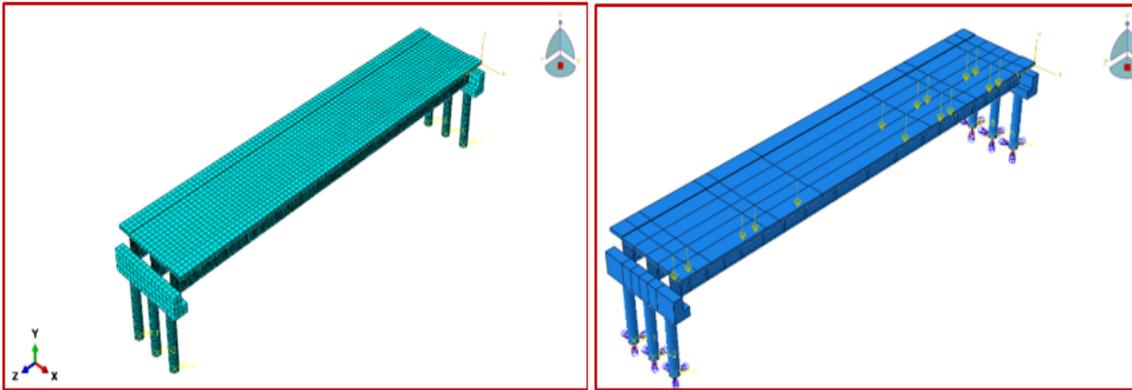
Fig. 2: Sección transversal del tablero y vigas metálicas del puente.



Fuente: Elaboración de autores

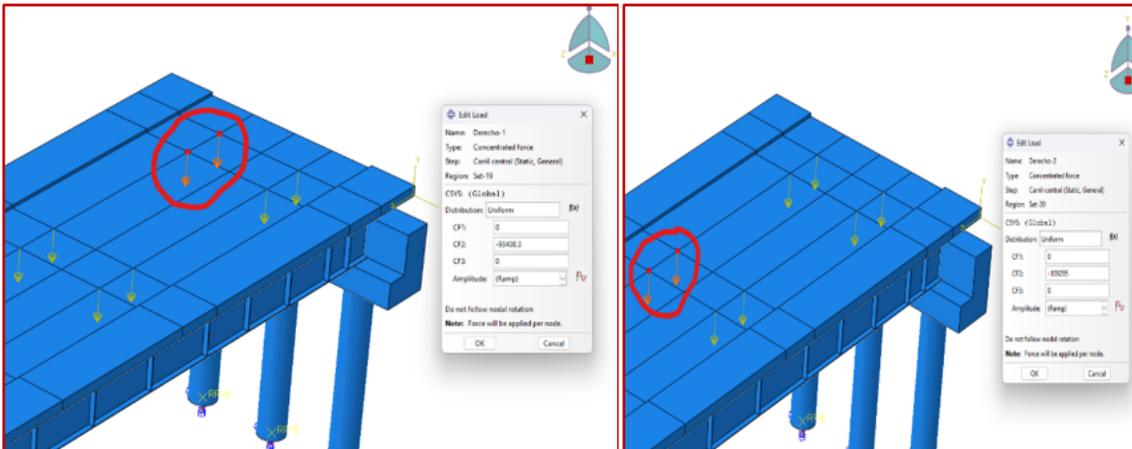
Para analizar la estructura bajo las cargas específicas del camión mencionado anteriormente.-Este método se emplea para evaluar y predecir el comportamiento de estructuras complejas, como puentes, bajo diversas condiciones de carga (Aparicio y Estradera, 1985). La modelación de la geometría del puente se realizará con precisión, desglosando cada componente en elementos finitos para construir un modelo global detallado, integrando las propiedades mecánicas de los materiales utilizados. Las condiciones de frontera simularán el comportamiento real, mientras que las cargas del camión se aplicarán en puntos críticos. El proceso de mallado dividirá la geometría en elementos discretos, crucial para la precisión de los resultados. Posteriormente, se resolverán las ecuaciones para analizar parámetros como desplazamientos, tensiones y deformaciones, evaluando así la seguridad y rendimiento del puente. Los resultados del modelo de elementos finitos (FEM) se validarán con datos teóricos o experimentales, y se considerarán optimizaciones y mejoras basadas en el análisis para asegurar un diseño robusto y eficiente como se muestra en las Figuras 3 y 4.

Fig. 3: Modelo FEM y cargas del camión transitando.



Fuente: Elaboración de autores

Fig. 4: Cargas ejes posteriores y centrales.



Fuente: Elaboración de autores

Para la evaluación detallada de la salud estructural del puente, se llevaron a cabo ensayos de vibración ambiental utilizando un geófono de 4Hz. Para maximizar la precisión de la recolección de datos, estos geófonos se posicionaron estratégicamente en la mitad de las vigas del puente. Con el objetivo de simular una carga en movimiento y entender cómo el puente responde a tales cargas, se hizo pasar un camión, cuyas propiedades específicas se detallan en la ilustración adjunta. El análisis fue meticuloso: se hizo que el camión transitara por cada carril a una velocidad constante de 30km/h, así como por el centro entre ambos carriles. Esto permitió obtener un panorama amplio y detallado de las vibraciones inducidas en la estructura, proporcionando datos valiosos para el análisis de su comportamiento y salud estructural.

Determinación de la rigidez según ensayo

Adquisición de datos con equipo especializado. – Inicialmente, con el equipo de medición a nuestra disposición, se adquirieron datos relacionados con la aceleración de la estructura en estudio, estos datos crudos representan la respuesta directa del puente a las cargas aplicadas y son fundamentales para las etapas de procesamiento subsiguientes (Cruz et al., 2014).

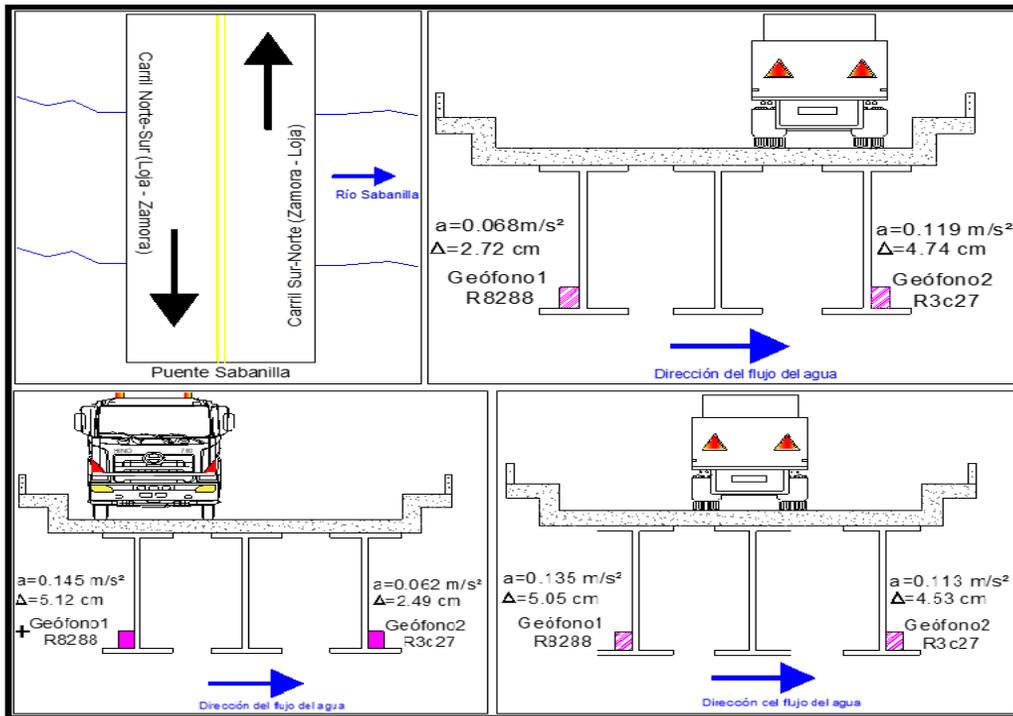
Procesamiento de señales y filtrado. – Las señales adquiridas se sometieron a iteraciones minuciosas para aislar las frecuencias de interés. Para ello, se utilizaron filtros pasabandas, que permiten seleccionar y aislar bandas de frecuencia específicas y descartar aquellas que no son relevantes para el estudio (González et al., 2020).

Doble integración para derivación de desplazamiento y velocidad. – Tras el filtrado, se llevó a cabo la integración doble de las señales de aceleración. La primera integración nos dio la velocidad, y una segunda integración proporcionó el desplazamiento. Ambos, desplazamiento y velocidad, son vitales para comprender cómo se comporta la estructura bajo diferentes cargas.

Análisis espectral y determinación de periodos: Una vez obtenidos el desplazamiento y la aceleración, se procedió al análisis espectral de la señal. Esto implica transformar la señal en el dominio de la frecuencia para identificar y caracterizar los componentes de frecuencia presentes. Con el espectro en mano, se pudo determinar el período fundamental de la estructura, que es un indicador crítico de su comportamiento vibratorio.

Comparación de resultados. - Al examinar los datos proporcionados, en la Figura 5 se puede hacer una serie de observaciones.

Fig. 5: Carriles de circulación.



Fuente: Elaboración de autores

La variación de la aceleración en la viga exterior del carril Sur-Norte cuando la carga móvil está sobre esta versus la aceleración de la viga exterior del carril Norte-Sur cuando la carga móvil está sobre esta última, es de 17.93%, esta variación puede ser indicativa de diferencias en la rigidez estructural, posibles daños o degradaciones en el carril Norte - Sur, o simplemente de diferencias en la respuesta dinámica del puente ante cargas en movimiento en ese carril específico.

La variación de la aceleración en la viga exterior Este cuando la carga móvil está sobre el carril Norte-Sur versus la aceleración de la viga Oeste cuando la carga móvil está en el carril Sur-Norte, es de 8.82%. Es decir, las aceleraciones cuando las vigas están descargadas en su correspondiente carril, también se tiene una diferencia importante.

La variación de las aceleraciones de las vigas exteriores cuando el vehículo transita por el eje longitudinal del puente, es de 16.30%. Esta variabilidad sugiere que el carril Norte-Sur experimenta una distribución de carga menos uniforme o una respuesta más variable a cargas en movimiento y se puede decir que el carril Norte-Sur presenta mala salud estructural, ya que el camión al seguir la trayectoria del eje longitudinal del puente era de esperarse que la carga se distribuya uniformemente a las vigas y no presente esta significativa variación

La variabilidad en las mediciones sugiere que hay diferencias notables en la respuesta del puente según la posición del vehículo.

El carril Norte-Sur, con la mayor variación, podría requerir una inspección más detallada para determinar la causa subyacente de esta variabilidad.

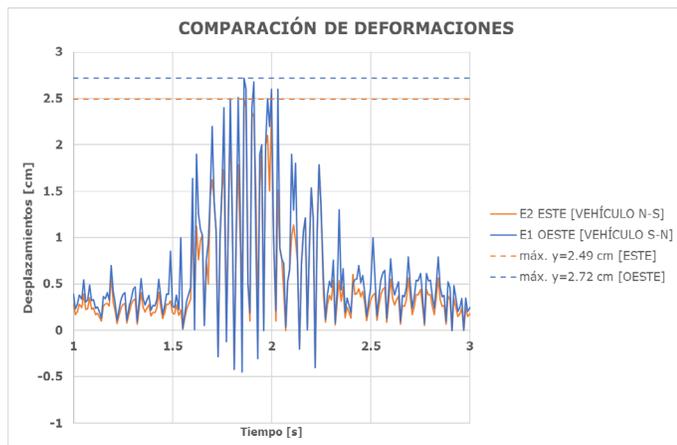
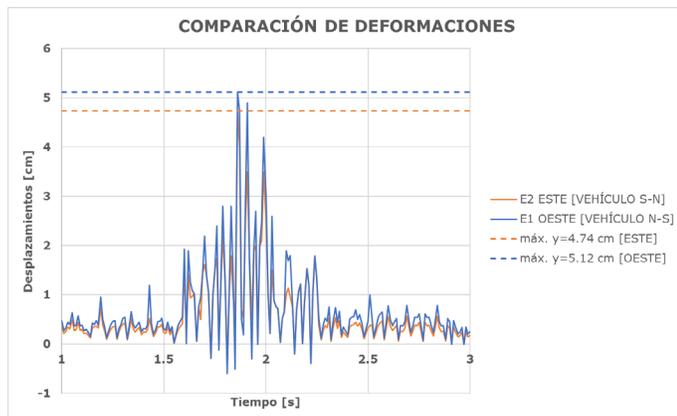
Las mediciones en el centro del puente también hacen que se acelere más la viga del carril Norte -Sur en comparación con la viga del carril Sur-Norte, por lo tanto, esta posición no sería un eje de referencia para futuras investigaciones.

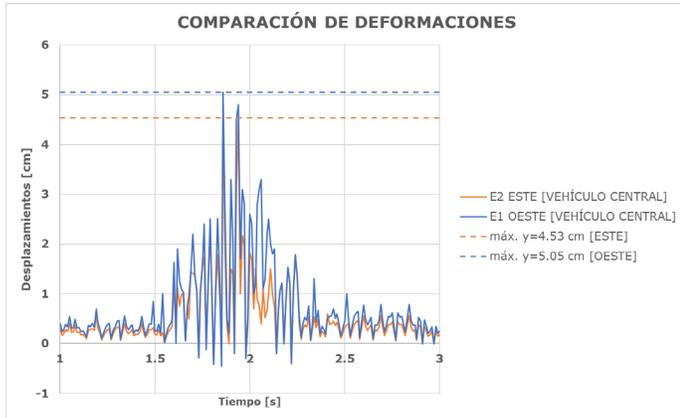
Es importante considerar que, mientras que las variaciones porcentuales proporcionan información valiosa sobre la consistencia de las mediciones, no deben ser el único factor considerado al evaluar la salud estructural del puente. Otros análisis y ensayos complementarios pueden ser necesarios para obtener una imagen completa del comportamiento y condición del puente.

Los resultados obtenidos evidenciaron diferencias notables en la aceleración y el desplazamiento medidos por los geófonos y los calculados mediante el modelo en FEM (MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS).

Ensayos no destructivos. - A continuación, se expondrán las gráficas de desplazamiento, las cuales han sido cuidadosamente corregidas y filtradas. Este proceso de filtrado y corrección asegura que la señal de aceleración refleje la misma cantidad de picos en ambas gráficas, tanto de aceleración como de desplazamiento. Este paso es crucial para garantizar la precisión y la coherencia en la interpretación de los datos, permitiendo así un análisis más fiable y detallado del comportamiento estructural del puente bajo diversas condiciones de carga y vibración (Figura 6).

Fig. 6: Ensayos de comparación de desplazamiento en cm.

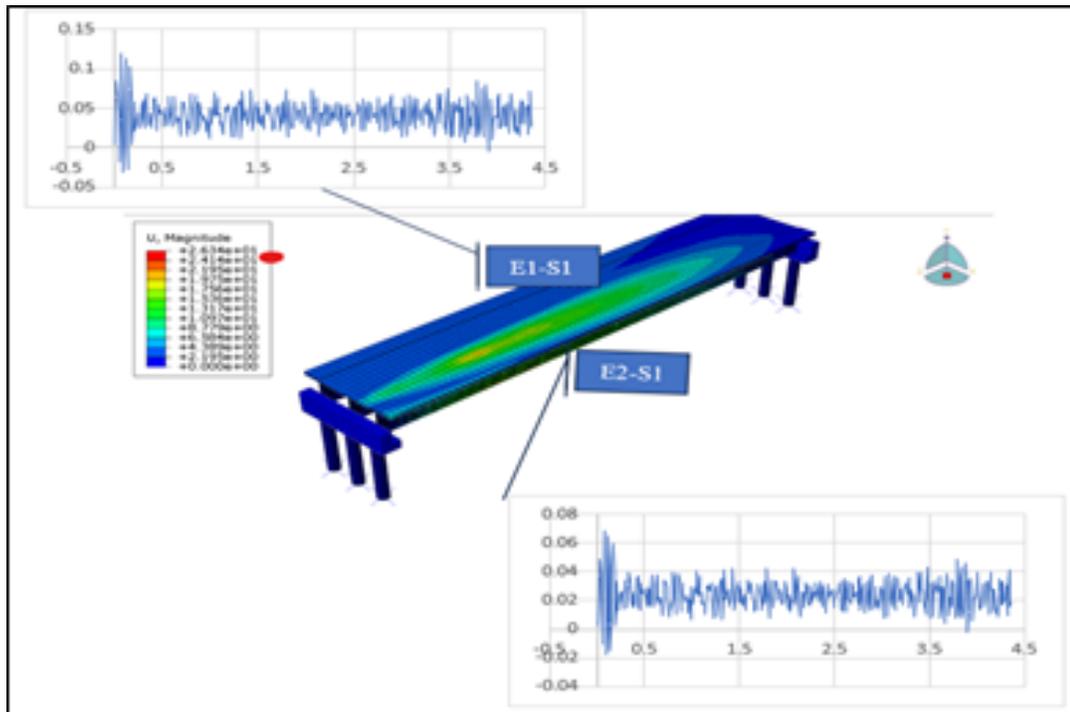




Fuente: Elaboración de autores

Análisis FEM. – En el análisis mediante el Método de Elementos Finitos (FEM), se calculó el desplazamiento estructural del puente bajo diferentes escenarios de carga. Para el caso de un camión circulando por el carril Sur-Norte, se determinó un desplazamiento de 4.85 cm en la viga Este y 2.43 cm para la viga Oeste. Cuando el camión se desplazó por el carril Norte-sur, el desplazamiento para la viga Oeste fue de 4.85 cm y para la viga Este 2.43 cm, evidenciándose simetría en el comportamiento estructural. Finalmente, con el camión transitando en el eje longitudinal del puente, se obtuvo un desplazamiento de 4.63 cm para ambas vigas. Estos hallazgos, derivados del análisis FEM, son fundamentales para evaluar la integridad y el comportamiento dinámico del puente ante diversas condiciones de tráfico, permitiendo así anticipar y mitigar potenciales riesgos estructurales (Cevallos et al., 2023) (Figura 7).

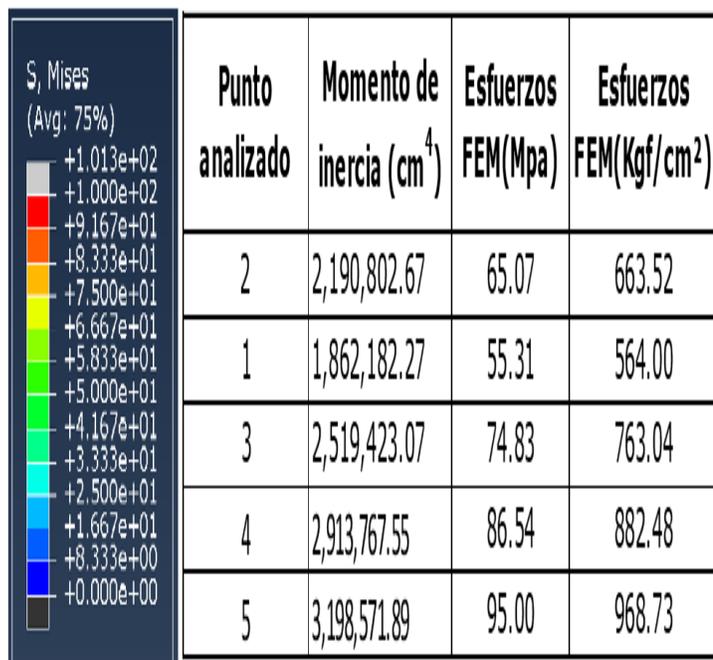
Fig. 7: Ensayo camión, aceleraciones.



Fuente: Elaboración de autores

Análisis de Fatiga. – Para realizar un análisis detallado de los esfuerzos en las secciones de vigas donde se unen las dobleces de acero estructural, se consideraron modelos computacionales avanzados utilizando el software de elementos finitos. El software de modelos finitos es una herramienta de simulación poderosa que permite a los ingenieros modelar el comportamiento de los materiales y las estructuras bajo cargas complejas, incluyendo el análisis de fatiga y los esfuerzos dinámicos (Figura 8).

Figura 8. Esfuerzos de 0.00 a 100.00 MPa.



Punto analizado	Momento de inercia (cm ⁴)	Esfuerzos FEM(Mpa)	Esfuerzos FEM (kgf/cm ²)
2	2,190,802.67	65.07	663.52
1	1,862,182.27	55.31	564.00
3	2,519,423.07	74.83	763.04
4	2,913,767.55	86.54	882.48
5	3,198,571.89	95.00	968.73

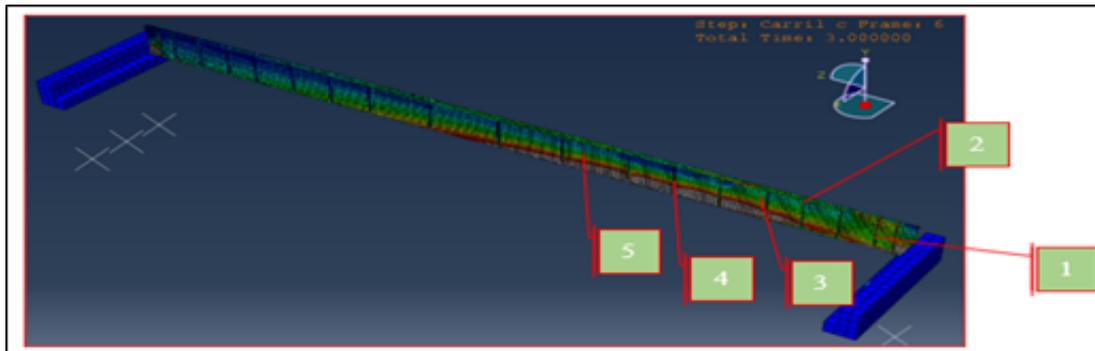
Fuente: Elaboración de autores

La Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras y Transporte (AASHTO), facilita el uso de las curvas S-N para estimar la vida de la unión en base al número de ciclos de carga y la amplitud de esfuerzos aplicada (Maldonado, 2023).

Las uniones soldadas entre dobleces de acero estructural A50 se clasifican en la categoría 'C' para los cálculos de resistencia a la fatiga. Según las tablas proporcionadas, la categoría 'C' tiene una constante de amplitud de fatiga (ΔF_{th}) de 10 KSI y una constante A de $44 KS^3 \cdot 10^8$. Estas constantes son cruciales para diseñar y evaluar la capacidad de la unión soldada para resistir la fatiga a lo largo de su vida útil (Figura 9).

La categoría 'C' indica las características específicas y el comportamiento esperado de la unión bajo condiciones de carga cíclica.

Fig. 9: Camión 1/2 del camino en la viga más esforzada (esfuerzos internos MPa).



Fuente: Elaboración de autores

De acuerdo con la clasificación de la unión tipo 'C' y los esfuerzos calculados en los modelos de elementos finitos (FEM), se puede establecer una estimación para el número de ciclos de vida útil de la estructura. Tomando como referencia la gráfica de fatiga proporcionada anteriormente, que correlaciona la amplitud del esfuerzo constante por fatiga con el número de ciclos hasta la falla, se puede deducir que las uniones clasificadas como tipo 'C' presentarían un rango de ciclos de vida comprendido entre 1,800,000 y 4,000,000. Este rango es determinado al evaluar los niveles de esfuerzos impuestos en las uniones durante el servicio y compararlos con los datos de la curva S-N que se muestra en la gráfica.

Para la unión tipo 'C', con esfuerzos en el rango obtenido de los análisis FEM, la intersección de estos esfuerzos con la curva S-N correspondiente sugiere un número de ciclos de vida en el espectro señalado. Es importante destacar que estos valores son estimaciones y pueden variar dependiendo de factores adicionales como la calidad de la soldadura, el ambiente operacional, las cargas dinámicas no previstas y la presencia de defectos o concentradores de esfuerzos no considerados en el modelo inicial.

Por lo tanto, la evaluación precisa del número de ciclos de vida útil para una unión soldada en una estructura de acero debe realizarse mediante análisis detallados que incorporen todas las condiciones de servicio relevantes, pruebas experimentales y observaciones empíricas, ajustando los modelos teóricos a la realidad observada en campo.

Análisis de factor de amortiguamiento. – El factor ξ (ξ) es un indicador crucial del amortiguamiento en sistemas oscilantes, como estructuras sujetas a cargas dinámicas. Para calcularlo, primero se mide la amplitud de las vibraciones y se cuenta el número de ciclos oscilatorios. Estos datos reflejan la energía y la periodicidad de las vibraciones inducidas en la estructura.

Posteriormente, se utiliza el decremento logarítmico, que vincula la amplitud con la longitud de onda de la vibración. Esta relación se ajusta por el número de ciclos y se normaliza para considerar las características periódicas de la oscilación. El decremento logarítmico se expresa como aparece en la fórmula 1:

$$Decrem_{logarit} = Ln \left(\frac{Amplitud}{longitud\ de\ onda} \right) \quad (F-1)$$

Finalmente, el factor ξ (ξ) se calcula al dividir el decremento logarítmico por el producto de 2π y el número de ciclos. Este resultado cuantifica el amortiguamiento y se expresa generalmente como un porcentaje. La fórmula final es , lo que permite evaluar la capacidad de la estructura para disipar energía y mantener su integridad bajo cargas dinámicas. A continuación, se presentan los resultados detallados:

CONCLUSIONES

Las conclusiones del estudio revelan información significativa sobre las uniones tipo "C" y el comportamiento estructural del puente sobre el río Sabanilla. En primer lugar, se determinó que las uniones tipo "C" poseen una vida a fatiga que oscila entre 1,800,000 y 4,000,000 ciclos según el método FEM, alineándose con la curva S-N. Además, se

subraya la importancia de la inercia, ya que incrementa los esfuerzos admisibles, desempeñando un papel crucial en el diseño y mantenimiento de estas uniones.

En relación con el puente sobre el río Sabanilla, los ensayos revelan variaciones estructurales significativas en diferentes carriles: 17.93% en un carril específico, 8.82% en el carril descargado y 16.30% en el carril central, indicando claramente la presencia de asimetría estructural. Los factores ξ variables, con valores que fluctúan entre 3.21% y 3.35%, sugieren un amortiguamiento desigual, posiblemente atribuible a la asimetría del puente y al desgaste diferencial en uno de sus lados, afectando la disipación de energía.

Los resultados también señalan discrepancias entre los desplazamientos predichos por el modelo FEM y los observados en los análisis computacionales (ensayos no destructivos), evidenciando la necesidad de revisar y ajustar el modelo o las condiciones estructurales asumidas. La variabilidad en las aceleraciones registradas en diferentes carriles sugiere diferencias en la distribución de carga o en la rigidez estructural entre ellos. Además, la respuesta lateral asimétrica del puente en los lados este y oeste, junto con las variaciones en periodo y frecuencia en diferentes ensayos, resalta la sensibilidad del puente a las condiciones de carga y ubicación, aspectos cruciales para evaluar su respuesta dinámica.

Se recomienda realizar inspecciones periódicas para monitorear la salud estructural del puente (quinquenales) y asegurar que las discrepancias observadas entre los desplazamientos esperados y los reales no afecten su integridad a largo plazo. Estas inspecciones permitirán ajustes oportunos y garantizarán la seguridad continua. Se recomienda también, realizar un análisis detallado de las vigas de acero del puente utilizando el método de la gota de lluvia para la fatiga. Este análisis ayudará a identificar áreas de preocupación potencial en términos de resistencia y durabilidad de las vigas bajo cargas cíclicas. Antes de proceder con el análisis, es aconsejable llevar a cabo una inspección visual completa para detectar signos de desgaste, corrosión o daño. Este paso preliminar garantizará que el análisis de fatiga se realice en un contexto bien informado, proporcionando así resultados más precisos y útiles para la toma de decisiones sobre el mantenimiento y la seguridad del puente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aparicio, Á. y Estradera, J. M. (1985). Aplicación Del método De Elementos Finitos Al Estudio De La distorsión De Tableros De Puente De sección Losa Aligerada. *Revista Internacional De métodos numéricos Para cálculo Y diseño En ingeniería*, 1(2), 3-26.

- Cevallos Sánchez, K. V., Maldonado Noboa, J. S., Mantilla Suin, S. P., y Maldonado Noboa, C. H. (2023). Formación académica de los ingenieros civiles en la competencia de rigidez en el tablero de puentes. *Revista Conrado*, 19(95), 51-65.
- Cruz, R., Quintero, L., Espinosa, E., & Galán, C. (2014). Evaluación de ensayos no destructivos para identificar deterioro en puentes de concreto. *Revista Colombiana De Materiales*, (5), 55–60
- El Mundo. (2007). *Al menos 56 muertos y un centenar de heridos al derrumbarse un puente en Vietnam*. <https://www.elmundo.es/elmundo/2007/09/26/internacional/1190787844.html>
- El Universo. (2020). *Un Puente colapsó y deja incomunicadas a 19 comunidades de Yantzaza*. <https://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador/puente-colapso-zamora-amazonia-agua.html>
- El Universo. (2023). *Colapso de un puente deja incomunicados a poblados costeros de Muisne*. <https://www.eluniverso.com/noticias/ecuador/muisne-colapso-puente-poblados-costeros-incomunicados-invierno-nota/>
- Erazo Álvarez, J. C. (2021). Capital intelectual y gestión de innovación: Pequeñas y medianas empresas de cuero y calzado en Tungurahua–Ecuador. *Revista De Ciencias Sociales*, 27, 230-245.
- Gómez Araujo, I., Maldonado Rondón, E., y Chio Cho, G. (2010). Pruebas de vibración ambiental en puentes. *Revista UIS Ingenierías*, 9(1), 55–68.
- González Martínez, Á. O., Horta Rangel, J. M., Arroyo Contreras, G. M., Pérez Lara, M. Á., y Hernández. (2020). Análisis de un puente peatonal conformado por una estructura soportante en forma de triditrabe y acoplada a módulos presforzados tipo tensegridad. *Revista Perspectivas de la Ciencia y la Ingeniería*, 6, 45-46.
- Marín Guzmán, C. R., & Maldonado Noboa, J. S. (2022). Estudio de las causas del colapso de puentes en Ecuador (2000-2022). *MQRInvestigar*, 6(4), 368–395.
- Martínez García, P. A. (2014). *Influencia de los requisitos de seguridad a la fatiga en el dimensionamiento de puentes mixtos de carretera*. [Tesis de maestría. Universidad Politécnica de Madrid].
- Parreño Quisnacela, S. V., y Nieto Cárdenas, J. X. (2023). Educación en Ingeniería Civil a través del estudio de la interacción agua-estructura de puentes. *Revista Conrado*, 19(95), 207-219.
- Villani, P. (2020). El puente de Morandi colapsado en el puerto italiano de Génova: dinámica y causas *Revista Vial*, 7, 1-11.
- Wilson, K. y Eaton, G. (1995). Scour at selected bridge sites in Mississippi. *Water-Resources Investigations Report*. <https://pubs.usgs.gov/wri/1994/4241/report.pdf>