

05

FORMACIÓN ACADÉMICA DE LOS INGENIEROS CIVILES EN LA COMPETENCIA DE RIGIDEZ EN EL TABLERO DE PUENTES

ACADEMIC TRAINING OF CIVIL ENGINEERS IN BRIDGE DECK STIFFNESS COMPETENCE

Katherin Viviana Cevallos Sánchez¹

E-mail: katherin.cevallos.38@est.ucacue.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6854-5870>

Juan Sebastián Maldonado Noboa¹

E-mail: jmaldonadon@ucacue.edu.ec

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

Stalin Paul Mantilla Suin¹

E-mail: spmantillas36@est.ucacue.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2480-7981>

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)

Cevallos Sánchez, K. V., Maldonado Noboa, J. S., Mantilla Suin, S. P., & 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.

RESUMEN

La investigación se centró en mejorar la formación académica de ingenieros civiles al abordar la evaluación estructural de puentes de hormigón armado mediante la aplicación de técnicas de ensayo no destructivo y análisis computacionales avanzados. El estudio se llevó a cabo utilizando un enfoque interdisciplinario que incluyó varias etapas clave. En primer lugar, se realizó un levantamiento topográfico del puente utilizando un dron y equipo RTK para medir con precisión la deflexión de la losa del puente. La experimentación incluyó un escenario simulado de carga dinámica utilizando un camión de 21.190 Kg, emulando condiciones reales de tráfico a una velocidad de 70 km/h. Para evaluar la integridad del puente de manera no destructiva, se emplearon diferentes herramientas, como un esclerómetro y un escáner, para localizar el acero de refuerzo en la estructura. Estos datos proporcionaron información adicional sobre el comportamiento dinámico del puente. Uno de los hallazgos clave de este estudio fue la identificación de una discrepancia del 6.38% entre los datos obtenidos a través de las pruebas y las predicciones realizadas utilizando el modelo SAP2000. Este resultado destacó la importancia de ajustar y mejorar el modelo estructural para que se corresponda de manera más precisa con la realidad.

Palabras clave:

Formación académica, Competencias, Puente, Vibración ambiental, Topografía, Pachometría.

ABSTRACT

The research focused on improving the academic training of civil engineers by addressing the structural evaluation of reinforced concrete bridges through the application of nondestructive testing techniques and advanced computational analysis. The study was conducted using an interdisciplinary approach that included several key steps. First, a topographic survey of the bridge was conducted using a drone and RTK equipment to accurately measure the deflection of the bridge slab. Experimentation included a simulated dynamic loading scenario using a 21,190 kg truck, emulating real traffic conditions at a speed of 70 km/h. To evaluate the integrity of the bridge in a non-destructive manner, different tools, such as a sclerometer and a scanner, were used to locate the reinforcing steel in the structure. These data provided additional information on the dynamic behavior of the bridge. One of the key findings of this study was the identification of a 6.38% discrepancy between the data obtained through testing and the predictions made using the SAP2000 model. This result highlighted the importance of adjusting and improving the structural model to more accurately match reality.

Keywords:

Academic training, Competencies, Bridge, Environmental vibration, Surveying, Pachometry, entrepreneurship promotion. It is concluded that a good business organization is constantly growing with productive projects, but properly structured.

INTRODUCCION

El Puente de Nulti, una estructura crucial en la vía Cuenca-Azogues, representa no solo un hito de ingeniería sino también un elemento esencial en la infraestructura de comunicación de Ecuador. Con signos recientes de deflexión excesiva, la necesidad de evaluaciones y soluciones robustas se ha hecho más apremiante que nunca. Este escenario real y crítico en la infraestructura del país resalta la importancia de incluir en la formación académica de los ingenieros civiles la competencia en rigidez en el tablero de puentes. Los ingenieros del futuro deben estar preparados para abordar desafíos estructurales como los que enfrenta el Puente de Nulti, utilizando técnicas avanzadas de evaluación y análisis computacionales para garantizar la seguridad y la durabilidad de las infraestructuras clave en Ecuador y en todo el mundo.

La vía Cuenca-Azogues es una arteria principal en la conectividad entre varias provincias ecuatorianas. Esta ruta es transitada diariamente por una amplia variedad de vehículos, desde transporte de pasajeros hasta vehículos de carga pesada, lo que indica la importancia del puente no solo desde una perspectiva de movilidad sino también de economía. Las provincias dependen del flujo constante y eficiente de bienes y servicios a través de esta ruta.

El uso de drones en la evaluación del Puente de Nulti ha revolucionado el enfoque tradicional de inspección. Estos dispositivos aéreos no tripulados pueden volar a altitudes bajas y acceder a rincones del puente que son inaccesibles o peligrosos para los humanos. Equipados con cámaras de alta resolución y sensores avanzados, los drones pueden capturar imágenes detalladas y generar modelos 3D de la estructura. Estos modelos permiten a los ingenieros visualizar deformaciones, fisuras o cualquier otra anomalía estructural con una precisión sin precedentes (Kusunoki et al., 2018).

Los ensayos de carga, como el realizado con una volquete de 8m³, son cruciales para evaluar cómo el puente responde a las cargas en condiciones reales. Al monitorizar la respuesta vibracional y deformaciones del puente bajo tales cargas, los ingenieros pueden determinar los límites seguros de carga y si la estructura necesita refuerzos o reparaciones. Estas pruebas replican las condiciones diarias de tráfico, proporcionando un escenario realista de las demandas a las que se enfrenta el puente.

El equipo de vibración ambiental con geófonos de 4 Hz, más allá de ser una herramienta de monitoreo sísmico, tiene aplicaciones específicas en ingeniería civil. Al registrar las vibraciones en diferentes puntos del puente, este dispositivo revela las frecuencias naturales de la estructura y cualquier posible amplificación debido a la

resonancia. Identificar estas frecuencias es vital, ya que una resonancia no controlada podría causar fallos catastróficos en la estructura.

Con la información recopilada, se esboza un panorama completo del estado estructural del Puente de Nulti. No solo es esencial identificar y abordar las áreas problemáticas, sino también anticipar y prevenir posibles problemas futuros. A largo plazo, la preservación del puente requerirá un enfoque proactivo, con inspecciones regulares y adaptación a los nuevos desafíos que presenten el clima, el aumento del tráfico o el desgaste natural.

La salvaguarda del Puente de Nulti va más allá de la estructura en sí. Es un compromiso con la seguridad de miles de personas que lo utilizan diariamente, y con la vitalidad económica de la región que depende de su funcionamiento ininterrumpido. A medida que la tecnología avanza y ofrece nuevas herramientas, el enfoque en la conservación y mejora de infraestructuras como esta debe mantenerse firme y adaptativo.

Situado entre las provincias de Cuenca y Azogues, el Puente de Nulti no es sólo una estructura de concreto y acero; representa una arteria esencial en la infraestructura vial de Ecuador. Su significado trasciende el simple tránsito vehicular. Este puente facilita el intercambio comercial, el flujo turístico, y hasta cierto punto, actúa como un símbolo de conectividad y progreso entre las provincias circundantes. En tal contexto, cualquier indicación de deterioro o amenaza a su integridad estructural podría desencadenar un conjunto de problemas logísticos, económicos y de seguridad.

Dada la vitalidad del Puente de Nulti, es imperativo garantizar su integridad a lo largo del tiempo. Aquí es donde entran en juego los Análisis No Destructivos (AND). Estos análisis se convierten en el pilar de la moderna inspección de infraestructuras por varias razones clave.

En la era tecnológica actual, los drones han revolucionado la forma en que vemos y monitoreamos estructuras de gran escala. Su capacidad para sobrevolar y capturar detalles minuciosos, incluso en las zonas más inaccesibles, brinda a los ingenieros una perspectiva sin precedentes. Además, al reducir la necesidad de inspección manual, también disminuyen los riesgos asociados para el personal de inspección.

Los datos que emergen de los AND, especialmente cuando se aplican con regularidad, permiten una gestión predictiva del mantenimiento. Estos datos pueden ser la diferencia entre una intervención temprana y rentable y una reparación costosa y disruptiva más adelante. Además, al compartir metodologías, técnicas y hallazgos, como se

ha hecho con el Puente de Nulti, se sientan precedentes y se establecen estándares para futuras inspecciones y evaluaciones en toda la industria global de la construcción de puentes.

En el presente análisis es fundamental mencionar los puentes que han colapsado en el Ecuador, por ejemplo, el puente que se extiende sobre el río Blanco conecta las regiones de la Costa y la Sierra a través de la carretera La Independencia-Calacalí, estableciendo un enlace entre las provincias de Pichincha, Santo Domingo y Esmeraldas. Esta infraestructura, que abarca unos 300 metros, se encuentra en la jurisdicción del cantón Puerto Quito, sirviendo como puente de comunicación entre Esmeraldas, Santo Domingo de los Tsáchilas y el noroccidente de Pichincha. Sin embargo, se ha reportado que la intensidad del caudal del río Blanco, en particular a la altura del km 166 de la vía Calacalí, ha comprometido la integridad del puente, afectando directamente sus cimientos según testimonios de los residentes locales (El Universo, 2023).

El colapso del puente en la vía E-482, en el km 14 del tramo Jipijapa-Montecristi, en la provincia de Manabí. Las causas del desplome aún son investigadas, pero tras el hundimiento del puente, cuya ruta forma parte de la vía Montecristi-Jipijapa-La Cadena, cinco personas que viajaban en dos autos resultaron con heridas, mientras otros dos que también se transportaban en esos vehículos resultaron con shocks tras el derrumbe del puente, confirmó Ricardo Lucas, jefe del Cuerpo de Bomberos de Montecristi (El Universo, 2021).

En el sector de Tachima, un tramo crucial de la ruta Esmeraldas-Camarón, se presentó un serio percance debido a una excavación lateral considerable en los estribos del puente de la zona, afectando su estabilidad y la circulación normal de vehículos. Las autoridades correspondientes ya están alertadas y han iniciado acciones para garantizar la seguridad de los usuarios, implementando señalizaciones y desvíos necesarios (Durán & Quishpe, 2009).

Un sector del puente Quimis, que conecta las ciudades ecuatorianas de Jipijapa y Montecristi en la provincia de Manabí, sufrió un colapso que resultó en cinco personas heridas. El tramo afectado tiene una longitud de 30 metros y era una ruta esencial para el tránsito entre estas dos localidades separadas por 43 kilómetros. Aunque aún se desconoce la causa exacta del desplome, se presume que el estado avanzado de deterioro de la estructura, conocido como vetustez, pueda ser el factor principal detrás de este suceso. Las autoridades locales están llevando a cabo investigaciones para determinar las causas exactas

y establecer planes para la restauración de la vital conexión vial (Loaiza, 2021).

Las fuertes lluvias que han afectado recientemente a la provincia de Morona Santiago, en Ecuador, causaron el desbordamiento del río Upano, lo que a su vez llevó al colapso de un puente estratégicamente ubicado en la carretera que facilita la comunicación entre las ciudades de Macas y Puyo. Este lamentable suceso interrumpe una arteria vital de transporte en la región, lo que podría tener repercusiones significativas en términos de movilidad y logística. Las autoridades locales están trabajando con rapidez para evaluar el alcance del daño y establecer rutas alternativas que permitan la transitabilidad mientras se realizan las reparaciones pertinentes. Se insta a los residentes y viajeros a que procedan con precaución y estén atentos a las actualizaciones de las autoridades (RT en Español, 2020).

En otros países, como Chile el puente Llacolen, que hasta hace poco facilitaba la comunicación entre Concepción y San Pedro de la Paz, sufrió el colapso de un tramo significativo debido a varias deficiencias estructurales. Entre los principales factores que contribuyeron al siniestro, se identificó la ausencia de vigas transversales, lo que resultó en una rigidez longitudinal marcada, pero con una flexibilidad transversal que permitió una grave falla longitudinal en medio del vano. Esta situación indicó que el tablero no logró soportar adecuadamente las fuerzas transversales aplicadas en ese punto (Aguiar, 2021).

Además, se observaron otras fallas que coadyuvaron al colapso, como la incorrecta instalación de los apoyos de neopreno, destacando una vez más que los desplomes estructurales pueden ser resultado de una serie de factores combinados y no una única falla. A raíz del incidente, se están llevando a cabo investigaciones minuciosas para descubrir todas las razones subyacentes del colapso y así definir estrategias efectivas para prevenir incidentes similares en el futuro. Se insta a la población a mantenerse alerta a las actualizaciones oficiales mientras se trabaja en la restauración del puente (Aguiar, 2021).

El puente Yanango, una notable estructura metálica atirantada asimétrica sostenida por una sola torre y que brindaba una luz de 150 metros, lamentablemente colapsó. Fabricado por la empresa australiana Wagner Biro en 1976, este puente ha sido una estructura central en la región desde su instalación en Perú. Con una capacidad diseñada para soportar la carga viva HS20, el puente contaba con una losa de concreto armado de 18 cm de espesor y una resistencia cilíndrica de 195 kg/cm², según los detalles del proyecto original de 1976 (Matamoros, 2014).

En el momento del colapso, se puso de manifiesto que la histórica construcción ha estado presentando signos de desgaste significativo, lo que plantea preguntas sobre su mantenimiento y la vigencia de los estándares de construcción de la época. En este contexto, las autoridades competentes han iniciado una investigación exhaustiva para determinar las causas exactas del colapso, enfocándose tanto en los materiales de construcción originales como en el estado actual de la infraestructura. Se espera que el análisis completo arroje luz sobre los pasos necesarios para garantizar la seguridad de otras infraestructuras similares en la región (Matamoras, 2014).

Se subraya la necesidad imperante de dar una atención rigurosa a la calidad del proceso constructivo en todas sus fases, con el fin de evitar catástrofes como los colapsos de infraestructura. En esta línea, se destaca la crucial tarea que tienen los interventores de supervisar y asesorar adecuadamente en cada etapa de la edificación. Siguiendo las pautas estipuladas en el Código colombiano de diseño sísmico de puentes, se insta a las entidades contratantes a garantizar una interventoría técnica tanto en la fase de diseño como en la de construcción (Muñoz, 2017).

Desafortunadamente, se ha identificado que existen marcadas deficiencias en el ámbito de la interventoría, principalmente atribuidas a la falta de experiencia suficiente de los profesionales encargados de esta labor crucial. Esta situación ha generado un control inadecuado, incapaz de detectar errores y fallas a tiempo, lo que, en muchas ocasiones, ha derivado en colapsos trágicos. Por lo tanto, se hace un llamado urgente para reforzar los estándares de supervisión, asegurando que los individuos asignados a estas tareas posean el conocimiento y la experiencia necesarios para garantizar la integridad y seguridad de las infraestructuras (Muñoz, 2017).

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación sobre la rigidez en el tablero del puente se ha desarrollado siguiendo una metodología mixta que combina aspectos de investigación cuantitativa y cualitativa en un solo estudio o serie de investigaciones. Esta aproximación metodológica permitió a los investigadores obtener una comprensión más exhaustiva y detallada de los fenómenos relacionados con la rigidez en el tablero de puentes, aprovechando las ventajas de ambos enfoques. El enfoque de investigación seleccionado fue de carácter experimental y de tipo transversal, lo que implicó que las mediciones de las variables se llevaron a cabo en un punto específico en el tiempo (Erazo, 2021).

Levantamiento Topográfico

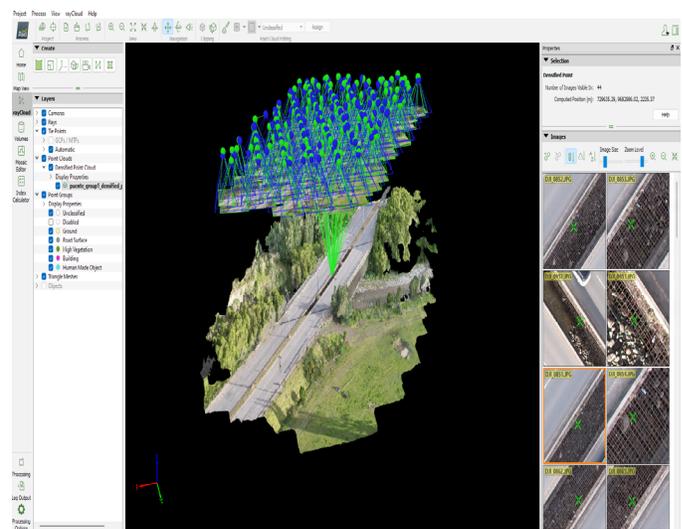


Figura 1. Análisis de imágenes Aéreas en programa de análisis fotogramétrico.

Para garantizar la seguridad y prolongar la vida útil de estructuras críticas como el Puente de Nulti, es esencial llevar a cabo evaluaciones periódicas de su salud estructural. Particularmente, se buscó entender y cuantificar cualquier posible deflexión de la losa del puente, un indicador crucial de problemas estructurales o tensiones que podría enfrentar la estructura en el futuro (Figura 1).

Dada la magnitud y complejidad del puente, un levantamiento topográfico se presentó como la solución ideal para este desafío. No obstante, en lugar de optar por los métodos tradicionales, que suelen ser más invasivos y laboriosos, se recurrió a la tecnología moderna de drones, una herramienta que ha revolucionado la inspección y monitoreo de infraestructuras a gran escala.

El equipo para el desarrollo de esta misión se realizó con un dron. Esta elección no fue fortuita; el equipo empleado se destaca en el mercado de los drones por su excepcional calidad y funcionalidad. Es ampliamente reconocido por su capacidad para producir imágenes de alta resolución, incluso en condiciones de iluminación y clima que podrían ser desafiantes para otros modelos. Ya sea bajo la intensidad del sol del mediodía o en días parcialmente nublados, este dron mantiene una calidad de imagen consistente, permitiendo a los ingenieros y especialistas obtener datos claros y definidos.

Más allá de la calidad de imagen, lo que realmente hace que este dron sea una herramienta inestimable para la topografía y cartografía es su cámara avanzada combinada con la estabilidad de vuelo. En escenarios donde se necesita precisión milimétrica, como en el levantamiento

de un puente, cualquier vibración o movimiento inestable podría comprometer la calidad de los datos. Sin embargo, este dron ha demostrado su capacidad para volar de manera estable y uniforme, asegurando que las imágenes y datos capturados sean precisos y confiables.

Para mejorar aún más la precisión de los datos recogidos, como se observa en la figura 2, se utilizó un sistema RTK (Real-Time Kinematic). El RTK es una técnica de GPS que proporciona datos de ubicación en tiempo real con una precisión centimétrica. Al combinar la tecnología de drones con el sistema RTK, se pudo obtener un conjunto de datos muy preciso y detallado para el análisis posterior.

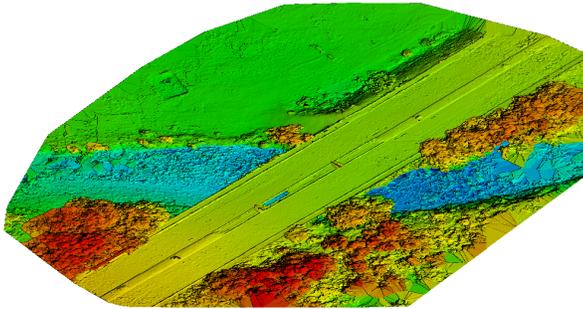


Figura 2. Análisis topográfico con una precisión centimétrica.

La integración de la tecnología moderna de drones con el poder del software de fotogrametría, como programa de análisis fotogramétrico, ha llevado la ingeniería y topografía a nuevos niveles de precisión y eficiencia. Mientras que el dron es responsable de capturar imágenes de alta calidad como se observa en la figura 3, la verdadera magia se desencadena cuando estas imágenes son procesadas. Aquí es donde entra en juego Programa de análisis fotogramétrico.

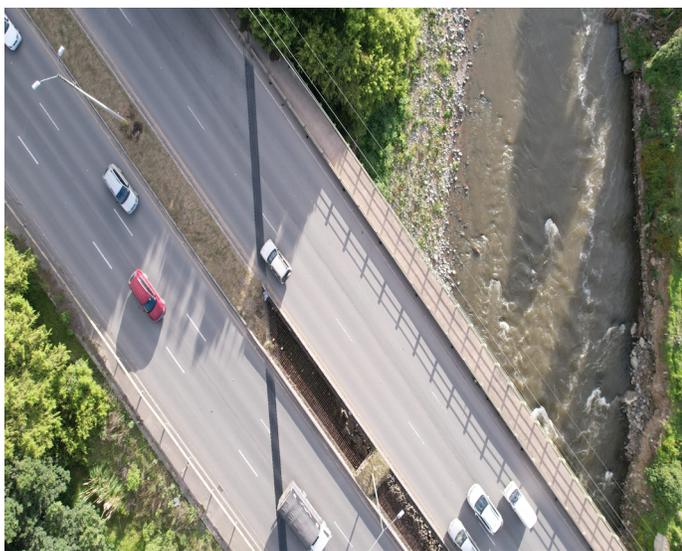


Figura 3. Levantamiento fotográfico del puente.

Programa de análisis fotogramétrico no es solo cualquier software de procesamiento de imágenes. Está diseñado específicamente para analizar y procesar fotografías desde una perspectiva tridimensional. Se basa en principios de fotogrametría, que, en su esencia, es el arte y la ciencia de hacer mediciones precisas a partir de fotografías. Al analizar múltiples fotografías de un objeto o área desde diferentes ángulos y perspectivas, Programa de análisis fotogramétrico puede reconstruir fielmente la estructura y topografía del objeto en un modelo 3D.

Este proceso es más complejo de lo que parece a simple vista. El software debe reconocer y emparejar puntos similares en diferentes imágenes, triangulando la posición exacta de esos puntos en el espacio tridimensional. Es aquí donde los algoritmos avanzados de Programa de análisis fotogramétrico juegan un papel crucial, garantizando que el modelo generado sea tanto detallado como preciso.

Al aplicar esta técnica al Puente de Nulti, el software pudo usar las imágenes capturadas por el dron para crear una representación digital fiel del puente. El modelo 3D resultante no solo proporcionó una vista visualmente

impresionante de la estructura, sino que también ofreció información cuantitativa valiosa. Por ejemplo, la deflexión de la losa, una métrica crucial para determinar la salud estructural del puente se pudo calcular con gran precisión.

Tener este nivel de detalle a mano es inestimable para los ingenieros. No solo pueden visualizar la estructura del puente en su totalidad, sino que también pueden acercarse a áreas específicas y examinarlas en detalle. Cualquier anomalía, por pequeña que sea, puede ser detectada rápidamente. En el caso del Puente de Nulti, el modelo 3D sirvió como una herramienta esencial de diagnóstico, permitiendo a los profesionales identificar áreas problemáticas y tomar decisiones informadas sobre las intervenciones necesarias. La combinación de la tecnología de drones con software de fotogrametría como Programa de análisis fotogramétrico representa el futuro del monitoreo y mantenimiento de infraestructura crítica.

Carga de camión

El empleo de cargas de prueba, como el camión cargado que se utilizó en el Puente de Nulti, es una técnica estandarizada y crucial en la evaluación de estructuras como puentes. A través de este método, se puede evaluar cómo reacciona una estructura ante cargas específicas, y determinar si es capaz de soportarlas sin mostrar signos de fallo o deformación excesiva.

El uso del camión de 21,190 kg sirvió como un punto de referencia significativo para el puente. Estos camiones, cargados hasta su capacidad máxima, simulan la presión que las estructuras como puentes pueden enfrentar en condiciones normales y extremas de tráfico. Dada la importancia del Puente de Nulti como una arteria principal de conexión entre regiones, es esencial que pueda manejar cargas pesadas de forma segura y eficiente.

Cuando se coloca una carga de prueba sobre un puente, se pueden monitorizar varios aspectos. Por ejemplo, la deflexión, que es el grado en que una estructura se deforma bajo carga, puede ser meticulosamente medida y comparada con los estándares y límites preestablecidos. Además, se pueden estudiar las vibraciones y las tensiones en diferentes partes del puente para determinar si hay áreas específicas de debilidad o preocupación.

El peso específico del camión, 21,190 kg, no se eligió al azar. Está diseñado para simular las cargas máximas que el puente podría tener que soportar en condiciones reales. Al utilizar un vehículo de este peso, los ingenieros buscan asegurarse de que el puente pueda soportar cargas similares en el futuro sin correr el riesgo de fallas estructurales.

Una vez que el camión estuvo en posición sobre el puente, se recopilaban datos utilizando una variedad de instrumentos y sensores. Estos datos ofrecieron información valiosa sobre la integridad estructural del puente. Por ejemplo, las áreas que mostraron deflexión excesiva o vibraciones inusuales podrían requerir más investigaciones o reparaciones.

Este método, a menudo referido como prueba de carga de camión, es una técnica estándar en la ingeniería estructural y de puentes. En esencia, se utiliza un camión cargado para imitar las cargas reales que el puente está diseñado para soportar. Durante esta prueba, se monitorean las respuestas del puente, incluyendo la deflexión y las vibraciones, para evaluar la capacidad de la estructura para manejar tales cargas (American Society of Civil Engineers, 2013).

Dirigir un camión cargado a través de un puente es una práctica común en ingeniería estructural para testear y estudiar el comportamiento de la infraestructura bajo cargas reales. Es fundamental comprender que este método, aunque simple en su enfoque, es sumamente informativo.

A medida que el camión avanzaba sobre el puente, el peso y la distribución de la carga ejercían presiones específicas en puntos distintos de la estructura. El avance del vehículo sobre el puente no sólo generaba una carga estática, sino que también introducía fuerzas dinámicas debido al movimiento, lo cual es un simulacro realista de las condiciones que el puente enfrentaría regularmente.

Los sistemas de monitoreo, especialmente el equipo de vibración ambiental, jugaron un papel vital en este proceso. Al capturar las vibraciones en tiempo real, los ingenieros pudieron visualizar no solo la magnitud de las vibraciones, sino también su frecuencia y modo. Diferentes problemas estructurales pueden manifestarse a través de patrones vibracionales únicos, y al comparar estos patrones con modelos teóricos y datos históricos, se pueden identificar irregularidades.

La medición de la deflexión, es decir, la cantidad que se curva o deforma la losa del puente bajo la carga, es un indicador clave del nivel de tensión y fatiga que la estructura puede estar experimentando. Una deflexión excesiva podría indicar que el material del puente ha perdido parte de su resistencia original, o que hay áreas dañadas o debilitadas que no están distribuyendo la carga de manera eficiente.

Al tener el peso exacto del camión, se pudo relacionar directamente la magnitud de la carga con las respuestas observadas en el puente. Esto permite una interpretación precisa de los datos, ya que se pueden establecer

relaciones claras entre la carga aplicada y cualquier deformación o vibración resultante.

Los resultados de la prueba de carga del camión, combinados con otros datos recopilados a través de diferentes técnicas de inspección no destructiva, ofrecieron a los ingenieros un panorama detallado del estado del Puente de Nulti. Estas pruebas no solo identificaron áreas que podrían necesitar atención inmediata, sino que también proporcionaron información valiosa que puede usarse para predecir y planificar el mantenimiento futuro y garantizar la longevidad y seguridad del puente en los años venideros.

En el contexto de este estudio, es importante tener en cuenta que el Puente de Nulti se encuentra en una vía rápida y, como tal, se consideran las condiciones reales de tráfico. Por lo tanto, en la prueba de carga con el camión, se hizo pasar al vehículo a una velocidad de 70 km/h, que es una velocidad representativa para esta clase de vía (American Institute of Steel Construction 341-16, 2015).

La velocidad del camión durante la prueba es un factor crucial, ya que afecta tanto las fuerzas dinámicas como las estáticas que se aplican al puente. Las cargas estáticas son las fuerzas constantes y predecibles que se aplican al puente, en este caso, el peso del camión. Por otro lado, las cargas dinámicas son aquellas que cambian con el tiempo, como las fuerzas adicionales causadas por el movimiento del camión.

La selección de una velocidad de 70 km/h para la prueba de carga de camión no fue arbitraria, sino que estuvo basada en el intento de simular las condiciones reales a las que el Puente de Nulti podría estar expuesto frecuentemente. El tráfico en movimiento rápido, como el que se ve a esta velocidad, introduce una serie de variables dinámicas que pueden influir en el comportamiento de un puente.

Cuando un vehículo pesado, como un camión, se desplaza a alta velocidad sobre una estructura, genera una serie de ondas de impacto y vibraciones. Estas vibraciones pueden variar en intensidad y patrón en función de la velocidad. Un puente sometido a velocidades constantemente altas puede experimentar desgastes y fatigas diferentes a aquellos sometidos a tráfico más lento. Además, el efecto de “golpe” que puede producir un vehículo pesado al pasar rápidamente puede revelar debilidades en la estructura que no se manifiestan bajo cargas estáticas o movimientos más lentos.

Adicionalmente, es esencial considerar la aerodinámica involucrada. A medida que el camión se desplaza a 70 km/h, no sólo aplica fuerza hacia abajo sobre el puente,

sino que también desplaza el aire a su alrededor, creando turbulencias y vientos cruzados que pueden afectar al comportamiento del puente. Estos efectos son particularmente pronunciados en estructuras elevadas y en puentes con diseños que puedan canalizar o magnificar estos efectos aerodinámicos.

El uso de 70 km/h como velocidad de prueba también tiene relevancia en términos de seguridad. Si el puente puede manejar cargas de tráfico a esta velocidad sin mostrar signos significativos de tensión o deterioro, indica que está en buen estado para manejar las condiciones diarias de tráfico que enfrenta.

Finalmente, es esencial que las pruebas y evaluaciones reflejen lo más fielmente posible las condiciones reales a las que se enfrenta el puente en su funcionamiento diario. De esta manera, los ingenieros y tomadores de decisiones pueden tomar medidas basadas en datos precisos y realistas, garantizando así la seguridad y durabilidad del Puente de Nulti para todos sus usuarios.

Ensayo de detección de metales (Pachometría)

El ensayo pachométrico es una técnica de inspección no destructiva esencial que se emplea para la detección y evaluación del acero de refuerzo en estructuras de concreto. Este método implica el uso de un dispositivo llamado pachómetro, que emite impulsos electromagnéticos de baja intensidad que interactúan con la superficie del concreto. Cuando estos pulsos encuentran acero de refuerzo, parte de la energía del pulso se refleja y es capturada por el aparato.

A lo largo del ensayo, se sitúan los electrodos del pachómetro en lugares clave de la estructura, tales como el tablero y las columnas, y se registran las lecturas correspondientes. Estos datos revelan la ubicación y la profundidad del acero de refuerzo, proporcionando información esencial sobre la calidad y el estado actual de la estructura. Además, el ensayo pachométrico permite identificar posibles irregularidades, como la corrosión del acero, mediante la detección de cambios en los valores del espesor del recubrimiento de concreto.

La pachometría es una metodología eficiente y no invasiva que brinda una evaluación detallada y precisa del acero de refuerzo en las estructuras de concreto. Esta técnica proporciona datos fundamentales para la planificación de acciones de mantenimiento y rehabilitación, lo que permite la implementación de medidas preventivas y correctivas destinadas a asegurar la integridad y la longevidad de las estructuras (Figura 4).

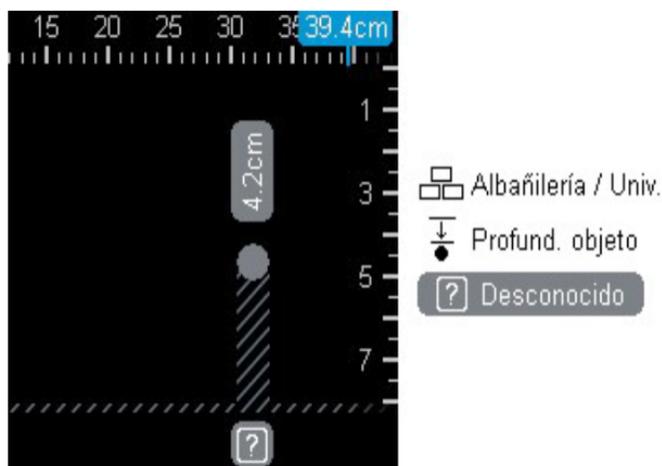


Figura 4. Análisis de Pachometría en la losa del puente.

La pachometría, en su esencia, se refiere al proceso de medir el grosor de una estructura o material. Una ubicación y distribución adecuada de las barras de refuerzo es esencial para garantizar que las estructuras de concreto armado, como las losas de los puentes, tengan una resistencia y durabilidad óptimas.

La ubicación estratégica de los electrodos del pachómetro garantiza que las lecturas sean tanto precisas como representativas de toda la losa. Al determinar la ubicación exacta y el grosor del acero de refuerzo, es posible prever cómo la losa reaccionará ante diferentes tipos de cargas y situaciones de estrés. Por ejemplo, si las barras de refuerzo estuvieran dispuestas de manera irregular o si hubiera áreas sin refuerzo adecuado, podrían surgir puntos débiles en la losa que podrían ser propensos a agrietarse o ceder bajo cargas pesadas.

El hecho de que la losa esté reforzada con barras de acero de 16 mm dispuestas cada 15 cm es una indicación de un diseño robusto. El diámetro de las barras y su separación son indicativos de la capacidad de la losa para distribuir y soportar tensiones. Sin embargo, no es sólo la presencia de estas barras lo que importa, sino también su estado. La oxidación o la corrosión de las barras de refuerzo pueden comprometer gravemente la integridad estructural de la losa.

Además, el análisis pachométrico puede revelar si ha habido movimientos o desplazamientos en el refuerzo con el tiempo, que podrían ser indicativos de problemas más profundos, como asentamientos diferenciales o daños causados por cargas no previstas. Estos desplazamientos podrían alterar la capacidad de la losa para distribuir las cargas de manera eficiente.

Por último, el valor de este tipo de análisis va más allá de la simple identificación de características estructurales.

Al proporcionar una visión detallada de la composición interna de la losa, los ingenieros pueden tomar decisiones informadas sobre reparaciones, refuerzos o intervenciones. Si, por ejemplo, se identificaran áreas donde el refuerzo es insuficiente o está dañado, podría llevarse a cabo una intervención focalizada para reforzar esos puntos específicos, en lugar de embarcarse en proyectos de renovación más grandes y costosos.

Análisis de esclerómetro

El principio detrás del esclerómetro se basa en la relación entre la resistencia superficial del concreto y su resistencia a compresión. Es decir, cuanto mayor es la energía de rebote registrada por el instrumento, mayor es la resistencia del concreto en ese punto específico. Esta relación se ha establecido a través de extensas investigaciones y pruebas de laboratorio, lo que ha permitido correlacionar los valores de rebote con la resistencia a compresión del concreto.

La ventaja principal del uso del esclerómetro en la evaluación de la resistencia del concreto es que se trata de un método no invasivo. Esto significa que no se necesita extraer muestras del concreto o causar daños en la estructura durante el proceso de evaluación, lo que resulta en una intervención mínima y un procedimiento de evaluación rápido.

Otra ventaja es que el esclerómetro puede ser utilizado en diversas zonas de una estructura en un corto período de tiempo. Así, proporciona un panorama general sobre la calidad y homogeneidad del concreto. En áreas donde el rebote es consistentemente bajo, puede indicar una mala consolidación, segregación del concreto, o la presencia de zonas deterioradas.

Sin embargo, es importante señalar que los resultados del esclerómetro son predominantemente superficiales. Aunque proporciona una buena indicación de la resistencia superficial, no puede determinar con precisión la resistencia interna o en profundidad del concreto. Por ello, a menudo se utiliza en conjunto con otros métodos no destructivos para obtener una evaluación más completa de la condición estructural del concreto.

Es también crucial calibrar el esclerómetro en función del tipo y características del concreto que se está evaluando. Esto es debido a que diferentes mezclas y tipos de concreto pueden tener diferentes relaciones entre la energía de rebote y su resistencia a compresión. Además, la presencia de recubrimientos o tratamientos superficiales puede afectar las lecturas, por lo que a menudo se recomienda realizar las pruebas en áreas limpias y sin recubrimientos.



Figura 5. Esclerómetro en la losa y estribo.

Los resultados del examen con esclerómetro se manifiestan en términos de valores de rebote, que se correlacionan con la resistencia del concreto. Cuanto mayor sea el valor de rebote, mayor será la resistencia del concreto (Figura 5).

La prueba con esclerómetro es rápida y fácil de realizar, lo que la hace una herramienta eficiente para evaluar rápidamente la calidad del concreto en diversas partes de una estructura. No obstante, es crucial recordar que este método proporciona una estimación indirecta de la resistencia del concreto y no sustituye las pruebas de laboratorio más rigurosas. Por tanto, se utiliza como un instrumento adicional en la evaluación de la calidad e integridad de las estructuras de concreto.

Análisis de vibración ambiental con el equipo de vibración ambiental

Diseñado originalmente para monitorear actividad sísmica, el equipo de vibración ambiental ha encontrado aplicaciones en diversas áreas, incluida la ingeniería civil y estructural. Su capacidad para detectar y registrar vibraciones mínimas lo hace especialmente útil en la monitorización de estructuras como puentes, edificios y represas.

En el contexto del Puente de Nulti, la utilización del equipo de vibración ambiental permite a los ingenieros evaluar cómo la estructura responde a cargas dinámicas, como las provocadas por el tráfico vehicular, vientos fuertes y otros factores ambientales. Estas vibraciones, aunque a menudo son sutiles, pueden tener implicaciones significativas en la salud y longevidad de la estructura. Un puente que vibra excesivamente o de manera anómala puede indicar problemas como fallos en los materiales, defectos constructivos o incluso daños no visibles a simple vista.

Uno de los principales beneficios de utilizar el equipo de vibración ambiental en esta evaluación es su capacidad para proporcionar datos en tiempo real. Esto significa que los ingenieros pueden obtener retroalimentación instantánea sobre el comportamiento del puente bajo diversas condiciones. Por ejemplo, al pasar un vehículo pesado, el sismógrafo puede registrar las vibraciones resultantes y permitir a los ingenieros determinar si la respuesta del puente es la esperada o si hay anomalías que necesitan ser investigadas más a fondo.

Otra ventaja es su portabilidad y facilidad de instalación. Dado que es un dispositivo compacto, se puede instalar en diferentes puntos del puente, permitiendo un monitoreo más extenso y versátil. Esta capacidad multilocalización es esencial para entender cómo diferentes partes de la estructura responden a cargas y estímulos.

Adicionalmente, el software asociado con el equipo de vibración ambiental permite un análisis detallado de los datos recogidos. Los ingenieros pueden visualizar las vibraciones en gráficos de tiempo-frecuencia, identificar patrones anómalos y correlacionar estos datos con eventos específicos, como el paso de vehículos pesados o cambios ambientales.

El diseño del equipo de vibración ambiental, a pesar de su pequeño tamaño, es altamente sensible, lo que lo hace ideal para captar incluso las vibraciones más sutiles que pueden pasar desapercibidas con otros equipos. Al instalar múltiples unidades en lugares estratégicos del puente, se obtiene una red de monitoreo que permite un análisis espacial de las vibraciones. Cada punto, aunque interconectado en la estructura global del puente, puede tener respuestas únicas a estímulos externos.

Los estribos, que son las estructuras de apoyo en los extremos del puente, experimentan diferentes cargas y tensiones que, por ejemplo, el centro del tablero, que es la parte central y horizontal del puente por donde circulan los vehículos. La viga principal, siendo uno de los componentes estructurales primarios, es fundamental para distribuir las cargas a lo largo del puente y soportar el peso

de la infraestructura y del tráfico. Monitorear estas áreas específicas proporciona datos sobre cómo las cargas se distribuyen y se manejan en toda la estructura.

Con este enfoque de multilocalización, no solo se puede detectar la presencia de vibraciones, sino también rastrear su propagación a lo largo del puente. Por ejemplo, un impacto o carga inusual en el centro del tablero puede generar ondas de tensión que se propagan hacia los estribos. Al comparar los datos de todas las unidades de equipo de vibración ambiental en tiempo real, se puede determinar la rapidez con la que estas ondas se desplazan, su amplitud y cualquier anomalía en su patrón.

Este tipo de información es invaluable cuando se trata de la prevención y detección temprana de problemas estructurales. Un patrón de vibración inusual en una zona específica puede ser indicativo de daño o desgaste, lo que puede requerir atención inmediata para evitar fallos estructurales mayores.

Además, al tener registros históricos de las vibraciones en diferentes puntos del puente, los ingenieros pueden evaluar cómo ha evolucionado la salud estructural del puente con el tiempo. Esto es esencial para planificar mantenimientos preventivos y para ajustar las cargas permitidas sobre la infraestructura, garantizando su seguridad y longevidad(Ritta et al., 2013).

Cuando se introdujo la carga del camión, las unidades de equipo de vibración ambiental registraron cómo las vibraciones ambientales del puente cambiaban en respuesta a esta carga adicional. Estos datos nos permitieron observar las posibles variaciones en la resistencia del puente y proporcionaron información vital sobre su capacidad para manejar cargas pesadas.

Además, la capacidad del equipo de vibración ambiental para registrar datos a lo largo del tiempo nos permitió observar cualquier cambio en las vibraciones del puente con el paso del tiempo. Esto podría revelar problemas estructurales a largo plazo que sólo se manifiestan bajo condiciones de operación continuada.

Por lo tanto, el análisis simultáneo con equipo de vibración ambiental es una herramienta valiosa en el estudio de la salud estructural de los puentes, proporcionando información detallada sobre la respuesta del puente a diferentes cargas y permitiendo la identificación temprana de posibles problemas estructurales.

En nuestro análisis estructural, implementamos un despliegue específico de los dispositivos equipo de vibración ambiental para maximizar su eficacia y obtener una visión comprensiva de las vibraciones del puente. Se dispusieron cinco unidades en puntos clave del puente

para capturar datos de vibración desde diferentes áreas. El primer equipo de vibración ambiental se ubicó en la losa, proporcionando información vital sobre las vibraciones y la resistencia en el área de mayor tránsito. El segundo se instaló en la viga principal, un elemento crucial para soportar las cargas de la estructura. Los dispositivos restantes, tercero, cuarto y quinto, se ubicaron en los estribos del puente. Estos puntos son esenciales, ya que los estribos actúan como soportes fundamentales que transmiten las cargas del puente al suelo. De esta manera, se logró una cobertura integral de la estructura, permitiendo un análisis exhaustivo y detallado de su salud estructural(Molnar et al., 2018) (Tabla 1).

Tabla 1. Ubicaciones del equipo de vibración ambiental.

Número de Equipo	Ubicación
1	Losa del puente
2	Viga principal
3	Estribo
4	Estribo
5	Estribo

Análisis de resistencia con ultrasonido

Preparación de la Superficie: Para asegurar la transmisión óptima de las ondas ultrasónicas, es esencial preparar adecuadamente la losa y el estribo del puente. Este proceso implica la eliminación de cualquier escombros, polvo, grava, óxido o pintura de la superficie del hormigón. Se puede utilizar un cepillo de alambre, aire comprimido, o incluso agua a alta presión para limpiar las superficies. Las superficies lisas y limpias aseguran que no haya interferencia durante el ensayo.

Selección de la Zona de Prueba: Identificar las áreas en la losa y el estribo donde se realizarán los ensayos de ultrasonido es fundamental. Esto podría basarse en áreas de interés identificadas a través de inspecciones visuales previas, o si se están siguiendo protocolos específicos, las áreas pueden ser seleccionadas para proporcionar una representación completa de la salud estructural del puente

Aplicación de Couplant: Un gel acoplante se aplica en las zonas de prueba seleccionadas en la losa y el estribo. Este gel mejora la transmisión de las ondas ultrasónicas al eliminar el aire entre la superficie de la losa o el estribo y el transductor del equipo de ultrasonido.

Realización del Ensayo: Con el gel acoplante aplicado, el transductor ultrasónico se sitúa sobre las áreas seleccionadas en la losa y el estribo. El transductor genera pulsos ultrasónicos que se propagan a través del hormigón. La presencia de posibles defectos estructurales dentro del

hormigón se puede inferir a partir de las variaciones en la velocidad y amplitud de las ondas ultrasónicas reflejadas.

Interpretación de los Resultados: Los datos recopilados durante el ensayo se analizan para identificar posibles defectos estructurales en la losa y el estribo. Por ejemplo, un aumento en el tiempo de tránsito de las ondas ultrasónicas puede indicar la presencia de una fisura o un vacío dentro del hormigón. Estos hallazgos pueden ser vitales para evaluar la salud estructural del puente y planificar reparaciones o mantenimientos (Ongpeng et al., 2018).

Documentación de Resultados: Finalmente, los resultados de los ensayos de ultrasonido realizados en la losa y el estribo se documentan meticulosamente. La documentación debe incluir la ubicación exacta de cada ensayo, los resultados y cualquier observación relevante. Esta documentación será una valiosa referencia para futuras inspecciones y análisis.



Figura 6. Ensayo de ultrasonido en losa y estribo.

El ensayo de ultrasonido en la losa y el estribo proporciona una perspectiva integral sobre la salud estructural del puente y puede detectar anomalías no visibles durante las inspecciones visuales, lo que hace de este ensayo un componente crucial en la gestión de la integridad de los puentes (Figura 6).

RESULTADO Y DISCUSIÓN

Análisis de scaneo de varillas

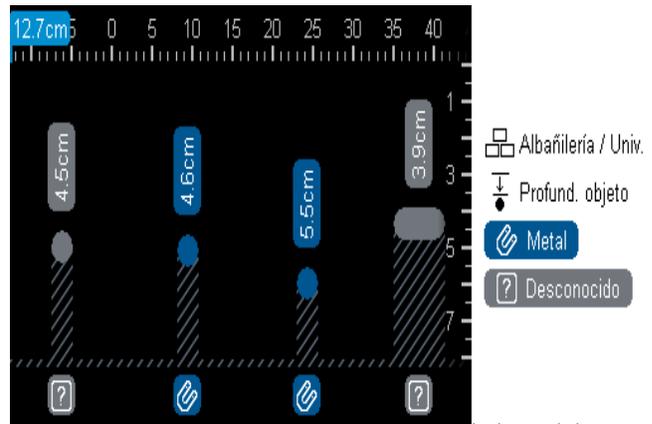


Figura 7. Resultados de la pachometría en la losa del puente.

La figura 7 representa el armado de la losa. Lo cual representa aceros de 16mm cada 15cm.

Análisis de esclerometría y ultrasonido

Tabla 2. Resultados de Esclerometría.

Ubicación	Resistencia con el esclerómetro	Resistencia con el ultrasonido
Losa	322.5Kg/cm ²	250.55Kg/cm ²
Estribo	235.11Kg/cm ²	203.22Kg/cm ²

Estos resultados (Tabla 2) muestran las resistencias medidas en la losa y el estribo del puente utilizando dos diferentes métodos de ensayo no destructivo: el esclerómetro y el ultrasonido. Es notable que los valores de resistencia obtenidos mediante el esclerómetro son más altos que los obtenidos con el ultrasonido tanto para la losa como para el estribo. Esto puede deberse a varias razones, entre las que se incluyen las diferencias inherentes a cada método de ensayo, la sensibilidad de cada técnica a ciertos factores o variaciones en las condiciones del material. Sin embargo, ambos métodos proporcionan valores de resistencia que son útiles para evaluar la integridad estructural del puente.

Análisis de vibración ambiental

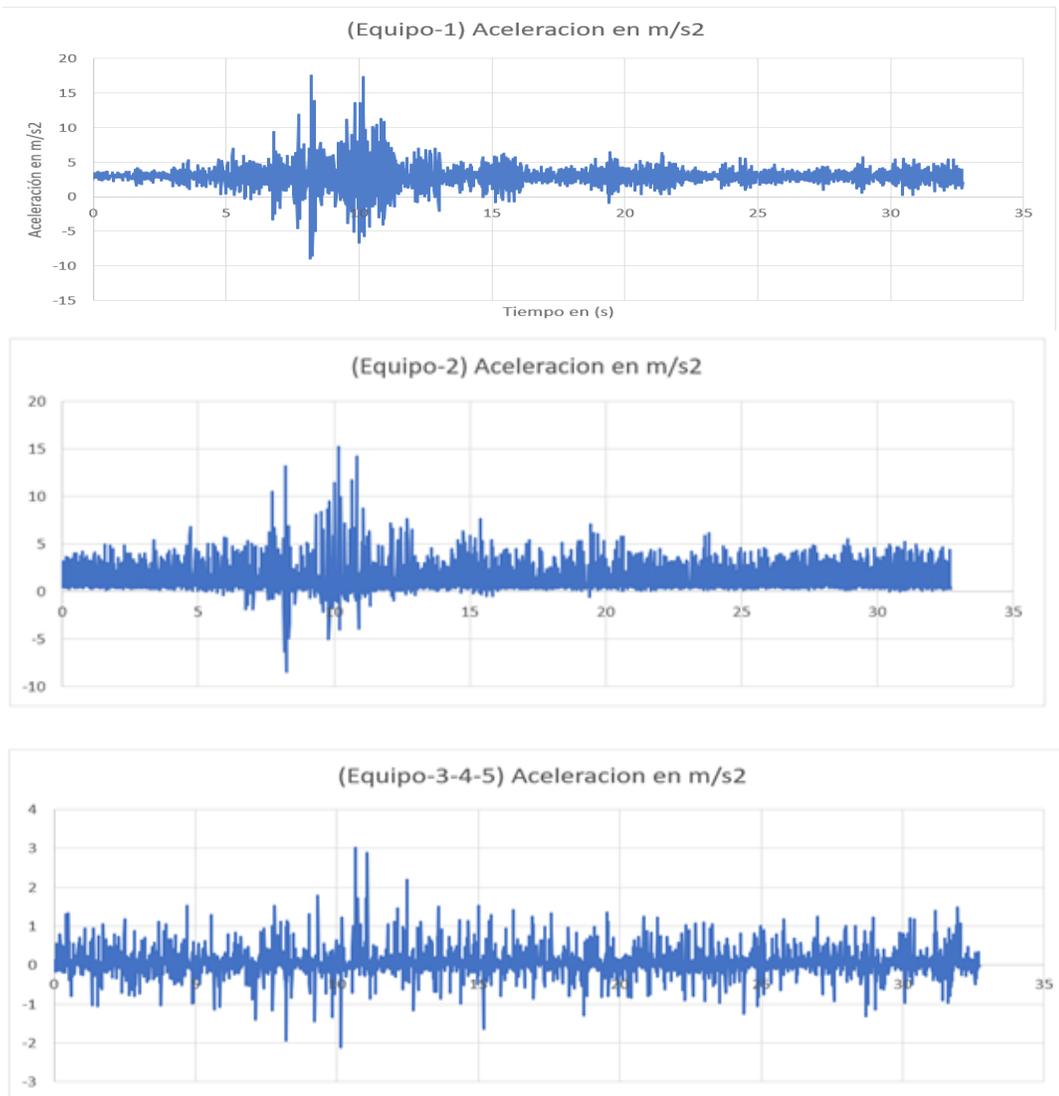


Figura 8. Aceleración Equipos 1-5.

Este conjunto de datos (Figura 8) muestra las medidas de aceleración máxima, desplazamiento máximo, periodo y frecuencia en varias ubicaciones del puente (Tabla 3).

Tabla 3. Análisis de vibración ambiental.

Número de Equipo	Ubicación	Aceleración máxima	desplazamiento máximo	Periodo (seg)	Frecuencia Hz
1	Losa del puente	17.5 m/s ²	12.1cm	0.23	4.35
2	Viga principal	15.21 m/s ²	9.5cm	0.18	5.56
3	Estribo	3.01 m/s ²	0.004cm	0.098	10.20
4	Estribo	3.02 m/s ²	0.0057cm	0.088	11.36
5	Estribo	2.98 m/s ²	0.0014cm	0.087	11.49

El equipo 1 y 2, ubicados en la losa del puente y la viga principal respectivamente, registraron las mayores aceleraciones

y desplazamientos máximos. Esto indica que estas partes de la estructura pueden estar experimentando las mayores fuerzas dinámicas y movimientos cuando el puente está en uso. Es importante destacar que estos desplazamientos son particularmente altos, lo cual puede indicar una preocupación estructural si exceden las tolerancias de diseño.

Los equipos 3, 4 y 5 se ubicaron en el estribo, y registraron aceleraciones y desplazamientos mucho menores en comparación con las otras ubicaciones. Esto se puede esperar, dado que los estribos son los soportes de los extremos del puente y se espera que sean los puntos de menor movimiento.

En cuanto a las frecuencias, se observa que los valores más altos se registraron en los estribos. Las frecuencias más altas corresponden a vibraciones más rápidas, lo cual puede ser un indicador de la rigidez del material en estas áreas.

Es importante notar que estas observaciones deben ser consideradas en el contexto del diseño y las características específicas del puente. Los datos proporcionados por estos equipos deben ser utilizados en conjunto con un análisis estructural detallado para determinar si existen problemas que requieran atención.

Análisis de deflexiones

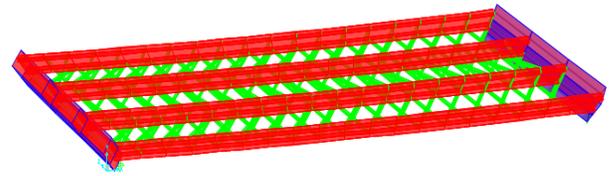
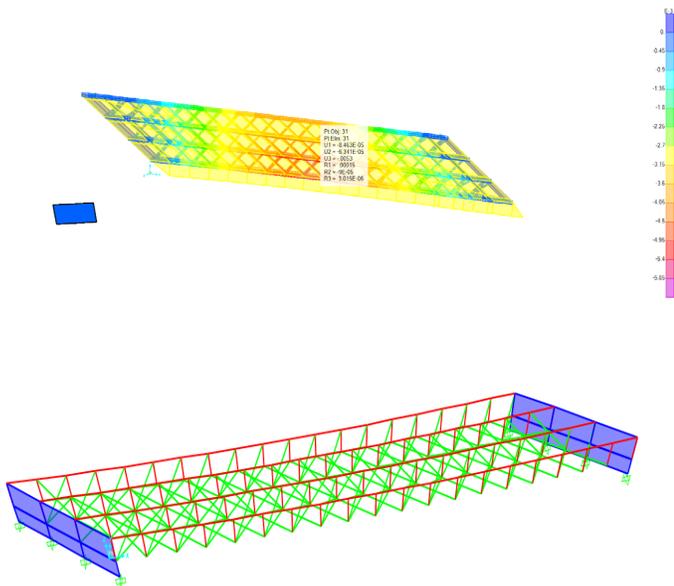


Figura 9. Modelo Computacional en SAP2000.

La comparación de los resultados (figura 9) del análisis in situ con los generados por la simulación en el software SAP2000 adquiere una mayor relevancia al considerar que se aplicaron las cargas dinámicas correspondientes a la volqueta de 8m³ que se utilizó durante los ensayos.

De acuerdo con el modelo de SAP2000, bajo estas condiciones de carga, se predice una deflexión de 10.34 cm en el vano central del puente.

Esta discrepancia entre los resultados de la simulación y las mediciones reales sugiere que podrían existir factores no considerados en el modelo, tales como posibles diferencias en las propiedades de los materiales, condiciones de soporte y la precisión de los parámetros del modelo, que están influyendo en la respuesta de la estructura.

Los resultados del modelo matemático y la comparación con las mediciones in situ muestran la importancia de ajustar y validar los modelos computacionales con observaciones y mediciones de campo. Estos ajustes permiten obtener predicciones más precisas y confiables sobre el comportamiento y la salud estructural de la infraestructura, lo que es fundamental para planificar y ejecutar intervenciones de mantenimiento y reparación eficaces y oportunas. En resumen, la combinación de herramientas de análisis estructural avanzadas y técnicas de ensayo no destructivo proporciona una metodología robusta y completa para evaluar la salud estructural de los puentes de hormigón armado.

CONCLUSIONES

La formación académica de los ingenieros civiles desempeña un papel crucial en la competencia de rigidez en el tablero de puentes. La aplicación de tecnologías innovadoras, como el uso de drones y software de análisis fotogramétrico, ha demostrado ser una herramienta valiosa en este contexto. Estas tecnologías permiten llevar a cabo levantamientos fotogramétricos detallados y precisos, lo que a su vez facilita la obtención de registros minuciosos de la deflexión de la losa del puente.

Comparado con los métodos convencionales, este enfoque automatizado ofrece una mayor eficiencia y precisión. Esto resulta esencial para determinar el estado actual de la estructura y, además, para planificar intervenciones futuras de manera más efectiva. En este sentido, la formación académica de los ingenieros civiles debe incluir el conocimiento y la habilidad para utilizar estas tecnologías avanzadas, ya que su aplicación puede marcar la diferencia en la seguridad y la eficiencia de las infraestructuras de puentes, garantizando su durabilidad y funcionalidad a lo largo del tiempo.

Los ensayos realizados con una volqueta de 8m³ carga, que pesó 21190kg, fueron fundamentales para entender la respuesta dinámica del puente bajo la influencia de cargas de tráfico reales. La simulación de la circulación del camión a 70km/h proporcionó información realista sobre el comportamiento del puente bajo condiciones operativas, lo que podría no ser evidente en las pruebas estáticas.

Las pruebas de pachometría, esclerometría y ultrasonido en la losa y estribos del puente proporcionaron información valiosa sobre la resistencia y calidad del hormigón y acero de refuerzo. Se identificó que el refuerzo consta de varillas de 16mm cada 15cm, vitales para la resistencia y estabilidad del puente.

El análisis simultáneo de vibraciones ambientales utilizando varios equipos de vibración ambiental colocados en la losa, viga y estribos, proporcionó una vista completa de la respuesta dinámica de la estructura. Los datos registrados, incluyendo la aceleración máxima, el desplazamiento máximo, el periodo y la frecuencia, proporcionaron una visión detallada de cómo la estructura del puente responde a las fuerzas dinámicas. En particular, los equipos de vibración ambiental ubicados en la losa y la viga principal registraron aceleraciones máximas de 17.5 m/s² y 15.21 m/s² y desplazamientos máximos de 12.1cm y 9.5cm, respectivamente. En comparación, los equipos ubicados en los estribos registraron aceleraciones y desplazamientos significativamente menores. Esta diferencia sugiere que la losa y las vigas principales experimentan una mayor influencia de las fuerzas dinámicas y podrían requerir una atención especial en la evaluación de la salud estructural y en el mantenimiento del puente.

Los resultados de estos análisis y pruebas proporcionan una visión comprensiva del estado actual del puente. Estos hallazgos sugieren que el puente puede estar experimentando algunas variaciones en su comportamiento estructural que requieren una atención más detallada. Las medidas preventivas y correctivas, basadas en los resultados de estos análisis, son esenciales para garantizar

la seguridad y la durabilidad del puente. Las estrategias para la evaluación y el mantenimiento futuro de la estructura pueden beneficiarse significativamente de la continuidad de este tipo de análisis y pruebas periódicas

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, R. (2021). GERISI-Seismic risk management in structures and non-structural elements of school buildings View project. <https://www.researchgate.net/publication/267795794>
- American Institute of Steel Construction. (2015). AISC 341-16. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, 1, 402.
- American Society of Civil Engineers. (2013). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. ASCE/SEI.
- Durán, S. V., & Quishpe, C. (2009). Reparación de puentes de hormigón colapsados, mediante la instalación de sistemas estructurales de acero. [Trabajo de titulación. Escuela Superior Politécnica del Litoral].
- El Universo. (2021). Colapsa puente en vía que conecta Manabí con Guayas; cinco personas heridas. <https://www.eluniverso.com/noticias/ecuador/colapsa-puente-en-la-provincia-de-manabi-nota/>
- El Universo. (2023). Colapsa puente sobre río Blanco que une zonas de la Costa y Sierra. <https://www.eluniverso.com/noticias/ecuador/colapsa-puente-sobre-rio-blanco-que-une-zonas-de-la-costa-y-sierra-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.
- Kusunoki, K., Hinata, D., Hattori, Y., & Tasai, A. (2018). A new method for evaluating the real-time residual seismic capacity of existing structures using accelerometers: Structures with multiple degrees of freedom. *Japan Architectural Review*, 1(1), 77-86.
- Loaiza, Y. (2021). Colapsó un puente en Ecuador y dejó atrapados a camiones y autos - Infobae. <https://www.infobae.com/america/america-latina/2021/10/15/video-colapso-un-puente-en-ecuador-y-dejo-atrapados-a-camiones-y-autos/>
- Matamoros, D. (2014). Evaluación de colapso del puente atirnatado Yanango. [Tesis de pregrado. Universidad Nacional del Centro de Perú].
- Molnar, S., Cassidy, J. F., Castellaro, S., Cornou, C., Crow, H., Hunter, J. A., Matsushima, S., Sánchez-Sesma, F. J., & Yong, A. (2018). Application of Microtremor Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (MHVSR) Analysis for Site Characterization: State of the Art. *Surveys in Geophysics*, 39(4), 613-631.
- Muñoz-Díaz, E. E. (2002). Estudio de las causas del colapso de algunos puentes en Colombia. *Ingeniería Y Universidad*, 6(1), 33-47.

- Ongpeng, J. M. C., Oreta, A. W., & Hirose, S. (2018). Contact and Noncontact Ultrasonic Nondestructive Test in Reinforced Concrete Beam. Hindawi, 2018. <https://www.hindawi.com/journals/ace/2018/5783175/>
- Ritta, R. J., Massa, J. C., & Chiappero, G. D. (2013). Processing of ambient vibration records for the estimation of the fundamental vibration period of soil deposits. IEEE Latin America Transactions, 11(1), 300–306.
- RT en Español. (2020). El desbordamiento de un río en Ecuador causa el colapso de un puente. <https://actualidad.rt.com/actualidad/357392-puente-colapsa-intensas-lluvias-ecuador>