



MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS SISMORRESISTENTES

INFORME DE INVESTIGACIÓN:

EVALUAR LA RIGIDEZ EN EL TABLERO DEL PUENTE DE MULTI UBICADO EN LA VÍA CUENCA-AZOGUES

AUTOR (A):

ING. KATHERIN VIVIANA CEVALLOS SÁNCHEZ

TUTOR:

ING. MSC. JUAN SEBASTIÁN MALDONADO NOBOA

CUENCA – ECUADOR

2023

AUTORÍA

Yo, Katherin Viviana Cevallos Sánchez con C.I: 060405763-8, certifico por medio de la presente que, la investigación: “EVALUAR LA RIGIDEZ EN EL TABLERO DEL PUENTE DE NULTI UBICADO EN LA VÍA CUENCA-AZOGUES” es de mi autoría.

Cuenca, octubre del 2023

.....

Ing. Katherin Viviana Cevallos Sánchez

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Yo, Maldonado Noboa, Juan Sebastián, Ing. MSc. certifico que, el informe de investigación:

“EVALUAR LA RIGIDEZ EN EL TABLERO DEL PUENTE DE NULTI UBICADO EN LA VÍA CUENCA-AZOGUES” es de autoría de la Ing. Katherin Viviana Cevallos Sánchez, informe que ha sido realizado bajo mi supervisión y tutoría.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad.

Cuenca, octubre del 2023

.....
Maldonado Noboa Juan Sebastián, Ing. MSc.

DEDICATORIA

*A mi madre y mis
hermanas que me han
apoyado para cumplir mis
metas, siendo mis mejores
compañeras de vida.*

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, a la Virgen y a mi angelito del cielo mami Lily por bendecir mi camino y cada paso que he dado, así también a mi familia por apoyar mis metas y motivarme a cada día ser mejor persona y profesional.

De manera especial agradezco a Stalin, que me ha brindado su apoyo incondicional para cumplir esta meta juntos.

De la misma forma expreso mi gratitud a mi tutor Maldonado Noboa, Juan Sebastián, Ing. MSc., por su paciencia, apoyo y las ganas de trasmitirme sus conocimientos para culminar este proyecto.

Resumen

El estudio abordó la evaluación estructural de un puente de hormigón armado mediante técnicas de ensayo no destructivo y análisis computacionales. Se empleó un levantamiento topográfico con dron y equipo RTK para determinar la deflexión de la losa del puente. La experimentación incluyó la utilización de un camión de 21.190 Kg que impuso una carga dinámica, simulando condiciones reales de tránsito a 70 km/h. Se usaron un esclerómetro y un escáner para localizar el acero de refuerzo, y un ensayo de ultrasonido para analizar las propiedades del hormigón en la losa y los estribos. ACELERÓMETROS monitorizaron las vibraciones ambientales en distintas partes del puente para evaluar su salud estructural. El análisis reveló una discrepancia del 6.38% entre los datos obtenidos y las predicciones del modelo SAP2000, indicando la necesidad de ajustes en el modelo. En conclusión, la combinación de pruebas no destructivas y análisis computacionales representa una estrategia eficaz para monitorizar y evaluar la integridad estructural de puentes.

Palabras claves: Puente, Vibración ambiental, Topografía, Análisis simultaneo de vibración, Pachometría, esclerometría, ultrasonido y desplazamientos.

Abstract

The study addressed the structural evaluation of a reinforced concrete bridge using non-destructive testing techniques and computational analyses. A topographic survey was carried out with a drone and RTK equipment to determine the deflection of the bridge slab. The experimentation included the use of a 21,190 Kg truck that imposed a dynamic load, simulating real traffic conditions at 70 km/h. A sclerometer and a scanner were used to locate the reinforcing steel, and an ultrasound test was conducted to analyze the properties of the concrete in the slab and the abutments. Accelerometers monitored environmental vibrations in different parts of the bridge to assess its structural health. The analysis revealed a discrepancy of 6.38% between the obtained data and the predictions of the SAP2000 model, indicating the need for adjustments in the model. In conclusion, the combination of non-destructive tests and computational analyses represents an effective strategy to monitor and evaluate the structural integrity of bridges.

Keywords: Bridge, environmental vibration, Topography, Simultaneous Vibration Analysis, Pachometry, Sclerometry, Ultrasound, and Displacements.

Indice

AUTORÍA.....	I
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
Resumen	V
Abstract	VI
Indice.....	VII
Indice de ilustraciones.....	VIII
Indice de tablas.....	VIII
1. Introducción	9
1.1. Objetivos.....	9
1.1.1. Objetivo general.....	9
1.1.2. Objetivos específicos	9
2. Justificación y antecedentes	12
2.1. PUENTES QUE HAN COLAPSADO EN EL ECUADOR	14
2.2. PUENTES QUE HAN COLAPSADO EN OTROS PAÍSES	16
3. Metodología de Investigación	21
3.1. Levantamiento Topográfico	21
3.2. Carga de camión	26
3.3. Ensayo de detección de metales (Pachometría).....	31
3.4. Análisis de esclerómetro.....	34
3.5. Análisis de vibración ambiental con el equipo de vibración ambiental	36
3.6. Analisis de resistencia con ultrasonido.....	40
4. RESULTADOS.....	43
5. Conclusiones y recomendaciones.....	50
6. Bibliografía.....	52
7. Anexos.....	55

Indice de ilustraciones

Ilustración 1 Puente en sismo de Chile(Aguiar, 2021).....	17
Ilustración 2 Analisis de imágenes Aéreas en programa de análisis fotogramétrico	21
Ilustración 3 Analisis topográfico	23
Ilustración 4 Levantamiento fotográfico del puente	24
Ilustración 5 Peso de volqueta de 8m3.....	27
Ilustración 6 Peso de la balanza	27
Ilustración 7 Paso de la volqueta de 8m3.....	31
Ilustración 8 Analisis de Pachometría en la losa.....	32
Ilustración 9 Esclerómetro en la losa y estribo	35
Ilustración 10 Equipo de vibración ambiental instalado en el tablero en la parte central.....	37
Ilustración 11 Equipo de vibración ambiental conectado en el inicio de la viga.....	38
Ilustración 12 Equipo de vibración ambiental conectados en el estribo derecho.....	39
Ilustración 13 Ensayo de ultrasonido en losa y estribo	42
Ilustración 14 Resultados de la pachometría en la losa del puente	43
Ilustración 15 Aceleración Equipo 1	45
Ilustración 16 Aceleración Equipo 2.....	45
Ilustración 17 Aceleración Equipo 3-4-5	46
Ilustración 18 Modelo Computacional en SAP2000.....	48
Ilustración 19 Ensayos de esclerómetro	56
Ilustración 20 Parte baja del puente	57
Ilustración 21 Armado inferior del puente	58
Ilustración 22 Colocación de Equipos 1 y 2.....	59
Ilustración 23 Colocación de equipos 2 y3	60
Ilustración 24 Ultrasonido 1	61
Ilustración 25 Ultrasonido 2.....	62
Ilustración 26 Paso de la volqueta.....	63
Ilustración 27 Materiales utilizados para el modelo.....	64
Ilustración 28 Cargas dinamicas del camión.....	64
Ilustración 29 Análisis de señales para desplzamientos.....	65
Ilustración 30 Analisis de señales para determiacion de ventanas de analisis	66
Ilustración 31 analisis de frecuencia de vibracion	67

Indice de tablas

Tabla 1 Ubicaciones del equipo de vibración ambiental.....	40
Tabla 2 Resultados de Esclerometría	43
Tabla 3 Análisis de vibración ambiental	46

1. Introducción

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Evaluar la rigidez efectiva del tablero de sección compuesta del puente de Nulti, ubicado en la vía Cuenca-Azogues, mediante análisis no destructivos para evaluar su salud estructural y detectar posibles patologías

1.1.2. Objetivos específicos

- Realizar la topografía y recolección de datos en campo con el fin de obtener la información necesaria para desarrollar un modelo computacional preciso del puente de Nulti. Esto incluirá mediciones de las dimensiones, ubicación y elevación de los elementos estructurales, así como otros datos relevantes para la construcción del modelo.
- Realizar ensayos no destructivos en cada elemento estructural del puente de Nulti para evaluar su rigidez y determinar posibles defectos o debilidades. Estos ensayos podrían incluir pruebas de ultrasonido, pruebas de resistencia, análisis de vibración u otras técnicas especializadas según corresponda. El objetivo es obtener datos confiables sobre la integridad estructural de cada componente.
- Comparar el modelo computacional desarrollado con el modelo físico del puente de Nulti. Esto implica verificar la precisión y la coherencia entre ambos modelos, analizando cómo se comportan y responden ante cargas y condiciones específicas. Esta comparación permitirá validar la fiabilidad del modelo computacional y detectar posibles discrepancias o áreas de mejora.

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.

Contexto Geográfico y Económico

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.

Drones

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).

Ensayos de Carga

Los ensayos de carga, como el realizado con una volqueta 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.

Sincronizado de las Vibraciones

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.

Implicaciones y Futuro

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.

2. Justificación y antecedentes

Importancia y Rol Estratégico del Puente de Nulti

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.

El Valor Indiscutible de los Análisis No Destructivos (AND) en la Evaluación de Puentes

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. Estos análisis se convierten en el pilar de la moderna inspección de infraestructuras por varias razones clave:

Inspección con Drones: 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.

Pruebas de Carga: Estas pruebas no sólo evalúan cómo el puente responde a cargas estáticas, sino que también dan una idea de su comportamiento ante cargas dinámicas, replicando las condiciones del tráfico diario. Estos tests son esenciales para entender y prever la respuesta del puente bajo condiciones extremas.

Pruebas de Vibración Ambiental: La verdadera genialidad de estas pruebas radica en su capacidad para detectar anomalías en las vibraciones naturales de la estructura. El uso de equipos avanzados como el equipo de vibración ambiental con geófonos de 4 Hz, que mide minuciosas variaciones en la vibración, es vital para esta tarea.

Los Puentes de Acero y Su Dinamismo Estructural

Los puentes, especialmente los construidos con acero, son estructuras vivas y dinámicas. Su comportamiento es una amalgama de respuestas a una serie de fuerzas externas, desde las cargas rutinarias del tráfico vehicular hasta fenómenos más impredecibles como los sismos y los fuertes vientos. Cada vehículo que cruza, cada ráfaga de viento, incluso las pequeñas vibraciones del suelo, pueden influir en el comportamiento global del puente.

Los ensayos de vibración ambiental simultánea son la respuesta a esta dinámica compleja. No sólo proporcionan un panorama actual del estado del puente, sino que, cuando se analizan

con el tiempo, pueden revelar patrones y tendencias, indicando áreas que requieren atención o mantenimiento.

Conclusiones y Visiones Futuras

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.

2.1. PUENTES QUE HAN COLAPSADO EN EL ECUADOR

Colapso de puente sobre río Blanco que une zonas de la Costa y Sierra

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)

Colapso del puente en la vía a Jipijapa, Manabí

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)

Estero Tachima

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. (Coro, 2009)

El puente Quimis

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 Yalilé, 2021)

Puente sobre el río Upano

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. (SNGRE, 2020)

2.2. PUENTES QUE HAN COLAPSADO EN OTROS PAÍSES

Puente Llacolen-sismo de 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. (Aguilar, 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)



Ilustración 1 Puente en sismo de Chile(Aguiar, 2021)

Colapso, del puente atirantado Yanango - Tarma, - Junin

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.(Matamoros, 2014)

-Colapso del puente Maizaro en la carretera Bogotá-Villavicencio

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)

-Colapso del puente pescadero, Colombia

El colapso del Puente Pescadero se atribuye a una serie de deficiencias críticas en su diseño y construcción, comenzando con una falla por fatiga en la unión soldada del atiesador-lámina inferior del arco. Este problema inicial derivó en una serie de complicaciones estructurales que llevaron a una redistribución de esfuerzos que, finalmente, el arco no pudo soportar. El epicentro del problema fue la insuficiente soldadura aplicada en la unión mencionada, siendo un 20% menor a lo que los planos originales especificaban, lo que acentuó los altos esfuerzos cíclicos para las cargas de diseño.(Cusba, 2011)

Las investigaciones post-colapso destacan que la tragedia podría haberse evitado si el diseño hubiese respetado los límites de las relaciones ancho-espesor, y los esfuerzos permisibles en el arco del puente, que se encontraban en condiciones desfavorables de trabajo. Este incidente resalta la importancia crucial de adherirse estrictamente a las normativas de diseño estructural, garantizando que cada detalle se ejecute conforme a las especificaciones para prevenir fallos catastróficos debido al pandeo local y otras formas de estrés estructural.(Cusba, 2011)

Colapso del puente Samaná Colombia

El puente que estaba diseñado para albergar dos vías de circulación y contaba con una separación entre los ejes de los dos arcos de 9,60m, lamentablemente colapsó el 3 de octubre de 1993. Este proyecto se basó en los planos construidos en 1980, adecuados para soportar cargas específicas conforme a las normativas de la AASHTO de ese periodo. Un análisis

realizado por la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia señaló como posible origen del desplome la falla en la unión de la armadura inferior con el pendolón, un detalle crucial que pudo haber sido el punto débil en la estructura del puente.

No obstante, este no sería el único incidente de este tipo en la región, ya que en enero de 1996 se reportó el colapso de otra estructura puente sobre el río Chicamocha en el departamento de Santander. La Universidad Nacional identificó que, similar al caso anterior, los problemas de fatiga y las concentraciones elevadas de esfuerzos en las uniones arco-pendolón habrían sido factores determinantes en el colapso. Estos incidentes resaltan la necesidad de revisar y actualizar las especificaciones y normativas para garantizar la seguridad y longevidad de estas infraestructuras vitales (Cinfuentes, 1997)

3. Metodología de Investigación

3.1. Levantamiento Topográfico

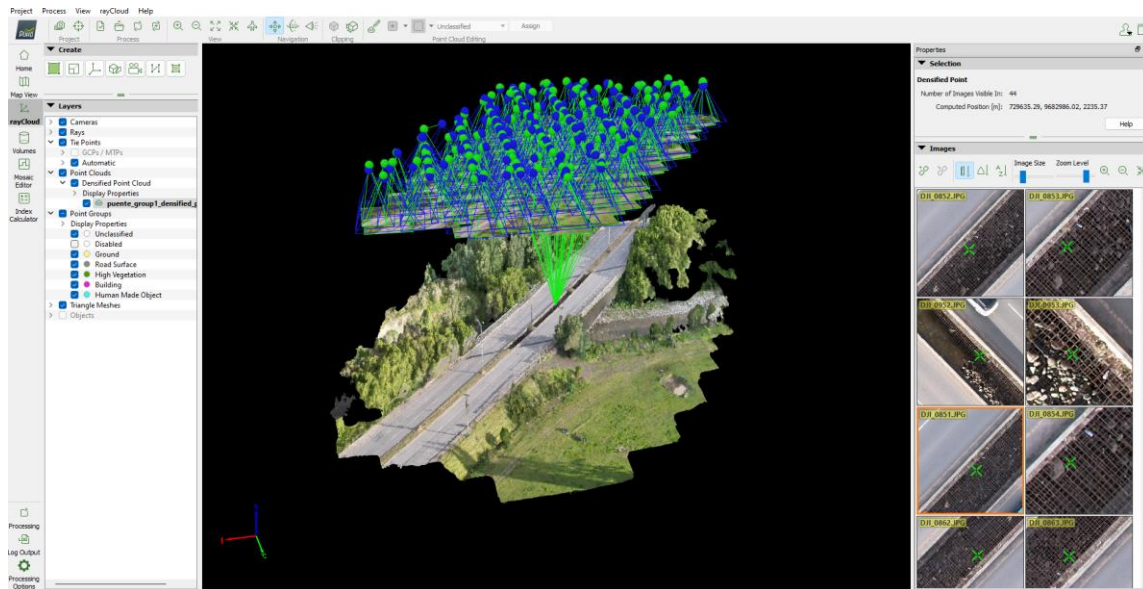


Ilustración 2 Analisis de imágenes Aéreas en programa de análisis fotogramétrico

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.

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.

En resumen, al combinar la avanzada tecnología de drones con técnicas tradicionales de evaluación estructural, se pudo obtener un panorama detallado y actualizado de la salud de la losa del Puente de Nulti, permitiendo una mejor toma de decisiones en cuanto a su mantenimiento y conservación.

Principio del formulario

(Avecillas et al., 2023).

Para mejorar aún más la precisión de los datos recogidos, 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.

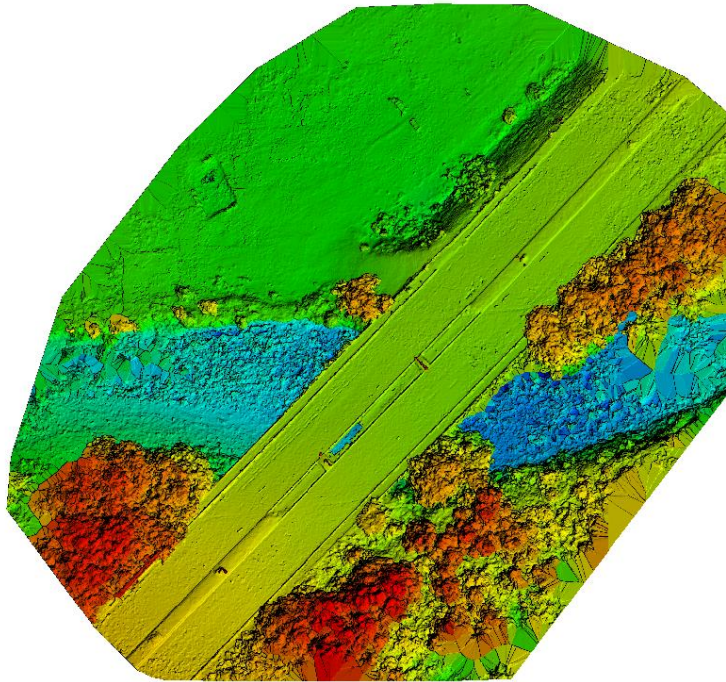


Ilustración 3 Analisis topográfico

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, la verdadera magia se desencadena cuando estas imágenes son procesadas. Aquí es donde entra en juego Programa de análisis fotogramétrico.



Ilustración 4 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.

3.2. 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.



Ilustración 5 Peso de volqueta de 8m³

Una vez que el camión estuvo en posición sobre el puente, se recopilaron 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.



Ilustración 6 Peso de la balanza

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(ASCE/SEI, 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 (AISC 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.



Ilustración 7 Paso de la volqueta de 8m³

3.3. 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.

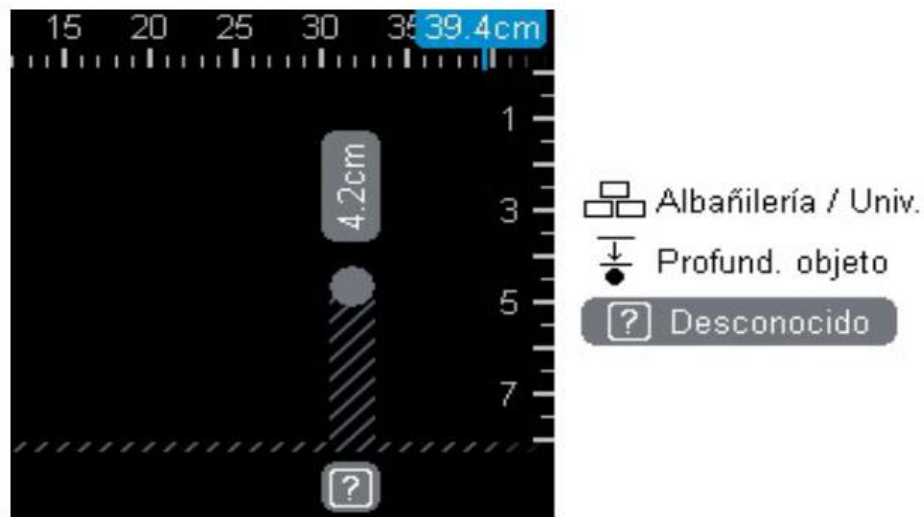


Ilustración 8 Analisis de Pachometría en la losa

La pachometría, en su esencia, se refiere al proceso de medir el grosor de una estructura o material. En el contexto de la ingeniería civil, el análisis pachométrico es fundamental para determinar el grosor de elementos de concreto y ubicar las barras de refuerzo internas. 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.

3.4. 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.



Ilustración 9 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. Estos valores se comparan con una escala de referencia para determinar si el concreto satisface los requerimientos de resistencia esperados. Cuanto mayor sea el valor de rebote, mayor será la resistencia del concreto.

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.

3.5. 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.



Ilustración 10 Equipo de vibración ambiental instalado en el tablero en la parte central

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 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).



Ilustración 11 Equipo de vibración ambiental conectado en el inicio de la viga

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.



Ilustración 12 Equipo de vibración ambiental conectados en el estribo derecho

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 Ubicaciones del equipo de vibración ambiental

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

3.6. 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.(Maximino et al., 2018)

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. (Maximino et al., 2018)

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. (Maximino et al., 2018)

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. (Maximino 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.

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.



Ilustración 13 Ensayo de ultrasonido en losa y estribo

4. RESULTADOS

ANÁLISIS DE SCANEEO DE VARILLAS

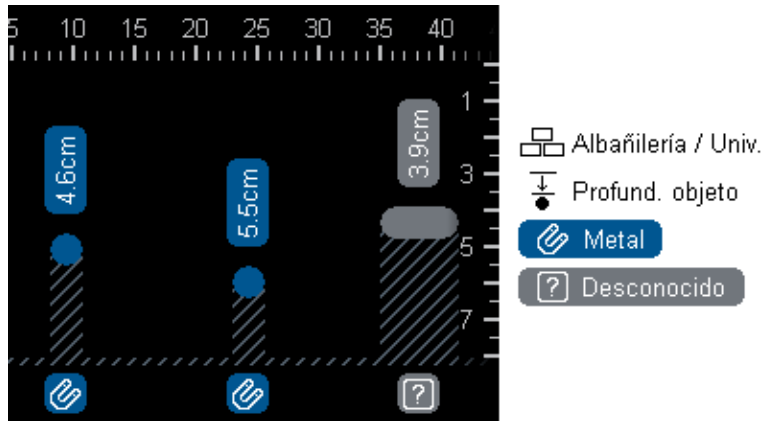


Ilustración 14 Resultados de la pachometría en la losa del puente

La ilustración anterior 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	con el ultrasonido
Losa	322.5Kg/cm ²	250.55Kg/cm ²
Estribo	235.11Kg/cm ²	203.22Kg/cm ²

Estos resultados 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

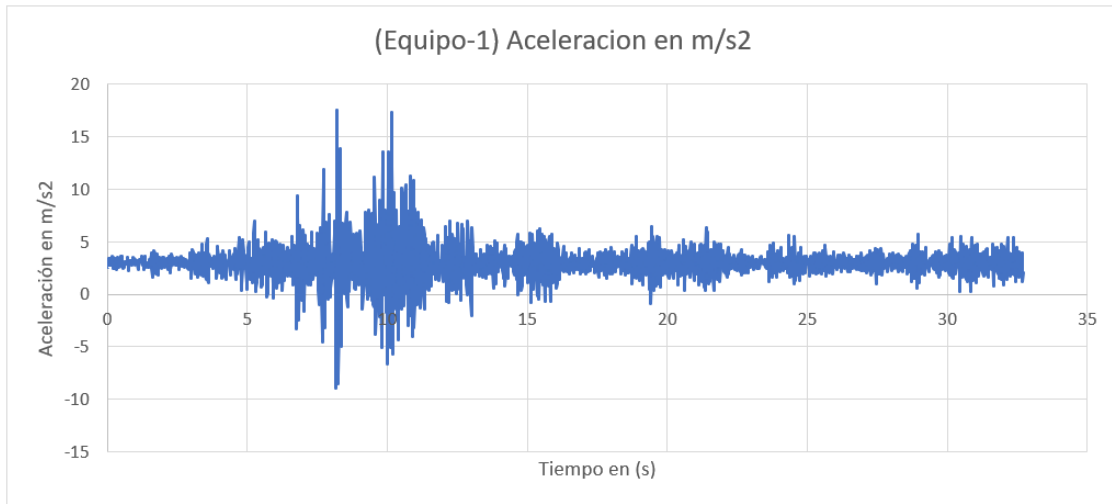


Ilustración 15 Aceleración Equipo 1

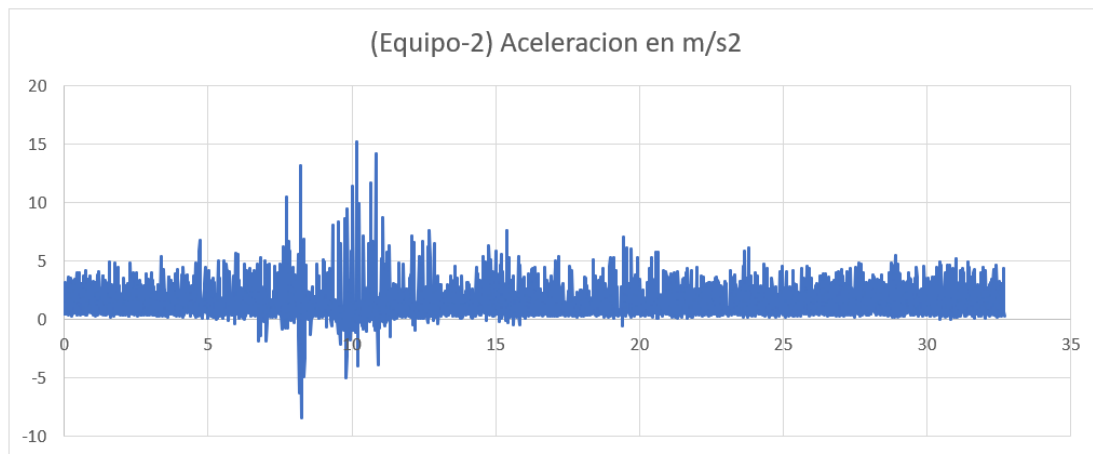


Ilustración 16 Aceleración Equipo 2

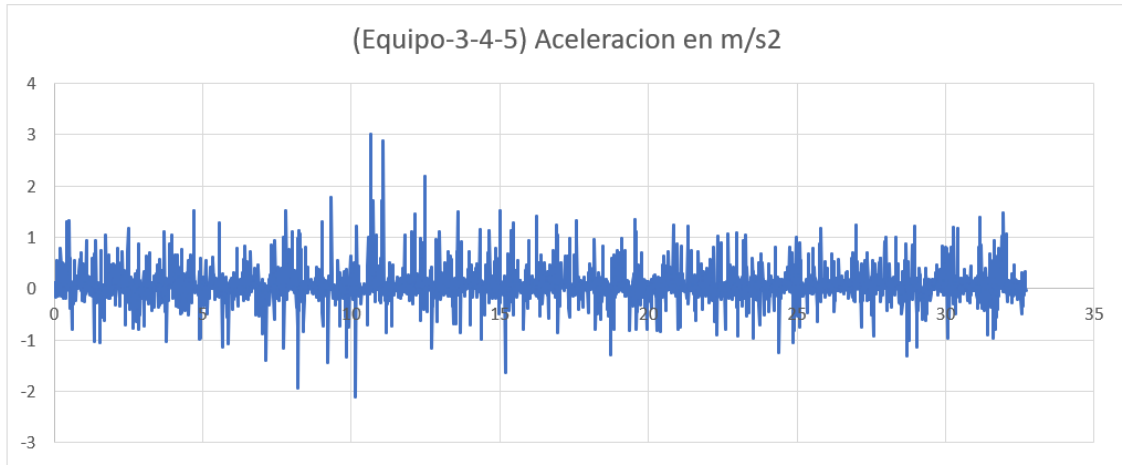


Ilustración 17 Aceleración Equipo 3-4-5

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

Este conjunto de datos muestra las medidas de aceleración máxima, desplazamiento máximo, periodo y frecuencia en varias ubicaciones del puente.

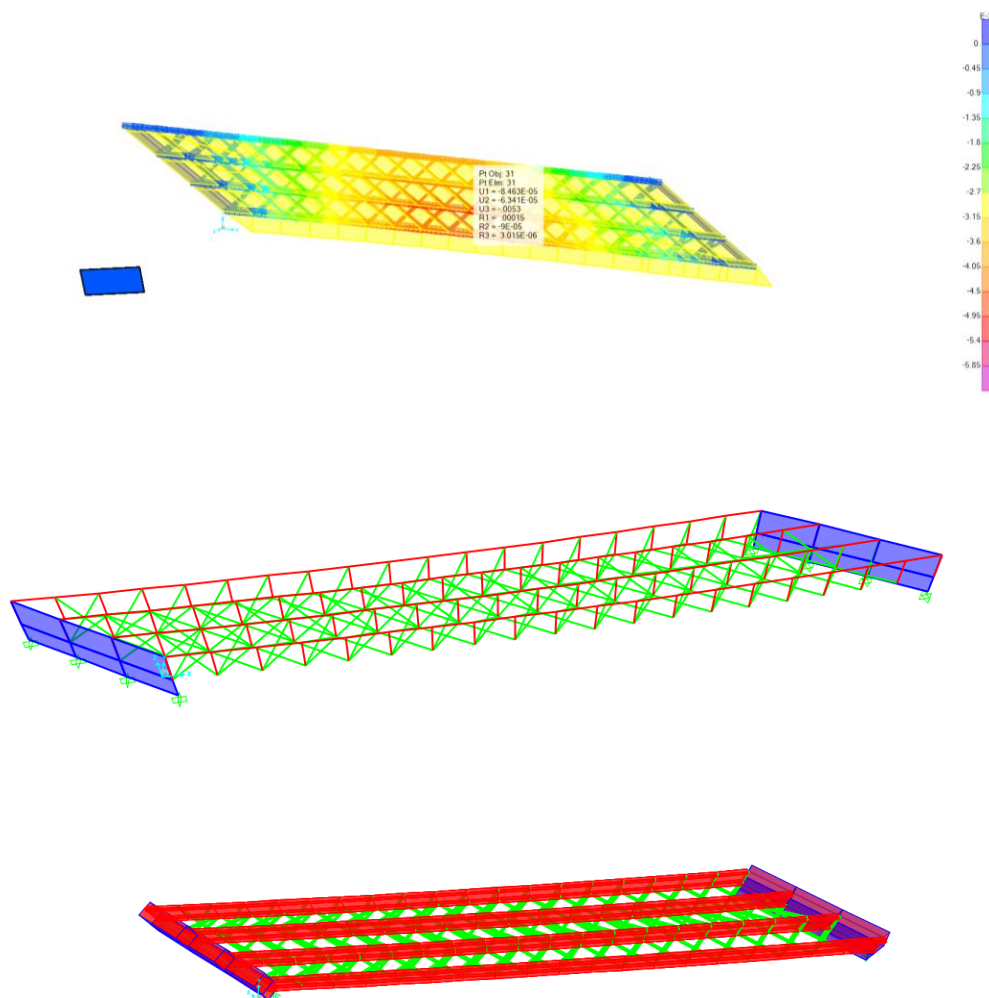
El equipo 1 y 2, ubicados en la losa del puente y la viga principal respectivamente, registraron las mayores aceleraciones y desplazamientos máximos. Esto indica que estas partes de la estructura pueden estar experimentando las mayores fuerzas dinámicas y movimientos cuando el puente está en uso. Es 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



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.

5. Conclusiones y recomendaciones

- La implementación de tecnologías innovadoras, como el uso de drones y software Programa de análisis fotogramétrico, ha demostrado ser valiosa en la realización de un levantamiento fotogramétrico detallado y preciso. Este tipo de levantamiento permitió obtener un registro detallado de la deflexión de la losa del puente. En comparación con los métodos convencionales, este enfoque automatizado proporcionó una mayor eficiencia y precisión, esencial para determinar el estado actual de la estructura y planificar futuras intervenciones.
- Los ensayos realizados con una volqueta de 8m³ cargada, 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/s^2 y 15.21 m/s^2 y desplazamientos máximos de 12.1 cm y 9.5 cm , 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.

6. Bibliografía

Petersen, S., & Jensen, T. (2019). *The Impact of Industrial Vibrations on Surrounding Ecosystems*. En T. Miller (Ed.), *Environmental Effects of Industrialization* (pp. 145-167). Springer.

Smith, L. (2022, abril). *Assessing the Impact of Vibrations on Urban Environments*. Ponencia presentada en la Conferencia Internacional sobre Vibración Ambiental, Cuenca, Ecuador.

García, M. (2017). *Vibrations in Transportation Infrastructures: Effects on Nearby Habitats* (Tesis de doctorado). Universidad de Azuay, Ecuador.

Aguiar, R. (2021). *GERISI-Seismic risk management in structures and non-structural elements of school buildings* View project. <https://www.researchgate.net/publication/267795794>

AISC 341-16. (2015). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, 1, 402.

ASCE/SEI. (2013). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*.

Avecillas, R., Ávila, J., Cabrera, J., & Espinoza, M. (2023). *Monitoreo de la salud estructural del puente vía Llacao mediante pruebas de vibración ambiental*.

Cinfuentes, G. (1997). *EL COLAPSO DEL PUENTE, SAMANA UN NUEVO ENFOQUE*.

Coro, C. Q. (2009). *REPARACIÓN DE PUENTES DE HORMIGÓN COLAPSADOS, MEDIANTE LA INSTALACIÓN DE SISTEMAS ESTRUCTURALES DE ACERO PROYECTO PREVIO A*

LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO SANDRA VERÓNICA DURÁN YAZUMA. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1462/1/CD-2188.pdf>

Cusba, D. (2011). *ESTUDIO DE LAS CAUSAS Y SOLUCIONES ESTRUCTURALES DEL COLAPSO TOTAL O PARCIAL DE LOS PUENTES VEHICULARES DE COLOMBIA DESDE 1986 AL 2011, Y LA EVALUACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS DEL DERRUMBAMIENTO DE UNO DE ELLOS.* <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7494/tesis600.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

El Universo. (2021). *Colapsa puente en vía que conecta Manabí con Guayas; cinco personas heridas* | Ecuador | Noticias | El Universo. <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* | Ecuador | Noticias | El Universo. <https://www.eluniverso.com/noticias/ecuador/colapsa-puente-sobre-rio-blanco-que-une-zonas-de-la-costa-y-sierra-nota/>

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. <https://doi.org/10.1002/2475-8876.1010>

Loaiza Yalilé. (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*.
- Maximino, C., Winston, A., & Hirose, S. (2018). *Contact and Noncontact Ultrasonic Nondestructive Test in Reinforced Concrete Beam*.
- 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. <https://doi.org/10.1007/S10712-018-9464-4>
- Muñoz, E. (2017). *ESTUDIO DE LAS CAUSAS DEL COLAPSO DE ALGUNOS PUENTES EN COLOMBIA*.
- 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. <https://doi.org/10.1109/TLA.2013.6502820>
- SNGRE. (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>

7. Anexos



Cienfuegos, 20 de octubre de 2023

Editorial "Universo SUR"

hace constar que:

El Artículo Científico presentado por los autores: Katherin Cevallos, Juan Maldonado-Noboa, Stalin Mantilla, Cesar Maldonado Noboa, con el título "Evaluar la rigidez en el tablero del puente de Nulti ubicado en la vía Cuenca-Azogues" ha sido aprobado por los pares evaluadores asignados por nuestra revista y será publicado en el Volúmen 19 número 94 correspondiente al período noviembre - diciembre 2023 de la Revista "CONRADO", con ISSN: 1990-8644. Misma que se encuentra certificada por el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA) como Publicación Seriada Científico-Tecnológica. También se encuentra indexada en directorios, catálogos y bases de datos internacionales como: Emerging Sources Citation Index (ESCI) de la Web of Science, Directory of Open Access Journals (DOAJ), la Biblioteca Científico-Electrónica en Línea, (en inglés Scientific Electronic Library Online, SciELO).



Atentamente,


Dr.C. Denis Fernández Álvarez
Jefe de Departamento- Editorial "Universo Sur"
Universidad de Cienfuegos, Cuba





Ilustración 19 Ensayos de esclerómetro



Ilustración 20 Parte baja del puente



Ilustración 21 Armado inferior del puente



Ilustración 22 Colocación de Equipos 1 y 2



Ilustración 23 Colocación de equipos 2 y3



Ilustración 24 Ultrasonido 1



Ilustración 25 Ultrasonido 2

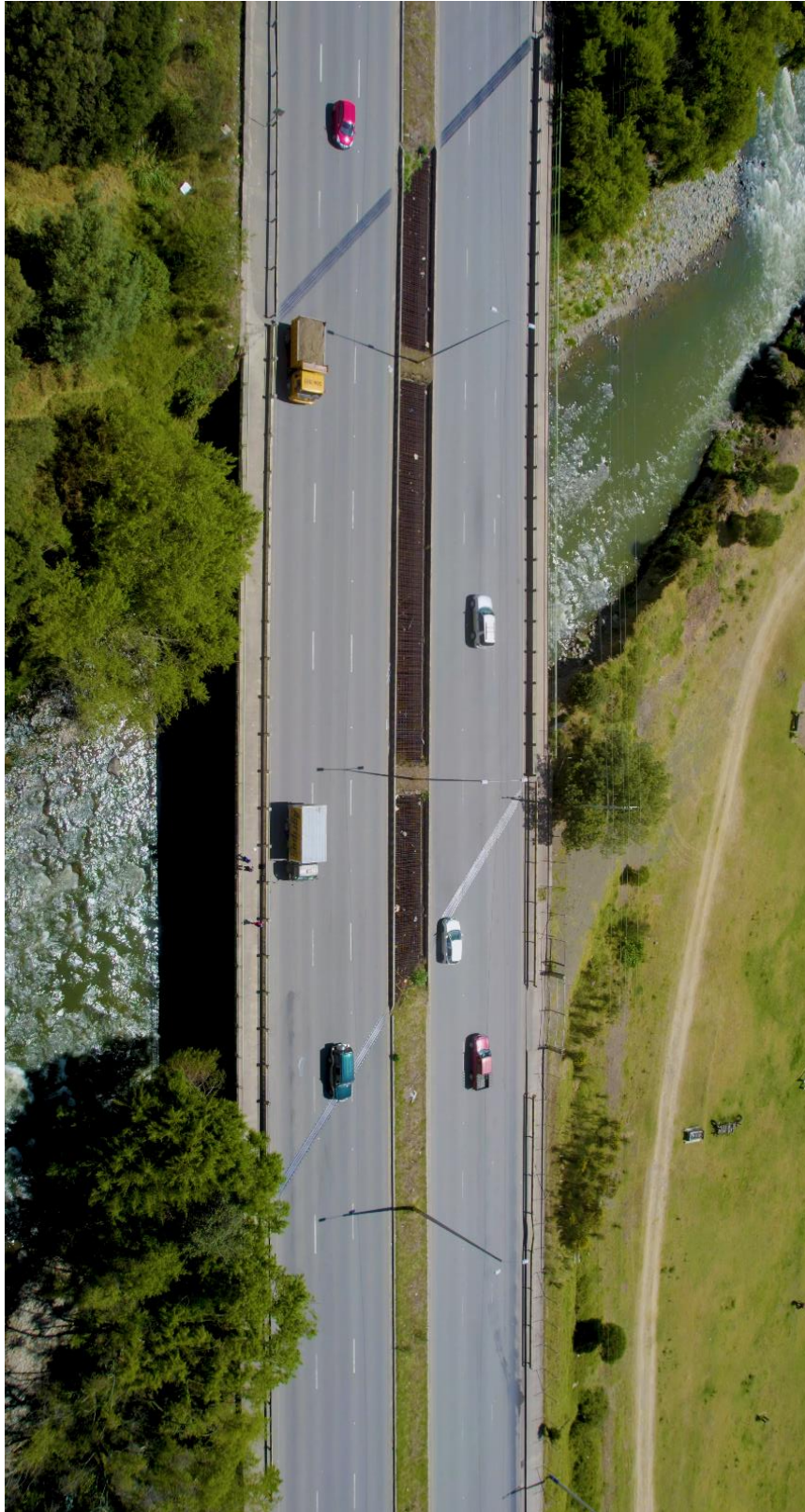


Ilustración 26 Paso de la volqueta

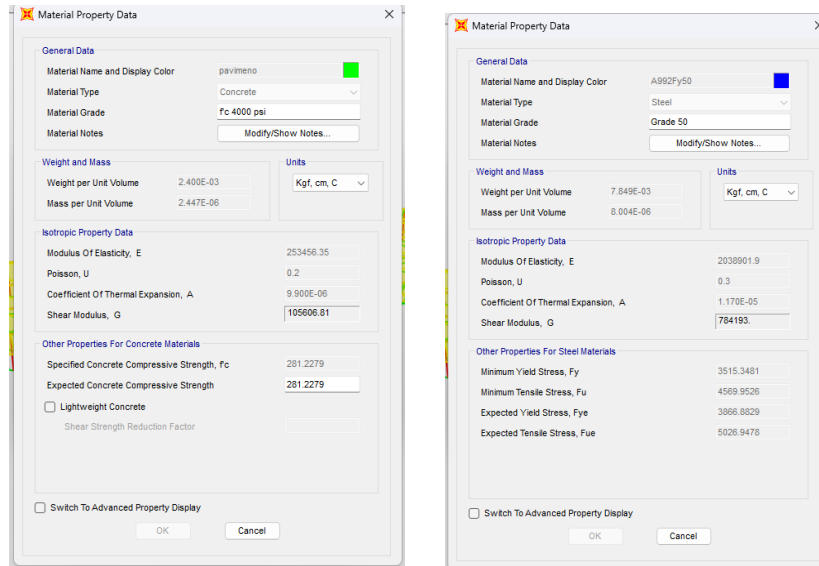
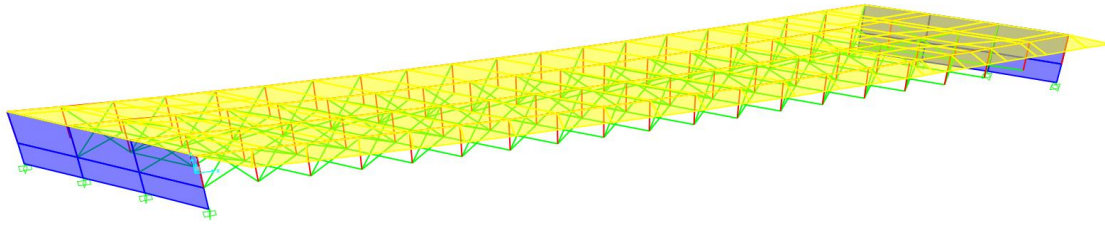


Ilustración 27 Materiales utilizados para el modelo

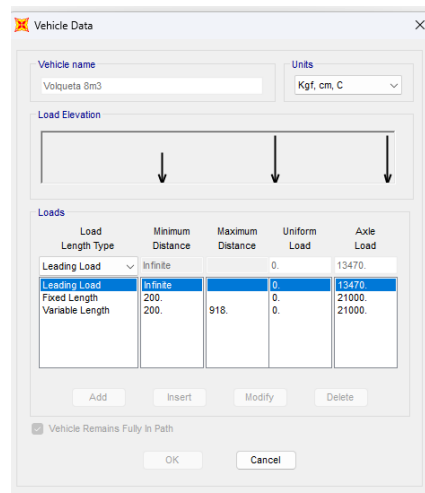


Ilustración 28 Cargas dinamicas del camión

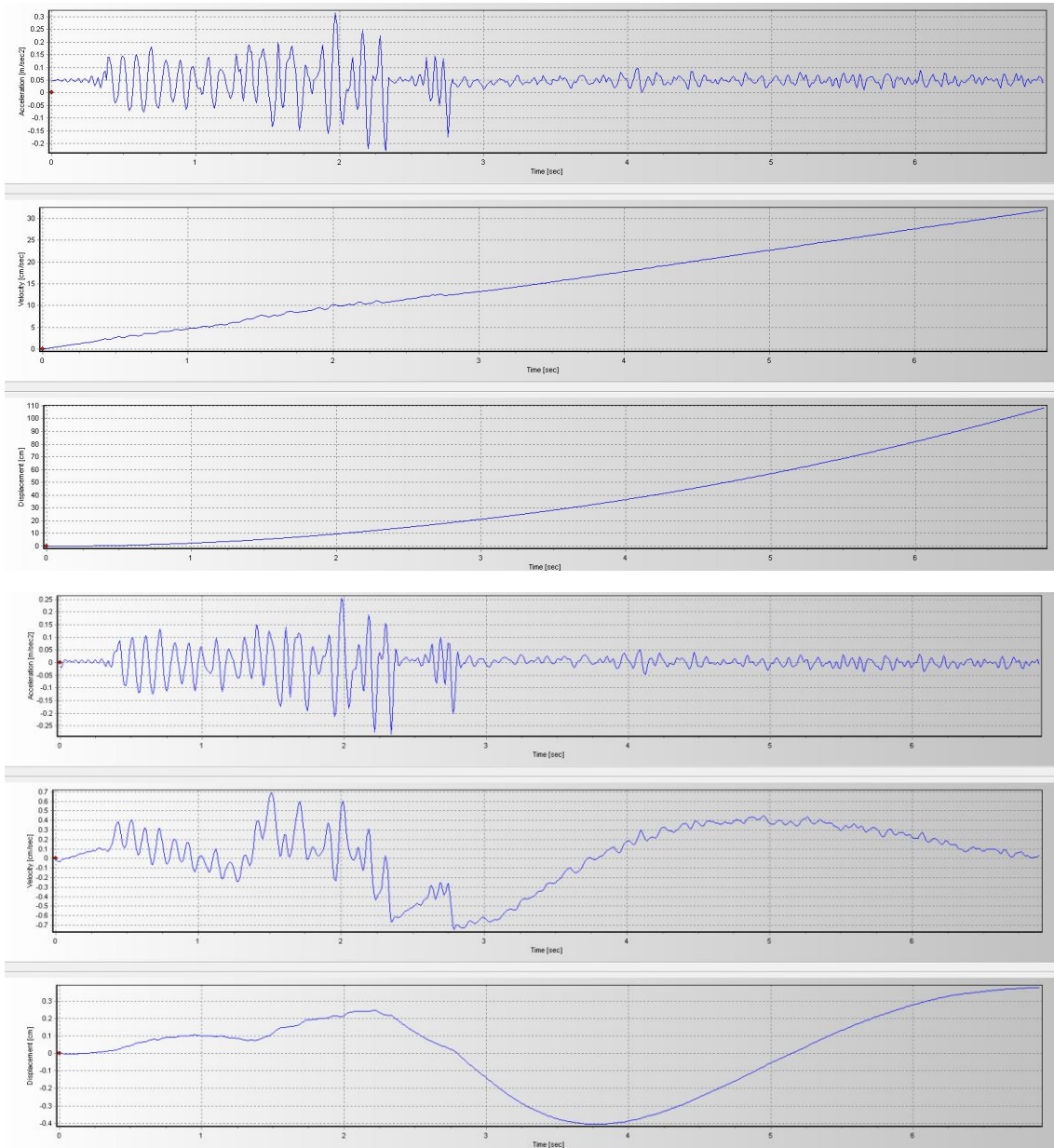


Ilustración 29 Análisis de señales para desplazamientos

ID	Name	Component	Start time	End time	Sampling frequency	Sampling period	N samples	Duration	Rec x	Rec y
1	V1	Vertical	2023-11-01 00:00:00.000000	2023-11-01 00:00:05.860000	100	0.01	586	5.860000s	0	0
2	V2	Horizontal	2023-11-01 00:00:00.000000	2023-11-01 00:00:05.860000	100	0.01	586	5.860000s	0	0

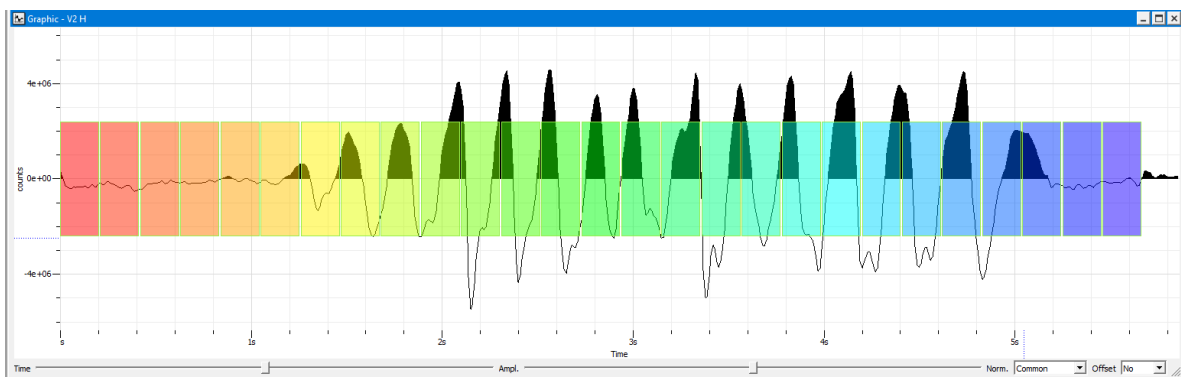
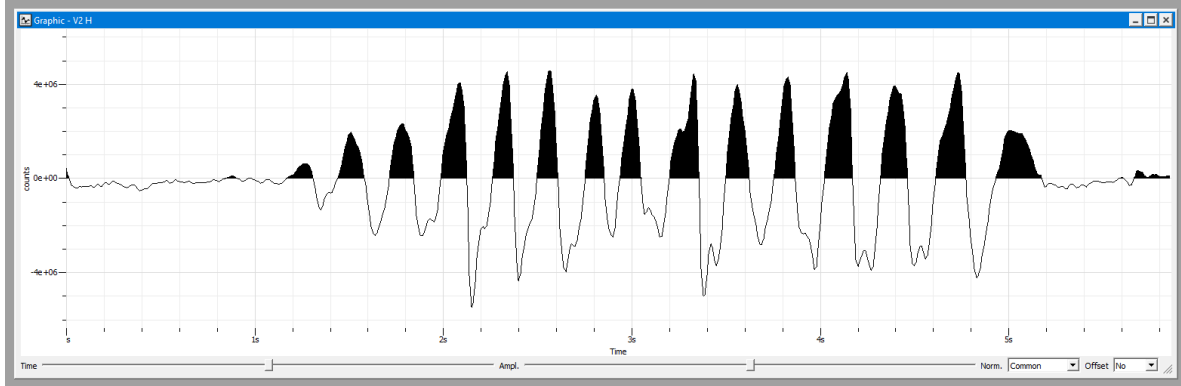


Ilustración 30 Análisis de señales para determinación de ventanas de análisis

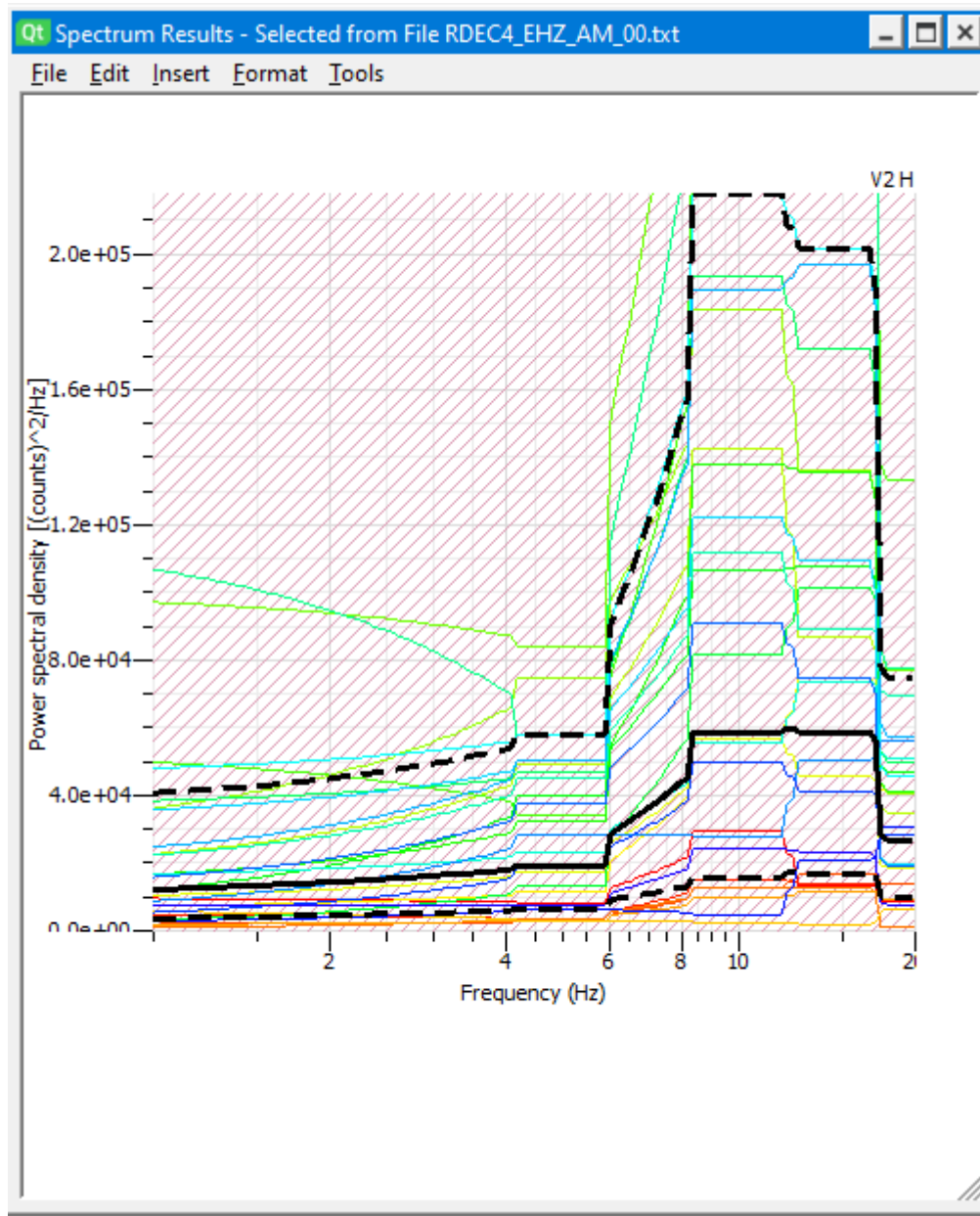


Ilustración 31 analisis de frecuencia de vibracion