

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN VIVIENDA Y CONSTRUCCIÓN

ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

“Metodología no destructiva para evaluación de patologías asociadas al concreto, tomando como referencia el valor de BHI en estructuras de puentes”

Informe final proyecto – Documento 01



**Informe final proyecto de
investigación**

*Metodología no destructiva para
evaluación de patologías asociadas al
concreto, tomando como referencia el
valor de BHI en estructuras de
puentes*

Fecha de emisión:
Abril 2024

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Vicerrectoría de Investigación y
Extensión

Escuela de Ingeniería en Construcción
Centro de Investigaciones en Vivienda
y Construcción

Contactos:

Tel: (506) 2550-2309

e-mail: civco@tec.ac.cr

www.tec.ac.cr

DOCUMENTO 01

1. Título: Metodología no destructiva para evaluación de patologías asociadas al concreto, tomando como referencia el valor de BHI en estructuras de puentes		
2. Descripción: El presente documento muestra los resultados del proyecto de investigación titulado: “Metodología no destructiva para evaluación de patologías asociadas al concreto, tomando como referencia el valor de BHI en estructuras de puentes”.		
3. Institución desarrolladora: Tecnológico de Costa Rica Vicerrectoría de Investigación y Extensión Escuela de Ingeniería en Construcción Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción		
4. Objetivo del informe: Presentar los resultados obtenidos en el proyecto: “Metodología no destructiva para evaluación de patologías asociadas al concreto, tomando como referencia el valor de BHI en estructuras de puentes”.		
6. Alcance del informe: El informe corresponde al documento 01 solicitado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Tecnológico de Costa Rica y presenta los resultados obtenidos en el proyecto: “Metodología no destructiva para evaluación de patologías asociadas al concreto, tomando como referencia el valor de BHI en estructuras de puentes”. Este informe fue preparado por los ingenieros: Giannina Ortiz Quesada, Gustavo Rojas Moya, Rommel Cuevas Kauffman y Gerardo Paez González.		
Firmas del informe		
Ing. Giannina Ortiz Quesada, MSc. Investigadora coordinadora Coordinadora CIVCO		Dr-Ing. José Andrés Araya Obando. Director Escuela de Ingeniería en Construcción

Tabla de contenido

1.	Código y título del proyecto	5
2.	Autores y direcciones	5
3.	Resumen	6
4.	Introducción	7
5.	Marco teórico.....	9
6.	Metodología.....	21
7.	Resultados por objetivo	24
7.1.	OE 1. Analizar las principales técnicas o métodos no destructivos utilizadas para caracterizar patologías en elementos de puentes en concreto.....	24
7.2.	OE 2. Estandarizar las técnicas de ensayo a utilizar en la metodología de evaluación	30
7.3.	OE 3. Proponer una herramienta metodológica para identificación de posibles causas de los daños identificados.....	33
7.4.	OE 4. Validar los resultados obtenidos en puente piloto	44
8.	Discusión de resultados.....	62
9.	Recomendaciones.....	64
10.	Bibliografía	65
11.	Apéndices.....	67

1. Código y título del proyecto

Código: 5402-1411-3201

Metodología no destructiva para evaluación de patologías asociadas al concreto, tomando como referencia el valor de BHI en estructuras de puentes

2. Autores y direcciones

El Proyecto fue coordinado por la Escuela de Ingeniería en Construcción, a través del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO), con la participación de la Escuela de Ingeniería en Computación.

Tabla 1. Autores y direcciones

Investigador	Escuela/Centro	email	ORCID
Giannina Ortiz Quesada. Coordinadora	Ingeniería en Construcción / Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción	gortiz@tec.ac.cr	https://orcid.org/0000-0001-7639-1499
Angel Navarro Mora ¹	Ingeniería en Construcción	annavarro@tec.ac.cr	https://orcid.org/0000-0002-0539-7014
Gustavo Rojas Moya	Ingeniería en Construcción	grojas@tec.ac.cr	https://orcid.org/0000-0003-3367-6165
Rommel Cuevas Kauffman	Ingeniería en Construcción / Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción	rcuevas@tec.ac.cr	https://orcid.org/0000-0001-6727-1110
Gerardo Paez González	Programa Evaluación Estructuras de Puentes	bpaez@tec.ac.cr	https://orcid.org/0000-0002-3961-2157

La coordinadora del proyecto fue la **Ing. Giannina Ortiz Quesada**, de la Escuela de Ingeniería en Construcción.

¹ El Ing. Angel Navarro trabajó durante el I Semestre del año 2022

3. Resumen

En Costa Rica el problema de infraestructura vial es uno de los más importantes, en particular relacionado al tema de puentes. Actualmente, la toma de decisiones y la asignación de recursos para las intervenciones de puentes no toman en cuenta la identificación adecuada y estandarizada de las causas de los daños encontrados en las inspecciones visuales de los puentes, lo que se evidencia en el estado actual de las estructuras.

El problema que se atendió con este proyecto de investigación fue la ausencia de una metodología que permita identificar las causas de las patologías identificadas en las evaluaciones visuales y los índices de salud de puentes valorados como inaceptables o deficientes, utilizando técnicas o ensayos no destructivos.

Este informe presenta un instrumento validado que permite estandarizar el análisis de un puente referenciado por su condición (valor BCI) y propone el uso de métodos no destructivos para la evaluación de daños asociadas al concreto.

Esta metodología de evaluación detallada se enfocó en elementos de concreto, al ser el material principal (80% de los puentes) en la construcción de puentes en Costa Rica [2], esta evaluación detallada complementará el trabajo que ha venido realizando el grupo de investigación eBridge, para priorización de intervenciones y apoyar la toma de decisiones por parte de los administradores de la infraestructura.

El principal aporte de este proyecto fue la generación de herramientas que permitirán a los administradores de estructuras de puentes la toma decisiones acertadas para la asignación de recursos e intervención de estas obras.

Palabras clave: índice de salud estructural, evaluación puentes, patologías en concreto, intervención puentes de concreto, ensayos no destructivos

4. Introducción

La condición de la infraestructura vial continúa siendo una gran debilidad socioeconómica en Costa Rica. Según el índice de competitividad mundial 2022 desarrollado por el Instituto Mexicano para la Competitividad, Costa Rica ocupa la posición 28 de 43 países analizados, posicionándose como un país con una competitividad media baja, siendo el tema de infraestructura uno de los puntos más débiles. Por otro lado, de acuerdo con el Plan Nacional de Desarrollo y de Inversión Pública 2022-2026 del actual Gobierno de Costa Rica, nuestro país es la cuarta economía más competitiva de América Latina, pero está rezagada en el tema de infraestructura del transporte y entorno macroeconómico.

Costa Rica es un país en desarrollo, con recursos limitados y que enfrenta en este momento el déficit fiscal más alto de la historia, lo que exige que se haga una correcta priorización de las inversiones en proyectos de infraestructura vial, para conseguir los recursos e invertirlos de la forma más eficiente posible. Para poder priorizar estas intervenciones, primero es necesario conocer de forma precisa la condición de vías. [1]

En el caso de infraestructura de puentes, según evaluaciones realizadas por el Programa de Evaluación de Estructuras de Puentes (PEEP) bajo el contrato TEC-CONAVI, un 44.13% se encuentra en estado deficiente y un 32.51% en situación insatisfactoria. Durante el periodo 2014-2018, se realizó el inventario de 1670 puentes y la inspección visual de daños para cada uno de estos, lo que permite tener una visión más clara de la condición de los puentes en rutas nacionales. Sin embargo, el resultado indica que solo un 2.34% de los puentes cuenta con una condición satisfactoria, la cantidad de puentes que deben ser intervenidos es superior a los 1600 puentes, de los cuales unos 600 requieren una intervención en el corto plazo. [2]

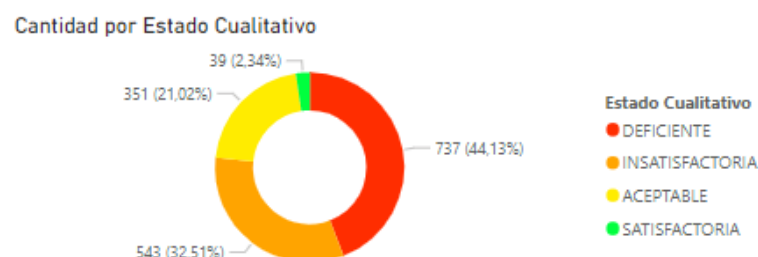


Figura 1. Resultados del inventario realizado 2014-2018

De estos puentes en estado inaceptable y deficiente el 80 % son puentes de concreto con daños en los elementos principalmente en la losa, superestructura y subestructura. [2]

Estos números son alarmantes y lamentablemente su atención no podría ser inmediata por la limitación de recursos no sólo económicos, es por lo que un análisis más detallado es necesario y la orientación hacia determinar las causas puede colaborar en el aprovechamiento de los recursos enfocados en la atención de las posibles causas.

En Costa Rica, a la fecha, las herramientas que ha utilizado Costa Rica para definir el abordaje sobre las estructuras de puentes, se basan en los resultados de inspecciones visuales o algunas detalladas, pero sin un análisis integral de las causas de los deterioros presentes, lo que puede generar que se enfoquen recursos económicos en reparar daños y no en enfocarse en la reparación del problema, podemos destacar los siguientes proyectos, que han presentado problemas en su planteamiento: [12]

- Rehabilitación del puente denominado actualmente Alfredo González y conocido popularmente como el puente de la “platina”, ruta nacional 1. En este puente el daño inicia con un problema en su junta de expansión en el año 2009, esta se atiende inicialmente con actividades de mantenimiento, sin realizar un análisis de la causa del problema. [13]. La rehabilitación finalmente se concluye en el año 2017. [14]
- Rehabilitación puente sobre Río Agua caliente, conocido como puente negro, en ruta nacional 224. Este puente empezó a tener problemas desde el año 2014, fue intervenido el año 2020, pero su intervención solamente consideró la subestructura, el análisis no fue integral, provocando que daños no atendidos provocarían el colapso del puente en el año 2021. [15]
- Intervenciones en juntas puente Juan Pablo II, ruta nacional 1. Este puente presenta problemas de desprendimiento de sus juntas de expansión desde el año 2017, se ha atendido con actividades de mantenimiento, se han realizado varias intervenciones las cuales han sido fallidas y a la fecha no se ha logrado solucionar el problema. [16]

Este proyecto presenta al país una herramienta que permite atender las intervenciones sobre los puentes enfocándose en las causas de los daños encontrados, no nada más reparando el daño; en otras palabras, identificando para los daños encontrados las posibles causas, de forma tal que los recursos se utilicen de forma adecuada.

5. Marco teórico

El mantener los puentes seguros para los usuarios es de suma importancia para los administradores de infraestructura vial. La gestión de los puentes carreteros requiere la recopilación y mantenimiento de información confiable, actualizada y completa para cada puente. Esta información incluye: datos de inventario que normalmente no cambian durante la vida de un puente; datos de inspecciones de campo y datos que se derivan o calculan para evaluar aspectos como socavación, vulnerabilidad a eventos extremos y capacidad de carga segura. [4]

El proyecto que se muestra a continuación ha sido desarrollado el grupo de investigación eBridge, del Centro de Investigaciones en Vivienda de la Escuela de Ingeniería en Construcción y perteneciente al Programa de Investigación eScience del Tecnológico de Costa Rica.

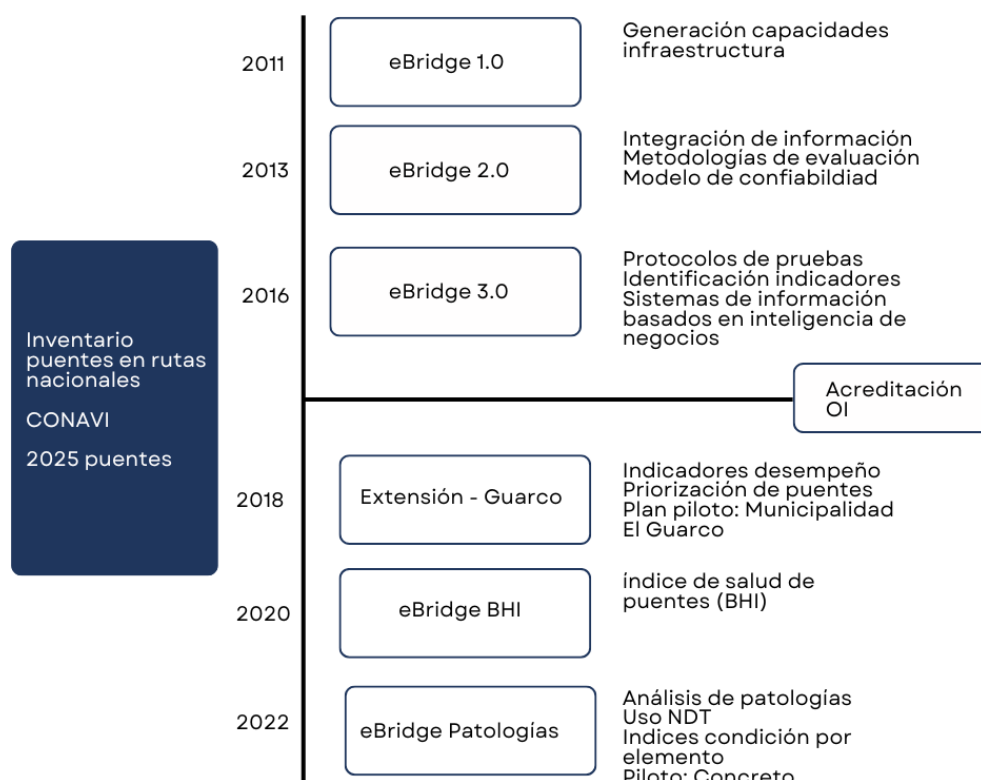


Figura 2. Desarrollo del grupo de investigación eBridge

En la figura 2, se muestra el desarrollo del tema de evaluación de puentes, partiendo de un análisis del entorno y las capacidades existentes en el país, luego se desarrolló un sistema de información basado en la teoría de inteligencia de negocios, haciendo uso de indicadores de desempeño. Se observa, además, la articulación de los diferentes proyectos de investigación y extensión del grupo eBridge y su desarrollo en el tiempo, en la propuesta que se presenta en este documento, se profundiza en el desarrollo y uso de los indicadores para la evaluación y toma de decisiones en infraestructura de puentes. Los indicadores propuestos se analizaron en un nivel más detallado ya no solo por puente, sino profundizando en el análisis causa efecto, las patologías y los elementos que componen el puente, en este caso enfocado en puentes de concreto.

Evaluación de puentes

En el ciclo de vida de un puente, la evaluación sobre su condición es una labor muy importante, no sólo para conocer su nivel de daño, sino que es una herramienta para definir las intervenciones necesarias.

En Costa Rica no se cuenta con una amplia normativa específica de carácter obligatoria para la evaluación de los puentes, pero si se cuenta con un Manual de Inspección de Puentes publicado por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes en el año 2007. [3] y los Lineamientos para el mantenimiento de puentes [17], los cuales se consideran de referencia obligatoria al ser publicados por el ente Rector en la materia.

El Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, ha publicado los Lineamientos para el Diseño Sismoresistente de Puentes [4], en este documento se presentan los requisitos mínimos para el análisis, diseño y rehabilitación sismorresistente de puentes que se construyan en el territorio de la República de Costa Rica.

El Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (Lanamme) posee una metodología de inspección de puentes, pero no incluye recomendaciones en cuanto a su posible intervención. [5]

Por otra parte, el Tecnológico de Costa Rica, por medio de su Programa de Evaluación de Estructuras de Puentes y el grupo de investigación eBridge del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción de la Escuela de Ingeniería en Construcción, ha propuesto una metodología de evaluación de puentes, la cual incluye un análisis del entorno, incluyendo variables sísmicas e hidrometeorológicas, considerando además una serie de pasos necesarios para realizar una evaluación de puentes. [6]

Inspecciones detalladas

Una inspección detallada incluye una inspección a profundidad de uno o más componentes del puente, usando medios visuales o técnicas no destructivas según sea necesario para identificar cualesquiera deficiencias no fácilmente detectables. Para estas inspecciones se requiere de control de tráfico y equipo especial, según sea necesario para obtener acceso a los elementos. [4].

A nivel nacional, el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), ha establecido un manual denominado Lineamientos para el Mantenimiento de Puentes, en este documento se recomiendan algunos ensayos destructivos y no destructivos para aplicar en las inspecciones detalladas de puentes y se dan algunas recomendaciones de cómo realizar un análisis causa-efecto [17], pero no establece una metodología para realizar este análisis.

Estos lineamientos pretenden ser una guía para que los ingenieros puedan realizar una inspección detallada sobre un puente, contiene la metodología para priorizar las estructuras con base en los resultados de la inspección visual. También, clasifica los principales ejemplos de deficiencia/deterioro de miembros de concreto/acero y el daño encontrado, tratando de establecer algunas posibles causas de este deterioro, pero sin relacionarlo con resultados de algún ensayo, lo deja abierto a la aplicación de juicio de experto. [17]

Uso de ensayos no destructivos

Los ensayos no destructivos son una alternativa para evaluar estructuras que presentan alguna patología, permitiendo obtener información clave sobre el desempeño del material, sin comprometer físicamente la estructura.

A nivel internacional, uno de los documentos que resumen algunas técnicas aplicables para la evaluación de puentes es el Manual de Inspección de Puentes de la American Association of State Highway and Transportation Officials [4], pero al igual que el anterior no establece una metodología para su aplicación.

En este manual se describe la información mínima a considerar en las inspecciones, pero, además, incluye una recomendación de ensayos que se pueden aplicar a las estructuras de concreto. El propósito es servir como herramienta para el desarrollo de políticas y procedimientos específicos para la inspección y evaluación de puentes de carretera en servicio. También, incluye la guía reconocida a nivel de Estados Unidos para el cálculo de la capacidad de carga de los puentes de carretera. [4]

Este Manual incluye algunas recomendaciones en cuanto a los ensayos recomendados sobre las estructuras de puentes, para distintos materiales. En la figura 3, se muestra la Tabla 5.2.1-1, la cual presenta diferentes técnicas de ensayos y su capacidad para detectar defectos o daños en el material.

Table 5.2.1-1—Capability of Investigating Techniques for Detecting Defects in Concrete Structures in Field Use

Capability of Defect Detection ^a						
Method Based on	Cracking	Scaling	Corrosion	Wear and Abrasion	Chemical Attack	Voids in Grout
Strength	N	N	P	N	P	N
Sonic	F	N	G ^b	N	N	N
Ultrasonic	G	N	F	N	P	N
Magnetic	N	N	F	N	N	N
Electrical	N	N	G	N	N	N
Nuclear	N	N	F	N	N	N
Thermography	N	G ^b	G ^c	N	N	N
Radar	N	G ^b	G ^c	N	N	N
Radiography	F	N	F	N	N	F

^a G = Good; F = Fair; P = Poor; N = Not suitable

^b Beneath bituminous surfacings

^c Detects delaminations

Figura 3. Ensayos para concreto y su capacidad para detectar daños [4]

Para el establecimiento de una adecuada metodología para la evaluación de puentes, es necesario definir algunos conceptos importantes, a saber: [18]

- Evaluación: La evaluación de una estructura de puente es la valoración del desempeño de este en un momento determinado y la identificación de daños y fallas en la estructura.
- Daño: El daño en una estructura se define como cambios en los materiales, en sus propiedades geométricas, en las propiedades de los sistemas, sus condiciones de frontera o conectividad. Los daños pueden afectar el desempeño actual o futuro de las estructuras.
- Falla: Una falla es la condición de un puente cuando un estado límite es alcanzado o excedido.

- Monitoreo de salud estructural: Actualmente se utiliza el término de monitoreo de la salud estructural o SHM por sus siglas en inglés, para describir las técnicas que permiten la evaluación y diagnóstico preventivo de las estructuras.

La identificación de daños en una estructura de puente de acuerdo con las técnicas de SHM, se describe en 4 niveles [18], a saber:

- Detección del daño: es cuando se identifica la presencia de un daño.
- Localización del daño: es cuando se localiza el daño.
- Tipificación del daño: es cuando se determina el tipo de daño.
- Extensión del daño: es cuando se evalúa la severidad del daño.

La evaluación de un puente debe incluir varias etapas, en el manual de evaluación de puentes [4], en este documento se puede encontrar:

- Elementos mínimos de un inventario
- Sistemas de administración de puentes
- Inspección
- Pruebas en materiales
- Pruebas de carga
- Análisis de fatiga

La mayoría de las metodologías de evaluación de daños e inspección visual para puentes se enfoca en la identificación de éstos en los diferentes componentes de un puente, el nivel de profundización dependerá de los objetivos de la evaluación.

Algunos de los manuales de referencia para las inspecciones visuales a nivel internacional son:

- Bridge Inspector's Reference Manual. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Publication No. FHWA NHI 12-050. December, 2012.
- BRIDGE ELEMENT INSPECTION MANUAL. New Jersey Department of Transportation. 2014.
- The Manual for Bridge Evaluation. American Association of State Highway and Transportation Officials. 2018.
- BRIDGE INSPECTION PROCEDURE MANUAL – Australia. 2013.
- Guía para la realización de inspecciones principales de obras de paso en la Red de Carreteras del Estado. Ministerio de Fomento. Gobierno España. 2012.

Tabla 2. Metodologías de evaluación de puentes

Nombre del Manual	País	Alcance
Bridge Inspector's Reference Manual. U.S	Estados Unidos	Describe los posibles daños a presentarse en materiales como concreto, madera, acero. Realiza una evaluación global del puente de forma visual. Recomienda algunos ensayos a aplicar para caracterizar los daños.
BRIDGE ELEMENT INSPECTION MANUAL	Estados Unidos	Es una guía para la evaluación visual de los diferentes elementos que componen un puente. Estandariza los elementos a evaluar.
The Manual for Bridge Evaluation	Estados Unidos	Describe los requerimientos mínimos para las inspecciones de puentes. Recomienda posibles ensayos destructivos y no destructivos a aplicar. Da recomendaciones en cuanto a la utilización del monitoreo y pruebas de carga.
Guía para la realización de inspecciones principales de obras de paso en la Red de Carreteras del Estado	España	Describe los posibles daños a presentarse en materiales como concreto, acero. Realiza una evaluación global del puente de forma visual. Describe el sistema de administración de puentes a utilizar. Introduce la evaluación de algunos elementos del entorno.
Manual de Inspección de Puentes	Costa Rica	Describe los posibles daños a presentarse en materiales como concreto, acero. Describe los requerimientos mínimos a considerar en el inventario de puentes Describe el sistema de administración de puentes a utilizar.

En la mayoría de los países con base en los datos obtenidos en las inspecciones visuales, se obtienen índices o indicadores que ayudan a dar seguimiento a los objetivos de un administrador de puentes, priorizar proyectos de mantenimiento o reemplazo de puentes, identificar qué estructuras en el inventario están más deterioradas y necesitan urgentemente reparaciones.

En el proyecto de investigación “Desarrollo de un índice de salud de puentes (BHI) para Costa Rica”, se desarrolla el tema del uso de indicadores para la priorización inicial de posibles intervenciones en los puentes. Estos indicadores se basan en las inspecciones visuales realizadas, las cuales en el caso del TEC se basan en el Manual de Inspecciones de Puentes del MOPT [3] y otros procedimientos desarrollados en proyectos anteriores, tales como el cálculo de indicadores de desempeño, basado en inspecciones visuales como el proyecto de extensión desarrollado para la Municipalidad del Guarco. [6]

En la figura 4, se muestra un resumen de los índices desarrollados, el BHI es el índice de salud y está compuesto por tres índices; BCI que es el índice de condición estructural, el BCI relacionado con el sismo y el BCI hidrometeorológico; utilizando un índice relacionado con la importancia socioeconómica para priorizar.

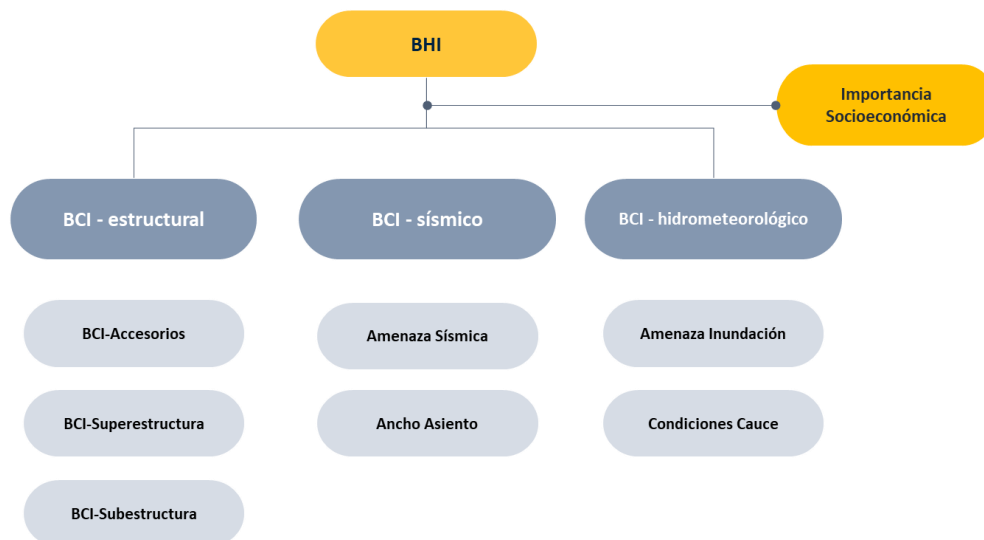


Figura 4. Desarrollo del BHI del grupo de investigación eBridge

De los índices calculados, el BCI es en el que se puede influir con actividades de ingeniería para el mejoramiento del estado del puente, ya que contempla el estado de los accesorios, superestructura y subestructura. Los otros índices se refieren a un análisis del entorno del puente y al riesgo que representa cada variable.

Recomendaciones para la intervención de puentes

En esta figura 5, se observa como con base en los resultados del inventario, se realiza una evaluación visual y se calculan los índices de condición (BCI), posterior a esto se realiza la priorización considerando no sólo la condición del puente, sino que aspectos hidrometeorológicos, sísmicos y las condiciones

socioeconómicas. Podemos asociar, además, el tipo de intervención recomendada, con base en los índices de condición. Esta propuesta la ha realizado el grupo de investigación eBridge, basada en la guía propuesta por la FHWA de Estados Unidos. [20]

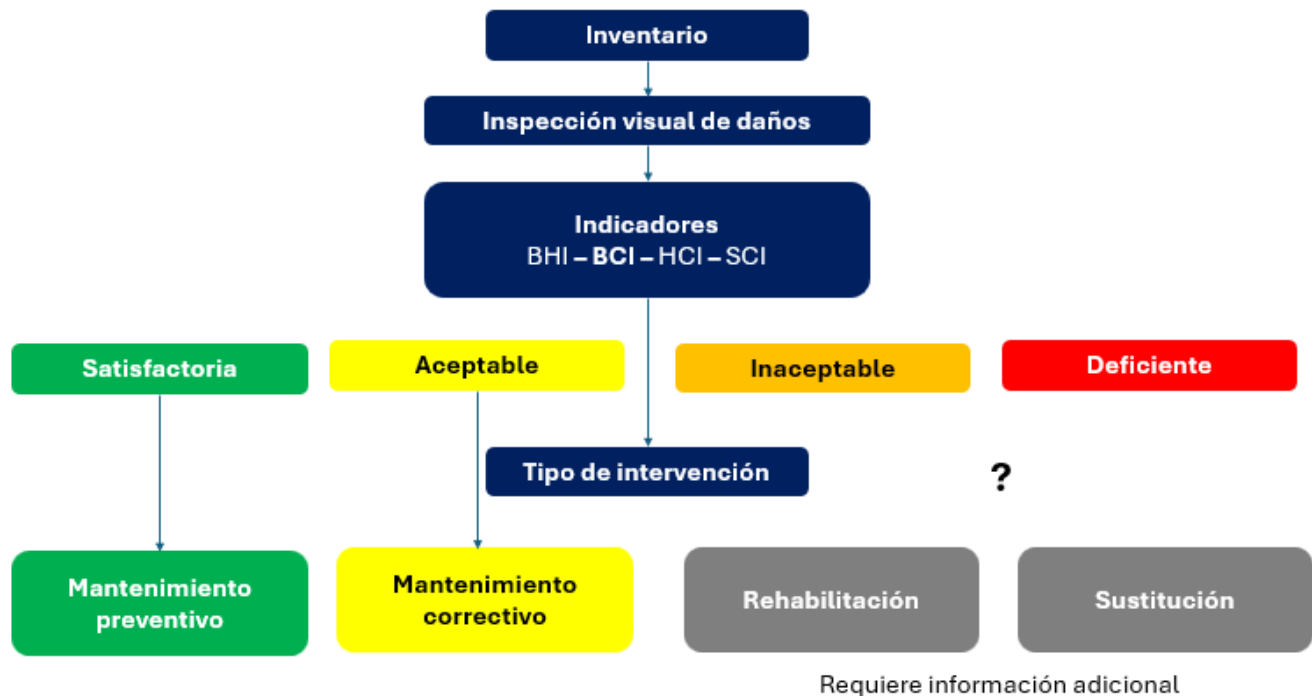


Figura 5. Propuesta uso indicadores para intervención de puentes

La FHWA, establece en su Bridge Preservation Guide del 2018, recomendaciones básicas para la intervención de puentes.

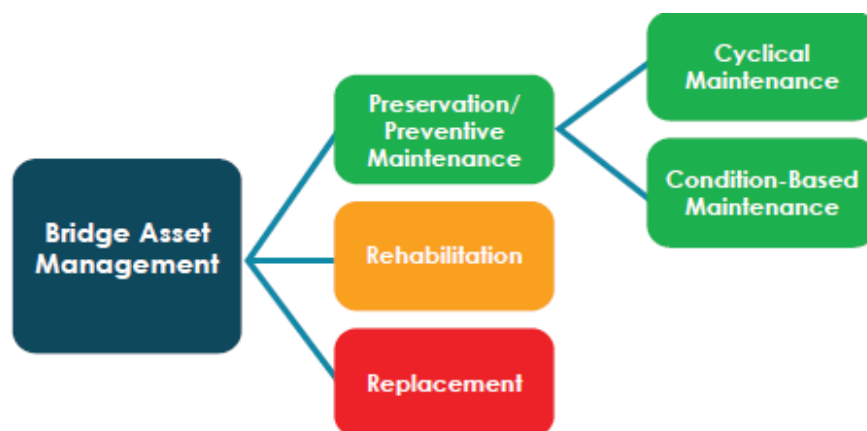


Figura 7. Recomendaciones generales de intervención de puentes [20]

Estas recomendaciones se hacen con base en la evaluación realizada sobre el puente, en una escala de 0 a 9, donde por ejemplo si la calificación se encuentra entre 7 y 9, la recomendación mantenimiento cíclico, si se califica con 5 o 6 es un mantenimiento por condición y si su calificación es menor o igual a 4 puede ser rehabilitación o sustitución.

Para el caso de Costa Rica, lo que se propuso fue utilizar la escala de 1 a 5, que se establece en el Manual del MOPT y generar una calificación de condición para los valores obtenidos en las inspecciones y el BCI.

Análisis de patologías

A nivel nacional, el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), ha establecido un manual denominado Lineamientos para el Mantenimiento de Puentes, en este documento se recomiendan algunos ensayos destructivos y no destructivos para aplicar en las inspecciones detalladas de puentes y se dan algunas recomendaciones de cómo realizar un análisis causa-efecto [17], pero no establece una metodología para realizar este análisis.

Estos lineamientos pretenden ser una guía para que los ingenieros puedan realizar una inspección detallada sobre un puente, contiene la metodología para priorizar las estructuras con base en los resultados de la inspección visual. También, clasifica los principales ejemplos de deficiencia/deterioro de miembros de concreto/acero y el daño encontrado, tratando de establecer algunas posibles causas de este deterioro, pero sin relacionarlo con resultados de algún ensayo, lo deja abierto a la aplicación de juicio de experto. [17]

A nivel internacional, uno de los documentos que resumen algunas técnicas aplicables para la evaluación de puentes es el Manual de Inspección de Puentes de la American Association of State Highway and Transportation Officials [4], pero al igual que el anterior no establece una metodología para su aplicación.

En este manual se describe la información mínima a considerar en las inspecciones, además, incluye una recomendación de ensayos que se pueden aplicar a las estructuras de concreto. El propósito es servir como herramienta para el desarrollo de políticas y procedimientos específicos para la inspección y evaluación de puentes de carretera en servicio. También, incluye la guía reconocida a nivel de Estados Unidos para el cálculo de la capacidad de carga de los puentes de carretera. [4]

Este Manual incluye algunas recomendaciones en cuanto a los ensayos recomendados sobre las estructuras de puentes, para distintos materiales. Otro elemento importante que posee este manual son las recomendaciones para la realización de pruebas de carga e instrumentación básica recomendada.

A nivel de edificaciones, se encuentran países que poseen normativa para la realización de inspecciones detalladas, tales como España. Estos documentos forman de un conjunto UNE 41805 IN, que, en su conjunto, consta de 14 partes.

Aunque el diagnóstico de un edificio se debe realizar con una visión global, la normativa pretende ir guiando los contenidos de los informes y recomendando ensayos o pruebas. Si bien, esta normativa es aplicable a edificaciones puede servir de guía para la generación de herramientas similares en el caso de puentes.

- UNE 41805-1 IN Diagnóstico de edificios. Parte 1: Generalidades.
- UNE 41805-2 IN Diagnóstico de edificios. Parte 2: Estudios históricos.
- UNE 41805-3 IN Diagnóstico de edificios. Parte 3: Estudios constructivos y patológicos.
- UNE 41805-4 IN Diagnóstico de edificios. Parte 4: Estudio patológico de la estructura del edificio. Terreno y cimentación.
- UNE 41805-5 IN Diagnóstico de edificios. Parte 5: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de fábrica.
- UNE 41805-6 IN Diagnóstico de edificios. Parte 6: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de hormigón.
- UNE 41805-7 IN Diagnóstico de edificios. Parte 7: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras metálicas.
- UNE 41805-8 IN Diagnóstico de edificios. Parte 8: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera.
- UNE 41805-9 IN Diagnóstico de edificios. Parte 9: Estudio patológico del edificio. Cubiertas.
- UNE 41805-10 IN Diagnóstico de edificios. Parte 10: Estudio patológico del edificio. Fachadas no estructurales. UNE 41805-11 IN Diagnóstico de edificios. Parte 11: Estudio patológico del edificio. Carpintería de ventanas y cerrajería. UNE 41805-12 IN Diagnóstico de edificios. Parte 12: Estudio patológico del edificio. Particiones interiores y acabados. UNE 41805-13 IN Diagnóstico de edificios. Parte 13: Estudio patológico del edificio. Instalaciones.
- UNE 41805-14 IN Diagnóstico de edificios. Parte 14: Informe del diagnóstico.

Otra referencia metodológica importante por considerar es el uso de las recomendaciones dadas para el monitoreo de la salud estructural para estructuras de puentes [18], en el cual los últimos dos pasos incluyen el análisis detallado de los daños para su adecuada caracterización:

- Detección del daño: es cuando se identifica la presencia de un daño.

- Localización del daño: es cuando se localiza el daño.
- Tipificación del daño: es cuando se determina el tipo de daño.
- Extensión del daño: es cuando se evalúa la severidad del daño.

Esta metodología ha contribuido a la caracterización de las estructuras, utilizando algunos ensayos no destructivos sobre los materiales y la utilización del monitoreo de variables tales como vibración, desplazamiento, entre otros.

El conocimiento sobre la condición de un puente o sus elementos es la información requerida más esencial. El monitoreo de la salud estructural brinda la oportunidad de cuantificar la condición y proporcionar la base para la toma de decisiones. En ingeniería civil, el procedimiento y las herramientas están mejor desarrollados para puentes. [18]

El alcance y seguimiento depende principalmente de los resultados requeridos. Actualmente se utilizan cinco niveles para determinar la profundidad de la investigación a realizar sobre la estructura. Estos son: [18]

- Nivel 1: Calificación. Esto representa la evaluación convencional de la estructura a partir de una inspección visual. Esta inspección que proporciona una impresión subjetiva del estado de la estructura. Esto implica la aplicación de un sistema de gestión de puentes como PONTIS o DANBRO o en el caso de Costa Rica el SAEP.
- Nivel 2: Evaluación de la condición. Este nivel implica el análisis mayor, la realización de alguna campaña de ensayos y tomar una decisión sobre si el enfoque convencional es satisfactorio o se toma un enfoque diferente. Esto determina el tipo y la cantidad de instrumentación.
- Nivel 3: Evaluación del desempeño. Este nivel intermedio utiliza el mismo procedimiento que se describe para Nivel 2. El nivel de evaluación y elaboración en el proceso de apoyo a la decisión es considerablemente mayor a medida que se mide y genera información adicional. Esta proporciona indicadores adicionales para la evaluación y demostrará el desempeño de la estructura. Se requiere una instrumentación más densa y un monitoreo síncrono.
- Nivel 4: Evaluación detallada y calificación. El siguiente paso será establecer un modelo analítico que represente la estructura. El modelo se comparará con los resultados del seguimiento. Si esa identificación es simple, se podría dar un paso atrás hacia el Nivel 3. Si se detectan fenómenos que no se pueden explicar en los registros, se deben tomar medidas adicionales para aclarar la situación. Lo recomendado es introducir un registro permanente durante un período de tiempo para capturar los fenómenos necesarios válidos para este caso concreto. Las pruebas de carga también han

demostrado ser exitosas para establecer parámetros de rendimiento. Con estos resultados se puede realizar una actualización del modelo simple para evaluar los resultados y proporcionar una calificación. Se requiere un monitoreo extenso. Los registros deben cubrir al menos 24 horas, pero preferiblemente mucho más tiempo para capturar el entorno y las situaciones de tráfico.

- Nivel 5: Predicción a lo largo de la vida útil. Para una predicción a lo largo de la vida útil de un puente, los registros disponibles deben ser suficiente extensos para cubrir al menos tres ciclos relevantes para la estructura. Este monitoreo debe incluir al menos 3 años. La simulación debe ejecutarse desde el modelo analítico para lograr un rendimiento teórico para comparación. Para manejar la gran cantidad de datos, se requiere un software especial para soporte de decisiones. Las pruebas de carga serán específicas y extensas. Además, las pruebas microestructurales podrían ser útiles para examinar el rendimiento de los elementos individuales de una estructura. El proceso de actualización será extenso y debe considerar varias condiciones de la estructura. Esto incluye particularmente diferentes casos de carga y todas las no linealidades involucradas. En caso de duda razonable, durante el seguimiento el sistema debe operarse en línea y basado en la web con diferentes alertas por el soporte de decisiones.

Esta metodología conocida bajo el registro de BRIMOS, es aplicada en países del norte de Europa, especialmente en Austria, como parte del seguimiento a las estructuras catalogadas como fundamentales. VCE Vienna Consulting Engineers ZT GmbH es una empresa de consultoría independiente orientada a la alta tecnología con sede en Austria.

6. Metodología

Para el desarrollo del proyecto y cumplimiento del objetivo general: **“Desarrollar una herramienta metodológica para identificar las posibles causas de patologías relacionadas al concreto en elementos de puentes, mediante el uso de ensayos no destructivos”** se utilizó la metodología, que se detalla a continuación.

OE 1. Analizar las principales técnicas o métodos no destructivos utilizadas para caracterizar patologías en elementos de puentes en concreto.

Para alcanzar este objetivo se realizaron las siguientes actividades:

- a. Revisión de documentación y bibliografía existente.
- b. Análisis de los métodos y técnicas y clasificación por su principio físico, acá se identificaron los siguientes:
 - Métodos de fuerza
 - Sonido
 - Ultrasonido
 - Magnéticos
 - Eléctricos
 - Nucleares
 - Termográficos
 - Radar (GPR)
 - Radiografía
 - Químicos
 - Monitoreo salud estructural (SHM)
- c. Generación de base de datos con documentación de cada uno de los métodos y los ensayos asociados.
- d. Elaboración de matriz comparativa

Esta matriz incluye:

- Método
- Descripción del método
- Ensayos asociados
- Descripción del ensayo
- Material
- Patologías que puede identificar
- Normativa asociada
- Equipo requerido
- Equipo existente en el CIVCO
- Correlación con otros ensayos

- Referencias bibliográficas

Adicionalmente y con el propósito de facilitar el uso del BCI (Índice de condición del puente) en las evaluaciones se han realizado acciones con el Área de Administración de Tecnologías de Información, específicamente con la profesora Sonia Mora y el estudiante Aaron Soto Cortes para generar una herramienta de software que ayude con el cálculo del BCI.

OE 2. Estandarizar las técnicas de ensayo a utilizar en la metodología de evaluación.

Para alcanzar este segundo objetivo se realizaron las siguientes actividades:

- Revisión de documentación y bibliografía existente
- Análisis de técnicas y equipos existentes en el CIVCO, para ello se generaron talleres de trabajo, con la participación de investigadores, expertos invitados y técnicos de laboratorio.

Proyecto de investigación: "Metodología no destructiva para evaluación de patologías asociadas al concreto, tomando como referencia el valor de BHI en estructuras de puentes"
Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción - CIVCO
Escuela de Ingeniería en Construcción
Plan de trabajo II Semestre 2022

Objetivo específico a atender: 2. Estandarizar las técnicas de ensayo a utilizar en la metodología de evaluación

Actividad	Responsable	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10	Semana 11	Semana 12	Semana 13	Semana 14	Semana 15	Semana 16	Semana 17	Semana 18	S
Taller sobre ensayo índice de rebote	Rommel Cuevas	9/9/2022																		
Taller sobre ensayo ultrasonido	Giannina Ortiz		12/9/2022																	
Taller sobre ensayo de carbonatación	Rommel Cuevas			17/9/2022																
Taller sobre ensayo de carga media	Giannina Ortiz				26/9/2022															
Taller sobre ensayo de termografía	Rommel Cuevas					3/10/2022														
Taller sobre SHM	Giannina Ortiz - Gustavo Rojas						16/9/2022													
Definición de prototipos	Todo el grupo							21/9/2022												
Construcción prototipo	Técnicos + Asistentes								26/9/2022											
Revisión procedimientos	Todo el grupo									5/10/2022	12/10/2022									
Planificación de ensayos	Todo el grupo											26/10/2022								
Aplicación de ensayos	Todo el grupo												2/11/2022	3/11/2022	16/11/2022					
Análisis de datos y conclusiones	Todo el grupo															23/11/2022	30/11/2022	1/12/2022		

Los talleres serán presenciales en la sala del CIVCO.
Los talleres se realizarán los días viernes para contar con la participación de los técnicos de laboratorio.
Para los talleres los miembros de equipo deben haber estudiado la técnica a analizar.
Las otras reuniones se mantienen para los días miércoles.
Las fechas marcadas con verde son viernes.
Las fechas marcadas con naranja son miércoles.
Las fechas marcadas con celeste son sábados a desarrollarse durante la semana.



Figura 6. Ejemplo de calendarización de actividades semestrales usado para el desarrollo del proyecto.

Los talleres fueron impartidos por lo miembros del equipo investigador y participaron técnicos de laboratorio y estudiantes. Incluyeron una parte teórica de cada método y una parte práctica.

Los temas impartidos fueron:

Tabla 3. Talleres impartidos para cumplimiento objetivo 2

Actividad	Responsable
Taller sobre ensayo índice de rebote	Rommel Cuevas
Taller sobre ensayo ultrasonido	Giannina Ortiz

Taller sobre GPR	Gerardo Paez
Taller sobre ensayo de carbonatación	Rommel Cuevas
Taller sobre ensayo de celda media	Giannina Ortiz
Taller sobre ensayo de termografía	Rommel Cuevas
Taller sobre SHM	Giannina Ortiz - Gustavo Rojas

- c. Generación de base de datos con documentación de cada uno de los métodos y el equipo existente en CIVCO.
- d. Recopilación de datos de ensayos realizados en el laboratorio del CIVCO para comparar el uso de diferentes métodos.

OE 3. Proponer una herramienta metodológica para identificación de posibles causas de los daños identificados.

Para alcanzar este objetivo se realizaron las siguientes actividades:

- a. Elaboración de matriz de causa raíz para los daños encontrados, utilizando la herramienta del diagrama de ichikawa.
- b. Taller de validación con expertos de la Escuela de Ingeniería en Construcción. En este taller se obtuvo realimentación sobre la metodología propuesta y las herramientas. En el siguiente enlace se puede visualizar el contenido del Taller: [Enlaces adjuntos\Taller-expertos.pdf](#)
- c. Generación de la herramienta en Excel.

OE 4. Validar los resultados obtenidos en puentes piloto.

La validación de los resultados obtenidos en esta investigación se refiere al grado en que el estudio de un puente piloto refleja o evalúa con precisión el concepto específico que el investigador intenta medir o comprender, en este caso si las técnicas de evaluación ayudan a la identificación de la causa de los daños presentes en el puente.

Dado lo complejo que es realizar la evaluación detallada en la estructura de un puente, debido a permisos para aplicación de ensayos, permisos para cierres temporales, disponibilidad de equipos

especial para acceso, los resultados obtenidos en el objetivo 3 fueron implementados a un puente piloto, en este caso el puente sobre el Estero Mata de Limón sobre la ruta nacional 23.

La validación se realizó al aplicar las técnicas identificadas para evaluar y su efectividad para generar información que permita verificar la causa del daño.

7. Resultados

Los resultados del proyecto de investigación se muestran a continuación, ordenados por objetivos.

El objetivo general del proyecto fue: **“Desarrollar una herramienta metodológica para identificar las posibles causas de patologías relacionadas al concreto en elementos de puentes, mediante el uso de ensayos no destructivos”**.

7.1. OE 1. Analizar las principales técnicas o métodos no destructivos utilizadas para caracterizar patologías en elementos de puentes en concreto

El producto principal de este objetivo fue una **matriz comparativa de las metodologías o técnicas** utilizadas internacionalmente y su posible aplicación en Costa Rica. Para la elaboración de esta matriz se identificaron y analizaron las principales técnicas de evaluación no destructiva aplicadas al concreto utilizadas. Estas técnicas se agruparon de acuerdo con el principio físico utilizado, se identificaron los siguientes: [4] [7]

- a. **Métodos de fuerza (Strength):** Los métodos de fuerza como los ensayos de rebote y penetración miden la dureza del concreto y se utilizan para predecir su resistencia. El esclerómetro y el martillo schmidt son probablemente los más utilizados. El método consiste en un émbolo y un resorte de masa conocida que golpea el extremo libre de un émbolo, que es en contacto con el concreto y rebota. La extensión del rebote da una indicación de la resistencia del concreto en la posición de la superficie probada. La medida es influenciada por el acabado del concreto, la edad y otros factores como la presencia de carbonatación.

Ensayos asociados: Índice de rebote - ASTM C805/C805M

Daño por detectar: Como técnica de inspección, puede ser utilizado para comparar la calidad del hormigón en diferentes partes de los componentes del puente de concreto.

Debe ser complementado con el análisis de testigos de concreto.

- b. Métodos de sonido (Sonic):** Los métodos mecánicos de pulso-velocidad sónica para concreto se han utilizado durante muchos años.

Los golpes sobre una estructura de concreto, como por ejemplo los de un martillo crean un impulso y un tiempo de recorrido de este pulso sónico.

El tiempo de recorrido está relacionado con el módulo de elasticidad del material y, por lo tanto, su fuerza. Esta técnica puede ser efectiva, pero es tediosa y solo se puede aplicar en áreas pequeñas. El procedimiento es capaz de detectar diferencias entre áreas de sonido y no sonido en el concreto y se utiliza con frecuencia para detectar delaminaciones u otras fracturas.

La técnica no es práctica para evaluar grandes superficies, como cubiertas de concreto.

Ensayos asociados: Cadenas de arrastre, Varillas de sonido, Martillo, Equipos portables de detección de sonido - ASTM D4580.

Daño por detectar: Delaminaciones en el concreto.

- c. Método de Ultrasonido (Ultrasonic):** Este método de ensayo no destructivo que se basa en el uso de una onda longitudinal acústica de alta frecuencia (generalmente 20 kHz a 150 kHz), no perceptible por el oído humano, que se transmite a través de un medio físico.

Requiere de un emisor y un receptor, ambos son un piezoeléctrico insertado en un palpador. El objetivo es medir el tiempo que la onda tarda cruzar el elemento situado entre el emisor y el receptor. Conocida la distancia recorrida, se calcula la velocidad de propagación.

Ensayos asociados: Ultrasonido en concreto - ASTM C597

Daño por detectar: Calidad del concreto. Identificación de grietas.

- d. Métodos magnéticos:** La principal aplicación de los métodos magnéticos en los ensayos de elementos de puentes de concreto, es la determinación de la posición del refuerzo. Los instrumentos correspondientes a este método dan resultados satisfactorios en elementos ligeramente reforzados, pero, en elementos fuertemente reforzados o donde hay grandes elementos de acero cerca, no es posible medir ni obtener resultados fiables. Además, algunos informes indican que los recubrimientos de epoxi distorsionan las lecturas.

Ensayos asociados: Pachómetro o medidor de cobertura - BS 1881: Part 204 : 1988: British Standard Testing concrete Part 204. Recommendations on the use of electromagnetic covermeters.

Flujo magnético - API-653

Daño por detectar: Los métodos magnéticos no son técnicas para detectar defectos o deterioro directamente, pero el hecho de que se observe un recubrimiento o espesor inadecuado se asocia con el deterioro inducido por la corrosión.

El método de fuga de flujo magnético (MFL) ha sido adaptado para detectar roturas y fracturas en torones de acero en tendones de elementos de concreto pretensado y postensado.

- e. **Métodos eléctricos:** Los métodos eléctricos para la inspección de componentes de puentes de concreto incluyen mediciones de resistencia y potencial. La corrosión de los refuerzos produce una celda de corrosión provocada por las diferencias de potencial eléctrico. Esta diferencia de potencial eléctrico se puede detectar colocando una semicelda de sulfato de cobre y cobre en la superficie del concreto y midiendo las diferencias de potencial entre la semicelda y el refuerzo de acero.

Ensayos asociados: Conductividad eléctrica (ASTM D3633), celda media (ASTM C876), pulso galvánico.

Daño por detectar: Estos métodos ayudan a identificar la probabilidad de presencia de corrosión en el acero de refuerzo.

- f. **Métodos nucleares:** El principal uso de los métodos nucleares es medir el contenido de humedad en el concreto mediante técnicas de absorción y dispersión de neutrones. Los métodos nucleares para la evaluación no destructiva del concreto se subdividen en dos grupos, según el tipo de radiación utilizada, que son rayos gamma o neutrones.

Ensayos asociados: Radiometría (ASTM C1040) y radiografía, esta no cuenta con una norma específica pero el Instituto Británico de Estándares (BSI) ha adoptado un estándar para pruebas radiográficas de concreto basado en BS 1881-205.

Daño por detectar: Las técnicas de transmisión directa se pueden usar para detectar el refuerzo. Sin embargo, el uso más común de la técnica es para medir la densidad in situ tanto en concreto fresco como endurecido. También, estas mediciones de humedad se utilizan luego para determinar si es probable que se produzca la corrosión del refuerzo.

La radiografía proporciona un medio para obtener una fotografía basada en la radiación del interior del concreto porque los materiales más densos bloquean más radiación. A partir de esta fotografía, se puede identificar la ubicación del refuerzo, agujeros en el concreto o los huecos en la lechada de los conductos de postensado.

- g. **Métodos termográficos:** También es conocida como termografía infrarroja, es un método que ha sido encontrado útil como suplemento en la detección de delaminaciones en tableros de concreto. El método podría ser utilizado en otros componentes que están expuestos a la luz solar de forma directa. La termografía se basa en el principio de que en la medida que el concreto se calienta y se enfría, existe un gradiente térmico sustancial dentro del concreto, porque el concreto es un mal conductor del calor. Las delaminaciones y otras discontinuidades

interrumpen la transferencia de calor a través del concreto, y estas discontinuidades causan una temperatura superficial más alta durante los periodos de calentamiento que el concreto circundante y la situación inversa durante los periodos de enfriamiento. Las diferencias en la temperatura de la superficie se pueden medir utilizando sistemas sensibles de detección de infrarrojos. El equipo puede registrar e identificar áreas de delaminación debajo de la superficie por las diferencias en la temperatura de la superficie. Como ventaja, permite examinar grandes áreas rápidamente. Como desventaja, se puede citar que tiene un costo relativamente alto y provee información solo en términos de dos dimensiones. Los defectos localizados bajo las delaminaciones no pueden ser detectados.

Ensayos asociados: Termografía ASTM D4788.

Daños por detectar: Discontinuidades y delaminaciones en el concreto.

- h. **Radar (GPR):** El radar de penetración (GPR) se ha utilizado para detectar el deterioro de los tableros de los puentes. Estas investigaciones se llevan a cabo mediante un radar pulsado de baja potencia y alta frecuencia. El radar detecta cualquier discontinuidad. La capacidad de medir el espesor de la capa de asfalto es un beneficio importante. El método de radar también tiene un potencial importante para examinar la condición del ala superior de las vigas cajón que de otro modo serían inaccesibles. Se necesita más que un poco de experiencia para la interpretación adecuada de los datos. [8]

Ensayos asociados: Radar GPR ASTM D6432.

Daños por detectar: Discontinuidades en el concreto.

- i. **Métodos químicos:** La aplicación de métodos químicos se utiliza para la determinación de diferentes propiedades químicas y físicas del concreto. Entre ellas: estado del pH, presencia de sustancias nocivas (concreto-refuerzo), absorciones y porosidades, entre otras.

Ensayos asociados: Determinación de la profundidad de carbonatación en un hormigón endurecido por el método de fenolftaleína (UNE-EN 14630), Determinación de la velocidad de penetración de la carbonatación en el hormigón endurecido (UNE 83993-2), Determinación de la resistencia a la carbonatación (UNE-EN 13295), para la presencia de cloruros se utiliza una prueba que consiste en obtener una muestra mediante perforación (pulverización) por medio de un taladro de impacto giratorio, y brocas de perforación, suficiente para proporcionar una muestra representativa de tamaño para la prueba. Posteriormente en el laboratorio con contenedores no contaminados se realiza el debido procedimiento con base a la norma ASTM C1152 Y C115 M-20, para determinar la concentración de cloruro con la profundidad de elementos de concreto.

Daños por detectar: La determinación de la profundidad permite identificar variaciones del nivel de pH y encontrar regiones ácidas debido al proceso de carbonatación del concreto, el valor de velocidad permite conocer el avance de la carbonatación en el interior del concreto hidráulico.

- j. **Monitoreo (SHM):** El monitoreo de la salud estructural (SHM, por sus siglas en inglés) tiene como objetivo ganar conocimiento de la integridad de una estructura en servicio en tiempo real. Las inspecciones programadas, visuales o detalladas, ofrecen conocimiento limitado de la condición estructural, son métodos que resultan costosos debido a la labor extensiva y el tiempo de inactividad en el que podría entrar la estructura durante el proceso de ejecución. Los avances en las tecnologías de sensores, materiales y caracterización de los daños, aunado a las tecnologías de diagnóstico disponibles para su integración con sensores ubicados en toda la longitud de la estructura, permiten inspección y detección de daños en tiempo real. Los sistemas SHM en puentes pueden definirse de acuerdo con lo que se desea observar y monitorear en el comportamiento de la estructura y pueden implementarse en puentes nuevos o existentes. Los objetivos principales según Liu et al. (2009) [9], de estos sistemas, son:

- Detectar daño estructural.
- Estimar la vida útil remanente de la estructura.
- Optimizar (basado en datos) el proceso de toma de decisión para esfuerzos de mantenimiento y evitar reemplazos costosos.
- Ayuda en la transición de metodologías de diseño.

Como se indica anteriormente, el sistema SHM se define para cumplir con ciertos objetivos y, por lo tanto, los beneficios pueden variar de acuerdo con esto. Sin embargo, los posibles beneficios se pueden resumir de la siguiente manera:

- Mantenimiento propicio y reducido.
- Reparación inminente y más eficaz.
- Prolongación de vida útil y servicio.
- Reducción en costos de operación y mantenimiento.
- Mejor comprensión del comportamiento de la estructura.
- Incrementan la seguridad y calidad en el largo plazo.
- Reducción de riesgo e incertidumbre.
- Permiten la detección temprana de defectos constructivos.
- Detección y localización de posibles daños.

Según un estudio realizado por Webb, Vardanega, & Middleton (2014) [10], en el que analizan 30 sistemas SHM y los clasifica según su función principal en: detección de anomalías, desarrollo de sensores, validación de modelos, revisión de umbrales y detección de daños.

Estas mediciones se complementan en muchas ocasiones con monitoreo de las condiciones ambientales, tales como humedad, temperatura, nivel de agua bajo el puente, topografía, entre otros.

Ensayos asociados: Para el diseño del Sistema SHM y de acuerdo con los objetivos planteados, se debe analizar la tecnología de sensores y las estrategias de monitoreo.

Las estrategias de monitoreo dependen de las particularidades del proyecto, generalmente dependen de la perspectiva con la que se abarquen y puede definirse una estrategia definitiva para el diseño de acuerdo con una combinación de varias.

No existe una norma específica para el monitoreo de la salud estructural. Algunas normas que pueden tomarse como referencia son las siguientes:

- ISO 2041: 1990 (Reaffirmed 2005) Vocabulary on Vibration and Shock
- ISO 18649: 2004 Mechanical Vibration – Evaluation of Measurement results from dynamic tests and investigations
- ISO 14963: 2003 Mechanical vibration and Shock -Guidelines for dynamic tests and investigations on bridges and viaducts
- ISO 4866:2010 Mechanical vibration and shock – Vibration of fixed structures – Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures
- Recomendaciones para la realización de pruebas de carga de recepción en puentes de carretera. Ministerio de Fomento, España.

Daños por detectar: Este tipo de métodos permite conocer el comportamiento de una estructura y analizar las causas de los daños identificados en una inspección visual.

El detalle completo de los métodos analizados puede visualizarse en la matriz adjunta en el siguiente enlace: [Enlaces adjuntos\OE01-Matriz tecnicas no destructivas.xlsx](#)

Otro producto relacionado con este objetivo fue la construcción de una base de datos de documentación sobre los diferentes métodos de ensayos, esta base está organizada por técnica y se puede acceder mediante el siguiente enlace: [Enlaces adjuntos\Documentacion sobre metodos](#)

7.2. OE 2. Estandarizar las técnicas de ensayo a utilizar en la metodología de evaluación

Para alcanzar este objetivo se tomó como base los resultados obtenidos en el objetivo 1 y la matriz se amplió con la información de la disponibilidad de equipos y procedimientos de cada una de las técnicas analizadas, adicionalmente se impartieron capacitaciones sobre cada una de las técnicas y se realizaron talleres prácticos.

Tabla 4. Técnicas y ensayos identificadas para la metodología de evaluación

Técnica o método	Ensayo	Equipo	Normativa	Procedimiento técnico CIVCO
Métodos de fuerza	Índice de rebote	Esclerómetro análogo y digital	ASTM C805	CIVCO IT-38
Métodos ultrasónicos	Ultrasonido en concreto	Ultrasonido	ASTM C597	CIVCO IT-42
Métodos magnéticos	Detección de barras de acero	Pachómetro	BS 1881: Part 204	CIVCO IT-39
Métodos eléctricos	Potencial de corrosión	Celda media	ASTM C876	CIVCO IT-37
Radar (GPR)	GPR	GPR	ASTM D6432	En proceso ²
Métodos químicos	Profundidad de carbonatación	Carbontest Núcleos	UNE-EN 14630	CIVCO IT-40
Monitoreo ³ (SHM)	Medición vibración	Acelerómetros	NA	NA
	Medición deformación	Straingages	NA	NA
	Medición desplazamiento	LVDT	NA	NA

² Para el análisis de este ensayo se contó con un estudiante Gerald Steven Sandí Ramírez que desarrolló su proyecto de graduación denominado: **Manual de procedimientos en la aplicación del georradar (GPR) para ensayos en elementos de concreto**. La aprobación del procedimiento propuesto está en proceso.

³ Para el monitoreo no se establecieron procedimientos técnicos, sino recomendaciones de instalación, ya que cada caso es particular. Las recomendaciones de instalación están en el apéndice 1.

La estandarización (proceso de ajustar o adaptar características en un producto, servicio o procedimiento; con el objetivo de que éstos se asemejen a un tipo, modelo o norma en común), se logra estableciendo el ensayo por aplicar para cada daño identificado y generando los procedimientos técnicos necesarios.

El análisis de estas técnicas se realizó mediante talleres, los cuales pueden visualizarse en este enlace:

[Enlaces adjuntos\Talleres de tecnicas](#)

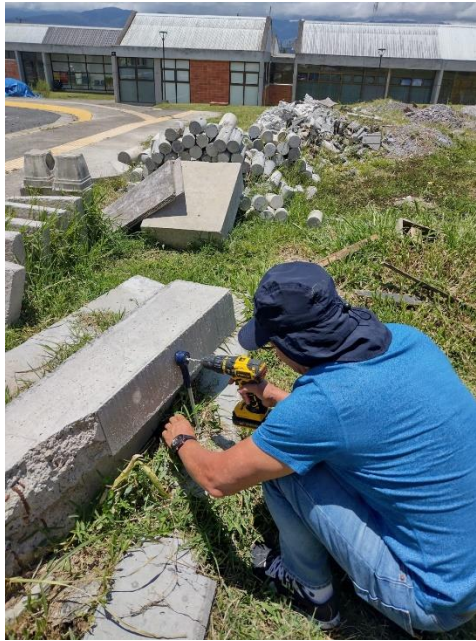


Figura 7. Ensayo de profundidad de carbonatación utilizando el carbontest



Figura 8. Ensayo de potencial de corrosión utilizando el equipo de celda media

Los equipos disponibles para monitoreo de estructuras son: straingages, crackmeters y lvdt. Estos sensores se probaron en laboratorio y se generaron instrucciones para su uso con el fin de medir deformaciones unitarias y desplazamientos. Ver apéndice 1: Manual: Mediciones de deformación, deflexión y desplazamiento. Además, se continuó con la implementación del piloto para la medición del nivel de agua bajo un puente como parte de los factores ambientales de importancia.

Adicional a los productos planteados originalmente para este objetivo, se desarrolló una aplicación para el cálculo del BCI (Índice de condición del puente) con el fin de facilitar dicho cálculo. Esta aplicación se puede acceder mediante el siguiente enlace:

<https://calculobciebridge.azurewebsites.net/>.

Adicionalmente y como parte de la estandarización de estos métodos de ensayo, se realizaron pruebas en el laboratorio del CIVCO durante el año 2023, con el fin de correlacionar los resultados de la falla de cilindros y testigos de concreto con los ensayos de ultrasonido y de esclerometría, debido a que la correlación que se conoce es con base en referencias de otros países, por lo que ir generando datos permitirá contar con relaciones para nuestro entorno.

La recolección de datos inició en febrero del 2023 y finalizó en setiembre 2023 en total se recopilieron 243 datos. Los técnicos de laboratorio tomaron cada uno de los cilindros por fallar en laboratorio incluyendo actividades de investigación, extensión y docencia. Los datos obtenidos pueden visualizarse en el siguiente enlace: [Enlaces adjuntos\OE02-ResultadosLaboratorio.xlsx](#)

En resumen, en el gráfico de la figura 9 se observa la correlación de los datos de resistencia a la compresión obtenidos en el laboratorio con las velocidades de ultrasonido medidas por el método directo, también, en el laboratorio y previo a su falla.

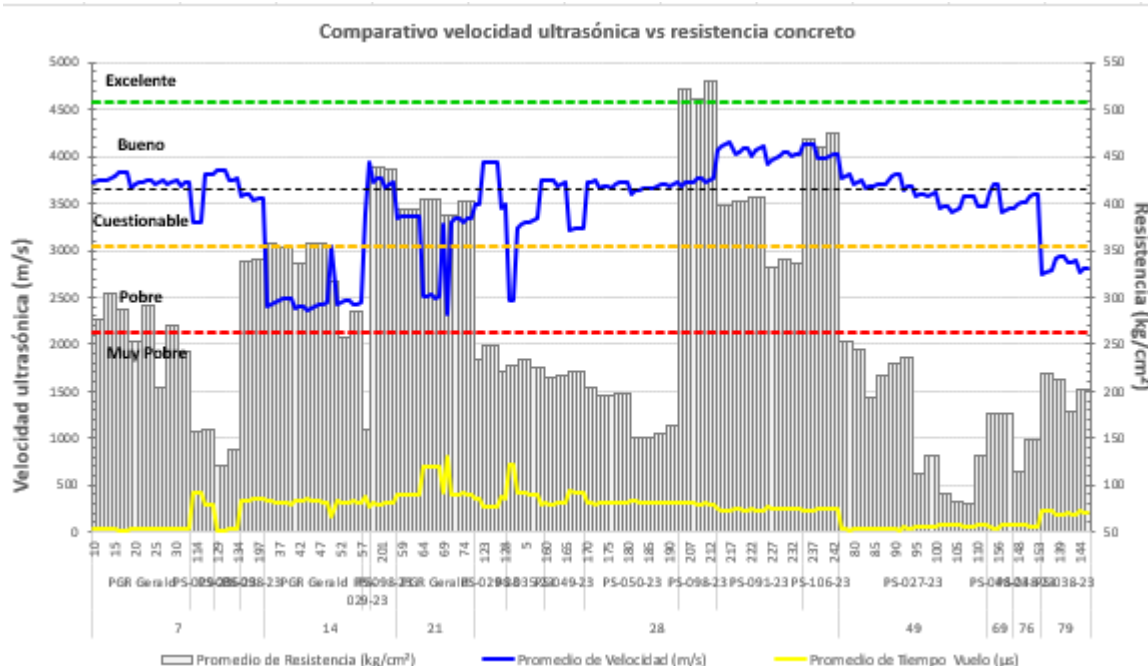


Figura 9. Comparativo velocidad ultrasónica vrs resistencia a la compresión del concreto

Como parte de este objetivo, también, se analizaron los procedimientos técnicos existentes en CIVCO y se realizaron observaciones para su mejora, estos no se adjuntan al documento debido a la confidencialidad del Sistema de Gestión de Calidad del CIVCO.

7.3. OE 3. Proponer una herramienta metodológica para identificación de posibles causas de los daños identificados

Una vez completados los objetivos 1 y 2 y con la información base del BCI, se elaboró la metodología para la identificación de las causas de los daños identificados. Esta propuesta se enmarcó en una metodología general para la evaluación de puentes. Ver apéndice 2.

La metodología general incluye los siguientes pasos:

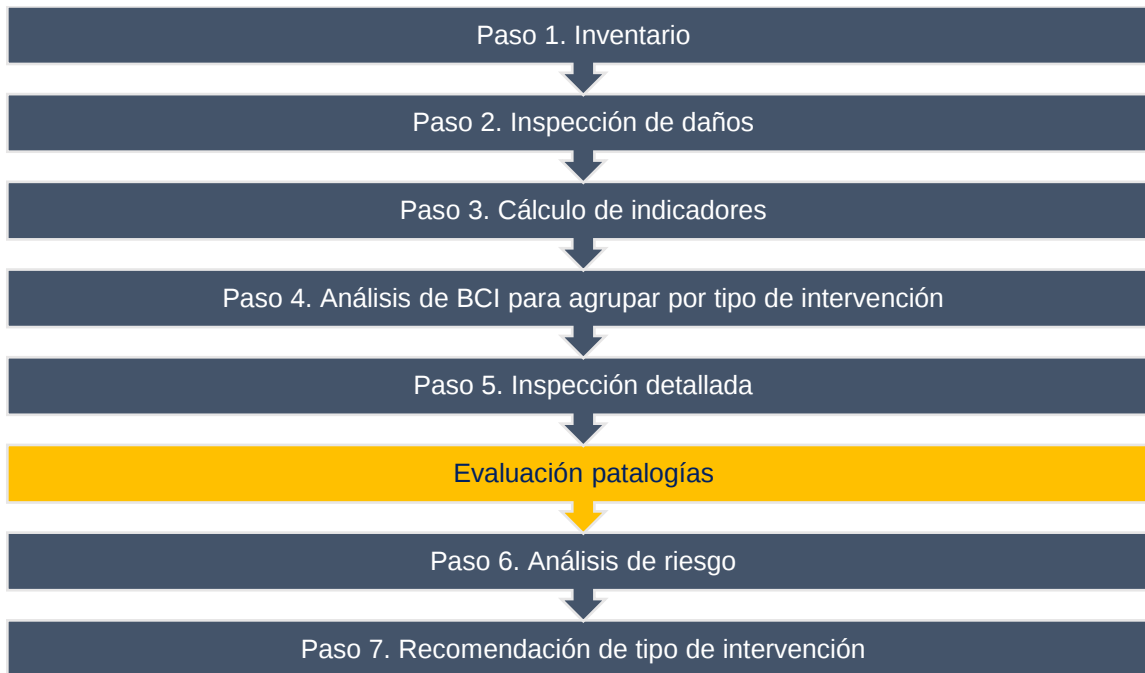


Figura 10. Metodología para la evaluación de puentes carreteros

En paso 4 correspondiente al cálculo del BCI se utilizará la herramienta desarrollada como apoyo a este cálculo. <https://calculobciebridge.azurewebsites.net/>. La forma de cálculo se hará con base en lo desarrollado en proyectos anteriores del grupo eBridge. [11]

En el paso 5 de la inspección detallada, la propuesta desarrollada en este proyecto de investigación incluye la evaluación de patologías en elementos de concreto tomando como base el valor del BCI, para esta evaluación se proponen los siguientes pasos:

- **Paso 5.1. Análisis de causa raíz**

Para las estructuras con valor de BCI mayor o igual a 3, se debe realizar un análisis de causa raíz de cada uno de los daños identificados. Para las estructuras de concreto los daños son:

- Agrietamiento
- Descascaramiento
- Acero de refuerzo expuesto
- Nidos de piedra
- Agujeros

- Eflorescencia

Se analizarán en los componentes y elementos presentes en el puente, por cada una de las superestructuras identificadas, que tienen un aporte significativo en el desempeño estructural.

Tabla 4. Técnicas y ensayos identificadas para la metodología de evaluación

Componente	Elemento
Superestructura	Losa
	Elemento principal (viga)
	Elemento secundario (diafragma)
Subestructura	Cabecal
	Aletón
	Cuerpo principal bastión
	Martillo
	Cuerpo principal pila

Este análisis se realizará con ayuda de la una hoja de cálculo elaborada como parte de las herramientas de la metodología propuesta.

El primer paso de este análisis es identificar los componentes, elementos y daños en los cuales el valor del BCI es mayor que 3.

Evaluación de superestructura: Superestructura 1					
Losa	2022	Viga principal concreto	2022	Diafragma	2022
Grieta en una dirección	5	Grieta en una dirección	3	Grieta en una dirección	1
Grieta en dos direcciones	5	Grieta en dos direcciones	3	Grieta en dos direcciones	1
Descascaramiento	5	Descascaramiento	5	Descaramiento	1
Acero de refuerzo	5	Acero de refuerzo	5	Acero de refuerzo expuesto	1
Nidos de piedra	2	Nidos de piedra	2	Nidos de piedra	1
Eflorescencia	3	Eflorescencia	3	Eflorescencia	2
Agujeros	4				

Figura 11. Identificación de componentes, elementos y daños con valor de BCI mayor que 3

Para esos componentes, elementos y daños, se realizará un análisis de causa, previo a ese análisis particular se generó una herramienta que consiste en matrices que identifica de forma general las posibles causas de los daños identificados y una recomendación de estudios adicionales que permitan su análisis.

Lo primero que se generó en el grupo de investigación fue un esquema de posibles causas utilizando la técnica de identificación de causa-raíz y el diagrama de ichikawa.

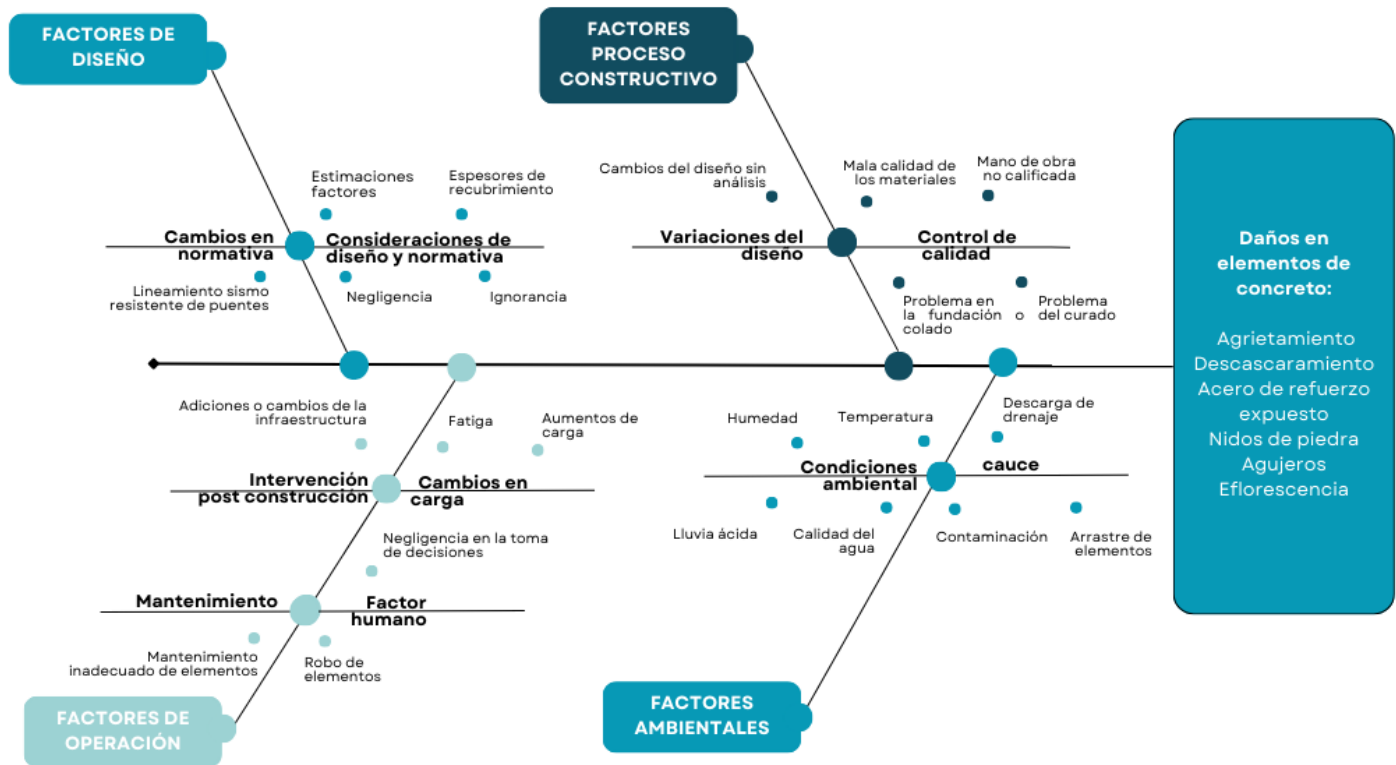


Figura 12. Diagrama ichikawa para análisis de causa de daños en elementos de concreto

En el diagrama mostrado en la figura 8, se observa que se definieron 4 factores o etapas en las que se podrían presentar los daños: diseño, proceso constructivo, operación y ambientales, entendido este último como los agentes externos que pueden provocar el daño.

Con base en este diagrama, se generaron matrices para cada uno de los daños, las cuales contemplan:

- Descripción del daño: descripción del daño encontrado, se asocia con la metodología de evaluación.
- Factor o etapa: Etapa del ciclo de vida o factor del entorno.
- Efecto: Efecto que podría producir ese daño en el elemento, el componente y el puente en general.

- Posibles causas: Posibles causas del daño.
- Posibles subcausas: Posibles subcausas del daño.
- Verificación: Ensayo o estudio que permita verificar las causas o subcausas.

A continuación, se muestran las matrices con los resultados por daño:

Tabla 5. Análisis de causa para el daño **agrietamiento**

Descripción del daño	Factor/Etapa	Efecto	Posibles causas	Posibles subcausas	Verificación
Grietas en dirección definida	Diseño	Aumento de esfuerzos	Aumento en las cargas	Cambios en las condiciones de diseño original	Revisión de diseño con normativa y condiciones actuales
		Comportamiento inadecuado de la estructura	Consideraciones de diseño	Subestimación de factores: diseño inadecuado de elementos, espesores de recubrimiento inadecuados	Revisión de diseño con normativa actual
Grietas aleatorias en varias direcciones	Proceso constructivo	Cambio en los esfuerzos esperados	Variaciones del diseño	Cambios en el diseño sin análisis	Revisión del comportamiento de la estructura (modelado)
		Daño adelantado en los elementos	Control de calidad	Baja calidad de materiales	Extracción de muestras y verificación en laboratorio: Testigos de concreto, probetas de acero.
				Problemas en la colocación del acero de refuerzo	Ensayo ubicación de acero: pachómetro.
				Problemas en el colado del concreto	GPR, ultrasonido
				Problemas en el curado del concreto	Ultrasonido
Grietas en dirección definida	Operación	Cambio en el comportamiento de la estructura	Intervenciones post-construcción	Adiciones o cambios en la estructura, que influyen en su comportamiento	Revisión del comportamiento real de la estructura con monitoreo de deformaciones, vibraciones o desplazamientos
		Fatiga	Cambio en cargas	Cambio en las condiciones de uso	Revisión del comportamiento real de la estructura con monitoreo de deformaciones, vibraciones o desplazamientos

		Cambio en el comportamiento de la estructura	Mantenimiento	Mantenimiento inadecuado de algunos elementos tales como juntas, provoca un aumento de esfuerzos en otros elementos	Revisión del comportamiento real de la estructura con monitoreo de deformaciones, vibraciones o desplazamientos
	Ambientales	Cambio en condiciones que afectan las condiciones originales de la estructura	Condiciones ambientales: humedad, temperatura, lluvia ácida, calidad agua en cauce	Falta de monitoreo de las condiciones del entorno de la estructura	Monitoreo de condiciones ambientales
				Carbonatación en el concreto	Medición de la profundidad de carbonatación
				Contaminación con sales o cloruros	Análisis químico del concreto
				Corrosión del acero de refuerzo	Ensayo de celda media

Tabla 6. Análisis de causa para el daño **descascaramiento**

Descripción del daño	Factor/Etapa	Efecto	Posibles causas	Posibles subcausas	Verificación
Desprendimiento local de la parte más cercana a la superficie del concreto endurecido	Diseño	Comportamiento inadecuado de la estructura	Consideraciones de diseño	Subestimación de factores: diseño inadecuado de elementos, espesores de recubrimiento inadecuados	Revisión de diseño con normativa y condiciones actuales
	Proceso constructivo	Daño adelantado en los elementos	Control de calidad	Baja calidad de materiales	Extracción de muestras y verificación en laboratorio: Testigos de concreto, probetas de acero.
				Problemas en la colocación del acero de refuerzo	Ensayo ubicación de acero: pachómetro.
				Problemas en el colado del concreto	GPR, ultrasonido
				Presencia excesiva de sales de cloruro de sodio o calcio	Análisis químico del concreto
				Acabados con presencia de agua de exudación	Ultrasonido

				Problemas en el curado del concreto	Ultrasonido
Desprendimiento local de la parte más cercana a la superficie del concreto endurecidos, con evidencias de golpes	Operación	Cambio en el comportamiento de la estructura	Golpes en la estructura	Golpes que afectan la geometría y el desempeño de la estructura	Revisión del comportamiento real de la estructura con monitoreo de deformaciones, vibraciones o desplazamientos
Desprendimiento local de la parte más cercana a la superficie del concreto endurecidos, con evidencias de golpes	Ambientales	Cambio en el comportamiento de la estructura	Golpes por arrastre de elementos	Golpes que afectan la geometría y el desempeño de la estructura	Revisión del comportamiento de la estructura (modelado)

Tabla 7. Análisis de causa para el daño **acero de refuerzo expuesto**

Descripción del daño	Factor/Etapa	Efecto	Posibles causas	Posibles subcausas	Verificación
Presencia de manchas color terracota, con exposición del acero de refuerzo y expansión del mismo	Diseño	Comportamiento inadecuado de la estructura	Consideraciones de diseño	Subestimación de factores: diseño inadecuado de elementos, espesores de recubrimiento inadecuados	Revisión de diseño con normativa actual y considerando la posible pérdida de sección del acero
Presencia de manchas color terracota, con exposición del acero de refuerzo y expansión del mismo	Proceso constructivo	Oxidación y posterior corrosión del acero de refuerzo	Variaciones en el espesor, la calidad y la densidad del concreto que alteren la protección contra la corrosión del acero de refuerzo	Baja calidad de materiales	Extracción de muestras y verificación en laboratorio: Testigos de concreto, probetas de acero.
				Problemas en la colocación del acero de refuerzo	Ensayo ubicación de acero: pachómetro.
				Contaminación del concreto	Análisis químico del concreto
				Problemas en el curado del concreto, que genere agrietamientos	Ultrasonido

Presencia de manchas color terracota, con exposición del acero de refuerzo y expansión del mismo	Operación	Reducción de la sección transversal del acero de refuerzo y decrecimiento de su capacidad mecánica	Intervenciones post-construcción	Adiciones o cambios en la estructura, que influyen en su comportamiento	Revisión del comportamiento real de la estructura con monitoreo de deformaciones, vibraciones o desplazamientos
			Mantenimiento	Mantenimiento inadecuado de algunos elementos que provocan fisuras y generación de grietas	Revisión del comportamiento real de la estructura con monitoreo de deformaciones, vibraciones o desplazamientos
	Ambientales	Pérdida de la protección brindada por el concreto al acero	Permeabilidad del recubrimiento, influenciado por procesos de difusión, que generan carbonatación, reducen el pH del concreto o aceleran la corrosión del acero de refuerzo	Falta de monitoreo de las condiciones del entorno de la estructura	Monitoreo de condiciones ambientales
				Carbonatación en el concreto	Medición de la profundidad de carbonatación
				Contaminación con sales o cloruros	Análisis químico del concreto
				Corrosión del acero de refuerzo	Ensayo de celda media

Tabla 8. Análisis de causa para el daño **nidos de piedra**

Descripción del daño	Factor/Etapa	Efecto	Posibles causas	Posibles subcausas	Verificación
Acumulaciones o concentraciones de agregado pétreo grueso (piedras) no rodeadas por suelos finos, en zonas localizadas de extensión variable	Proceso constructivo	Daño adelantado en los elementos, ya que pueden dejar elementos de acero desprotegidos	Control de calidad	Problemas en el colado del concreto	GPR, ultrasonido

Tabla 9. Análisis de causa para el daño **agujeros**

Descripción del daño	Factor/Etapa	Efecto	Posibles causas	Posibles subcausas	Verificación
Desprendimiento del agregado, o de una porción del concreto que puede ser desde escamas hasta un metro cúbico de la misma.	Diseño	Comportamiento inadecuado de la estructura	Consideraciones de diseño	Estimación de espesores de recubrimiento inadecuados	Pachómetro
	Proceso constructivo	Daño adelantado en los elementos	Control de calidad	Baja calidad de materiales	Extracción de muestras y verificación en laboratorio: Testigos de concreto, probetas de acero.
				Problemas en la colocación del acero de refuerzo	Ensayo ubicación de acero: pachómetro.
				Problemas en el colado del concreto	GPR, ultrasonido
				Presencia excesiva de sales de cloruro de sodio o calcio	Análisis químico del concreto
				Acabados con presencia de agua de exudación	Ultrasonido
				Problemas en el curado del concreto	Ultrasonido

	Operación	Desgaste de la superficie	Mantenimiento inadecuado	Exposición de la superficie de concreto a desgaste sin una protección o reposición de la protección adecuada	GPR, ultrasonido
--	-----------	---------------------------	--------------------------	--	------------------

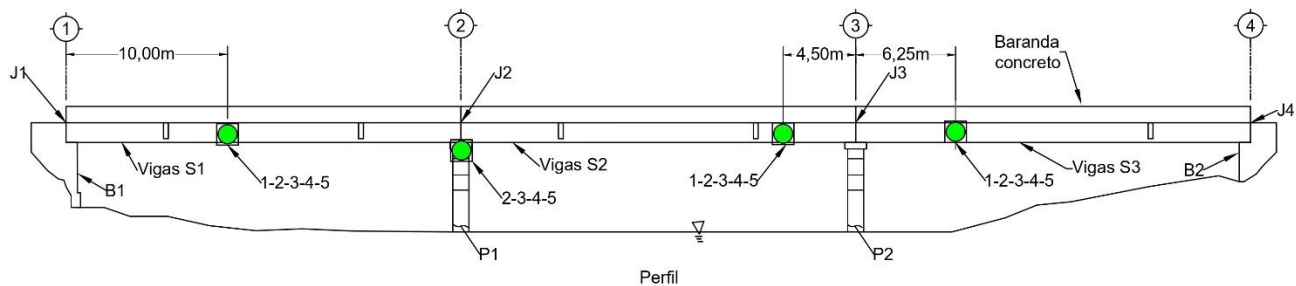
Tabla 10. Análisis de causa para el daño **eflorescencia**

Descripción del daño	Factor/Etapa	Efecto	Posibles causas	Posibles subcausas	Verificación
Manchas blancas irregulares que observan en la superficie del concreto.	Proceso constructivo	Daño adelantado en los elementos	Control de calidad	Baja calidad de materiales	Extracción de muestras y verificación en laboratorio: Testigos de concreto, probetas de acero.
				Presencia excesiva de sales de cloruro de sodio o calcio	Análisis químico del concreto
				Acabados con presencia de agua de exudación	Ultrasonido
				Problemas en el curado del concreto	Ultrasonido
	Operación	Cambios en la alcalinidad del concreto que pueda provocar oxidación del acero de refuerzo	Mantenimiento inadecuado	Exposición de la superficie de concreto a desgaste sin una protección o reposición de la protección adecuada	Métodos químicos

Con estas tablas se diseñó una herramienta en Excel para ayudar en el análisis de causa, especialmente cuando no hay experiencia por parte de los ingenieros evaluadores.

- **Paso 5.3. Plan de muestreo**

Una vez analizados cada uno de los daños, por componente y elemento, se generará un plan de muestreo, que incluirá los estudios o ensayos a realizar, la ubicación de cada uno de ellos y la cantidad.



1. Velocidad de ultrasonido, 2. Índice de rebote, 3. Carbonatación, 4. Extracción de núcleo 5. Sales y cloruros

Figura 9. Ubicación de los ensayos realizados en vigas.

Figura 13. Ejemplo de esquema recomendado en el plan de muestreo

- **Paso 5.4. Análisis de resultados**

En esta etapa se analizará con base en los resultados obtenidos, si la posible causa identificada es correcta.

- **Recomendaciones**

Una vez clara la posible causa de los daños, se propondrá una intervención que atienda las causas y no los daños.

Posterior a esta recomendación técnica y previo a la intervención se debe realizar un análisis de los índices de condición sísmica (SCI) y condición hidrometeorológica (HCI) para valorar el nivel de riesgo y que la intervención sea rentable en el tiempo.

Todos estos pasos constituyen la herramienta metodológica, definida como el conjunto de técnicas e instrumentos que se utilizan en investigación con el fin de analizar el objeto de estudio, en este caso las técnicas, instrumentos y procedimientos utilizadas en la evaluación de daños en elementos de concreto.

La herramienta se puede acceder en el siguiente enlace: [Enlaces adjuntos\OE03-Herramienta.xlsx](#)

7.4. OE 4. Validar los resultados obtenidos en puente piloto

La validación de la metodología propuesta se realizó mediante la implementación de una inspección detallada en el puente Estero Mata de Limón, este trabajo se realizó para el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) en diciembre del 2022. Se tomaron los resultados obtenidos y se utilizaron para la validación de las posibles causas de los daños identificados.

Evaluación detallada: Puente Estero Mata de Limón – Ruta Nacional 23

El puente sobre el Estero Mata Limón se encuentra sobre la ruta nacional 23 en el kilómetro 11,40 con dirección de la vía hacia Puerto Caldera, coordenadas CRTM-05: 9,922581 Norte y -84,71343 Este.

La estructura originalmente fue diseñada entre los años 1970 y 1975 con las especificaciones AASHO de 1969, sin embargo, su diseño se finalizó en 1979 para una carga viva HS 20-44. Para el año 2003, se realizó una rehabilitación que tuvo como objetivo elevar la rasante un metro y mejorar la altura libre inferior, para evitar que el agua salada impregnara los elementos de la superestructura, según MOPT en su informe de inspección. En la rehabilitación se sustituyó la superestructura original de vigas pretensadas por vigas doble T pretensadas, así como la losa de concreto que se construyó nueva en su totalidad.

Se ubica en la provincia de Puntarenas, cantón de Esparza, distrito de Espíritu Santo. Está a cargo de la zona 3-1 Puntarenas, según la administración del CONAVI en una ruta primaria. La ruta alterna al puente es de 20,87 km.

Esta estructura es de 73,00 m de largo, con un ancho de calzada de 8,50 m, está conformada por 3 superestructuras de viga simple tipo viga doble T de concreto presforzado, cuenta con 3 tramos y 4 subestructuras. La alineación del puente es recta.

La altura libre inferior de la estructura es de 3,33 metros. El TPD es de 12 284 vehículos y el porcentaje de vehículos pesados es de 28,98% 2012 (Proporcionado por secretaria de Planificación Sectorial, TPD realizado en el 2015).

La ruta alterna para vehículos livianos, autobuses y camiones tándem (no articulados) en caso de cierre de puentes son las Rutas Nacional 755, Ruta 622 y Ruta 131.



Figura 14. Vista general del puente sobre el Estero Mata, Ruta Nacional 23. Año 2022

a. Cálculo del valor del BCI

Con base en la inspección visual de daños realizada en el año 2022, se calculó el valor del BCI, dado que el puente cuenta con 3 superestructuras se escogió el BCI más crítico.

En resumen, los resultados obtenidos en la inspección visual de daños fueron:

Evaluación accesorios: Superestructura 1					
Pavimento	2022	Baranda concreto	2021	Juntas de expansión	2022
Ondulación	NA	Agrietamiento	5	Sonidos extraños	1
Surcos	NA	Acero de refuerzo expuesto	1	Filtración de aguas	5
Agrietamiento	NA	Faltante	1	Faltante o deformación	3
Baches	NA			Movimiento vertical	1
Sobrecapas de asfalto	NA			Juntas obstruidas	3
				Acero expuesto	5

Evaluación accesorios: Superestructura 2					
Pavimento	2022	Baranda concreto	2021	Juntas de expansión	2022
Ondulación	NA	Agrietamiento	5	Sonidos extraños	NA
Surcos	NA	Acero de refuerzo expuesto	1	Filtración de aguas	NA
Agrietamiento	NA	Faltante	1	Faltante o deformación	NA
Baches	NA			Movimiento vertical	NA
Sobrecapas de asfalto	NA			Juntas obstruidas	NA
				Acero expuesto	NA

Evaluación accesorios: Superestructura 3					
Pavimento	2022	Baranda concreto	2021	Juntas de expansión	2022
Ondulación	NA	Agrietamiento	5	Sonidos extraños	1
Surcos	NA	Acero de refuerzo expuesto	5	Filtración de aguas	5
Agrietamiento	NA	Faltante	1	Faltante o deformación	4
Baches	NA			Movimiento vertical	1
Sobrecapas de asfalto	NA			Juntas obstruidas	3
				Acero expuesto	1

Figura 15. Resultados de la inspección visual de los accesorios

Evaluación de superestructura: Superestructura 1					
Losa	2022	Viga principal concreto	2022	Diafragma	2022
Grieta en una dirección	5	Grieta en una dirección	3	Grieta en una dirección	1
Grieta en dos direcciones	5	Grieta en dos direcciones	3	Grieta en dos direcciones	1
Descascaramiento	5	Descascaramiento	5	Descaramiento	1
Acero de refuerzo	5	Acero de refuerzo	5	Acero de refuerzo expuesto	1
Nidos de piedra	2	Nidos de piedra	2	Nidos de piedra	1
Eflorescencia	3	Eflorescencia	3	Eflorescencia	2
Agujeros	4				

Evaluación de superestructura: Superestructura 2					
Losa	2022	Viga principal concreto	2022	Diafragma	2022
Grieta en una dirección	5	Grieta en una dirección	3	Grieta en una dirección	1
Grieta en dos direcciones	5	Grieta en dos direcciones	1	Grieta en dos direcciones	1
Descascaramiento	4	Descascaramiento	5	Descaramiento	1
Acero de refuerzo	4	Acero de refuerzo	5	Acero de refuerzo expuesto	1
Nidos de piedra	2	Nidos de piedra	2	Nidos de piedra	1
Eflorescencia	3	Eflorescencia	2	Eflorescencia	2
Agujeros	3				

Evaluación de superestructura: Superestructura 3					
Losa	2022	Viga principal concreto	2022	Diafragma	2022
Grieta en una dirección	5	Grieta en una dirección	4	Grieta en una dirección	1
Grieta en dos direcciones	4	Grieta en dos direcciones	1	Grieta en dos direcciones	1
Descascaramiento	5	Descascaramiento	2	Descaramiento	1
Acero de refuerzo	4	Acero de refuerzo	3	Acero de refuerzo expuesto	1
Nidos de piedra	2	Nidos de piedra	1	Nidos de piedra	1
Eflorescencia	2	Eflorescencia	3	Eflorescencia	2
Agujeros	1				

Figura 16. Resultados de la inspección visual de superestructura

Evaluación de subestructura: Bastión 1 y 2									
Apoyos	2022	Cabezal/Aletón	2022	Cuerpo principal (bastión)	2022	Martillo (Pila)	2022	Cuerpo principal (Pila)	2022
Rotura de pernos	1	Grieta en una dirección	3	Grieta en una dirección	3	Grieta en una dirección	NA	Grieta en una dirección	NA
Deformación	2	Grieta en dos direcciones	1	Grieta en dos direcciones	3	Grieta en dos direcciones	NA	Grieta en dos direcciones	NA
Inclinación	1	Descascaramiento	2	Descascaramiento	3	Descascaramiento	NA	Descascaramiento	NA
Desplazamiento	1	Acero de refuerzo	3	Acero de refuerzo	3	Acero de refuerzo	NA	Acero de refuerzo	NA
		Nidos de piedra	1	Nidos de piedra	2	Nidos de piedra	NA	Nidos de piedra	NA
		Eflorescencia	2	Eflorescencia	2	Eflorescencia	NA	Eflorescencia	NA
		Protección de terraplen	1	Pendiente en taludes	3			Inclinación	NA
				Inclinación	1			Socavación	NA
				Socavación	5				

Evaluación de subestructura: Pila 1									
Apoyos	2022	Cabezal/Aletón	2022	Cuerpo principal (bastión)	2022	Martillo (Pila)	2022	Cuerpo principal (Pila)	2022
Rotura de pernos	1	Grieta en una dirección	NA	Grieta en una dirección	NA	Grieta en una dirección	3	Grieta en una dirección	2
Deformación	2	Grieta en dos direcciones	NA	Grieta en dos direcciones	NA	Grieta en dos direcciones	3	Grieta en dos direcciones	1
Inclinación	1	Descascaramiento	NA	Descascaramiento	NA	Descascaramiento	5	Descascaramiento	1
Desplazamiento	1	Acero de refuerzo	NA	Acero de refuerzo	NA	Acero de refuerzo	5	Acero de refuerzo	1
		Nidos de piedra	NA	Nidos de piedra	NA	Nidos de piedra	1	Nidos de piedra	1
		Eflorescencia	NA	Eflorescencia	NA	Eflorescencia	2	Eflorescencia	1
		Protección de terraplen	NA	Pendiente en taludes	NA			Inclinación	1
				Inclinación	NA			Socavación	1
				Socavación	NA				

Evaluación de subestructura: Pila 2									
Apoyos	2022	Cabezal/Aletón	2022	Cuerpo principal (bastión)	2022	Martillo (Pila)	2022	Cuerpo principal (Pila)	2022
Rotura de pernos	1	Grieta en una dirección	NA	Grieta en una dirección	NA	Grieta en una dirección	5	Grieta en una dirección	1
Deformación	2	Grieta en dos direcciones	NA	Grieta en dos direcciones	NA	Grieta en dos direcciones	1	Grieta en dos direcciones	1
Inclinación	1	Descascaramiento	NA	Descascaramiento	NA	Descascaramiento	5	Descascaramiento	1
Desplazamiento	1	Acero de refuerzo	NA	Acero de refuerzo	NA	Acero de refuerzo	5	Acero de refuerzo	1
		Nidos de piedra	NA	Nidos de piedra	NA	Nidos de piedra	2	Nidos de piedra	2
		Eflorescencia	NA	Eflorescencia	NA	Eflorescencia	2	Eflorescencia	2
		Protección de terraplen	NA	Pendiente en taludes	NA			Inclinación	1
				Inclinación	NA			Socavación	1
				Socavación	NA				

Figura 17. Resultados de inspección visual de subestructura

Con base en estos datos se procedió a calcular el valor del BCI, para ello se utilizó la herramienta desarrollada (<https://calculobciebridge.azurewebsites.net/>):



Sistema de Gestión Bridge Condition Indicator

El BCI es el cálculo y evaluación de calificación de cada componente individual de la estructura de un puente, para determinar el valor actual. El BCI apoya en el comprensión del inventario de puentes y es solo uno de los métodos utilizados para ver qué estructuras pueden necesitar reparaciones, mantenimiento y reemplazo.



Consulta

Figura 18. Página principal de sistema de cálculo del BCI

Los resultados obtenidos fueron:

Consulta BCI

Leer Excel:

Seleccionar archivo CIVCO-PS-09...22-Daños.xlsx

Procesar
Descargar

Mostrar 10 registros por página

ID del puente	Nombre de puente	BCI Accesorios	BCI Superestructura	BCI Subestructura	BCI del puente
P106	ESTERO MATA LIMON (3/3)	3.0444355	3.236413	2.92133164	3.06927347

Mostrando de 1 a 1 de un total de 1 registros

BCI del puente 3.06 = Inaceptable

Al tener un BCI mayor o igual a 3 y dados los daños presentados, que se está en una zona con un ambiente agresivo, se toma la decisión de realizar una inspección detallada, para analizar con más detalle la estructura. La inspección detallada, específicamente el trabajo de campo se realizó entre finales del 2022. De estos datos de campo, se tomaron los necesarios para aplicar la metodología propuesta e implementar la herramienta desarrollada.

b. Identificación de daños, componentes, elementos

En la siguiente figura se muestra un resumen de los daños más importantes identificados:

Super estructura: 1

Componente afectado	Elemento afectado	Agrietamiento	Descascaramiento	Acero expuesto	Nidos de piedra	Eflorescencia	Agujeros
x	Accesorios	x	Baranda	5			
x	Superestructura	x	Losa	5	5	5	3
		x	Elemento principal (viga)	3	5	5	3
			Elemento secundario (diafragma)				
x	Subestructura	x	Cabezal/Aletón	3	3	3	
		x	Cuerpo principal bastión	3	3	3	
			Martillo				
			Cuerpo principal pila				

Super estructura: 2

Componente afectado	Elemento afectado	Agrietamiento	Descascaramiento	Acero expuesto	Nidos de piedra	Eflorescencia	Agujeros
x	Accesorios	x	Baranda	5			
x	Superestructura	x	Losa	5	4	4	3
		x	Elemento principal (viga)	3	5	5	3
			Elemento secundario (diafragma)				
x	Subestructura		Cabezal/Aletón				
			Cuerpo principal bastión				
		x	Martillo	3	5	5	
			Cuerpo principal pila				

Super estructura: 3

Componente afectado	Elemento afectado	Agrietamiento	Descascaramiento	Acero expuesto	Nidos de piedra	Eflorescencia	Agujeros
x	Accesorios	x	Baranda	5	5	5	
x	Superestructura	x	Losa	5	5	4	
		x	Elemento principal (viga)	4	3	3	
			Elemento secundario (diafragma)				
x	Subestructura		Cabezal/Aletón				
			Cuerpo principal bastión				
		x	Martillo	5	5	5	
			Cuerpo principal pila				

Figura 19. Principales daños identificados en el puente Estero Mata de Limón

En resumen, este puente presenta una condición deficiente e inaceptable, en elementos principales de la superestructura, mostrando daños como agrietamiento, descascaramiento, acero de refuerzo expuesto, eflorescencia y agujeros. La subestructura presenta también una condición deficiente e inaceptable en bastiones y pilas, mostrando daños como: agrietamiento, descascaramiento y acero de refuerzo expuesto.

Además, de la evaluación cuantitativa del daño, es necesario en este punto una descripción de los daños con el fin de realizar el análisis de causa.

Tabla 11. Descripción de los principales daños encontrados

Elemento	Descripción del daño
Losa de concreto	la losa presenta en la parte superior, desgaste, grietas en una dirección con espesores de 0,60 mm con separaciones de más de un 1,00 m, se detectaron grietas en dos direcciones con espesores de hasta 0,90 mm, con separaciones de 0,50 m, considerable descascaramiento en varios sectores de la losa de concreto acompañado de acero de refuerzo expuesto en algunas partes.
Vigas	las vigas, estas presentan algunas grietas con espesores mayores a 0,20 mm separadas más de 1,0m, inicio de descascaramiento, acero de refuerzo expuesto, nidos de piedra en algunas partes y manchas blancas de eflorescencia.
Pilas	En el caso de la pila 1, los daños se concentran en el martillo; se observaron grietas en una dirección con espesores de 0,40 mm con separaciones de más de 1,00 m, crecimiento del descascaramiento en varios sectores. Además, se observó acero de refuerzo expuesto y oxidado, más de 10 nidos de piedra y manchas blancas de eflorescencia.
Bastiones	En el bastión 2 se observó una grieta de 0,40 mm de espesor en la superficie de concreto, además de inicio de descascaramiento, algunos nidos de piedra y manchas blancas de eflorescencia. Para la viga cabezal y aletones se observaron algunas manchas blancas producto de la eflorescencia. Para el martillo de la pila 2 se detectaron manchas blancas producto de la eflorescencia, inicio de descascaramiento y algunos nidos de piedra.



Figura 20. Desprendimiento del concreto, acero expuesto y grietas losa.



Figura 21. Acero de refuerzo expuesto en losa.



Figura 22. Descascaramiento del concreto y acero expuesto en viga.



Figura 23. Acero expuesto en viga en zona de apoyo.



Figura 24. Desprendimiento del concreto y acero expuesto en martillo de la pila.



Figura 25. Descaramiento y grietas en bastión.

c. Análisis de causa

Con base en la calificación y la descripción de los daños encontrados, para cada elemento se aplicarán las matrices de análisis de causa, presentadas en las tablas 5,6,7,8,9 y 10.

Como ejemplo para el caso de la losa de concreto, en el daño de descascaramiento, se obtuvo el siguiente resultado:

Daño	Descripción del daño	Factor/Etapa	Efecto	Posibles causas	Posibles sub-causas	Verificación
Descascaramiento	Desprendimiento local de la parte más cercana a la superficie del concreto endurecidos	Diseño	Comportamiento inadecuado de la estructura	Consideraciones de diseño	Subestimación de factores: diseño inadecuado de elementos, espesores de recubrimiento inadecuados	Revisión de diseño con normativa actual
		Proceso constructivo	Daño adelantado en los elementos	Control de calidad	Baja calidad de materiales	Extracción de muestras y verificación en laboratorio: Testigos de concreto, probetas de acero.
					Problemas en la colocación del acero de refuerzo	Ensayo ubicación de acero: pachómetro.
					Problemas en el colado del concreto	GPR, ultrasonido
					Presencia excesiva de sales de cloruro de sodio o calcio	Análisis químico del concreto
					Acabados con presencia de agua de exudación	Ultrasonido
					Problemas en el curado del concreto	Ultrasonido
	Desprendimiento local de la parte más cercana a la superficie del concreto endurecidos, con evidencias de golpes	Operación	Cambio en el comportamiento de la estructura	Golpes en la estructura	Golpes que afectan la geometría y el desempeño de la estructura	Revisión del comportamiento real de la estructura con monitoreo de deformaciones, vibraciones o desplazamientos
	Desprendimiento local de la parte más cercana a la superficie del concreto endurecidos, con evidencias de golpes	Ambientales	Cambio en el comportamiento de la estructura	Golpes por arrastre de elementos	Golpes que afectan la geometría y el desempeño de la estructura	Revisión del comportamiento de la estructura (modelado)

Figura 26. Análisis de causa para el daño de descascaramiento en la losa de concreto

En el análisis de este daño se estableció como hipótesis que los daños podrían provenir de las etapas de diseño y proceso constructivo, relacionado con las consideraciones de diseño y el control de calidad. En cuanto a las consideraciones de diseño podría relacionarse con subestimación de factores, diseño inadecuado de elementos, espesores de recubrimiento inadecuados. En la etapa de construcción se pudo haber presentado un pobre control de calidad, que podría haber generado baja calidad en los materiales, un curado inadecuado del concreto, una mala colocación del acero de refuerzo.

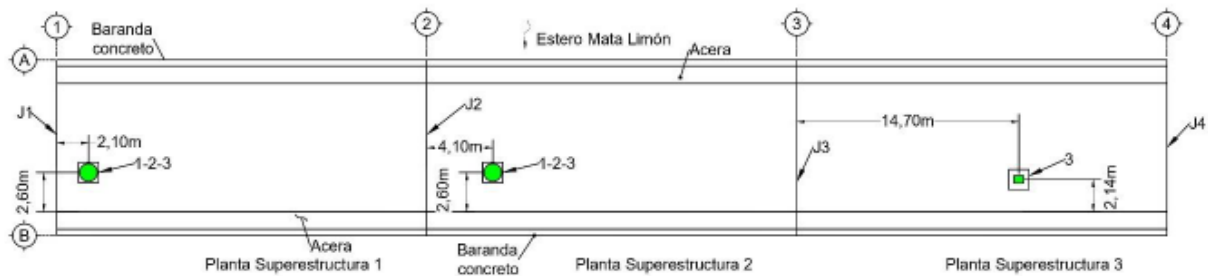
d. Plan de muestreo

En este punto de la evaluación, se definirán los ensayos o estudios a realizar con el fin de establecer la causa de los daños identificados.

Tabla 12. Lista de ensayos o evaluaciones a aplicar

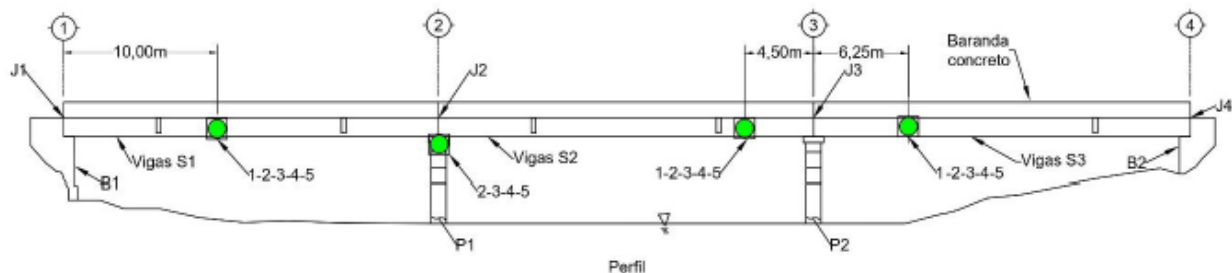
Ensayo o evaluación	Elemento	Normativa	Procedimiento CIVCO
Revisión del diseño	Todo el puente	AASTHO, Código sísmico, Lineamientos diseño sismoresistente	NA
Modelado de la estructura	Todo el puente	AASTHO, Código sísmico, Lineamientos diseño sismoresistente	NA
Resistencia a la compresión de testigos de concreto	Losa, vigas, pilas y bastiones	ASTM C39	CIVCO-IT-31
Ubicación de acero de refuerzo	Losa, vigas, pilas y bastiones	BS 1881: Part 204	CIVCO IT-39
Ultrasonido de concreto	Losa, vigas, pilas y bastiones	ASTM C597	CIVCO IT-42
GPR		ASTM D6432	
Medición de esfuerzos		NA	
Medición de desplazamiento		NA	
Medición de vibración		NA	
Monitoreo de condiciones ambientales		NA	
Profundidad de carbonatación	Losa, vigas, pilas y bastiones	UNE-EN 14630	CIVCO IT-40
Análisis químico concreto	Losa, vigas, pilas y bastiones	ASTM C1152 ASTM C115	
Potencial de corrosión (celda media)	Losa, vigas, pilas y bastiones	ASTM C876	CIVCO IT-37
Determinación de capacidad de carga	Todo el puente	AASTHO, Código sísmico, Lineamientos diseño sismoresistente	NA

En la tabla 12 se presentan los ensayos o estudios recomendados para poder corroborar las causas de los daños identificados en el puente Estero Mata de Limón. Esta tabla se complementa con la recomendación de cantidad de ensayos y esquemas de ubicación para los ensayos.



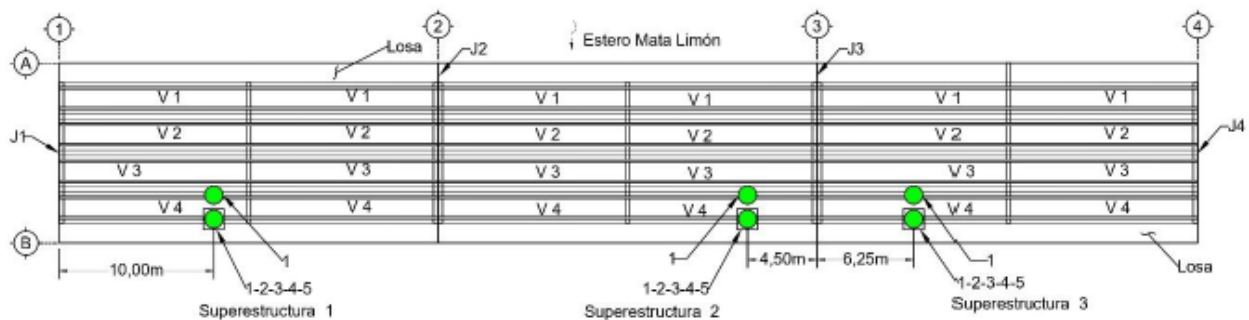
1. Extracción de núcleo y Prueba de carbonatación 2. Prueba de Sales y cloruros 3. Índice de rebote- Celda Media.

Figura 27. Ubicación de ensayos a realizar en losas



1. Velocidad de ultrasonido, 2. Índice de rebote, 3. Carbonatación, 4. Extracción de núcleo 5. Sales y cloruros

Figura 28. Ubicación de ensayos a realizar en vigas y pila 1



1. Velocidad de ultrasonido, 2. Índice de rebote 3. Carbonatación, 4. Extracción de núcleo 5. Sales y cloruros

Figura 29. Ubicación de ensayos a realizar en vigas

e. Resultados de ensayos y estudios

Los ensayos y estudios se realizaron en su mayoría entre diciembre 2022 y enero 2023.

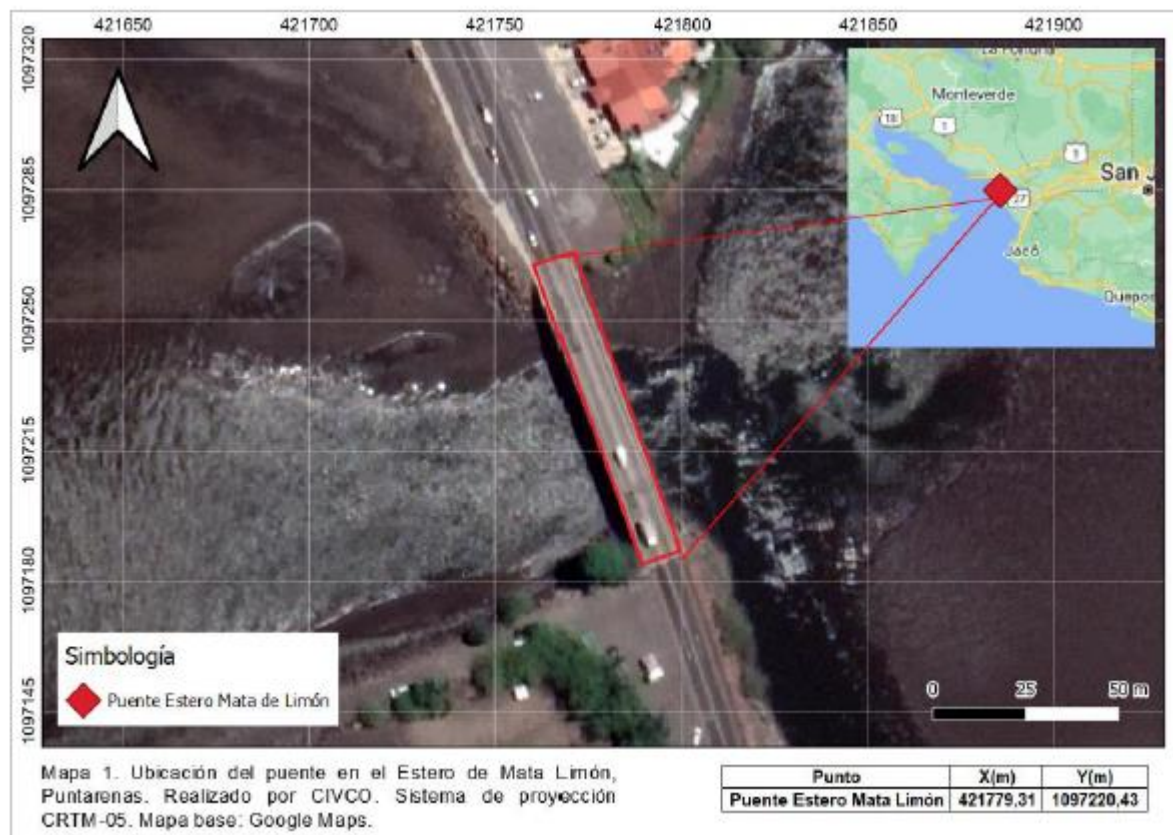


Figura 30. Ubicación del puente sobre la desembocadura del Estero de Mata Limón, en la Ruta Nacional 23



Figura 31. Aplicación de celda medía en losa.

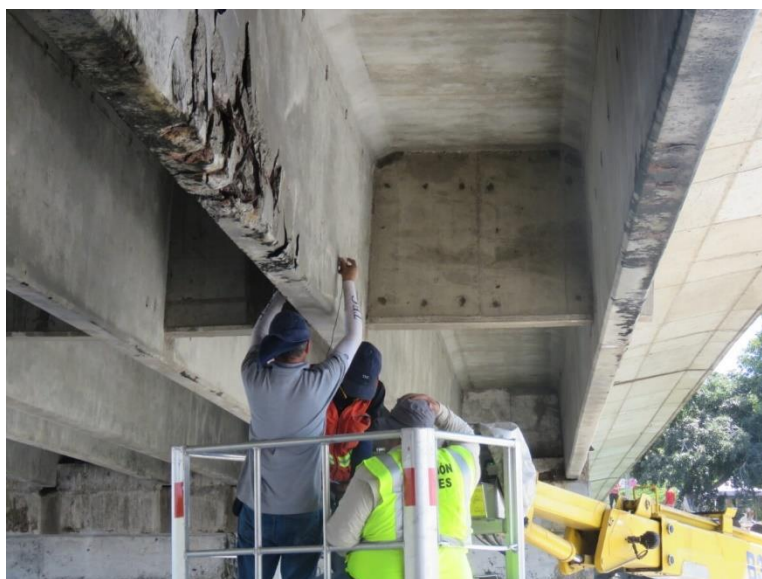


Figura 32. Ultrasonido en viga.



Figura 33. Prueba de cloruros en losa.



Figura 34. Extracción de núcleos y prueba de cloruros.

Los resultados de cada uno de los ensayos o estudios se presentarán con base en los procedimientos establecidos por cada laboratorio o institución. Es importante generar un registro de esos resultados, los cuales se deben sintetizar en la siguiente tabla para hacer el análisis de los resultados. En la tabla 13 se muestra un ejemplo del análisis de los resultados obtenido para el daño de agrietamiento.

Tabla 13. Análisis de los resultados de ensayos y estudios

Elemento	Daño	Etapas/Factor	Ensayo/Estudio	Resultado	Observaciones	Causa identificada	Subcausa identificada	Verificación
Losa	Agrietamiento	Diseño	Revisión aumento de carga	Satisfactorio	Si bien se encontró un aumento en las cargas que transitan por el puente, estas se encuentran dentro de lo estipulado en el diseño de la rehabilitación.	Cambios en las cargas	Variaciones en las condiciones de carga	✗
Losa	Agrietamiento	Diseño	Revisión del diseño	Satisfactorio	No se encontraron consideraciones ni planteamientos inadecuados en los planos originales ni en la rehabilitación.	Consideraciones de diseño	Subestimación de factores: diseño inadecuado de elementos, espesores de recubrimiento inadecuados	✗
Losa	Agrietamiento	Proceso constructivo	Revisión del diseño	Satisfactorio	La estructura original fue rehabilitada en el año 2003, pero el diseño de la rehabilitación cumple con la normativa.	Variaciones del diseño	Cambios en el diseño sin análisis	✗
Losa	Agrietamiento	Proceso constructivo	Resistencia a la compresión de testigos de concreto	233.5 kg/cm ² Valor más bajo	Este valor se encuentra dentro del rango especificado en planos	Control de calidad	Baja calidad de materiales	✗
Losa	Agrietamiento	Proceso constructivo	Ubicación acero de refuerzo	El recubrimiento promedio fue de 42.4mm y el espaciamiento del acero coincide con planos	Estos valores se encuentran dentro de lo especificado en planos	Control de calidad	Problemas en la colocación del acero de refuerzo	✗
Losa	Agrietamiento	Operación	Revisión de bitácora de mantenimiento	Deficiente	No existe un plan de mantenimiento, ni bitácora de los trabajos realizados sobre el puente	Mantenimiento	Mantenimiento inadecuado de algunos elementos tales como juntas, provoca un aumento de esfuerzos en otros elementos	✓
Losa	Agrietamiento	Ambientales	Revisión de condiciones ambientales en el puente	Deficiente	No existe un registro de las condiciones del entorno del puente, ni una estrategia de monitoreo para la toma de decisiones	Condiciones ambientales: humedad, temperatura, lluvia ácida, calidad agua en cauce	Falta de monitoreo de las condiciones del entorno de la estructura	✓
Losa	Agrietamiento	Ambientales	Profundidad de carbonatación	La profundidad de carbonatación máxima medida fue de 15 mm	No hay problemas con la carbonatación en este momento siendo que el recubrimiento es de 42.4 mm	Condiciones ambientales: humedad, temperatura, lluvia ácida, calidad agua en cauce	Carbonatación en el concreto	✗
Losa	Agrietamiento	Ambientales	Análisis de cloruros y sales	Los resultados del análisis químico (este fue realizado en CEQUITEC) fue de: (0,073 ± 0,004) y (0,039 ± 0,002) Esto es el porcentaje de ion cloruro presente en el concreto	El límite de contenido total de ion cloro del concreto, expresado en términos de porcentaje, peso del cemento, es un máximo de 0,04 %. La norma ASTM C1218/C 1218M93: Método estándar para el análisis de cloruros solubles establece que cuando se tienen concentraciones entre 0,04 y 0.1 es posible que tenga riesgo de iniciar la oxidación del acero de refuerzo	Condiciones ambientales: humedad, temperatura, lluvia ácida, calidad agua en cauce	Contaminación con sales o cloruros	✓
Losa	Agrietamiento	Ambientales	Potencial de corrosión	La losa de la superestructura 1 es la que presentó un potencial de corrosión mayor. El 44% de área presentó un valor de potencial menor que -350mV y el 55% entre -350mV y -200mV.	Los valores obtenidos indican una alta probabilidad de la presencia de corrosión en el acero de refuerzo.	Condiciones ambientales: humedad, temperatura, lluvia ácida, calidad agua en cauce	Corrosión del acero de refuerzo	✓

En esta tabla se hace un análisis para cada ensayo o estudio de los resultados obtenidos y se compara con la posible causa y subcausa identificadas anteriormente con el fin de verificar si esta es probable.

Posterior a esta identificación de causas se realiza un análisis de riesgo, para ello se analizan los otros indicadores que componen el BHI.

Paso 6. Análisis de riesgo

Referencia: Guía para la evaluación de puentes - TEC

P-106 ESTERO MATA DE LIMON - RN 23

[Resumen de daños - BD - Puentes Costa Rica](#)

Año: 2023

Para el análisis de riesgo se consideró el entorno del puente.

Condición hidrometereológica	HCI	1	Satisfactoria
Condición sísmica	SCI	2	Aceptable
Importancia socioeconómica	SoCI	5	Alta

Alerta !!!!! Se encuentra en un ambiente marino con contacto directo de elementos

Figura 35. Análisis de riesgos sobre puente Estero Mata de Limón.

Una vez realizado este análisis es posible hacer una recomendación de intervención.

Finalmente, y para lograr intervenciones efectivas desde el punto de vista económico, es necesario analizar el entorno mediante los índices de condición sísmica e hidrometereológica.

En este enlace se puede tener acceso al documento de análisis: [Enlaces adjuntos\OE04-PuentePiloto.xlsx](#)

8. Discusión y conclusiones

Los objetivos planteados en este proyecto fueron logrados con éxito. El objetivo general de “Desarrollar una herramienta metodológica para identificar las posibles causas de patologías relacionadas el concreto en elementos de puentes mediante el uso de ensayos no destructivos”, se alcanzó desarrollando una herramienta metodológica que incluye el uso de ensayos destructivos, no destructivos, procedimientos de análisis no sólo ensayos no destructivos, sino, además otro tipo de estudios complementarios. Esta metodología si bien se ha orientado a puentes, puede ser aplicada a otro tipo de obras de concreto.

Por medio de este proyecto, también, se mejoraron las competencias del personal técnico del CIVCO y de los investigadores, generando una línea de trabajo en ensayos no destructivos.

Con respecto al objetivo 1: Analizar las principales técnicas o métodos no destructivos utilizadas para caracterizar patologías en elementos de puentes en concreto. Se generó una matriz que resume las principales técnicas de ensayos no destructivos y se incorporó en esta las técnicas de monitoreo de salud estructural, como otra herramienta de análisis. Para cada una de las técnicas, se realizó una investigación exhaustiva la cual incluyó no sólo la normativa sino investigaciones sobre su aplicación.

Se generó una base de datos de información técnica que servirá como referencia al continuo trabajo que debe hacerse para un mejor dominio de estas. También, se han promovido proyectos de estudiantes.

Esta matriz se puede utilizar como base para ampliar los servicios que ofrece el CIVCO, incorporando nuevos equipos o técnicas allí descritas que en este momento no se pueden implementar por falta de equipo.

Con respecto al objetivo 2: Estandarizar las técnicas de ensayo a utilizar en la metodología de evaluación. Se seleccionaron las técnicas que se pueden aplicar a nivel del CIVCO, ya sea porque se cuenta con el equipo o bien el equipo podría adquirirse en el corto plazo, y por su aplicabilidad para la identificación de patologías de los elementos de concreto en los puentes.

Se revisaron los procedimientos existentes y se mejoraron, también se identificaron oportunidades de mejora para algunos de los instructivos técnicos, como por ejemplo el relacionado a la profundidad de carbonatación.

Bajo este objetivo se realizaron talleres de trabajo no sólo con el equipo investigador, sino que también se involucraron a los técnicos de laboratorio, estudiantes y profesores de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales.

Otro aporte realizado bajo este objetivo fue la generación de datos que permitieron iniciar la correlación de resultados de ensayos, especialmente la correlación que existe entre la resistencia a la compresión del concreto y la velocidad de la onda obtenida en la aplicación de ensayo de ultrasonido.

La correlación realizada se dio básicamente entre 2 técnicas: la resistencia a la compresión de cilindros de concreto cuyo nivel de incertidumbre es menos, pero es un ensayo destructivo, con el ensayo de ultrasonido aplicado utilizando el método directo. Se observó que efectivamente hay una correlación entre la velocidad de ultrasonido y la calidad del concreto.

En cuanto al objetivo 3: Proponer una herramienta metodológica para identificación de posibles causas de los daños identificados. Se logró generar una metodología que permite realizar una evaluación mucho más objetiva con el fin de las decisiones de intervención que se tomen posteriormente estén orientadas a atacar la causa de los daños y no solamente la reparación de estos.

Esta herramienta es ágil y permite llegar un nivel de detalle adecuado de cada uno de los daños identificados en las estructuras, sin dejar de mantener la integralidad de la evaluación.

Las tablas de identificación de daños pueden ampliarse de acuerdo con la experiencia de los profesionales que las usan, sin embargo, integran la mayoría de posibles causas de los daños más comunes en puentes de concreto. La base han sido las más de 2000 inspecciones realizadas por el programa de evaluación de puentes.

Esta metodología fue presentada y validada por un grupo de expertos de la Escuela de Ingeniería en Construcción mediante una sesión de trabajo en la cual se recibieron e incorporaron mejoras a la metodología y a las posibles causas de daños.

Uno de los aportes más importantes son las tablas de identificación de posibles causas, esto será de gran ayuda para profesionales que estén iniciando en la evaluación de estructuras.

Con respecto al objetivo 4: Validar los resultados obtenidos en puente piloto. Para lograr este objetivo se utilizó la inspección detallada realizada para el CONAVI sobre el puente Estero Mata de Limón en la ruta 23. Este es un puente de 75 metros y de gran importancia, cuenta con 3 superestructuras.

Al implementar esta metodología se pudo verificar su utilidad, ya que permitió organizar la información tomada de campo en las inspecciones de daños. Al aplicar las matrices de identificación de posibles causas, se identificaron algunas oportunidades de mejora relacionadas con la forma de presentar la

información. El uso de estas matrices en una hoja electrónica ayuda en la organización y trazabilidad de los datos.

Estas matrices, además, permitieron validar la causa propuesta para cada uno de los daños identificados.

La matriz de análisis de resultados resume de forma sencilla los datos de los ensayos o estudios y los compara con los parámetros esperados para verificar si la causa identificada es correcta.

En general este proyecto hace un aporte importante a las buenas prácticas para la evaluación de estructuras de puentes de concreto, permitiendo estandarizar y documentar los resultados de las inspecciones como ayuda a la toma de decisiones.

9. Recomendaciones

El desarrollo de este proyecto de investigación ha abierto un área de trabajo que puede apoyar las líneas de investigación de la Escuela de Ingeniería en Construcción y el CIVCO, tanto en la línea de infraestructura vial como en vivienda y edificaciones, por lo que se recomienda:

- Continuar con la generación de datos que permitan mejorar la correlación entre distintos ensayos no destructivos, esto permitirá trabajar con datos de nuestro entorno y no solamente con referencias de otras latitudes.
- Mantener programas de capacitación en temas de ensayos no destructivos como herramienta no invasiva para la evaluación de estructuras.
- Establecer una relación más sólida con el Centro de Investigación y Extensión en Ingeniería de los Materiales (CIEMTEC) con el fin de ser referentes en el uso de ensayos no destructivos a nivel regional.
- Completar esta herramienta de evaluación introduciendo otros materiales como el acero, así como otro tipo de estructuras.
- Promover el desarrollo de proyectos de graduación de estudiantes en esta temática.
- Innovar en el uso y adquisición de otros equipos que puedan fortalecer esta área de investigación.

10. Bibliografía

- [1] Garita, C., & Ortiz, G. (2014). Towards a Workflow Management Approach for Health Monitoring of Bridges. In L. M. Camarinha-Matos & H. Afsarmanesh (Eds.), Collaborative Systems for Smart Networked Environments: 15th IFIP WG 5.5 Working Conference on Virtual Enterprises, PRO-VE 2014, Amsterdam, The Netherlands, October 6-8, 2014, Proceedings (Vol. 434, pp. 489-497). Berlin Heidelberg: Springer.
- [2] Ortiz, G. & Otros. (2019). Programa de Evaluación de Puentes. Informe sobre inventario de puentes 2014-2018. Instituto Tecnológico de Costa Rica. <https://www.tec.ac.cr/hoyeneltec/2019/07/17/tecnologico-presento-informe-estado-puentes-pais>. 2019.
- [3] Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Manual de Inspección de Puentes. 2007.
- [4] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2018). The Manual for Bridge Evaluation (MBE), tercera edición 2018.
- [5] Muñoz Barrantes, Jorge. (2017). Unidad de Puentes, LanammeUCR. Ciudad de la investigación Universidad de Costa Rica. GUÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONDICIÓN EN PUENTES MEDIANTE INSPECCIÓN VISUAL. CONGRESO ESTRUCTURAS 2017 y XIV SEMINARIO DE INGENIERIA ESTRUCTURAL Y SISMICA SAN JOSE, COSTA RICA. 2017
- [6] Ortiz-Quesada, G; Garita-Rodríguez, C; Navarro-Mora, A; Paez, G. (2021). Priorización de intervenciones en puentes utilizando indicadores. Tecnología en Marcha. Vol. 34-3 Julio-Setiembre 2021. Pág 134-142. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5120>
- [7] ACI 228.2R-13 R3 Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures.
- [8] NDT-Bo-2014-IRICE-NDT of bridges: páginas 77 y 162. 2014
- [9] Liu, M., Frangopol, D. M., & Kim, S. (2009). Bridge System Performance Assessment from Structural Health Monitoring: A Case Study. Journal of Structural Engineering, 135(6), 733–742. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000014](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000014)
- [10] Webb, G. T., Vardanega, P. J., & Middleton, C. R. (2014). Categories of SHM Deployments: Technologies and Capabilities. Journal of Bridge Engineering, 20(11), 04014118. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000735](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000735)
- [11] Ortiz-Quesada, G; Garita-Rodríguez, C; Navarro-Mora, A; Paez-González, G; Alfaro-Acuña, A. Diseño de un índice de salud estructural de puentes para priorización de intervenciones técnicas en Costa Rica. Tecnología en Marcha. Vol. 37, No 2. Abril-Junio, 2024. Pág. 156-166. <https://doi.org/10.18845/tm.v37i2.6718>
- [12] Arrieta, Esteban. (2017). La República.net. “La Platina” es la antesala al infierno vial. <https://www.larepublica.net/noticia/-la-platina-es-la-antesala-al-infierno-vial>

- [13] Ortiz, Luis. (2015). Telenoticias. 'Puente de la platina' cumple seis años de reparaciones.
https://www.teletica.com/nacional/puente-de-la-platina-cumple-seis-anos-de-reparaciones_86944
- [14] MOPT. (2017). Dirección de Relaciones Públicas. Los 6 carriles del puente Alfredo González Flores están en Servicio. https://www.mopt.go.cr/wps/portal/Home/noticias!/ut/p/z0/fczNjolwFAXqV9GFy-a2gNJZkIEJStMIulmcktvSBVbwPr39pKYSWY1q5OTnO-AgggUw5ttMFjvsB37t1r8Fleci23Cy3zxtetZR1nO13seJ0UMG1D_D8YHe-x7IYHqsCFm6GIbB9XBDwHbyeoRaHB-xnc-2Nripz93LQX862rvAj0CVN3b0K-xbiRi1igM_nqhdhJxkc64jqSRiJpJkaQsiQ1nKIVhpDUZISmlKlbupPTznk1fuoWWVQ!!/
- [15] Rojas, Pablo. (2021). CRHoy. Nuevo Puente Negro de Orosi operaría a partir de la próxima semana.
<https://www.crhoy.com/nacionales/nuevo-puente-negro-de-orosi-operaria-a-partir-de-la-proxima-semana/>
- [16] Rojas, Pablo. (2019). CRHoy. ¿Que sucederá con el Puente Juan Pablo II?.
<https://www.crhoy.com/nacionales/y-que-sucedera-con-el-puente-juan-pablo-ii/>
- [17] Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Lineamientos para el mantenimiento de puentes. 2007.
- [18] Wenzel, H. (2009). Health Monitorin of Bridges. Austria: John Wiley & Sons, Ltda.
- [19] Puello Méndez, Juliana & otros. Correlaciones estadísticas para la estimación de propiedades reológicas de asfaltos en estado original y envejecido. 2013.
<http://www.scielo.org.co/pdf/rion/v26n1/v26n1a08.pdf>
- [20] Federal Highway Administration (FHWA). (2018). Bridge Preservation Guide. Maintaining a Resilient Infrastructure to Preserve Mobility. 2018.

11. Apéndices

11.1. Manual: Mediciones de deformación, deflexión y desplazamiento.

11.2. Guía para la evaluación de puentes.