



Ensayos no destructivos en el diagnóstico de puentes: conclusiones después de 15 años de ejercicio

Non-destructive testing in bridge diagnostics: conclusions after 15 years of practice

Fecha de entrega: 24 de julio 2025
Fecha de aceptación: 26 de septiembre 2025

Frank Schanack¹, Jessica Antiao¹, José Pablo Gacitúa² y Tamara González²

¹ Universidad Austral de Chile, Laboratorio de Ingeniería de Puentes y Estructuras, General Lagos 2086, Valdivia, Chile,
frank.schanack@uach.cl, jessica.antiao@gmail.com

² PONTINEL SpA, Arica 2253, Valdivia, Chile, pontinelspa@gmail.com

Los ensayos no destructivos son métodos indirectos que no dañan o alteran de forma permanente las propiedades de la estructura sujeta a inspección. El Laboratorio de Ingeniería de Puentes de la UACH ha realizado más de 750 de estos ensayos en puentes chilenos desde el 2012. Los ensayos más usados han sido Esclerómetro de hormigón, Profundidad de carbonatación, Pacómetro, Calidad de hormigón con ultrasonido, Dureza Brinell in situ y el ensayo de Impact-Echo. Basado en esta experiencia se concluye, entre otros, que los ensayos de esclerómetro, carbonatación y ultrasonido en hormigón armado HA debería realizarse siempre como un trío. Además, para evaluar la vida útil restante se requieren ambos ensayos: carbonatación y la medición del recubrimiento mediante pacómetro. Finalmente se observa que la Dirección de Vialidad solicita cada vez más ensayos no destructivos por puente, dándole así mayor importancia a sus resultados.

Palabras clave: puentes, diagnóstico, ensayos no destructivos

Non-destructive testing is an indirect method that does not permanently damage or alter the properties of the structure under inspection. The UACH Laboratorio de Ingeniería de Puentes has performed more than 750 of these tests on Chilean bridges since 2012. The most commonly used tests have been the concrete rebound hammer, carbonation depth, rebar detector, ultrasonic concrete quality, in situ Brinell hardness, and the Impact-Echo test. Based on this experience, it is concluded, among others, that the rebound hammer, carbonation, and ultrasonic tests on concrete structures should always be performed as a trio. Furthermore, both tests are required to assess the remaining service life: carbonation and rebar detector measurement of the cover. Finally, it is noted that the Chilean Highway Administration is increasingly requesting non-destructive tests per bridge, thus giving greater importance to their results.

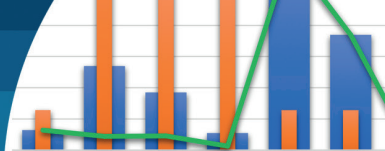
Keywords: bridges, diagnostics, non-destructive testing

Introducción

A diciembre 2021 Chile contaba con 6781 puentes bajo la tuición de la Dirección de Vialidad (Retamal *et al.*, 2022). Esta enorme cantidad de puentes se ha logrado a través de un continuo proceso de diseño y construcción de puentes a largo de la historia. Cabe destacar que el puente más antiguo que aún se encuentra operativo fue construido en 1910. Es así que gran parte de los puentes que hoy día se encuentran en servicio, no son recientes, sino que fueron construidos en distintos momentos durante los últimos 115 años.

Considerando que la vida útil económica que solicita el

Manual de Carreteras (MC-V3, 3.1004.101, MOP, 2022) es de 50 años y que en la práctica la vida útil técnica de puentes llega a 80 o 100 años, es evidente que gran cantidad de los puentes chilenos se encuentran en una avanzada edad de su vida. Surge entonces la preocupación sobre el estado de conservación de nuestros puentes más antiguos. Para determinar el estado de conservación de una estructura, ciertamente la herramienta más potente es la inspección visual realizada por personal calificado. Sin embargo, para un diagnóstico eficaz generalmente se requieren otros antecedentes que no son posibles levantar



visualmente y requieren la realización de ensayos.

En los últimos años, el Laboratorio de Ingeniería de Puentes de la Universidad Austral de Chile ha realizado más de 750 ensayos no destructivos en 31 puentes en Chile. Estos estudios han sido analizados en conjunto con la empresa PONTINEL SpA para determinar la utilidad, alcances y limitaciones de los ensayos no destructivos para el diagnóstico de puentes. En el presente artículo, se expone un resumen de este trabajo de investigación y sus principales conclusiones.

Métodos de ensayos no destructivos analizados

Según la definición de García (2007), los ensayos no destructivos son métodos indirectos que no dañan o alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales del material, parte o componente sujeto a inspección. Los ensayos no destructivos también se conocen como pruebas no destructivas y se abrevian con las siglas END.

Dentro de la Ingeniería Civil los END tienen una gran importancia en cuanto a inspección y monitoreo de estructuras. Ofrecen una ventaja sobre los clásicos métodos destructivos o invasivos, porque se pueden implementar

sin generar daños, ya sea en la etapa de construcción de las obras o estando en uso, permitiendo conocer el estado de los elementos internos y externos de las estructuras, ya sea su localización y/o caracterización de material, condiciones que no pueden ser visibles en la superficie, pero que afectan la durabilidad o rendimiento estructural.

Los métodos de ensayos no-destructivos se encuentran en constante desarrollo. Se mejoran algunos, se introducen nuevos y otros caen obsoletos (Hola, 2015). En otro trabajo de investigación realizado en nuestro laboratorio, hemos identificado 50 distintos tipos de END que teóricamente se pueden aplicar en puentes (Antiao, 2017). Estos ensayos se clasifican en la Figura 1.

Sin embargo, en la práctica no todos los ensayos no destructivos se utilizan con la misma frecuencia, ya sea por razones económicas o razones técnicas, como aplicabilidad, transporte o acceso. En la Tabla 1 se muestran los ensayos y sus cantidades que como Laboratorio de Ingeniería de Puentes efectivamente hemos realizado. Como se puede desprender de la tabla, son sólo 12 tipos de ensayos que se han solicitado para del diagnóstico de puentes. Antes de analizar los beneficios y desventajas según la experiencia obtenida, a continuación, se expone una breve descripción de cada uno de los 12 tipos de ensayos.

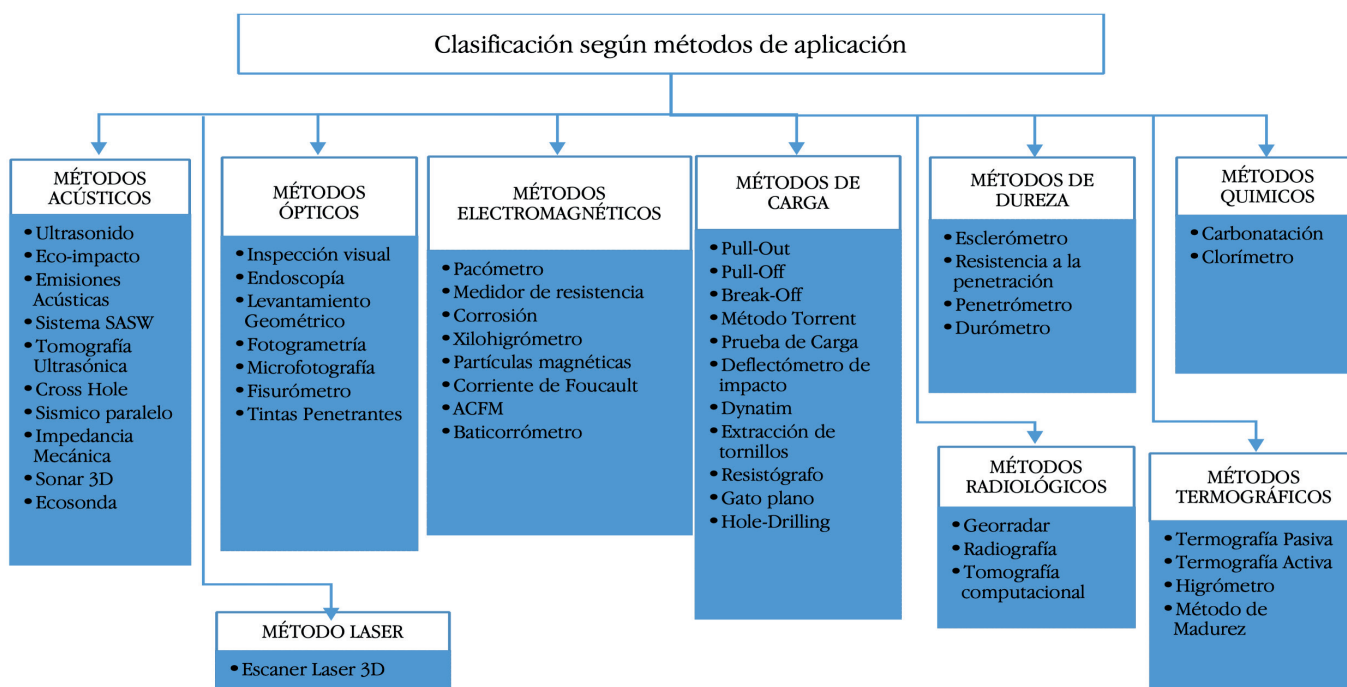


Figura 1: Clasificación de métodos y técnicas básicas de ensayos no destructivos END (Antiao, 2017)



Tabla 1: Ensayos y sus frecuencias ejecutados por el Laboratorio de Ingeniería de Puentes.

Tipo de ensayo		Cantidad de puentes	Cantidad de ensayos
Esclerómetro de hormigón		22 de 31	169
Profundidad de carbonatación	19 de 31	186	
Pacómetro	15 de 31	15 (global)	
Calidad de hormigón con ultrasonido	12 de 31	52	
Dureza Brinell in situ	11 de 31	42	
Impact-Echo	7 de 31	248	
Fotogrametría	7 de 31	24	
Fisurómetro	4 de 31	4 (global)	
Prueba de carga	4 de 31	4	
Espesores con ultrasonido	2 de 31	6	
Endoscopia		1 de 31	1
Termografía activa y pasiva		1 de 31	1

Esclerómetro de hormigón

La prueba está basada en el principio de que el rebote de una masa elástica depende de la dureza de la superficie sobre la que golpea la masa (Figura 2(a)). El rebote, o el índice esclerométrico (reducido por el factor de tiempo cuando aplica) se convierte en una resistencia a la compresión según el diagrama de conversión (Rudeli y Santilli, 2017). Se determina el rango de dispersión correspondiente y se establece el límite inferior de la resistencia. Con este límite inferior se clasifica el hormigón de acuerdo con la norma NCh170 (2016).

Profundidad de carbonatación

Es un ensayo químico que se utiliza para diagnóstico del hormigón. Se basa en cambios de color producidos en la superficie del hormigón por un indicador pH. Se emplea generalmente la sustancia fenolftaleína sobre el hormigón. Si se colorea violeta indica pH aceptable (no hay corrosión), pero si no varía de color, indica una carbonatación y el pH es menor a 9.2 (Figura 2). El ensayo permite estimar la profundidad de carbonatación y con eso la vida útil residual del elemento de hormigón armado. Para efectuar el ensayo es necesario realizar una intervención estructuralmente irrelevante y luego sellar la perforación.



Figura 2: a) Realización del ensayo con esclerómetro en el Puente Calle Calle 1, Valdivia y b) realización del ensayo de carbonatación en el Puente Quinchilca viejo, Los Lagos.

Pacómetro

Consiste en la detección electromagnética de armaduras. La sonda de búsqueda (Figura 3(a)) induce una corriente electromagnética en la armadura y mide su amplitud. La amplitud depende de la orientación, profundidad y tamaño de la barra. El cabezal de búsqueda es direccional y la señal máxima se obtiene cuando la barra está alineada con su eje. Tiene una precisión de ± 1 diámetro estándar de barra y de ± 3 mm para detectar el centro de la barra. Se utiliza para la medición del recubrimiento del hormigón, de los diámetros de barras y para la detección de la ubicación de las barras.

Calidad de hormigón con ultrasonido

Se basa en el principio de que la velocidad de pulso ultrasónico en un material depende de su densidad y sus propiedades elásticas, las cuales están relacionadas con la calidad y la resistencia a la compresión del hormigón. Las ondas ultrasónicas se introducen y reciben por medio de transductores acoplados a la superficie (Figura 3(b)). La velocidad se determina dividiendo el tiempo de recorrido entre la distancia entre transductores. Este ensayo proporciona información sobre la uniformidad del

hormigón, cavidades, grietas, defectos, espesor de losas y detección de huecos, conductos y grietas.

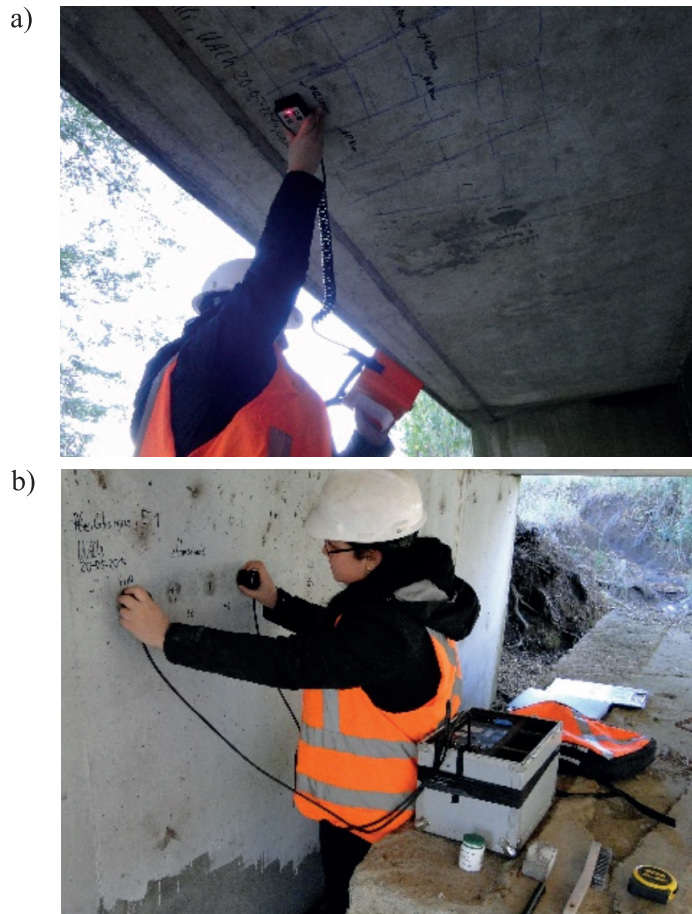


Figura 3: a) Realización del ensayo con Pacómetro en el Puente Trafampulli, Cunco y b) realización del ensayo con ultrasonido en el estribo de hormigón del Puente Caburgua.

Dureza Brinell in situ

Este ensayo consiste en la medición de la dureza superficial del acero utilizando equipos portátiles (Figura 4(a)) que se basan en el ensayo de rebote dinámico según Leeb, y se traducen a la escala de Brinell. Depende de otras propiedades como la elasticidad, la plasticidad y la cohesión y tiene una precisión de $\pm 0.5\%$. La dureza Brinell obtenida se puede convertir en la resistencia del acero a tracción según la normativa ISO 18265 (2013).

Impact-Echo

El método eco-impacto se basa en el seguimiento periódico de la llegada de las ondas elásticas reflejadas y permite obtener información sobre la profundidad de la interfaz de reflexión. Utiliza un transductor generador de impacto

para generar ondas elástico y que tiene acceso de un solo lado de la estructura (Figura 4(b)). Para la medición del espesor de hormigones se obtiene una precisión del 3% al estar calibrado. Se usa para la medición del espesor de pavimentos, revestimientos de asfalto, losas sobre el suelo y paredes. Detecta también la presencia y profundidad de vacíos, nidos y delaminaciones, entre otros.

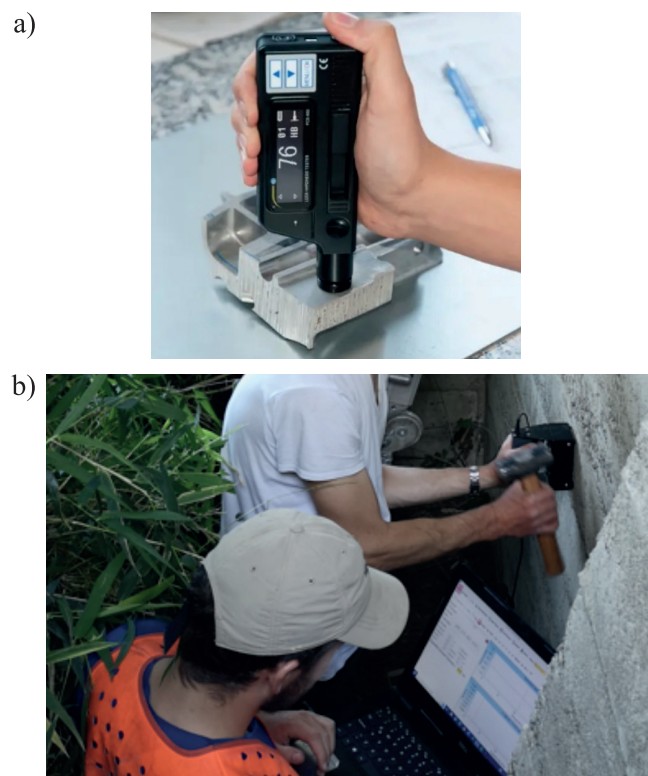


Figura 4: a) Ejemplo de un durómetro Leeb portátil y b) realización del ensayo eco impacto en el Puente Chirre, Entrelagos.

Fotogrametría

Técnica cuyo objetivo es el conocimiento de las dimensiones y posición de objetos en el espacio, a través de las medidas realizadas a partir de la intersección de dos o más fotografías y el modelo digital del terreno correspondiente al lugar representado. El concepto de fotogrametría es: “medir sobre fotos” (Figura 5(a)). Las fotografías se pueden obtener de forma aérea o a nivel del suelo. La precisión depende del tamaño de la fotografía y el pixel, a mayor tamaño de pixel se obtiene menor precisión.

Fisurómetro

Utiliza un microscopio de medición de alta definición que es usado para medir los anchos de grietas en estructuras

de hormigón y otras como muros de albañilería. Tiene una propia fuente de luz ajustable para condiciones oscuras. El microscopio operado por baterías tiene una magnificación (aumento) de 40x (Figura 5(b)). Posee una escala del ocular para alinear con la dirección de la grieta bajo examen. El ancho máximo de medida es de 4 mm, dividido en segmentos de 0.2 mm, los cuales se subdividen en partes iguales de 0.02 mm (Ramírez *et al.*, 2017).

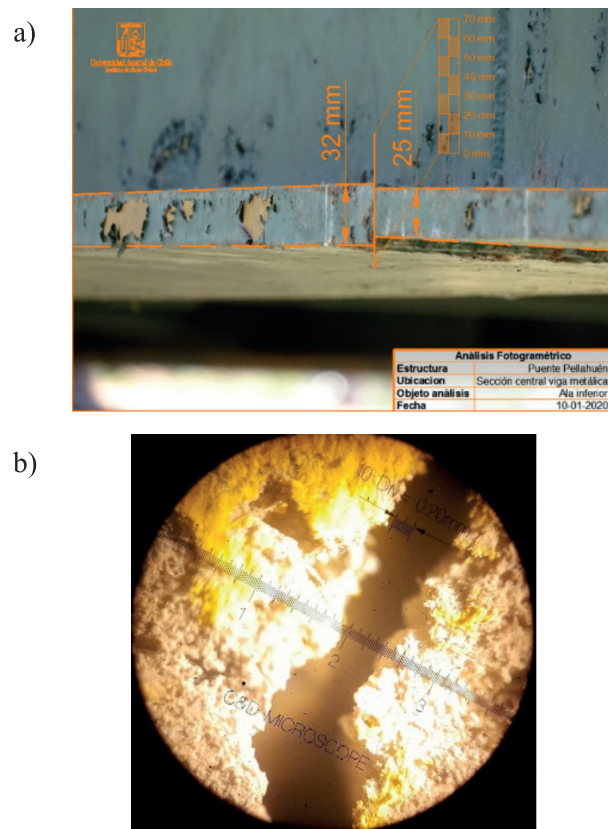


Figura 5: a) Ejemplo del uso de la fotogrametría para determinar el espesor del ala inferior del Puente Pellahuén y b) ejemplo de la medición del ancho de una fisura en el Puente Calle Calle 1, Valdivia

Prueba de carga

La prueba de carga es un conjunto de operaciones consistente en la reproducción de uno o varios estados de carga, con objeto de medir ciertos valores y compararlos con aquellos teóricamente esperados. Sirve para confirmar que una estructura se comporta de acuerdo al proyecto y/o estado de conservación pronosticado. Dada la pequeña magnitud de los valores y la alta exactitud necesaria, se requiere sensores de desplazamiento, extensómetros, acelerómetros y otros artefactos para realizar las mediciones (Figura 6(a)).

Espesores de acero con ultrasonido

Al igual que el ultrasonido para hormigones, este ensayo se basa en principio de que la velocidad de pulso ultrasónico en un material depende de su densidad y sus propiedades elásticas. Una vez calibrado el aparato en el acero a ensayar, entrega resultados con gran exactitud y rapidez. Se usa para medir el espesor de aceros que no tienen acceso de ambos lados, como perfiles huecos (Figura 6(b)), almas de vigas doble T, cajones, etc.

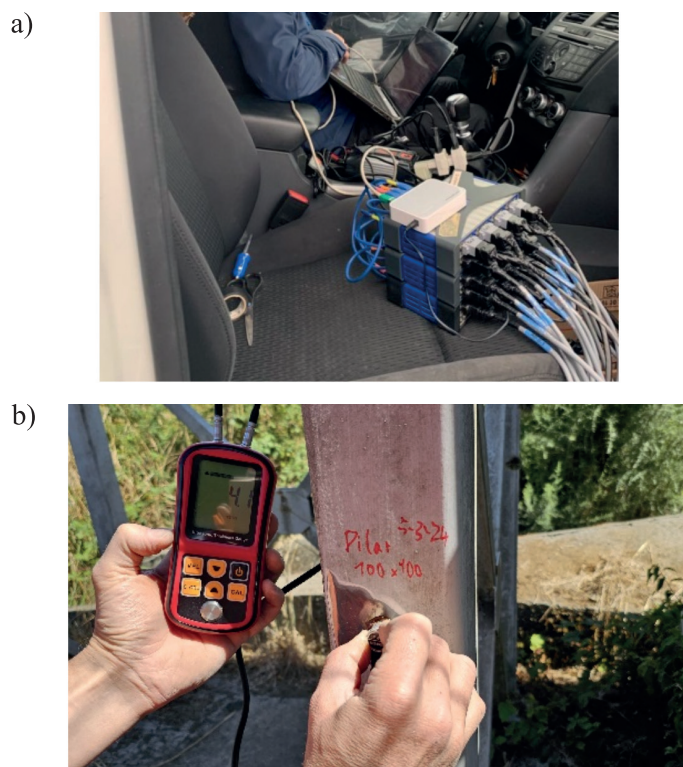


Figura 6: a) Equipo de adquisición de datos usado durante la prueba de carga del Puente Colgante Exploradores, Puerto Río Tranquilo y b) ejemplo de aplicación de la medición de espesor con ultrasonido en la pasarela Ragñintuleufu, Nueva Imperial

Endoscopía

La endoscopía consiste en la observación indirecta del interior de un elemento estructural, a través de una perforación practicada o existente, que permita inspeccionarlo visualmente. La imagen se transmite por medio de paquetes de fibra óptica, pasando por el tubo, la cámara, el vídeo sistema de proyección, o lentes (Figura 7). Las categorías básicas son rígidas o flexibles, según la configuración del tubo. Los boroscopios más utilizados hoy en día son: boroscopios de fibra óptica, boroscopios de cámara, boroscopios de lente y microscopios. Está

limitado por obstrucciones visuales, que pueden deberse a iluminación, acceso u obstrucción.

Termografía activa y pasiva

La termografía pasiva estudia las diferencias de la radiación infrarroja natural entre diferentes zonas del objeto en estudio, que reflejen distintas materialidades, espesores u otras características ocultas a la vista (Figuras 7(a) y 7(b)). En la termografía activa se utilizan fuentes de calor adicionales que para provocar mayores diferencias de temperatura entre diferentes zonas de los materiales de forma que se acentúan las irregularidades internas (grietas, filtraciones, diferentes materiales ocultos) no detectables mediante termografía pasiva. Permite la inspección rápida en obras de amplias zonas de forma no invasiva. Se usa para la localización de humedades, huecos y grietas, detección de delaminación, de diferentes materiales, análisis de pinturas, estado de materiales, etc.

a)



b)

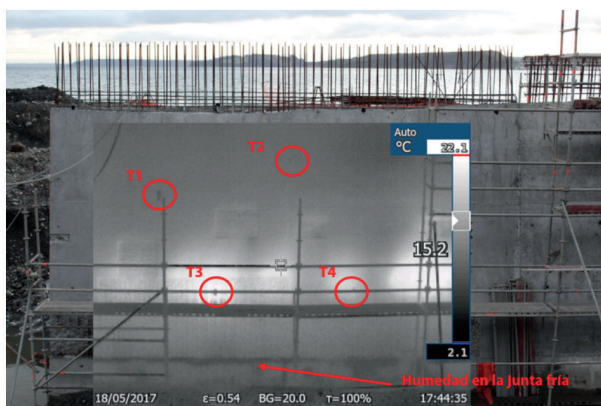


Figura 7: a) Imagen de un boroscopio de fibra óptica y cámara y b) ejemplo de aplicación de la termografía activa en un muro de HA, costanera Ruta 7, Puerto Montt.

Resultados

En base al análisis de los ensayos END realizados, se obtienen resultados clasificados en dos aspectos:

- 1) Evaluación cuantitativa de los ensayos realizados
- y 2) Evaluación cualitativa de los tipos de ensayos, reconociendo sus beneficios y limitaciones.

Evaluación cuantitativa

El gráfico de la Figura 8 resume la cantidad de ensayos realizados por el Laboratorio de Ingeniería de Puentes de la UACH desde el año 2012. Como se puede ver, la cantidad de puentes ensayados por año se mantiene relativamente constante (2.6 por año), sin embargo, la cantidad de ensayos por puente va en aumento. En los años 2012 a 2015, el promedio era 8.5 ensayos por puente, mientras entre 2020 y 2023 el promedio subió a 36.4.

Las Tablas 1 y 2 muestran las frecuencias con las que se solicitaron los distintos tipos de END a lo largo de los años. Considerando la cantidad de puentes en los que se realizan los ensayos, los 5 tipos más solicitados son: Esclerómetro de hormigón, Profundidad de carbonatación, Pacómetro, Calidad de hormigón con ultrasonido y Dureza Brinell in situ. Si se considera la cantidad absoluta total de ensayos realizados, se repiten los mismos ensayos, añadiendo, en primer lugar, el ensayo de Impact-Echo. En general, esta distribución se mantiene constante a lo largo de los años. No obstante, es posible notar un aumento de los ensayos de Dureza Brinell y Fisurómetro en los últimos años.

Evaluación cualitativa

Basado en nuestra experiencia, los distintos tipos de ensayos son especialmente beneficiosos en las siguientes condiciones:

- Esclerómetro: Ensayo estándar para conocer el grado del hormigón, es posible calibrarlo para compensar el efecto de carbonatación, debe acompañarse por el ensayo de carbonatación
- Carbonatación: Ensayo imprescindible para evaluar la vida útil restante del hormigón, debe acompañarse por el ensayo con pacómetro para medir el recubrimiento
- Ultrasonido HA: permite evaluar la calidad del hormigón en un área y profundidad mayor que el esclerómetro, no es muy útil si se realiza sólo, idealmente complementa el ensayo esclerométrico
- Pacómetro: es muy exacto para ubicar la armadura

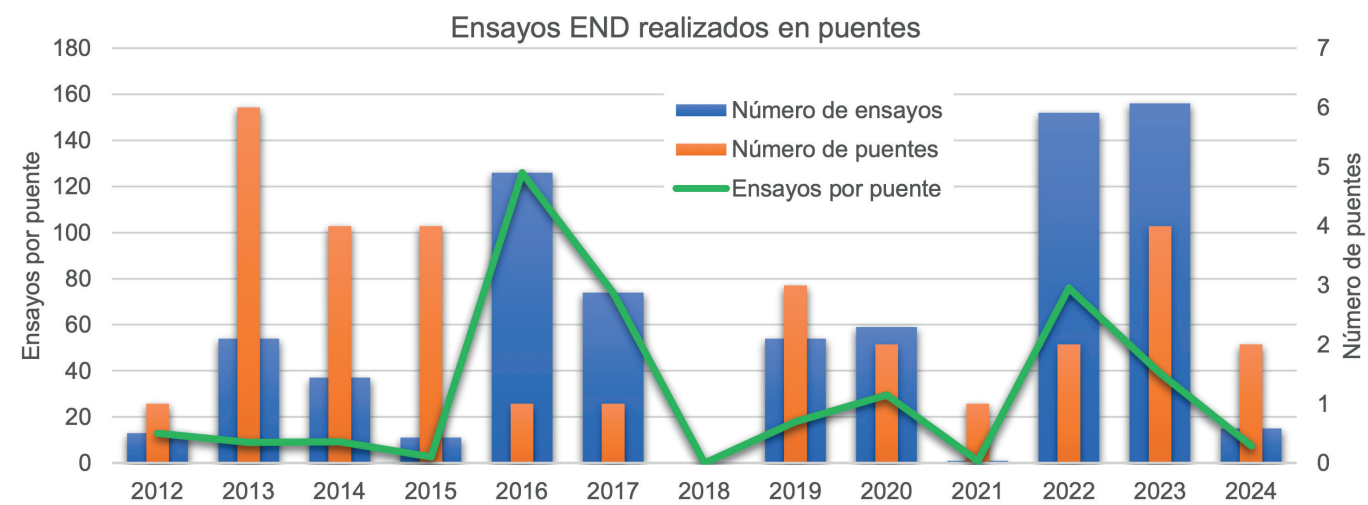


Figura 8. Ensayos END realizados en puentes por el Laboratorio de Ingeniería de Puentes de la UACH

Tabla 2: Ensayos según tipo, realizados por el Laboratorio de Ingeniería de Puentes de la UACH.

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Suma
Esclerómetro	6	13	17		3	32	16	17		42	21	2	169
Carbonatación	6	13	10			32	16	17		42	50		186
Pacómetro		3	2	3		1	2			2	2		15 (global)
Ultrasonido HA		13	6				16	17					52
Brinell		3	2			4	3	4		16		10	42
Impact-Echo					119					48	81		248
Fotogrametría		9		6		5		4					24
Fisurómetro										2	2		4 (global)
Prueba de carga	1			1			1		1				4
Ultrasonido acero					3							3	6
Endoscopia				1									1
Termografía					1								1

- y determinar su recubrimiento cuando el diámetro es conocido, cuando no es conocido requiere mucha experiencia para hallar resultados correctos, solamente permite detectar la primera capa de la armadura, solamente mide bien armadura hasta unos 8 cm bajo superficie, no distingue barras que están muy juntas, a pesar de todas estas limitaciones, es actualmente el método más utilizado cuando se requiere levantar de forma no destructiva la armadura del puente completo
- Brinell: Método excelente para determinar el grado de

- acero, dado que los aceros se clasifican en grados bien marcados, se ha usado también en barras de armadura expuestas
- Impact-Echo: método muy rápido y exacto para medir el espesor de losas y muros de hormigón, sin problemas hasta 50 cm de espesor, requiere experiencia para espesores mayores
 - Fotogrametría: la mejor forma del levantamiento geométrico de un puente, es decir, crear planos *as-built* donde no existen, es con medición directa manual



(huincha, vernier, nivel, etc.), entonces, algunos elementos de difícil acceso pueden ser determinados mediante fotogrametría, requiere fotos de alta resolución y de un ángulo adecuado

- Fisurómetro: la posibilidad de medir con gran exactitud el espesor de fisuras tiene especial importancia a la hora de monitorear fisuras sobre un periodo de tiempo, para una inspección única solamente interesa si la fisura supera los 0.2 mm de ancho o no, lo cual puede ser medido con regla de fisuras más rápido
- Prueba de carga: es un método que requiere un estudio propio, con proyecto, cálculos y análisis posteriores, es muy potente para evaluar el estado real de conservación de un puente, generalmente se piden en consecuencia de una primera evaluación del puente
- Ultrasonido acero: mide con gran exactitud y rapidez el espesor de acero que no cuenta con acceso de ambos lados (almas de vigas doble-T, perfiles huecos, chapas de piso, tubos yoder, etc.)
- Endoscopia: sobre todo en puentes no convencionales, donde hay espacios cerrados puede hacerse una perforación para introducir el boroscopio
- Termografía: su gran fuerte es que funciona sin contacto (a distancia) y entrega resultados inmediatos, detecta vacíos, desprendimientos y delaminaciones en el hormigón

Sumando las posibilidades descritas se concluye que los END también permiten confeccionar planos *as-built*, con información de geometría y de materiales de un puente del cual se perdió esta información.

Conclusiones

En base al trabajo desarrollado, se derivan las siguientes conclusiones.

1. Al ser no destructivos, todos los métodos presentados tienen la crucial ventaja de no alterar el puente en estudio.
2. El aumento de ensayos por puente en los últimos años indica que la Dirección de Vialidad le da cada vez más importancia a la información levantada con

ensayos no destructivos.

3. Los ensayos de esclerómetro, carbonatación y ultrasonido en HA deberían realizarse siempre como un “paquete”, dado que la correcta interpretación de uno de ellos se beneficia mucho con la información de los otros ensayos. Por ejemplo, el ultrasonido permite extrapolar los resultados puntuales del esclerómetro y la carbonatación permite calibrar por edad al esclerómetro.
4. Para la evaluación de la vida útil restante de un puente de HA se requieren los dos ensayos: carbonatación y la medición del recubrimiento mediante pacómetro.
5. En estructuras de acero o puentes mixtos, los ensayos de Brinell in situ y de ultrasonido permiten levantar la geometría y la materialidad.
6. El fisurómetro es especialmente útil en el monitoreo de fisuras existente a lo largo el tiempo.
7. La termografía pasiva y activa funciona a distancia y por eso promete gran utilidad en el ámbito de puentes, pero ha sido usado demasiado poco para dar conclusiones definitivas

Agradecimientos

Este estudio fue financiado y apoyado por la empresa PONTINEL SpA en el marco de su colaboración con la Universidad Austral de Chile.

Referencias

- Antiao, J. (2017). Estado del arte de los ensayos no destructivos en la ingeniería civil y diseño de un programa de ensayos para el Puente Calle Calle 1, Valdivia. Laboratorio de Ingeniería de Puentes, Universidad Austral de Chile
- García, A.R. (2007). *Fundamentos a los ensayos no destructivos*. Instituto Mexicano de Ensayos No Destructivos, México
- Hoła, J., Bien, J., Sadowski, L. and Schabowicz, K. (2015). Non-destructive and semi-destructive diagnostics of concrete structures in assessment of their durability. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences* 63(1), 87-96



ISO 18265 (2013). *Metallic materials — Conversion of hardness values*. Geneva, Switzerland

MOP (2022). *Instrucciones y criterios de diseño. Manual de Carreteras, Volumen 3*. Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile

NCh170 (2016). *Hormigón - Requisitos generales*. Instituto Nacional de Normalización INN, Santiago, Chile

Ramírez, R., Chagoyén, E. y Martirena, J.F. (2017). Caracterización de cambios de volumen en hormigones producidos en Cuba y sus aplicaciones. *Obras y Proyectos* **22**, 18-30

Retamal, J., Márquez, M. y Bianchi, E. (2022). *Plan de puentes 2020 – 2030*. Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, Registro de Propiedad Intelectual N° 2022-A-3364, Santiago, Chile.

Rudeli, N. y Santilli, A. (2017). Medición de resistencia a tempranas edades del hormigón: método que mejor se ajusta para la determinación de tiempos mínimos de desencofrado de elementos verticales de hormigón. *Obras y Proyectos* **22**, 6-16