

## Estado del arte de los métodos de ensayo no destructivos al concreto

<https://doi.org/10.51378/ilia.vi1.8517>

A. E. Menéndez Orellana <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Técnica de Múnich (TUM), Múnich, Alemania

E-mail: ana.menendez@tum.de

**Resumen** — En la actualidad, las técnicas de ensayo no destructivas se han convertido en una herramienta fundamental para la ingeniería civil. De la mano de los avances de la tecnología, dichas técnicas han visto gran progreso en años recientes. Numerosas investigaciones han sido y continúan siendo publicadas, y de ahí surge la necesidad de una guía que convenientemente, a través de un enfoque contemporáneo, haga referencia a teoría y casos de estudio que ilustren al lector en la materia. Este último es el principal objetivo de este artículo. Con base en una revisión exhaustiva de la literatura, se presenta un análisis del estado del arte de una serie de métodos no destructivos que se enfoca en su utilización específica para la evaluación de estructuras de concreto. Dichos métodos se han agrupado en seis categorías de acuerdo con su aplicación principal, y se discuten distintas limitaciones, retos y perspectivas a futuro de los mismos.

**Palabras Clave** – concreto, ensayos no destructivos, estado del arte, estandarización, retos

**Abstract** — Non-destructive testing techniques have become, at present, a fundamental tool for civil engineering. Hand in hand with technological advances, these techniques have seen great progress in recent years. Numerous investigations have been and continue to be published, and from that arises the need for a guide that conveniently, through a contemporary approach, makes reference to theory and case studies that illustrate the reader in the matter. The latter is the main objective of this article. Based on a comprehensive literature review, an analysis of the state-of-the-art of a series of non-destructive testing methods that focuses on their specific use for the evaluation of concrete structures, is presented. These methods have been grouped into six categories according to their main application, and their limitations, challenges and outlook are discussed.

**Keywords** — challenges, concrete, non-destructive testing, standardization, state-of-the-art

### I. INTRODUCCIÓN

El concreto reforzado es uno de los materiales de construcción más utilizados en todo el mundo. Aun cuando se considera un material versátil y resistente que puede soportar niveles de degradación externa significativos, el concreto experimenta una pérdida de integridad con el paso del tiempo debido a daños causados por mecanismos químicos (reacción álcali-sílice, carbonatación, corrosión, cristalización, lixiviación, acción de sales y ácidos, etc.), físicos (variaciones de temperatura, fatiga, sobrecarga, contracción, ciclos hielo-deshielo, etc.) e incluso biológicos (acumulación de materia orgánica, organismos vivos, etc.).

Comprender los múltiples procesos de deterioro es crucial, ya que cada uno deriva en distintos tipos de defectos (corrosión, agrietamiento, desprendimiento, delaminación, etc.) [1].

Según las estadísticas mundiales, alrededor del 3 % del producto interior bruto (PIB) mundial, USD 2.2 billones, se pierde en el deterioro prematuro de estructuras de concreto [2]. El deterioro es, de hecho, un problema importante en cualquier elemento de concreto durante su ciclo de vida. Y es ahí donde los ensayos no destructivos resultan indispensables.

Si bien no existe una definición estándar para los ensayos no destructivos específicamente enfocados en el concreto, el concepto en general hace referencia a métodos que permiten examinar objetos, materiales o sistemas sin perjudicar su futura capacidad de servicio, es decir, *inspeccionar o medir sin causar daño* [3]. Dichos métodos son esenciales para la supervisión periódica, la evaluación del estado, el control de la calidad y el mantenimiento a largo plazo de las distintas etapas de la vida útil de estructuras de concreto. Gracias a ellos se ha reducido drásticamente el tiempo necesario para detectar problemas estructurales. Y además de facilitar el mantenimiento basado en la condición (en inglés, condition-based maintenance o CBM), han abierto sin duda la puerta a nuevas posibilidades para el monitoreo de la salud estructural (en inglés, structural health monitoring o SHM).

Este artículo pretende servir como guía sobre los ensayos no destructivos al concreto, de forma similar a como lo fue en su momento el manual [4] publicado en 2002 por la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA por sus siglas en inglés) en Viena, pero con un enfoque contemporáneo. Se trata de un resumen que agrupa distintas publicaciones ilustrativas de cada método y hace referencia a hallazgos y conclusiones de investigadores alrededor del mundo en los últimos años, con el fin de actualizar los conocimientos en la materia. Vale enfatizar, sin embargo, que los ensayos no destructivos van mucho más allá no solo del concreto, sino también de la ingeniería civil. De hecho, su uso se extiende a una amplia variedad de materiales e industrias. Como un brillante ejemplo del uso de los mismos, se considera oportuno citar el trabajo de Elkarmoty et al., quienes por medio de distintos métodos encontraron un corredor oculto en la Gran Pirámide de Giza, en Egipto [5].

---

Ana Menéndez Orellana es científica y candidata a doctorado en la Universidad Técnica de Múnich (TUM), Múnich, Alemania.

## II. CLASIFICACIÓN

En la literatura, los ensayos no destructivos suelen estar clasificados según la naturaleza de su principio de funcionamiento. La razón por la que comúnmente no se clasifican en función de su aplicación se atribuye a que, para la mayoría de métodos, esta última no es única. No obstante, para fines prácticos, dicho criterio de clasificación también es válido, y de hecho, resulta muy conveniente.

A continuación se agrupan una serie de técnicas no destructivas en seis categorías, según su uso más habitual:

i. *Evaluación de la calidad del concreto*, por medio de ondas elásticas o de tecnologías de imagen (termogramas, rayos X) para la detección y localización de fallas internas, evaluación de la integridad del concreto, detección y evaluación de la severidad de reacciones álcali-sílice, estimación del ancho de elementos estructurales, etc.

ii. *Evaluación de la corrosión del acero de refuerzo* a través de métodos electroquímicos, así como la detección de cloruros, la elaboración de perfiles para cuantificar su avance, y la detección de carbonatación según el pH del concreto.

iii. *Determinación de resistencia* (a compresión, a tensión), *adhesión y dureza superficial* mediante métodos mecánicos de ensayo in situ, para identificar posibles áreas de deterioro, evaluar la efectividad de recubrimientos y reparaciones con capas superpuestas, para programar el desencofrado, curado, carga de los elementos, etc.

iv. *Exploración del acero de refuerzo*, localización de las varillas, determinación de su diámetro y longitud, verificación de su correcto posicionamiento, i.e., de su separación y distancia de recubrimiento, etc. Identificación de otros objetos ferromagnéticos embebidos en el concreto.

v. *Evaluación de Permeabilidad* del concreto, para determinar cuánta agua lo penetra, examinar la efectividad de medidas de impermeabilización, sellado de juntas, humedad en la superficie antes de aplicar recubrimientos, etc.

vi. *Monitoreo de grietas*, es decir, detección, determinación de su ancho y profundidad, identificación de la naturaleza del daño y evaluación de su progreso.

En la fig. 1, se presenta para cada método un resumen de bibliografía relevante en la que puede encontrarse una descripción técnica, así como aplicaciones, ventajas y desventajas generales. También se incluyen referencias a estudios de casos que, o ilustran la forma en que las técnicas resultan útiles para pruebas al concreto, o presentan resultados de investigaciones enfocadas hacia la mejora de las mismas. Tomando en cuenta que la mayor parte de la literatura se encuentra publicada en inglés, junto al nombre de cada método se especifica su traducción y abreviatura.

## III. REVISIÓN DE LITERATURA

### A. Breve historia de los ensayos no destructivos al concreto a lo largo del tiempo

Una excelente referencia sobre el tema se puede encontrar en el trabajo de Carino [6]. Desde una perspectiva

histórica, el autor comenta una serie de hitos en el desarrollo de los métodos de ensayo no destructivos, y presenta una cronología del progreso para el uso de los mismos en concreto endurecido a lo largo de los 50 años anteriores a la publicación en cuestión, con un esbozo de las futuras orientaciones y retos para el siglo XXI. Según el autor, el final del siglo XX fue una época apasionante para los ensayos no destructivos al concreto.

Carino destaca la contribución de V. M. Malhotra. Vale la pena recordar que, en su histórico artículo de 1977 sobre el ensayo a especímenes vs. ensayos in situ, Malhotra hizo un llamamiento para cambiar el orden establecido del control de calidad del concreto. Argumentó que la práctica actual basada en la resistencia de especímenes estándar curados es ineficaz, y concluyó: “Para crear una apariencia de orden en una situación que de otro modo sería caótica, se sugiere una visión completamente nueva. Esto, por supuesto, implicará cambios fundamentales en nuestro enfoque para las especificaciones y la redacción de códigos, y podría llevar algún tiempo antes de que la comunidad del concreto lo acepte” [6]. Carino citó esto último en 1994. Hoy, casi 50 años después, la visión de Malhotra sigue siendo una meta aún sin alcanzar.

### B. Retos principales asociados a los métodos de ensayo no destructivos al concreto

Carino señaló que, en comparación con otros materiales como el acero, el desarrollo de los métodos no destructivos al concreto ha progresado a un ritmo más lento. Lo anterior, debido a que el concreto es un material intrínsecamente más difícil de ensayar que el acero, y la tecnología ya desarrollada no puede transferirse directamente de un material a otro [6].

Los retos a los cuales se enfrentan los ensayos no destructivos pueden dividirse en dos grandes tipos. Por un lado, aquellos *asociados con el proceso de ensayo mismo*. Por ejemplo, el ensayo de UE suele requerir considerable tiempo y esfuerzo. Es imprescindible llevar a cabo una calibración cuidadosa del tomógrafo al iniciar cada serie de pruebas, y debido al tamaño de este último, no suele ser fácil ensayar en espacios reducidos [21]. Otro ejemplo es la técnica IE, la cual solo es capaz de detectar ciertos defectos en estructuras similares a placas, pero resulta menos eficaz para detectar defectos pequeños y profundos en otros tipos de estructuras (como en los elementos prismáticos de concreto). Y de forma similar, con el método RT, las delaminaciones superficiales y las pequeñas discontinuidades son difíciles o incluso imposibles de detectar.

La prueba es además sensible a múltiples factores externos, como la dirección de grietas, ya que las grietas perpendiculares a la radiación tienen menos probabilidad de

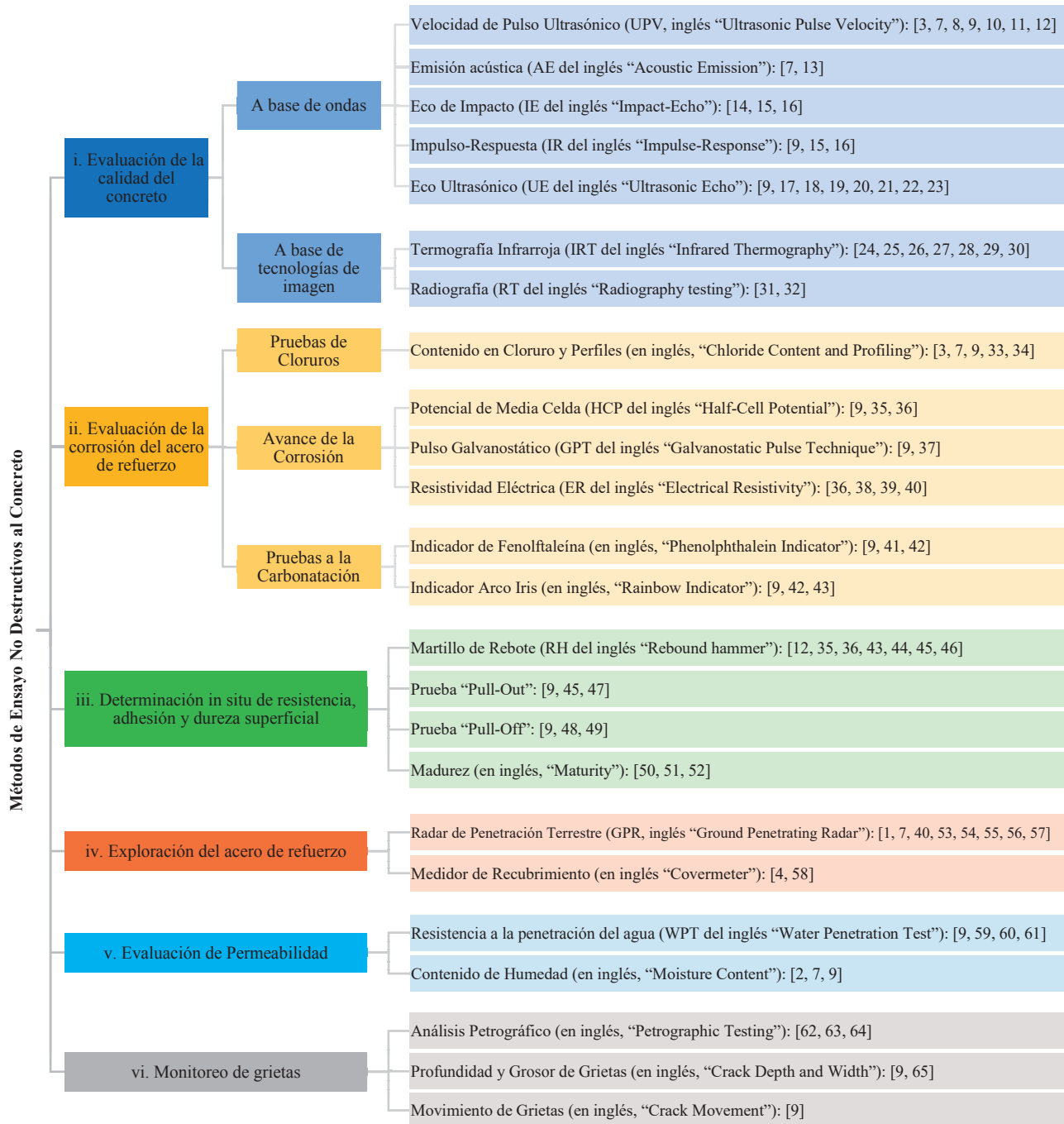


Fig. 1. Resumen de la revisión de literatura concerniente al estado del arte de los métodos de ensayo no destructivos al concreto

ser detectadas [31]. La seguridad operativa es otra limitación importante del método RT [32].

Alternativamente, los retos pueden estar asociados con el análisis de datos. Con el método *Pull-Off*, por ejemplo, los resultados de los ensayos muestran una gran dispersión debido a la naturaleza heterogénea del concreto (como la presencia de áridos gruesos debajo de la fijación metálica), o

debido a las variaciones de las condiciones experimentales entre prueba y prueba; y también, la resistencia medida puede no ser representativa de la capacidad de adherencia real, ya que el modo de carga será de tensión pura, por lo tanto, difiere de las condiciones de servicio in situ [48]. Otro ejemplo es el método UPV, utilizado principalmente para detectar defectos pero también para evaluar la resistencia a la compresión. Los valores medidos pueden verse afectados por varios factores,

la mayoría de los cuales no influyen necesariamente en la resistencia a la compresión del concreto y generan ruido en los datos [11]. Por lo tanto, el uso de este método sin ensayos semi-destructivos de testigos no proporciona predicciones fiables de la resistencia. Un tercer ejemplo es la técnica GPR, que requiere un especialista altamente cualificado para interpretar los datos obtenidos, lo cual complica su uso para SHM ya que el procesamiento y análisis de datos a largo plazo sería problemático.

El método ER también enfrenta ambos tipos de retos. La interpretación acertada de los datos es compleja, ya que los valores son sensibles a diversos parámetros relacionados con las propiedades de los materiales y factores ambientales. De hecho, todos los factores que afectan la estructura porosa del concreto (la relación a/c, la edad, el tipo de cemento, los aditivos puzolánicos, el grado de hidratación, etc.) también afectarán su resistividad eléctrica. El diámetro y la separación de las varillas de refuerzo, su orientación y el espesor del recubrimiento provocan la variación de los valores de ER [39]. Además, la prueba suele llevar mucho tiempo y a menudo causar molestias al público.

La técnica IRT enfrenta asimismo tales retos. La IRT pasiva depende de las condiciones meteorológicas, la orientación de la superficie, el color y la textura del concreto. El mismo defecto tendrá un contraste variable a lo largo del día y, por lo tanto, es crucial comprender las condiciones ambientales necesarias para proporcionar un gradiente térmico adecuado [26]. Existen informes contradictorios al respecto. Por esta razón, las técnicas IRT activas se utilizan cada vez más, estableciendo un gradiente térmico mediante la importación de energía a través de una fuente de calor externa artificial. Sin embargo, el concreto tiene una baja conductividad térmica, por lo que se requiere mucha energía para manipular su cambio de temperatura e iniciar el flujo de calor. Además, un calentamiento no uniforme puede dar lugar a falsos positivos. A menudo es necesario un complejo post-procesamiento para el análisis de termogramas [27].

No existe un único ensayo no destructivo capaz de evaluar todo tipo de problemas estructurales, por lo que es a menudo necesario recurrir a métodos complementarios. Por ejemplo, mediante la prueba HCP, el potenciómetro no indica la velocidad de corrosión, sino solamente la posibilidad de que exista corrosión en curso [36]. Por lo tanto, se necesitan ensayos adicionales para evaluar el progreso de la misma. Otro ejemplo son los ensayos petrográficos, que analizan el concreto a nivel microscópico, pero por sí solos no son suficientes para un diagnóstico completo del concreto [62].

A veces, los métodos no destructivos deben respaldarse con métodos semi-destructivos. Para la prueba RH, por ejemplo, los fabricantes proporcionan medios para convertir las cifras de rebote en valores de resistencia a la compresión, pero no son universales, y no son fiables a menos que los resultados se correlacionen con resultados de ensayos a testigos. Shubbar et al. sugieren que pueden obtenerse valores más altos de resistencia a la compresión debido a carbonatación superficial, que provoca el endurecimiento del

concreto. Cuanto más duro sea el concreto, mayor será la resistencia a la compresión medida, que podría no ser cierta para el concreto a mayor profundidad. También pueden obtenerse valores más altos si ha ocurrido desprendimiento. Por el contrario, una superficie con un alto contenido de humedad tendrá un número de rebote más bajo [35].

Cabe mencionar que varios de los métodos presentados en este artículo no se consideran totalmente no destructivos. Con la técnica HCP, por ejemplo, es necesario abrir el elemento de concreto para hacer contacto con la barra de refuerzo. Los resultados dependen en gran medida de la eficacia de dicho contacto eléctrico [36]. O también, al realizar ensayos *Pull-Out* y *Pull-Off* se producen pequeños daños en la superficie. Mientras que los ensayos petrográficos requieren la extracción de testigos.

Además, no solo ensayos no destructivos tradicionales enfrentan desafíos. El uso de herramientas modernas, como los drones, no se halla exento de limitaciones [66].

### C. Resumen del estado del arte de los métodos de ensayo no destructivos al concreto

Gracias a los adelantos de la tecnología en las últimas décadas, los métodos de ensayo no destructivos al concreto han avanzado a grandes pasos, ya que se ha perseguido activamente la mejora continua de los mismos. Lo anterior ha dado lugar a formidable progreso en la ingeniería civil.

Ciampa et al. demostraron que es posible llevar a cabo inspecciones visuales haciendo uso de drones [66].

Howlader et al. propusieron un novedoso mecanismo de adhesión magnética para un robot trepador de estructuras verticales de concreto reforzado [67].

El artículo de Kot et al. resume los avances recientes en varias técnicas actuales de ensayos no destructivos para la SHM del concreto. Se presta gran atención a la inteligencia artificial (IA) como parte importante de la interpretación de datos complejos. Los autores comentan el uso de aprendizaje automático profundo (en inglés, *deep machine learning*) para la detección de grietas en el concreto. También se revisan otras herramientas modernas para SHM, como: sensores de fibra óptica, técnicas basadas en cámaras para monitorizar el desplazamiento de estructuras, sistemas LiDAR (en inglés, *Light Detection and Ranging*) o LaDAR (en inglés, *Laser Detection and Ranging*), como parte de las tecnologías de teledetección para la inspección detallada de grandes estructuras [7].

Hüsken et al. utilizaron técnicas de medición óptica para estudiar el comportamiento estructural de una viga de concreto reforzado. Su trabajo se centró en determinar los modos de falla mediante ensayos no destructivos ópticos, y compararlos con los métodos de medición clásicos. La viga de flexión se equipó con dos fibras sensoras monomodo. Se realizaron mediciones ópticas de deformación mediante correlación digital de imágenes y estereofotogrametría [68].

Ham et al. estudiaron la utilidad de los sensores microelectromecánicos (en inglés, micro-electromechanical

sensors o MEMS), para su aplicación en la detección sin contacto en ensayos no destructivos al concreto [69].

Milovanovic et al. señalaron cómo los avances en el procesamiento de señales, junto con algoritmos numéricos eficientes y un mayor acceso a computadoras potentes, hicieron factible implementar con éxito la tecnología de imágenes en los ensayos no destructivos al concreto [26].

Sin embargo, no basta con disponer de tecnología de punta en los equipos de medición. Una interpretación adecuada de los datos obtenidos es igual o incluso más importante. Los investigadores están estudiando técnicas de IA, como algoritmos de aprendizaje automático (en inglés, machine learning o ML), redes neuronales artificiales (en inglés, artificial neural networks o ANN), máquinas de vectores de soporte (en inglés, support vector machines o SVM), entre otras, para abordar diversos retos, y también combinando múltiples técnicas no destructivas para mejorar la precisión y facilitar la obtención de parámetros adicionales, con el fin de mejorar el proceso de diagnóstico.

Lande y Gadewar estudiaron cómo el uso de ANN es una estrategia viable para desarrollar herramientas computacionales que apoyen la interpretación de métodos ultrasónicos, para reducir el sesgo y ayudar a los especialistas con el análisis de grandes cantidades de datos [11].

Debido a que mediante el ensayo RH y el ensayo UPV, las estimaciones de la resistencia a compresión del concreto tienen un gran porcentaje de error cuando se comparan con los resultados de los ensayos destructivos, Ngo et al. utilizaron técnicas de IA (ANN, SVM y otras) para explorar las relaciones entre los resultados de los dos tipos de ensayo en cuestión y la resistencia del concreto [10].

Zhang et al. introdujeron técnicas avanzadas de ML para el análisis de datos del método IE, basándose en la idea de que las características extraídas de las señales IE en bruto portan información mucho más completa para capturar los patrones de señal IE que el desplazamiento de frecuencia pico utilizado en el método tradicional [14].

Por otro lado, es común combinar los resultados de distintos métodos no destructivos complementarios, para obtener diagnósticos completos. Moczko et al. describieron cómo el método IR puede utilizarse para el estudio rápido de grandes estructuras de concreto con el fin de determinar zonas locales con posibles defectos, para un posterior análisis a profundidad con técnicas distintas. Tal es también el caso de la técnica IRT, para la que los investigadores han realizado extensas pruebas de laboratorio e in situ comparando sus resultados con los de los métodos electromagnético y ultrasónico. Milovanovic et al. resumieron numerosos estudios de casos en los que la fusión de dos o más métodos de ensayo no destructivos mejoró la confiabilidad de la evaluación [26].

Los métodos en cuestión son esenciales en el propio mundo de la investigación. Rathnarajan et al., por ejemplo, estudiaron la vida útil de sistemas de concreto reforzado con aditivos minerales y cementos especiales, usando indicadores de fenolftaleína y arco iris [42].

No obstante, un problema fundamental de los ensayos no destructivos es que los conocimientos sobre la materia son radicalmente heterogéneos alrededor del mundo. Hace diez años, Lee et al. presentaron un estudio sobre el uso de estos métodos en Estados Unidos. Su objetivo era aclarar cómo, cuándo y dónde utilizaban los departamentos de transporte estatales los métodos de ensayo no destructivos para las inspecciones de puentes de autopistas. Sus resultados fueron positivos en general [70]. Mientras que, hace cuatro años, Martínez-Barrita et al. señalaron que el uso de técnicas semi-destructivas y no destructivas en algunas partes de México era muy limitado, como en Oaxaca, donde el estudio de los autores tuvo lugar [71].

Para profundizar en el tema, se recomiendan al lector las revisiones bibliográficas sobre ensayos no destructivos realizadas previamente por Verma et al. y por Venkatesh et al. [3, 43].

#### *D. Estandarización de los ensayos no destructivos*

Las técnicas no destructivas se utilizan desde hace décadas y, en la actualidad, más de 70 tipos de métodos para la evaluación del concreto se encuentran estandarizados [72].

Verma et al. presentan una amplia lista de códigos que incorporan métodos de ensayo no destructivos [3]. Kwan et al. también enumeran varias normas de referencia para la evaluación del estado de las estructuras [36]. Moczko et al. comentan el nuevo enfoque normativo europeo introducido para el control de calidad tradicional del concreto (ensayos de laboratorio), un grupo de normas identificadas como EN 12390; y para el ensayo de concreto en estructuras existentes (mediciones in situ), un grupo de normas identificadas como EN 12504 [45].

Sin embargo, aunque son numerosas las normativas locales e internacionales que ya incorporan métodos de ensayo no destructivos, para que la estandarización de los mismos sea comparable con la de métodos de ensayo destructivos, queda aún un largo camino por recorrer.

## IV. DISCUSIÓN

La ingeniería civil en su totalidad ha sido revolucionada por herramientas como la teledetección, la IA, el internet de las cosas, fibra óptica, sensores, drones, equipos de imagen de alta definición, computadoras de tamaño del bolsillo que funcionan con pilas, etc. De ahí que sea previsible que a los ensayos no destructivos les espera un futuro brillante.

Los esfuerzos de los investigadores se orientan hacia el modelado de la vida útil de las estructuras, el procesamiento de datos de monitorización a largo plazo, la extracción de información en profundidad sobre las propiedades de los materiales, la optimización de la combinación de métodos complementarios, la identificación de niveles de deterioro imperceptibles, la facilidad de uso, la precisión, la eficiencia; así como el establecimiento de procedimientos trazables con

el mínimo esfuerzo y la posibilidad de compartir datos sin obstáculos para la colaboración y la garantía de la calidad en infraestructura crítica [53].

Las técnicas no destructivas también desafían los límites de la arqueología y la restauración, sentando las bases para exploraciones sin precedentes del patrimonio cultural [57].

La innovación de los ensayos no destructivos sigue en curso. Por ejemplo, al final de su artículo, Zatar et al. anticipan que sus futuros trabajos se centrarán en el desarrollo de un robot trepador para automatizar la recopilación de datos para el método UE, y que el software desarrollado en su estudio se ampliará para proporcionar visualización en tiempo real de estructuras de concreto [19]. Chakraborty et al. señalan que la eficacia de los sensores ultrasónicos para la monitorización de grietas a largo plazo en estructuras reales será el objetivo de sus estudios posteriores [72]. Sarker et al. concluyen que, aunque la investigación sobre el potencial de la cámara de profundidad ZED aún está en una fase inicial, los métodos experimentales tienen gran potencial para el reconocimiento y modelado de infraestructura. Su trabajo a futuro se centrará en desarrollar un marco sólido para técnicas de modelado más sofisticadas [73].

Evidentemente, la superación de los retos actuales y el alcance de una estandarización completa de estas técnicas conducirán a un uso progresivamente más amplio de los métodos entre investigadores, técnicos e ingenieros de todo el mundo, haciendo posible la realización rutinaria de diagnósticos rápidos de concreto, que sean además rentables, sencillos, precisos y fiables; y quizás, llegando a sustituir por completo la necesidad de métodos de ensayo destructivos.

## V. CONCLUSIONES

Pese a que, en general, los métodos de ensayo no destructivos han sido utilizados con éxito en las últimas décadas, aún quedan grandes retos por superar para que se conviertan en parte cotidiana del diagnóstico de estructuras de concreto en todo el mundo. Se requiere más investigación en la materia, y la estandarización es esencial. No obstante, es justo afirmar que las limitaciones definitivamente no superan a las ventajas, y que las técnicas no destructivas son una herramienta fundamental y extremadamente valiosa para la ingeniería civil en la actualidad.

Cabe recalcar que ni la clasificación ni la lista de métodos presentados en este artículo pretenden ser exhaustivas. Otros autores presentan categorías distintas que engloban técnicas adicionales, más allá del alcance de esta investigación.

## AGRADECIMIENTOS

Al Prof. dr hab. inż. Krzysztof Schabowicz, de la Universidad Politécnica de Breslavia, por su valiosa asesoría en la tesis de maestría que sirvió de base para este artículo.

## REFERENCIAS

- [1] M. Alsharqawi, T. Zayed y S. Abu Dabous, «Common practices in assessing conditions of concrete bridges,» MATEC Web of Conferences, 2017.
- [2] K. H. Teng, P. Kot, M. Muradov, A. Shaw, K. Hashim, M. Gkantou y A. Al-Shamma'a, «Embedded Smart Antenna for Non-Destructive Testing and Evaluation (NDT&E) of Moisture Content and Deterioration in Concrete,» Sensors 2019, 19, 547, 2019.
- [3] S. K. Verma, S. S. Bhadauria y S. Akhtar, «Review of Nondestructive Testing Methods for Condition Monitoring of Concrete Structures,» Journal of Construction Engineering, vol. Article ID 834572, 2013.
- [4] Industrial Applications and Chemistry Section, International Atomic Energy Agency (IAEA), Guidebook on non-destructive testing of concrete structures. Training Course Series No. 17, Vienna, 2002.
- [5] M. Elkarmoty, J. Rupfle, K. Helal, M. Sholqamy, M. Fath-Elbab, J. Kollofrath, B. Maier, A. G. Hamza, A. Ramirez-Pinero, T. Schumacher, R. Deraz, C. Sessa, O. Popovych, H. Anwar, K. Taie, M. Tayoubi, C. U. Grosse y H. Helal, «Localization and shape determination of a hidden corridor in the Great Pyramid of Giza using non-destructive testing,» NDT and E International, 2023.
- [6] N. J. Carino, «Nondestructive Testing of Concrete: History and Challenges,» SP-144: Concrete Technology: Past, Present, and Future, American Concrete Institute, pp. 623-678, 1994.
- [7] P. Kot, M. Muradov, M. Gkantou, G. S. Kamaris, K. Hashim y D. Yeboah, «Recent Advancements in Non-Destructive Testing Techniques for Structural Health Monitoring» Applied Sciences, 2021.
- [8] L. Pedreros, F. Cárdenas, N. Ramírez y E. Forero, «NDT Non-Destructive Test for Quality Evaluation of Concrete specimens by Ultrasonic Pulse Velocity measurement,» IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 844 (2020) 012041, 2020.
- [9] Germann Instruments, «Products by Application,» [En línea]. Available: <https://germann.org/products-by-application>. [Último acceso: Marzo 2022].
- [10] T. Q. L. Ngo, Y. R. Wang y D. L. Chiang, «Applying Artificial Intelligence to Improve On-Site Non-Destructive Concrete Compressive Strength Tests,» Crystals 2021, 11, 1157, 2021.
- [11] P. S. Lande y A. S. Gadewar, «Application of Artificial Neural Networks in Prediction of Compressive Strength of Concrete by Using Ultrasonic Pulse Velocities,» IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), 2012.
- [12] B. Youcef, K. Said y A.-B. Khoudja, «Prediction of concrete strength by non-destructive testing in old structures: Effect of core number on the reliability of prediction,» de Second International Congress on Materials & Structural Stability (CMSS-2017), Rabat, 2018.
- [13] T.-M. Oh, M.-K. Kim, J.-W. Lee, H. Kim y M.-J. Kim, «Experimental Investigation on Effective Distances of Acoustic Emission in Concrete Structures,» Applied Sciences 10, 6051, 2020.
- [14] J. Zhang, W. Yan y D. Cui, «Concrete Condition Assessment Using Impact-Echo Method and Extreme Learning Machines,» Sensors 2016.
- [15] A. Moczko y M. Moczko, «Modern NDT Systems for Structural Integrity Examination of Concrete Bridge Structures,» de Procedia Engineering Volume 91, XXIII R-S-P Seminar on Theoretical Foundation of Civil Engineering (TFoCE 2014), Wrocław, 2014.
- [16] A. Davis, «Impact-Echo and Impulse Response Testing» de Workshop on new technologies for NDT of roads and bridges, Transportation Research Board Annual Conference, Washington DC, 1998.
- [17] S. Küttenbaum, A. Taffe, T. Braml y S. Maack, «Reliability assessment of existing bridge constructions based on results of non-destructive testing,» de MATEC Web of Conferences Volume 199, International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICRRR 2018), Cape Town, 2018.
- [18] O. Aguirre, I. Vidaud, L. Peña y E. Vidaud, «Evaluación de Integridad Estructural mediante Tomografía Tridimensional Ultrasónica (MIRA), Primera parte,» Construcción y Tecnología en Concreto, 2013.
- [19] W. A. Zatar, H. D. Nguyen y H. M. Nghiem, «Ultrasonic pitch and catch technique for non-destructive testing of reinforced concrete slabs,» Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, 2020.

- [20] O. Aguirre, I. Vidaud, L. Peña y E. Vidaud, «Evaluación de Integridad Estructural mediante Tomografía Tridimensional Ultrasónica (MIRA), Segunda parte,» *Construcción y Tecnología en Concreto*, 2013.
- [21] C. Germann Petersen y H. D. Orozco Recillas, «Non-destructive testing of joints in precast element structures,» de *Concrete Solutions: Proceedings of Concrete Solutions, 6th International Conference on Concrete Repair, Thessaloniki*, 2016.
- [22] E. Krawczyk, «Praca Dyplomowa Magisterska: Analiza wybranych metod niszczących do badania konstrukcji betonowych dostępnych jednostronnie (en Polaco),» *Politechnika Wroclawska, Wroclaw, Año académico 2019/2020*.
- [23] A. Kwicińska, «Master's Diploma Thesis: Analysis of selected non-destructive methods for concrete diagnosis (en Inglés),» *Politechnika Wroclawska, Wroclaw, Año académico 2017/2018*.
- [24] M. Solla, S. Lagüela, N. Fernández y I. Garrido, «Assessing Rebar Corrosion through the Combination of Nondestructive GPR and IRT Methodologies,» *Remote Sensing*, 2019.
- [25] Y. K. Zhu, G. Y. Tian, R. S. Lu y H. Zhang, «A Review of Optical NDT Technologies,» *Sensors*, 2011.
- [26] B. Milovanović y I. Banjad Pečur, «Review of Active IR Thermography for Detection and Characterization of Defects in Reinforced Concrete,» *Journal of Imaging* 2016, 2, 11, 2016.
- [27] B. Milovanović, M. Gaši y S. Gumbarević, «Principal Component Thermography for Defect Detection in Concrete,» *Sensors* 2020.
- [28] J. Huh, V. H. Mac, Q. H. Tran, K. Y. Lee, J. I. Lee y C. Kang, «Detectability of Delamination in Concrete Structure Using Active Infrared Thermography in Terms of Signal-to-Noise Ratio,» *Applied Sciences*, 2018.
- [29] C. Maierhofer, A. Brink, M. Röllig and H. Wiggenhauser, "Quantitative impulse-thermography as non-destructive testing method in civil engineering – Experimental results and numerical simulations," *Construction and Building Materials*, 2005.
- [30] Q. H. Tran, "Passive and Active Infrared Thermography Techniques in Nondestructive Evaluation for Concrete Bridge," in *The 1st International Conference on Innovations for Computing, Engineering and Materials*, Ho Chi Minh City, 2021.
- [31] S. Nasrazadani y S. Hassani, «Modern analytical techniques in failure analysis of aerospace, chemical, and oil and gas industries,» de *Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Oil and Gas Industry*, First Edition, Elsevier, 2016.
- [32] VicRoads, «Technical Note: Non-Destructive Testing (NDT) of Concrete in Structures,» Diciembre 2010. [En línea]. Disponible en: <https://www.vicroads.vic.gov.au>. [Último acceso: Abril 2022].
- [33] E. Poulsen, «Chloride Profiles: Analysis and Interpretation of Observations,» *AECLaboratory*, 1995.
- [34] L. O. Nilsson, «Durability concept: pore structure and transport processes,» de *Advanced Concrete Technology*, Elsevier, 2003.
- [35] A. Shubbar, Z. Al-khafaji, M. Nasr y M. Falah, «Using non-destructive tests for evaluating flyover footbridge: Case study» *KBES*, 2020.
- [36] A. Kwan y P. L. Ng, «Building Diagnostic Techniques and Building Diagnosis: The Way Forward,» P.W. Tse et al. (eds.), *Engineering Asset Management - Systems, Professional Practices and Certification*, Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 849-862, 2015.
- [37] S. Sathiyarayanan, P. Natarajan, K. Saravanan, S. Srinivasan y G. Venkatachari, «Corrosion monitoring of steel in concrete by galvanostatic pulse technique,» *Cement & Concrete Composites* 28, pp. 630-637, 2006.
- [38] K. Hornbostel, T. Danner y M. R. Geiker, «Non-destructive Test Methods for Corrosion Detection in Reinforced Concrete Structures,» *Nordic Concrete Research – Publ. No. NCR 62 – Article 3, nº 1*, 2020.
- [39] K. P. V. Robles, J.-J. Yee y S.-H. Kee, «Effect of the Geometrical Constraints to the Wenner Four-Point Electrical Resistivity Test of Reinforced Concrete Slabs,» *Sensors* 2021, 21, 4622, 2021.
- [40] Z. M. Sbartai, S. Laurens, J. Rhazi, J. P. Balayssac y G. Arlguie, «Using radar direct wave for concrete condition assessment: Correlation with electrical resistivity,» *Journal of Applied Geophysics* 62, p. 361–374, 2007.
- [41] V. Rimshin y P. Truntov, «Determination of carbonation degree of existing reinforced concrete structures and their restoration,» de *E3S Web of Conferences Volume 135, Innovative Technologies in Environmental Science and Education, Divnomorskoe village*, 2019.
- [42] S. Rathnarajan y R. G. Pillai, «Carbonation rate and service life of reinforced concrete systems with mineral admixtures and special cements,» de *CORCON, Mumbai*, September 2017.
- [43] P. Venkatesh y M. Alapati, «Condition Assessment of Existing Concrete Building Using Non-Destructive Testing Methods for Effective Repair and Restoration - A Case Study,» *Civil Engineering Journal*, vol. 3, nº 10, 2017.
- [44] A. Borosnyói, «NDT Assessment of existing concrete structures: Spatial analysis of rebound hammer results recorded in-situ,» *Engineering Structures and Technologies*, ISSN 2029-882X / eISSN 2029-8838, 2015 7(1), pp. 1-12, 2015.
- [45] A. Moczko y M. Moczko, «In-situ examination of the concrete quality: European standard approach,» de *MATEC Web of Conferences* 196, 02045 (2018), XXVII R-S-P Seminar 2018, Theoretical Foundation of Civil Engineering, Rostov-on-Don, 2018.
- [46] Technische Universität München (TUM), «TUM Wiki-System,» [En línea]. Available: <https://wiki.tum.de/>. [Último acceso: Abril 2022].
- [47] N. J. Carino, «In-Place Strength Without Testing Cores: The Pullout Test,» de *6th International Seminar on Advances in Cement & Concrete Technology for Sustainable Development*, Guangzhou, 2018.
- [48] A. Billon-Filiot, F. Taillade, M. Quiertant, J. M. Hénauld, J. C. Renaud, R. Maurin y K. Benzarti, «Development of an Innovative Non-Destructive and Field-Oriented Method to Quantify the Bond Quality of Composite Strengthening Systems on Concrete Structures,» *Materials* 2020, 13, 5421, 2020.
- [49] S. Czarnecki, «Non-destructive evaluation of the bond between a concrete added repair layer with variable thickness and a substrate layer using ANN,» *Procedia Engineering* 172, p. 194–201, 2017.
- [50] N. J. Carino y H. S. Lew, «The Maturity Method: From Theory to Application,» de *Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition*, Washington, D.C., 2001.
- [51] COMMAND Center concrete temperature and maturity system, «The Maturity Method: Why You Should Validate Your Maturity Curve,» Junio 2019. [En línea]. Available: <https://www.commandcenterconcrete.com/maturity-method-why-validate-maturity-curve/>. [Último acceso: Mayo 2022].
- [52] BERRA Construction Products, «What Is Concrete Maturity?,» [En línea]. Disponible en: <https://www.berraproducts.com.au/what-is-concrete-maturity/>. [Último acceso: Mayo 2022].
- [53] O. G. Erhimona y J. Andrew, «Recent advances in non-destructive testing of concretes and structures: An outlook,» *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, pp. 20-31, 2019.
- [54] M. A. Rasol, V. Pérez-Gracia, F. M. Fernandes, J. C. Pais, M. Solla and C. Santos, "NDT assessment of rigid pavement damages with ground penetrating radar: laboratory and field tests," *International Journal of Pavement Engineering*, 2020.
- [55] K. Dinh, N. Gucunski, J. Kim and T. H. Duong, "Understanding depth-amplitude effects in assessment of GPR data from concrete bridge decks," *NDT&E International*, 2016.
- [56] M. I. Hasan and N. Yazdani, "An Experimental and Numerical Study on Embedded Rebar Diameter in Concrete Using Ground Penetrating Radar," *Chinese Journal of Engineering*, 2016.
- [57] C. W. Wong, «Applications of Non-destructive Tests for Diagnosis of Heritage Buildings: Case Studies from Singapore and Malaysia,» *Built Heritage*, MAEK Consulting Pte Ltd, 2019.
- [58] N. J. Carino, «Performance of Electromagnetic Covermeters for Nondestructive Assessment of Steel Reinforcement,» *NISTIR 4988*, National Institute of Standards and Technology, 1992.
- [59] A. Moczko y M. Moczko, «GWT – New Testing System for „in-situ” Measurements of Concrete Water Permeability,» *Procedia Engineering* 153 (2016), XXV Polish – Russian – Slovak Seminar “Theoretical Foundation of Civil Engineering”, p. 483–489, 2016.
- [60] A. I. Cark, «The Influences of Silica Fume and Curing Temperature on Water Permeability of Concrete,» [En línea]. Disponible en: <https://www.germanninstruments.com/wp-content/uploads/2022/01/Cark-A.-I.-The-influence-of-silica-fume-and-curing-temperature-on-water-permeability-of-concrete.pdf>. [Último acceso: Mayo 2022].

- [61] K. G. Trezos, I. P. Sfikas y D. I. Pavlou, «Water Permeability of Self Compacting Concrete,» de Proceedings of the 3rd fib International Congress, Washington, D.C., 2010.
- [62] D. Rothstein, «Petrography: What It Can and Cannot Do,» AC Business Media, Inc. Construction Network, January 2014. [En línea]. Available: <https://www.forconstructionpros.com/concrete/article/11248215/peetrography-what-it-can-and-cannot-do-for-concrete-contractors>. [Último acceso: April 2022].
- [63] «Petrographic Examination of Concrete,» Concrete Research & Testing, LLC (CRT), [En línea]. Disponible en: <http://www.concretetesting.com/peetrographic-examinations-concrete/>. [Último acceso: Abril 2022].
- [64] A. Snyder, «What Can Petrographic Analysis Tell You About the Condition of Concrete Structures?,» RJ Lee Group, Diciembre 2014. [En línea]. Available: <https://www.rjlg.com/2014/12/peetrography-tell-you-about-concrete-structures/>. [Último acceso: Abril 2022].
- [65] J. H. Castorena-González, U. Martín, C. Gaona-Tiburcio, R. E. Núñez-Jáquez, F. M. Almeraya-Calderón, J. M. Bastidas y D. M. Bastidas, «Modeling Steel Corrosion Failure in Reinforced Concrete by Cover Crack Width 3D FEM Analysis,» Frontiers in Materials, 2020.
- [66] E. Ciampa, L. De Vito y M. R. Pecce, «Practical issues on the use of drones for construction inspections,» XXVI AIVELA National Meeting, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1249 (2019) 012016, 2019.
- [67] O. F. Howlader y T. P. Sattar, «Finite Element Analysis based Optimization of Magnetic Adhesion Module for Concrete Wall Climbing Robot,» International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), vol. 6, nº 8, 2015.
- [68] G. Hüsken, S. Pirskawetz, D. Hofmann, F. Basedau, K. P. Gründer y D. Kadoke, «The load-bearing behaviour of a reinforced concrete beam investigated by optical measuring techniques,» Materials and Structures (2021) 54:102, 2021.
- [69] S. Ham y J. S. Popovics, «Application of Micro-Electro-Mechanical Sensors Contactless NDT of Concrete Structures,» Sensors 2015, 15, pp. 9078-9096, 2015.
- [70] S. Lee y N. Kalos, «Bridge inspection practices using non-destructive testing methods,» Journal of Civil Engineering and Management, 2015.
- [71] R. Martínez-Barrita, H. López-Calvo, H. Gómez-Barranco y A. Muciño-Vélez, «Diagnosis of the deterioration state of a reticular reinforced concrete roof using non-destructive and semi-destructive techniques,» Revista de Ingeniería Civil, vol. 3, nº 7, pp. 12-20, 2019.
- [72] J. Chakraborty, A. Katunin, P. Klikowicz y M. Salamak, «Early Crack Detection of Reinforced Concrete Structure Using Embedded Sensors,» Sensors 2019, 19, 3879, 2019.
- [73] M. M. Sarker, T. A. Ali, A. Abdelfátah, S. Yehia y A. Elaksher, «A Cost-Effective Method for Crack Detection and Measurement on Concrete Surface,» de The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W8, 5th International Workshop LowCost 3D – Sensors, Algorithms, Applications, Hamburg, 2017.
- [74] A. E. Menéndez Orellana, «Master's Diploma Thesis: Analysis of selected non-destructive methods for diagnosis in building (en Inglés)» Politechnika Wroclawska, Wrocław, Año académico 2021/2022.