

MAESTRÍA EN PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

1. METODOLOGÍA PARA LA APLICACIÓN DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN E INGENIERÍA FORENSE

Autor: Carlos Eduardo Ruiz Navarro

Tutor: Yeisson Domingo Pérez Lamus

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia

carlos.navarrorui@usantotmas.edu.co

2. Resumen

Este artículo se desarrolla como apoyo a la industria AICO (Arquitectura, Ingeniería, Construcción, Operación y Mantenimiento) en el desarrollo de proyectos relacionados con la patología de la construcción e ingeniería forense, en los que la experiencia profesional se integra con la aplicación de ensayos no destructivos (END/NDT) en estudios de evaluación de elementos estructurales y diagnóstico de patologías. El trabajo reúne más de 35 años de experiencia profesional y 14 años específicos en patología estructural e ingeniería forense aplicada a edificaciones, infraestructura, geotecnia, acabados y peritajes judiciales.

Los ensayos no destructivos aquí descritos se encuentran definidos en normas y códigos internacionales, en los que tanto los principios científicos como los procedimientos, metodologías y ecuaciones utilizadas para determinar propiedades físico-mecánicas, químicas y biológicas de los materiales han sido estandarizados. En este sentido, Carino (2012) afirma que “la mayoría de los fracasos en la construcción no se deben a la falta de conocimiento, sino a la falta de aplicación consistente del conocimiento existente” (p. 3).

La literatura consultada reconoce los END como herramientas fundamentales en los estudios de patología de la construcción, no solo como métodos diagnósticos y de certificación de calidad, sino también como técnicas predictivas que permiten evaluar el estado o salud de los activos durante su ciclo de vida. Su correcta implementación contribuye

al cumplimiento de los requisitos de diseño y calidad de los materiales, así como a la prevención de fallas en edificaciones, infraestructura e industria.

Este artículo no busca profundizar en un ensayo específico, sino presentar una visión integral y comparativa de los END aplicables a distintos materiales, activos y sistemas constructivos, promoviendo la incorporación de procedimientos estandarizados basados en normas y códigos internacionales.

Palabras clave

Ensayos no destructivos (NDT), patología de la construcción, activo, ingeniería forense, industria AICO (Arquitectura, Ingeniería, Construcción, Operación y Mantenimiento)

3. Introducción

En la práctica de la Arquitectura y la Ingeniería, los estudios de patología de la construcción requieren la integración de conocimientos técnicos, experiencia profesional y metodologías de evaluación que permitan determinar tanto el estado de un activo construido como el origen de sus afectaciones. Estos activos pueden corresponder a edificaciones, infraestructura, instalaciones industriales o sistemas de producción, en los cuales la evaluación de materiales y elementos estructurales constituye un proceso fundamental para la toma de decisiones técnicas, operativas y de mantenimiento.

En este contexto, los ensayos no destructivos (END/NDT) desempeñan un papel estratégico, ya que permiten evaluar las propiedades y condiciones de los materiales sin alterar la integridad de los elementos analizados. La inspección visual constituye el punto de partida esencial para establecer un diagnóstico preliminar del activo y definir la planificación de campañas técnicas y de laboratorio orientadas a determinar su estado real. Dependiendo del tipo de material, geometría, condición de servicio y objetivo del estudio, los END pueden aplicarse mediante diferentes metodologías y tecnologías, adaptadas a las características particulares de cada activo.

A nivel internacional existen normas, códigos y metodologías que regulan la selección y aplicación de los END, sustentadas en estándares reconocidos como ACI, ASTM, UNE e ICNDT. Sin embargo, en Colombia y en gran parte de América Latina, su implementación sistemática continúa siendo limitada y, en muchos casos, carece de procesos formales de estandarización, lo que genera dispersión en los criterios técnicos y dificulta la trazabilidad y comparabilidad de los resultados. En contraste, los países desarrollados incorporan los END como parte integral de los procesos de control, evaluación y recepción de obras, mediante protocolos validados y metodologías especializadas. En este sentido, Carrión Viramontes et al. (s.f.) señalan que los END permiten detectar deterioros en etapas tempranas, reduciendo la necesidad de intervenciones correctivas de alto costo.

La necesidad de avanzar hacia la estandarización de los END se relaciona directamente con el fortalecimiento de la industria AICO (Arquitectura, Ingeniería, Construcción, Operación y Mantenimiento), entendida como un modelo integral de gestión del ciclo de vida de los activos construidos. Este enfoque articula las etapas de diseño, construcción, operación, mantenimiento y rehabilitación bajo criterios de colaboración interdisciplinaria, digitalización, sostenibilidad y gestión de activos. Dentro de este marco, los END adquieren una relevancia estratégica al proporcionar información verificable sobre el comportamiento y desempeño de los activos durante cualquier etapa de su vida útil, contribuyendo a la reducción de incertidumbre técnica, la trazabilidad de datos y la toma de decisiones basadas en evidencia.

Las patologías de la construcción deben entenderse no solo como manifestaciones de daño, sino también como indicadores de desempeño que pueden presentarse en cualquier fase del ciclo de vida del activo. Su análisis permite retroalimentar procesos de diseño, construcción y operación, fortaleciendo la prevención de fallas y optimizando la gestión técnica de edificaciones e infraestructura. En consecuencia, la integración de los END dentro

del marco AICO promueve una cultura de evaluación continua, mantenimiento planificado y sostenibilidad técnica y económica en la administración de activos.

En este contexto, el presente artículo no busca profundizar en un ensayo no destructivo específico, sino presentar una visión integral y comparativa de diferentes metodologías END aplicables a diversos materiales, activos y sistemas constructivos dentro de la patología de la construcción e ingeniería forense. Asimismo, se propone establecer lineamientos preliminares que contribuyan a la implementación estandarizada de los END en la práctica profesional y académica, promoviendo criterios de confiabilidad, trazabilidad y sostenibilidad en la gestión del ciclo de vida de los activos construidos.

4. Planteamiento del problema

El diagnóstico de patologías de la construcción en edificaciones, infraestructura e industria requiere criterios de evaluación confiables, reproducibles y técnicamente verificables que permitan determinar el estado real de los activos construidos, identificar el origen de las afectaciones y establecer medidas de intervención acordes con su condición estructural y funcional. En este contexto, los ensayos no destructivos (END/NDT) constituyen herramientas fundamentales, ya que permiten evaluar propiedades físicas, mecánicas y condiciones internas de los materiales sin alterar la integridad de los elementos analizados, facilitando procesos de control de calidad, mantenimiento predictivo, evaluación de desempeño y análisis forense.

A pesar del avance tecnológico y normativo existente a nivel internacional, en América Latina persiste una aplicación heterogénea y poco estandarizada de los END en estudios de patología de la construcción e ingeniería forense. Esta situación se refleja en diferencias significativas relacionadas con la selección de metodologías, criterios de interpretación, formación técnica de los operadores, calibración de equipos, acreditación de laboratorios y aplicación de protocolos de ensayo. Como consecuencia, los resultados obtenidos presentan variabilidad técnica, dificultades de trazabilidad y limitaciones para su comparación entre proyectos, instituciones y profesionales.

En muchos casos, la práctica profesional continúa dependiendo predominantemente de ensayos destructivos o de evaluaciones basadas únicamente en inspecciones visuales y criterios subjetivos, limitando el aprovechamiento integral de tecnologías END ampliamente utilizadas en países desarrollados. Aunque normas y estándares internacionales como ACI, ASTM, UNE, EN e ICNDT establecen procedimientos validados para la aplicación de diferentes metodologías END, su incorporación en normas nacionales y procesos regulatorios en América Latina sigue siendo parcial y desarticulada.

La problemática se amplía en el ámbito de la ingeniería forense y los peritajes técnicos y judiciales, donde la ausencia de protocolos unificados y criterios de validación reduce la aceptación de los END como soporte técnico en procesos de certificación, rehabilitación, reforzamiento estructural o controversias legales. Adicionalmente, la limitada formación especializada, la escasez de laboratorios acreditados y la reducida investigación aplicada en contextos latinoamericanos dificultan la consolidación de procedimientos confiables y comparables.

Desde la perspectiva de la industria AICO (Arquitectura, Ingeniería, Construcción, Operación y Mantenimiento), esta situación representa una debilidad significativa en la gestión integral del ciclo de vida de los activos construidos. Los END no deben entenderse únicamente como herramientas de diagnóstico frente a daños visibles, sino como metodologías estratégicas para evaluar el estado y desempeño de los activos en cualquier etapa de su vida útil, desde la construcción y recepción de obras hasta la operación, mantenimiento y rehabilitación.

En este sentido, el problema de investigación no radica en la inexistencia de tecnologías o metodologías END, sino en la falta de integración, estandarización y aplicación sistemática del conocimiento técnico existente. Como señala Carino (2012), gran parte de los fracasos en la construcción no se originan por ausencia de conocimiento, sino por la falta de aplicación consistente del conocimiento disponible.

Por lo anterior, surge la necesidad de establecer lineamientos metodológicos que permitan orientar la implementación estandarizada de ensayos no destructivos en estudios de patología de la construcción e ingeniería forense, integrando experiencia profesional, normas internacionales y criterios técnicos aplicables a diferentes materiales, elementos y sistemas constructivos. El propósito es contribuir al fortalecimiento de la confiabilidad diagnóstica, la trazabilidad de resultados y la sostenibilidad técnica en la gestión de activos dentro del marco de la industria AICO.

5. Objetivos

5.1. Objetivo general

Formular directrices metodológicas para la aplicación estandarizada de ensayos no destructivos (END/NDT) en la evaluación y gestión de patologías de la construcción, articulando su implementación con las diferentes etapas del ciclo de vida de los activos dentro del marco de la industria AICO (Arquitectura, Ingeniería, Construcción, Operación y Mantenimiento).

5.2. Objetivos específicos

1. Analizar el estado del arte y las tendencias internacionales relacionadas con la aplicación de ensayos no destructivos en el diagnóstico, control de calidad, evaluación estructural y mantenimiento de edificaciones, infraestructura e instalaciones industriales.
2. Identificar y evaluar las ventajas, limitaciones y condiciones de aplicabilidad de los principales métodos END utilizados en la construcción, considerando su comportamiento en diferentes materiales, elementos estructurales y etapas del ciclo de vida del activo.
3. Comparar la aplicabilidad y alcance de normas y estándares internacionales y nacionales (ACI, ASTM, EN, NSR-10 y NTC) relacionados con los END, con el propósito de establecer criterios que contribuyan a la estandarización metodológica en la práctica profesional y académica.

4. Integrar los conceptos de patología de la construcción, ingeniería forense y gestión de activos dentro del marco de la industria AICO, proponiendo una visión metodológica que fortalezca la implementación de los END como herramientas de diagnóstico, evaluación preventiva y seguimiento técnico continuo.

5. Proponer lineamientos preliminares que fortalezcan la práctica profesional y la investigación aplicada en END, promoviendo su incorporación en procesos de mantenimiento, certificación, rehabilitación estructural y gestión del desempeño de los activos construidos.

6. Marco teórico y conceptual

Los materiales que conforman los activos en la industria AICO (Arquitectura, Ingeniería, Construcción, Operación y Mantenimiento) están sometidos a diferentes acciones físicas, mecánicas, químicas y ambientales que, con el tiempo, pueden generar deterioro, pérdida de capacidad resistente o fallas en los sistemas constructivos. Estas afectaciones pueden presentarse en edificaciones, infraestructura e instalaciones industriales, haciendo necesario contar con metodologías confiables para evaluar el estado real de los materiales y apoyar la toma de decisiones en mantenimiento, rehabilitación y gestión de activos.

En este contexto, los ensayos no destructivos (END/NDT) se consolidan como herramientas fundamentales en la patología de la construcción y la ingeniería forense, ya que permiten evaluar propiedades y condiciones internas de los materiales sin afectar la integridad de los elementos analizados. Su aplicación facilita el diagnóstico de patologías, la verificación de requisitos de calidad y la evaluación del desempeño estructural durante el ciclo de vida del activo.

El desarrollo de los END tiene origen en avances científicos y tecnológicos consolidados durante los siglos XIX y XX, incluyendo el uso de ultrasonido, radiografía, métodos electromagnéticos y tecnologías de inspección aplicadas inicialmente en la industria y posteriormente incorporadas a la construcción civil. Actualmente, estas metodologías se encuentran respaldadas por normas y estándares internacionales como ASTM, ACI, UNE e

ICNDT, los cuales establecen procedimientos, criterios de interpretación y lineamientos de aplicación.

En los últimos años, los END han evolucionado hacia una integración con tecnologías digitales, sensores, inteligencia artificial y modelos de gestión de activos, fortaleciendo su papel no solo como herramientas diagnósticas, sino también predictivas dentro de la industria AICO. Su implementación contribuye a reducir incertidumbre, optimizar recursos y mejorar la confiabilidad de las evaluaciones técnicas. Como señala Carino (2012), muchos problemas en la construcción no se originan por falta de conocimiento, sino por la aplicación inconsistente del conocimiento existente.

A pesar de los avances internacionales, en América Latina la aplicación de los END continúa siendo heterogénea y limitada en algunos contextos, debido a diferencias normativas, falta de protocolos estandarizados, limitada formación especializada y escasez de laboratorios acreditados. Esta situación dificulta la comparabilidad de resultados y la consolidación de criterios técnicos comunes en estudios de patología de la construcción e ingeniería forense.

En este sentido, el presente estudio busca establecer lineamientos metodológicos preliminares para la implementación de los END en diferentes materiales, elementos y sistemas constructivos, integrando criterios técnicos, experiencia profesional y referencias normativas internacionales. El alcance contempla aplicaciones en edificaciones, infraestructura e industria, considerando procesos de inspección, control de calidad, mantenimiento y diagnóstico forense.

La investigación se fundamenta en la revisión de literatura especializada, análisis comparativo de normas internacionales y evaluación de experiencias aplicadas en proyectos reales. Como resultado, se plantea una visión integral de los END orientada a fortalecer su implementación estandarizada en la práctica profesional y académica dentro del sector AICO.

7. Metodología

La metodología desarrollada en este artículo se fundamenta en la experiencia profesional acumulada durante más de 14 años en la aplicación de ensayos no destructivos (END/NDT) en

proyectos de edificación, infraestructura e industria, integrando criterios técnicos de patología de la construcción e ingeniería forense. El estudio se orienta a establecer una visión integral de los END aplicables a diferentes materiales, elementos y sistemas constructivos, sustentada en normas y códigos internacionales como ACI, ASTM, UNE e ICNDT.

La investigación parte de la patología de la construcción como disciplina encargada de analizar las causas, manifestaciones y efectos del deterioro de materiales, elementos y sistemas estructurales, con el propósito de garantizar la seguridad, funcionalidad y durabilidad de los activos construidos. En este contexto, los END se emplean como herramientas de evaluación que permiten obtener información confiable sobre las propiedades físicas, mecánicas, químicas y biológicas de los materiales sin comprometer su integridad ni alterar su desempeño en servicio.

La metodología implementada se basa en el análisis comparativo de diferentes aplicaciones de END en elementos de cimentación, estructuras de concreto, elementos metálicos y estructuras patrimoniales, considerando las características particulares de cada activo, material, geometría y condición de servicio. Para ello, se seleccionaron estudios representativos desarrollados en diferentes regiones del país, los cuales permitieron evaluar la aplicabilidad de metodologías como Sonic Echo, Impact Echo, Ultra Pulse Velocity (UPV), Escáner y Esclerometría.

En cimentaciones profundas y superficiales, los ensayos Sonic Echo permitieron analizar la integridad de pilotes y zapatas mediante perfiles de amplitud de onda, identificando discontinuidades, cambios de sección y posibles pérdidas de integridad. En elementos verticales, vigas y losas de concreto, los ensayos UPV facilitaron la evaluación de continuidad interna, homogeneidad y calidad del concreto a partir de la velocidad de propagación de las ondas y su comportamiento en el medio continuo. Complementariamente, el uso de escáner permitió localizar armaduras de refuerzo y verificar recubrimientos, mientras que la esclerometría se utilizó como método de estimación de resistencia superficial del concreto mediante el índice de rebote.

En estructuras patrimoniales y elementos especiales, la aplicación de metodologías no invasivas permitió diagnosticar condiciones estructurales minimizando la intervención sobre los elementos evaluados. Asimismo, en elementos de acero, los END contribuyeron a verificar continuidad física e integridad estructural antes y durante las etapas de montaje y servicio.

La implementación de los END exige comprender el comportamiento de las ondas en medios continuos, independientemente del material analizado. Las propiedades físico-mecánicas de los materiales condicionan la propagación de ondas generadas mediante impulsos físico-mecánicos, cuya respuesta es registrada e interpretada mediante equipos especializados y formulaciones científicas que permiten estimar parámetros como resistencia, módulo de elasticidad, homogeneidad y condiciones internas del elemento evaluado.

En elementos compuestos, como el concreto reforzado, la presencia de acero de refuerzo, ductos o cables modifica el comportamiento de las ondas, por lo que previamente se requiere la utilización de equipos escáner para localizar armaduras y definir adecuadamente la posición de los transductores. Esta etapa resulta fundamental para reducir incertidumbre y mejorar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Finalmente, la metodología propuesta busca establecer lineamientos preliminares para la implementación estandarizada de los END en estudios de patología de la construcción e ingeniería forense, promoviendo criterios de trazabilidad, confiabilidad y sostenibilidad técnica en la gestión del ciclo de vida de los activos construidos.

Tabla 1. Equipos para ensayos no destructivos utilizados

Id	Definición	Norma/Código Referencia	Método y principio	Aplicación	Imagen
1	Escáner	Concreto ASTM D4748 ASTM D6432 Madera ASTM D4444	El escáner basado en el principio de campo electromagnético en ensayos no destructivos (END) se fundamenta en la interacción entre campos magnéticos inducidos y las propiedades físicas de materiales sólidos (principalmente conductores ferromagnéticos o conductores eléctricos).	Detectar discontinuidades, grietas, corrosión o cambios estructurales sin dañar la pieza Materiales: Ladrillo, concreto, Drywall, madera, acero, cables, tuberías,	

Id	Definición	Norma/Código Referencia	Método y principio	Aplicación	Imagen
2	Detector de temperatura y humedad	ASTM E1186 EN 13187 ASHRAE Standard 55, 62.1 y 62.2	Los detectores que miden tanto temperatura como humedad de forma simultánea se conocen como termo detectores, que no "tocan" el objeto para medir su calor; utilizan leyes de la física óptica y termodinámica, mediante radiación Infrarroja (Ley de Stefan-Boltzmann), para cuerpos con temperatura superior al cero absoluto.	Materiales: Ladrillo/universal, Concreto, Drywall, madera, plástico, vidrio, metál. Estos dispositivos permiten determinar e identificar puentes térmicos, fugas de energía y riesgos de moho.	
3	Cámara de inspección	No aplica normativa	La capacidad de la cámara para capturar fotos ayuda en la creación de informes y análisis posteriores.	Múltiples aplicaciones en los trabajos de patología como la inspección de elementos con difícil acceso, tuberías y agujeros en la pared, así como para sistemas hidráulicos.	
2.7	Martillo de Schmidt (Esclerómetro)	ASTM C1074 ACI 228.1R EN	Se mide el índice de rebote al accionar un resorte que impulsa el martillo y a su vez le ejerce una resistencia que corresponde a la dureza del material evaluado.	Concreto y materiales compuestos con agregados y aglutinantes como arena, triturado y cemento, rocas, ladrillos, etc.	
	UPV Ultra Pulse Velocity	ACI 228.2R ASTM C597 ASTM E494 BSI 98/105795 DC	A través de pulsos ultrasónicos codificados, enviados por un transductor emisor y recibido por un transductor receptor, conectados a una quipo que compara las ondas, para evaluar el comportamiento de la onda en el medio evaluado.	Determina la velocidad de onda y el comportamiento de la misma para identificar vacíos, hormigueros, delaminaciones, intrusiones en concreto, madera, ladrillo, piedra, cerámica y metales.	
2.2	SONIC ECHO	ASTM D5882 ACI 228.2R	La onda se envía a través de un acelerógrafo que permite identificar la velocidad de rebote en el elemento evaluado en su longitud	Ensayos de integridad de pilotes para identificar longitud, defectos dentro del elemento, deformaciones de las paredes del mismo, discontinuidades o intrusiones.	
	IMPACT ECHO	ASTM C1383	A través del impacto de un martillo electrónico que genera ondas de compresión que se reflejan en el elemento, realizando la lectura de la onda en un receptor instalado en el equipo.	Determinar las condiciones y espesores en materiales como concreto, madera, mampostería, miembros estructurales, para identificar defectos y propiedades.	
	RTG	ASTM C215 ASTM C666	De acuerdo con el comportamiento de las ondas emitidas a través de un impacto leve y transductores colocados en diferentes sitios de la probeta, se calculan las propiedades del material, Módulo Elástico, Cortante, Torsión, Poisson.	Determinar propiedades de los materiales en probetas de concreto, acero, mampostería, madera, asfalto.	

8. Resultados y análisis

Diseño metodológico y protocolo de implementación de los END

La aplicación de ensayos no destructivos (END/NDT) requiere criterios técnicos y metodológicos que permitan interpretar adecuadamente los resultados obtenidos según el tipo de material, geometría, espesor y condición del elemento evaluado. En este sentido, algunos métodos presentan mejores niveles de confiabilidad en elementos de espesores reducidos, debido a que en elementos de mayor volumen las propiedades internas y el comportamiento de las ondas pueden variar significativamente. Por esta razón, determinadas metodologías son

recomendables principalmente para elementos con espesores menores a 200 mm, donde la propagación de la señal presenta menor incertidumbre y permite una interpretación más confiable.

El protocolo planteado en esta investigación se fundamenta en normas y estándares internacionales ampliamente utilizados en la práctica profesional, entre ellos ACI 228 para concreto, diferentes series ASTM aplicadas a acero, ultrasonido y otras metodologías END, además de lineamientos promovidos por organismos como ICNDT y ALCONPAT. En el contexto colombiano, la NSR-10 y las Normas Técnicas Colombianas (NTC) incorporan criterios relacionados con inspección y evaluación estructural mediante END, aunque su implementación todavía presenta diferencias metodológicas y limitaciones de estandarización.

La existencia de múltiples referencias normativas evidencia la necesidad de contar con metodologías integradas que permitan unificar criterios para la selección de ensayos, interpretación de resultados y elaboración de diagnósticos técnicos. Una estandarización metodológica contribuiría a reducir la variabilidad en la práctica profesional y fortalecer la confiabilidad de los análisis utilizados en procesos de rehabilitación, reforzamiento, certificación estructural e ingeniería forense.

La articulación de estos criterios con la industria AICO (Arquitectura, Ingeniería, Construcción, Operación y Mantenimiento) permite comprender los END no solo como herramientas diagnósticas, sino como componentes estratégicos dentro de la gestión integral del ciclo de vida de los activos construidos. Este enfoque favorece la integración de herramientas digitales, procesos colaborativos y criterios de sostenibilidad técnica orientados a optimizar el desempeño de edificaciones, infraestructura e instalaciones industriales.

Diseño de investigación

El presente estudio adopta un enfoque descriptivo y exploratorio, orientado a formular lineamientos preliminares para la implementación de END en estudios de patología de la construcción e ingeniería forense. La metodología combina revisión documental de normas y

literatura especializada con la aplicación práctica de diferentes metodologías END en activos reales evaluados durante el ejercicio profesional.

Protocolo metodológico propuesto

Para la implementación de los END se plantea el siguiente esquema metodológico:

Fase de reconocimiento

Corresponde al proceso inicial de investigación técnica y forense orientado al entendimiento integral del activo. Esta fase incluye inspección visual preliminar, identificación de patologías, recopilación de antecedentes y caracterización general del sistema constructivo.

Como línea base del análisis se consideran:

- Objeto y funcionalidad del activo.
- Estado actual de conservación.
- Sistema constructivo y materiales.
- Intervenciones previas.
- Comportamiento estructural observado.

Activos evaluados

La investigación contempla aplicaciones en:

- Edificaciones.
- Infraestructura.
- Instalaciones industriales.

Incluyendo activos de diferentes edades, materiales y sistemas constructivos.

Elementos priorizados

Se consideran principalmente:

- Elementos estructurales: concreto, acero, mampostería, madera, cimentaciones, elementos verticales y horizontales.
- Elementos no estructurales: acabados e instalaciones.

Criterios de inclusión

- Activos con antecedentes de inspección o manifestaciones de deterioro.
- Elementos accesibles para evaluación in situ o en laboratorio.
- Condiciones que permitan la aplicación confiable de END.

Criterios de exclusión

- Elementos cuya evaluación comprometa la seguridad estructural.
- Condiciones que impidan la correcta aplicación o interpretación de los END.

Instrumentación utilizada

Los principales métodos END considerados corresponden a técnicas ampliamente implementadas en la práctica profesional:

- Inspección visual.
- Ultra Pulse Velocity (UPV).
- Sonic Echo e Impact Echo.
- Esclerometría.
- Escáner de armaduras.
- Radiografía industrial y rayos X.
- Termografía infrarroja.
- Corrientes Eddy (Foucault).

Procedimiento general

1. Definición de objetivos y selección de metodologías END según el tipo de patología o elemento evaluado.
2. Ejecución de ensayos in situ y/o laboratorio bajo procedimientos controlados y conforme a referencias normativas aplicables.
3. Registro sistemático de resultados mediante formatos técnicos, fotografías, perfiles de onda y parámetros medidos.
4. Procesamiento e interpretación de datos mediante análisis comparativo y correlación con criterios normativos y técnicos.

5. Consolidación de resultados en matrices y tablas comparativas orientadas a identificar tendencias, confiabilidad y aplicabilidad de cada metodología END.

Análisis de resultados

El análisis considera:

- Caracterización del estado de materiales y elementos estructurales.
- Comparación entre técnicas END aplicadas.
- Identificación de ventajas, limitaciones y niveles de confiabilidad.
- Relación de resultados con normas y referencias internacionales.
- Definición de criterios preliminares para implementación estandarizada en América Latina.

Consideraciones éticas y de seguridad

La investigación prioriza:

- La protección e integridad de los activos evaluados.
- La seguridad del personal técnico durante la ejecución de los END.
- La confidencialidad de la información técnica y de los proyectos analizados.

Fórmulas:

A continuación, se presentan una serie de fórmulas aplicables a los ensayos Impact Echo, Sonic Echo y Ultra Sonic Pulse Velocity

$$E = \rho \times C^2 \quad \text{Ecuación 1}$$

$$C_p = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$E = \frac{C^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

Ecuación 3

Donde:

C_p = Velocidad de onda Primaria

E = Módulo de elasticidad de Young

ρ = densidad del material

ν = módulo de Poisson

A continuación, se presentan las ecuaciones aplicables al ensayo NDT Resonance Test Gauge. Estas ecuaciones se clasifican de acuerdo con el modo de vibración (Frecuencia Transversal, Frecuencia Longitudinal, Frecuencia Torsional) inducido en el espécimen.

En primera instancia, se presenta la ecuación que corresponde al cálculo del módulo de elasticidad dinámico Dynamic E, en pascuales, a partir de la frecuencia fundamental transversal.

$$\text{Dynamic } E = CMn^2$$

Ecuación 4

Donde:

M = masa del espécimen, kg

n = frecuencia fundamental transversa, Hz

$C = 1,6067 \left(\frac{L^3 T}{d^4} \right), m^{-1}$ en cilindros o

$= 0,9464 \left(\frac{L^3 T}{bt^3} \right), m^{-1}$ en prismas

L = longitud del espécimen, m

d = diámetro del cilindro, m

t = dimensión de la sección transversal del prisma en la dirección en la que el prisma es impulsado o impactado, m

b = dimensión de la sección transversal del prisma perpendicular a t , m

T = factor de corrección que depende de la relación entre el radio de giro K (el radio de giro para un cilindro es $d/4$ y en un prisma es $t/3,464$), y la longitud de la probeta L , y del coeficiente de Poisson.

Enseguida, se presenta las formula de módulo de elasticidad dinámico Dynamic E , en pascales, a partir de la frecuencia fundamental longitudinal.

$$\text{Dynamic } E = DM(n')^2 \quad \text{Ecuación 5}$$

Tabla 3 Factor de corrección T de acuerdo con μ

Valores del Factor de corrección T				
K/L	$\mu=0,17$	$\mu=0,20$	$\mu=0,23$	$\mu=0,26$
0,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,01	01,01	01,01	01,01	01,01
0,02	01,03	01,03	01,03	01,03
0,03	01,07	01,07	01,07	01,07
0,04	1,13	1,13	1,13	1,14
0,05	1,20	1,20	1,21	1,21
0,06	1,28	1,28	1,29	1,29
0,07	1,38	1,38	1,39	1,39
0,08	1,48	1,49	1,49	1,50
0,09	1,60	1,61	1,61	1,62
0,10	1,73	1,74	1,75	1,76
0,12	02,03	02,04	02,05	02,07
0,14	2,36	2,38	2,39	2,41
0,16	2,73	2,75	2,77	2,80
0,18	3,14	3,17	3,19	3,22
0,20	3,58	3,61	3,65	3,69
0,25	4,78	4,84	4,89	4,96
0,30	06,07	6,15	6,24	6,34

Para otros valores de Poisson, el factor de corrección se halla a partir de

$$T' = T \left[\frac{1 + (0,26\mu + 3,22\mu^2) K/L}{1 + 0,1328 K/L} \right] \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

T = valor del factor de corrección cuando $\mu = 0,17$

n' = frecuencia fundamental longitudinal, Hz

$D = 5,093 \left(L/d^2 \right), m^{-1}$ en cilindros o

$= 4 \left(L/bt \right), m^{-1}$ en prismas

Enseguida, se presenta las formula de módulo de rigidez dinámico Dynamic G, en pascales, a partir de la frecuencia fundamental torsional.

$$Dynamic\ G = BM(n'')^2 \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

n'' = frecuencia torsional fundamental, Hz

$B = 4LR/A, m^{-1}$

R = factor de forma

= 1 para un cilindro circular

= 1,183 para un prisma de sección transversal cuadrada

= $((a/b) + (b/a))/(4(a/b) - 2,52(a/b)^2 + 0,21(a/b)^6)$ en prismas rectangulares cuyas dimensiones de sección transversal son a y b, en metros, siendo a menor que b

A = Área de la sección transversal del espécimen, m^2

Fórmula para el cálculo de μ a partir de E, G

$$\mu = \left(E/2G \right) - 1 \quad \text{Ecuación 8}$$

Probetas:

- Si existen, se tomas datos para establecer la densidad del material ρ , esta densidad depende de la humedad, temperatura y presión atmosférica, en el sitio donde se encuentra y no del entorno.

- **Si no existen**, se debe trabajar con datos teóricos de acuerdo con la composición del material y tener en cuenta las condiciones de humedad, temperatura y presión atmosférica en el sitio en donde se encuentra, no del entorno.

Variables para reducir incertidumbre:

- Temperatura: ambiente y del material
- Humedad: ambiente y del material
- Presión atmosférica, sólo la del ambiente.

Tabla 2. Matriz de implementación de END

Matriz de Viabilidad					
	SE	UPV	IE	Escáner	Esclerometría
Cimentación Profunda	X				
Zapatas	X	X	X	X	X
Vigas	X	X	X	X	X
Losas	X	X	X	X	X
Elementos Verticales		X	X	X	X
Elementos metálicos		X	X		

Tabla 3. Matriz de guía para parámetros obtenidos con END

Matriz Guía					
	SE	UPV	IE	Escáner	Esclerometría
Integridad	X	X	X		
Longitud	X				
Espesor			X		
Impedancia	X	X	X		
Velocidad de onda	X	X	X		
Resistencia		X	X		X
Dureza(Índice de rebote)					X
#Barras de refuerzo y separación				X	
Recubrimiento				X	

Los resultados obtenidos mediante la aplicación de ensayos no destructivos (END/NDT) permiten evaluar la integridad, continuidad y comportamiento físico-mecánico de diferentes materiales y elementos estructurales sin afectar su condición de servicio. La interpretación de los datos obtenidos depende de variables como el tipo de material, geometría del elemento, presencia de refuerzo interno, condiciones ambientales y metodología aplicada, por lo que la correlación entre parámetros de onda, propiedades dinámicas y criterios normativos resulta fundamental para reducir incertidumbre y aumentar la confiabilidad de los diagnósticos.

Las ecuaciones anteriormente presentadas permiten determinar parámetros como velocidad de propagación de onda, módulo dinámico de elasticidad, módulo de rigidez y coeficiente de Poisson, utilizados en metodologías como Sonic Echo (SE), Impact Echo (IE), Ultra Pulse Velocity (UPV) y Resonance Test Gauge. Estos parámetros constituyen la base técnica para interpretar la calidad, homogeneidad, continuidad e integridad de los materiales evaluados.

En el caso de materiales compuestos, como el concreto reforzado, el comportamiento de las ondas presenta variaciones asociadas a la presencia de acero de refuerzo, ductos, vacíos o cambios de sección, razón por la cual la interpretación de resultados debe complementarse con herramientas como escáner de armaduras y correlaciones entre diferentes metodologías END. Del mismo modo, factores como temperatura, humedad y presión atmosférica influyen en la propagación de las ondas y deben considerarse como variables de control para disminuir incertidumbre durante la ejecución e interpretación de los ensayos.

La utilización de probetas o muestras de referencia permite establecer parámetros como densidad y comportamiento dinámico del material; sin embargo, cuando estas no existen, se hace necesario trabajar con propiedades teóricas y correlaciones basadas en la composición y condiciones reales del activo evaluado.

Las matrices de viabilidad y de guía metodológica desarrolladas en esta investigación permiten relacionar cada ensayo END con el tipo de elemento estructural y el parámetro que se

desea evaluar, facilitando la selección de metodologías apropiadas según el objetivo técnico del estudio. De esta manera, ensayos como Sonic Echo presentan mayor aplicabilidad en cimentaciones profundas y superficiales, mientras que metodologías como UPV, Impact Echo, Escáner y Esclerometría muestran mejores resultados en elementos verticales, vigas, losas y elementos metálicos.

A continuación, se presentan aplicaciones de END recopiladas en diferentes estudios desarrollados en edificaciones, infraestructura e industria, organizadas según el tipo de elemento evaluado y la metodología utilizada. En primer lugar, se incluyen aplicaciones en cimentaciones profundas y superficiales mediante Sonic Echo (SE), orientadas a determinar integridad, continuidad, longitud y posibles discontinuidades internas. Posteriormente, se presentan aplicaciones en elementos verticales —columnas, muros y pantallas— y elementos horizontales —vigas, losas y placas— mediante Escáner, Ultra Pulse Velocity (UPV), Esclerometría (Martillo de Schmidt) e Impact Echo (IE). Asimismo, se incluyen aplicaciones en estructuras metálicas mediante UPV y evaluaciones en construcciones patrimoniales de mampostería, tierra y madera, donde la utilización de métodos no invasivos resulta esencial para preservar la integridad de los elementos evaluados.

La caracterización de cada estudio considera variables como material, tipología estructural, localización y comportamiento de los espectros de onda registrados durante los ensayos. Los END pueden aplicarse en materiales como concreto, acero, metales, ladrillo, madera, adobe, plástico y suelo, independientemente de que el medio sea homogéneo o compuesto. En estructuras de madera, por ejemplo, la interpretación de resultados permite identificar regiones con criterios de aceptación o rechazo, determinar áreas de mayor capacidad estructural y evaluar deformaciones o afectaciones internas en los elementos que conforman el sistema resistente.

Con base en lo anterior, el análisis de resultados se desarrolla en los siguientes apartados:

- Cimentaciones profundas – Sonic Echo.
- Cimentaciones superficiales – Sonic Echo.
- Elementos verticales – Escáner.
- Elementos verticales – Esclerometría.
- Elementos verticales – Ultra Pulse Velocity (UPV).
- Vigas – Ultra Pulse Velocity (UPV).
- Losas de concreto – Ultra Pulse Velocity (UPV).
- Losas de concreto – Escáner.
- Losas de concreto – Impact Echo (IE).
- Elementos de acero – Ultra Pulse Velocity (UPV).
- Elementos patrimoniales – Ultra Pulse Velocity (UPV).

9. Conclusiones y recomendaciones

9.1. Conclusiones

La evolución tecnológica de los ensayos no destructivos (END/NDT) ha permitido desarrollar metodologías y equipos especializados capaces de caracterizar las propiedades físico-mecánicas de diferentes materiales sin alterar la integridad ni el desempeño de los elementos evaluados. Su aplicación en edificaciones, infraestructura e industria demuestra que los END constituyen herramientas fundamentales para el diagnóstico, control de calidad, evaluación estructural y mantenimiento de activos dentro de la industria AICO.

La investigación permitió evidenciar que los END no se limitan exclusivamente al concreto o al acero, sino que son aplicables a una amplia variedad de materiales y sistemas constructivos, incluyendo madera, mampostería, tierra, elementos metálicos y materiales compuestos. Siempre que exista un medio continuo capaz de transmitir ondas electromagnéticas, térmicas o acústicas, es posible obtener información relevante sobre el estado interno y comportamiento del material mediante metodologías adecuadamente correlacionadas con formulaciones matemáticas y criterios técnicos de interpretación.

Los resultados obtenidos demuestran la efectividad de metodologías como Sonic Echo (SE), Ultra Pulse Velocity (UPV), Impact Echo (IE), Escáner y Esclerometría para evaluar integridad, continuidad, resistencia, espesores, presencia de discontinuidades y comportamiento estructural en diferentes tipos de elementos. Estas metodologías permiten reducir incertidumbre y mejorar la toma de decisiones técnicas en procesos de rehabilitación, reforzamiento, mantenimiento predictivo e ingeniería forense.

La investigación también evidencia que las propiedades de los materiales presentan variaciones asociadas a factores como humedad, temperatura, presión atmosférica, composición y condiciones de servicio, razón por la cual la interpretación de resultados END requiere criterios estadísticos, correlaciones técnicas y control de variables que permitan aumentar la confiabilidad de los diagnósticos.

Aunque existen normas y estándares internacionales ampliamente desarrollados —como ACI, ASTM, EN e ICNDT—, su implementación en América Latina continúa siendo heterogénea y fragmentada. La ausencia de metodologías unificadas, protocolos comunes y criterios homogéneos de interpretación limita la comparabilidad de resultados y reduce la confiabilidad técnica y legal de muchos estudios de patología de la construcción e ingeniería forense. En consecuencia, se concluye que es necesario avanzar hacia procesos de estandarización que integren referencias internacionales con normativas nacionales como la NSR-10 y las NTC en Colombia y otras regulaciones equivalentes en América Latina.

Desde la perspectiva de la industria AICO, los END deben entenderse no solo como herramientas diagnósticas asociadas a patologías visibles, sino como metodologías estratégicas para la gestión integral del ciclo de vida de los activos construidos. Su implementación permite realizar seguimiento técnico continuo desde las etapas de construcción y recepción de obra hasta la operación, mantenimiento, rehabilitación y evaluación forense de los activos.

La investigación confirma igualmente la importancia de fortalecer la formación profesional, la certificación técnica de operadores, la acreditación de laboratorios y la calibración de equipos

END, con el fin de garantizar trazabilidad, repetibilidad y confiabilidad en los resultados obtenidos. Asimismo, resulta fundamental promover investigación aplicada, actualización normativa y desarrollo de guías metodológicas que faciliten la incorporación sistemática de los END en la práctica profesional y académica en América Latina.

Finalmente, este estudio propone una visión integral de los ensayos no destructivos aplicados a la patología de la construcción e ingeniería forense, orientada a consolidar criterios metodológicos preliminares que contribuyan al fortalecimiento de la confiabilidad diagnóstica, la sostenibilidad técnica y la gestión eficiente de activos dentro del contexto de la industria AICO.

9.2. Recomendaciones

A. Fortalecimiento profesional y técnico

- Promover programas de formación, capacitación y certificación profesional en ensayos no destructivos (END/NDT), bajo estándares internacionales como ISO 9712 e ICNDT, con el propósito de garantizar competencias técnicas homogéneas en la práctica profesional.
- Fortalecer la infraestructura técnica y la acreditación de laboratorios mediante procesos de calibración y aseguramiento metrológico, siguiendo referencias como la norma ISO/IEC 17025, con el fin de reducir incertidumbre y aumentar la confiabilidad de los resultados.
- Incentivar la integración de los END dentro de los programas académicos de arquitectura, ingeniería civil, ingeniería estructural, geotecnia e ingeniería forense, promoviendo una formación interdisciplinaria alineada con la industria AICO.

B. Desarrollo regulatorio y normativo

- Formular lineamientos metodológicos que permitan articular normas internacionales como ACI, ASTM, EN e ICNDT con las regulaciones nacionales de los países latinoamericanos, facilitando procesos de evaluación, rehabilitación, reforzamiento y certificación estructural.

- Promover la incorporación progresiva de procedimientos END en códigos y reglamentos de construcción, tanto para procesos de control de calidad y aceptación de obra, como para mantenimiento preventivo y evaluación de patologías estructurales.
- Establecer criterios unificados de interpretación, trazabilidad y presentación de resultados, con el propósito de fortalecer la validez técnica y jurídica de los estudios de patología de la construcción e ingeniería forense.

C. Investigación aplicada y desarrollo académico

- Incentivar investigaciones orientadas al comportamiento de ondas y propagación de pulsos en materiales convencionales y no convencionales, incluyendo mampostería, madera, tierra, materiales patrimoniales y sistemas compuestos.
- Promover estudios que integren END con tecnologías emergentes como inteligencia artificial, sensores digitales, monitoreo estructural, modelación BIM y gemelos digitales, ampliando las capacidades predictivas dentro de la gestión de activos.
- Desarrollar guías metodológicas y protocolos piloto que documenten de manera estandarizada la ejecución, procesamiento e interpretación de los END, incorporando variables ambientales como humedad, temperatura y presión atmosférica.

D. Procedimientos operativos y aplicación en campo

- Establecer como procedimiento preliminar el uso de escáneres electromagnéticos en elementos de concreto reforzado antes de la aplicación de metodologías de onda, con el fin de localizar armaduras, ductos y elementos embebidos que puedan alterar el comportamiento de las señales.
- En elementos de gran espesor o alta complejidad estructural, utilizar la esclerometría únicamente como método de referencia preliminar, complementándola con metodologías como Ultra Pulse Velocity (UPV), Impact Echo (IE), Sonic Echo (SE) o extracción controlada de testigos cuando técnicamente se requiera.

- Promover protocolos de inspección basados en campañas integrales de END, donde diferentes metodologías sean correlacionadas entre sí para reducir incertidumbre y aumentar la confiabilidad de los diagnósticos estructurales.

E. Gestión integral de activos en la industria AICO

- Integrar los ensayos no destructivos dentro de estrategias de gestión del ciclo de vida de los activos, permitiendo su aplicación desde la construcción y recepción de obra hasta la operación, mantenimiento, rehabilitación y evaluación forense.
- Fomentar la implementación de END como herramientas de mantenimiento predictivo y monitoreo continuo, contribuyendo a mejorar la sostenibilidad técnica, económica y operativa de edificaciones, infraestructuras e instalaciones industriales.
- Consolidar una cultura técnica orientada al diagnóstico preventivo, donde los END sean reconocidos no únicamente como herramientas para identificar daños visibles, sino como instrumentos permanentes de evaluación y control del estado estructural de los activos.

10. Referencias bibliográficas

Libros y textos técnicos

Álvarez, F., & Tejera, R. (2014). *Ensayos no destructivos aplicados a la construcción: panorama actual y perspectivas*. ISBN Cloud.

Muñoz Hidalgo, A. (2004). *Manual de humedad en el edificio: causas, diagnóstico y tratamiento*. Beamonte y Vallejo Arquitectos.

Muñoz Hidalgo, A. (2012). *Patología de la construcción: detección, diagnóstico e intervención*. Beamonte y Vallejo Arquitectos.

Serrano Alcudia, M. J. (2005). *Grietas en edificios: diagnóstico, tratamiento y reparación*. Beamonte y Vallejo Arquitectos.

Zanni, S. (2019). *La importancia de la inspección y el diagnóstico en la conservación de infraestructuras*. Consejo Profesional de Arquitectura y Urbanismo.

Artículos científicos, investigaciones e informes técnicos

Arango-Londoño, D. F. (2022). *Aplicación de ensayos no destructivos en la ingeniería civil colombiana* [Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia].

Carino, N. J. (2012). *Construction failures: Have we learned our lessons? ACI Special Publication*, 285, 1–18. <https://doi.org/10.14359/51683934>

Carrión Viramontes, F. J., Lomelí González, M. G., Quintana Rodríguez, J. A., & Martínez Madrid, M. (s.f.). *La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes*.

CIB W086. (2021). *Building pathology: State-of-the-art report*. International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB).

Leinenbach, C., et al. (2024). Digitalization and interoperability of non-destructive testing data for structural assessment. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 14(2), 155–172.

Maury Ramírez, A. (2015). Implementación de la norma ISO/IEC 17025 en laboratorios de materiales para ensayos mecánicos y control de calidad. *Revista Colombiana de Materiales*, 7, 45–58.

Mejía Ardila, J., Pérez Gómez, L., & Ramírez Silva, D. (2023). Aplicación y limitaciones de los ensayos no destructivos en el contexto latinoamericano. *Revista Ingeniería y Competitividad*, 25(3), 55–69.

Sadowski, Ł. (2022). Non-destructive testing and evaluation of civil engineering structures. *Buildings*, 12(1), 1–25. <https://doi.org/10.3390/buildings12010001>

Normas y códigos técnicos

American Concrete Institute. (2019). *ACI 228: Report on nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures*. ACI Committee 228.

ASTM International. (2020). *ASTM standards for nondestructive testing*. ASTM International.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. AIS.

Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción. (2022). *Lineamientos para ensayos no destructivos y diagnóstico estructural en América Latina*. ALCONPAT.

ICONTEC. (2018). *Normas Técnicas Colombianas (NTC) para materiales y ensayos de construcción*. ICONTEC.

International Committee for Non-Destructive Testing. (2021). *Guidelines and certification schemes for non-destructive testing*. ICNDT.