

ANÁLISIS END PARA LA EXTENSIÓN DE VIDA DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN



JOSÉ AMADOR SILLERO MARÍN
Responsable de Desarrollo Tecnológico e Innovación
TECNATOM S.A.



FEDERICO NAVARRO CASTAÑO
Ingeniero Sénior
TECNATOM S.A.



COVADONGA GARCÍA RAMOS
Responsable Comercial y Promoción
TECNATOM S.A.

INTRODUCCIÓN

Estos años se está alcanzando el final del periodo inicial de operación de las centrales nucleares españolas, y se trabaja para su renovación de licencia que les permita seguir funcionando de manera segura y eficiente a largo plazo. Las grandes infraestructuras como las centrales nucleares llevan asociadas la necesidad de verificar el estado de determinados componentes y estructuras de cara a asegurar su integridad y vida útil.

Para ello se está elaborando la normativa específica para el mantenimiento de las estructuras de hormigón de las centrales nucleares en base a la experiencia operativa de las instalaciones con mayor tiempo de operación, y se están desarrollando métodos de inspección que sean capaces de identificar un hormigón en perfecto estado para determinar su aptitud y ampliar su vida útil; o bien para detectar posibles discontinuidades, controlarlas y evaluarlas tras su reparación.

En esa línea se trabaja en el desarrollo de nuevos métodos de Ensayos No Destructivos (END). Estos son una rama de la ciencia de los materiales que utiliza técnicas no invasivas para determinar la integridad de multitud de componentes, como es el caso del hormigón (bien sea del componente individual o de la estructura completa), además de permitir medir ciertas características de estos. El método y la técnica más adecuada mediante la que llevar a cabo una inspección se selecciona en función del objetivo de la misma, la defectología típica del componente, las características de la estructura y las condiciones de la propia inspección.

De esta forma, en base a la experiencia operativa de cada planta y bajo la supervisión del Consejo de Seguridad Nuclear, se elaboran los planes de inspección de determinadas estructuras para verificar su integridad de cara a la extensión de vida de las centrales nucleares españolas.

ESTRUCTURAS Y PATOLOGÍAS

Todas las centrales nucleares comerciales tienen estructuras de hormigón cuyo desempeño y función son necesarios para proteger la seguridad del personal operativo de la central, del público en general y del medioambiente (Figura 1). Inicialmente se utilizaron en la industria nuclear como base para el diseño y la construcción de elementos estructurales los códigos existentes, como el estándar American Concrete Institute (ACI). Sin embargo, debido a que no cubrían todo el espectro de requisitos de diseño y a que no siempre se consideraron adecuados, la Comisión Reguladora Nuclear de los EE. UU. (USNRC) desarrolló sus propios criterios para el diseño de estructuras sísmicas de Categoría 1 (es decir, las relacionadas con la seguridad). Las plantas que utilizaron los primeros códigos ACI para el diseño fueron revisadas por el USNRC a través del Programa de Evaluación Sistemática para determinar si había algún problema de seguridad no resuelto; mientras que las reglas actuales para la construcción de las estructuras de contención de hormigón vienen descritas en la Sección III, División 2 del Código ASME, publicada por primera vez en 1963 y utilizada por todas las centrales nucleares españolas.

La estructura de contención es, desde el punto de vista de la seguridad, uno de los componentes más importantes de una central nuclear porque sirve como barrera final para la

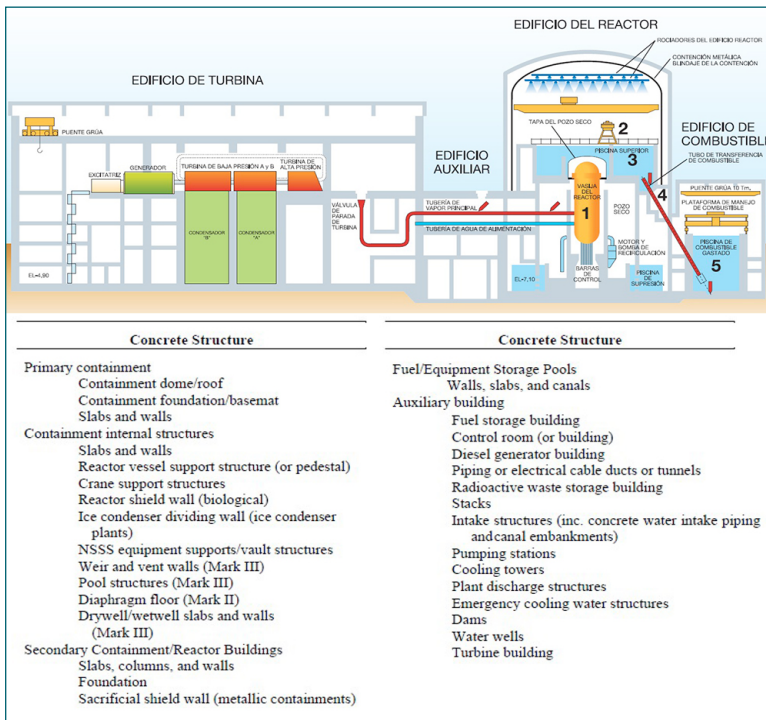


Figura 1. Principales estructuras de hormigón relacionadas con la seguridad en las centrales nucleares.

Materiales inadecuados	Mano de obra incorrecta	Exposición ambiental	Estructurales
Uso de materiales defectuosos o contaminados durante la construcción (agregados, cemento, agua, refuerzos...) o en la mezcla inadecuada de ellos.	Fallos en el diseño o en la colocación de los materiales, encofrados, refuerzos... También fallos en el proceso de curado del hormigón.	Ataques químicos como eflorescencias, ácidos/base, reacciones árido-álcali, carbonatación y cloruros... Ataques físicos como cristalización, congelación, ciclos térmicos, irradiación, abrasión, fatiga...	Principalmente por exceder las cargas de diseño, desplazamiento del asentamiento, accidentes y terremotos.

Figura 2. Principales causas de generación de defectos en el hormigón.

Localización de las armaduras de refuerzo y comprobación del espesor de su recubrimiento 	Localización de tendones y comprobación del estado de la lechada
Determinación del estado de la matriz y la corrosión de la armadura metálica 	Detección de grietas, huecos, inclusiones y delaminaciones en la matriz de la estructura

Figura 3. Patologías de las estructuras de hormigón.

liberación de productos de fisión al medioambiente exterior en las condiciones de accidente postuladas.

Las estructuras secundarias son principalmente las estructuras de apoyo de vasija, el edificio de la piscina de combustible, y los ciementos y estructuras subterráneas.

Otras estructuras de hormigón importantes son el escudo biológico primario y secundario, así como paredes, suelos y estructuras de soporte en contención, edificios auxiliares (o intermedios), edificios de generadores diésel, estructuras de toma, casas de bombas de agua de servicio y torres de refrigeración.

Las causas más comunes para la degradación de las estructuras de hormigón son las que se muestran en la Figura 2.

Por otro lado, se pueden recoger en 4 grupos los objetivos o alcances de las técnicas de END para la inspección de estructuras de hormigón en centrales nucleares (Figura 3).

Para la detección de estas patologías, en el campo de la inspección de estructuras de obra civil, se pueden agrupar de modo general los métodos de END en tres categorías:

- los métodos químicos para el análisis de la degradación de la matriz de cemento y mortero.
- los electroquímicos se utilizan para estudiar el estado de degradación de las armaduras metálicas;
- los métodos físicos se emplean para obtener información acerca del interior de la estructura, así como la posición y estado de la estructura metálica de refuerzo;

A continuación, haremos un repaso de los más destacados dentro de cada una de estas categorías.

MÉTODOS QUÍMICOS

Uno de los principales procesos de degradación del hormigón son las reacciones con los áridos que pueden provocar las denominadas "reacciones expansivas de origen internas". Las reacciones que se producen se clasifican en tres categorías según el tipo de árido: reacciones álcali-sílice (ASR), reacciones álcali-carbonato (ACR) y ataque por sulfatos.

La expansión viene causada por la presión osmótica. Los silicatos alcalinos pueden ejercer grandes presiones durante el proceso expansivo, mayores que la resistencia a tracción del hormigón. Los factores que afectan a la reacción son la concentración y naturaleza del árido, la humedad de la estructura y el modo de construcción de esta (Figura 4).

El procedimiento experimental para la detección de estas reacciones en las estructuras de hormigón se basa en la extracción de testigos o probetas que se hacen reaccionar con una

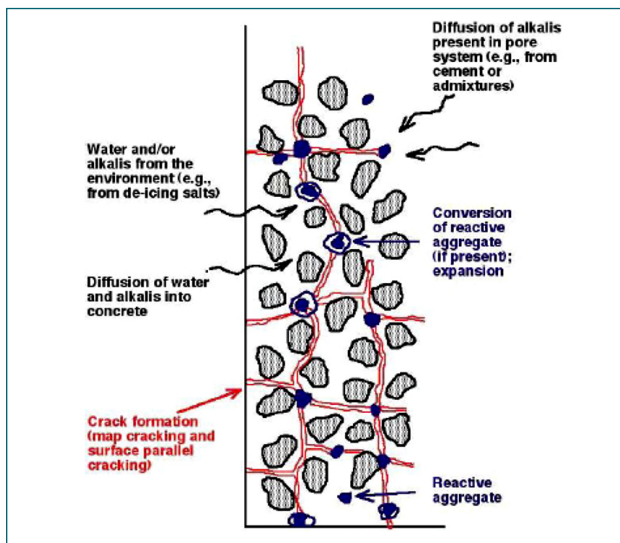


Figura 4. Modelo idealizado de micro y macrofisuras causadas por la reacción álcali-sílice en hormigón.

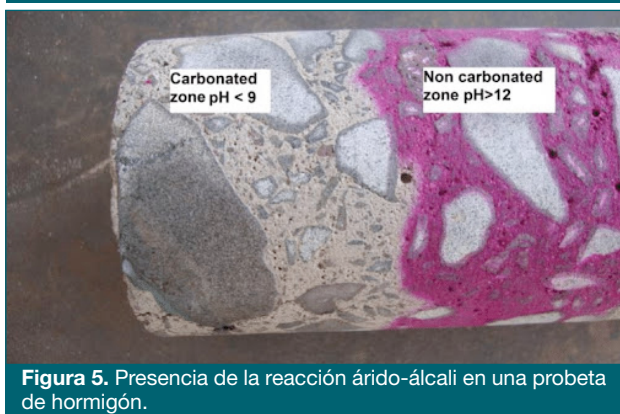


Figura 5. Presencia de la reacción árido-álcali en una probeta de hormigón.

disolución de Na(OH) en unas determinadas condiciones y durante diferentes periodos de tiempo. Transcurrido el tiempo se determina mediante colorimetría la concentración de sílice que se ha solubilizado en el proceso y mediante espectrofotometría de emisión atómica de llama la cantidad de Na(OH) que queda sin reaccionar (Figura 5).

MÉTODOS ELECTROQUÍMICOS

La probabilidad de corrosión se basa en la aplicación de tres Ensayos No Destructivos basados en métodos electroquímicos. Estos conjuntos de ensayos se realizan para conocer la probabilidad de que el armado embebido en el hormigón esté sufriendo un proceso de corrosión (Figura 6).

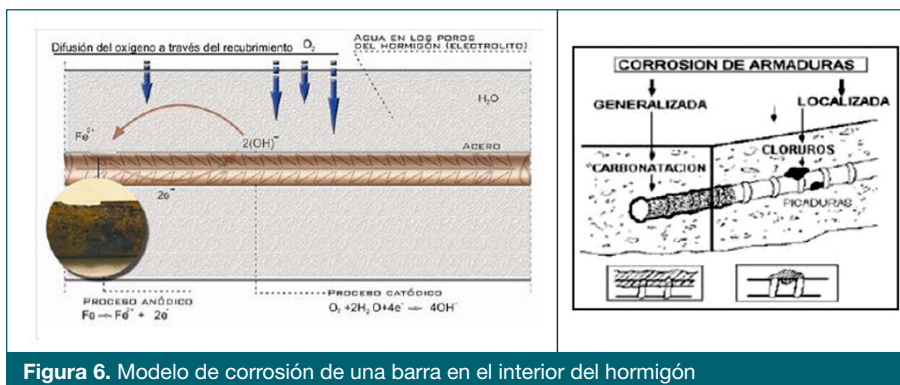


Figura 6. Modelo de corrosión de una barra en el interior del hormigón

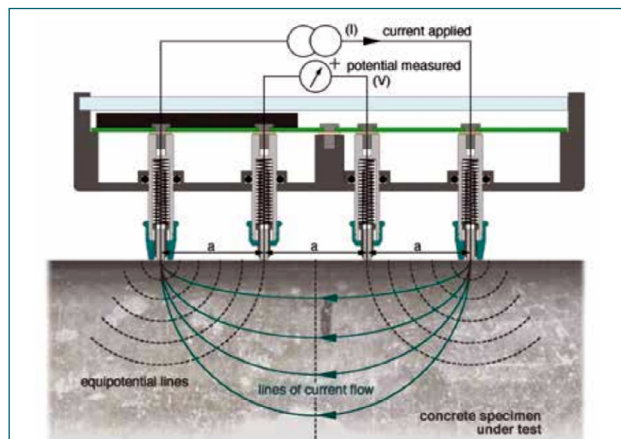


Figura 7. Metodología de medición de la resistividad.

Estado de la armadura	Resistividad (kΩ.cm)	Conductividad (μs/cm)
Riesgo bajo	100KΩcm - 50KΩ	10 μs/cm - 1 μs/cm
Riesgo medio	50KΩcm - 20KΩ	20 μs/cm - 40 μs/cm
Riesgo alto	20KΩcm - 10KΩ	50 μs/cm - 100 μs/cm

Figura 8. Estado de corrosión en función de la resistividad.

Tras el fraguado y endurecimiento del hormigón, el acero embebido en hormigón está protegido por su alta alcalinidad, que pasiva el acero haciéndolo más resistente a la corrosión. La pérdida de alcalinidad del hormigón debida a la carbonatación o a la penetración de iones de cloruros puede destruir esta película de pasivación en el acero y provocar el comienzo de un proceso de corrosión.

Estos procesos de corrosión derivan en dos tipos de patologías:

- **Delaminaciones:** es la defectología más visible, debida un incremento de volumen del acero que provoca tensiones internas en el hormigón.
- **Pérdida de propiedades mecánicas:** debido a la pérdida de acero producida por el proceso de corrosión, la sección resistente del armado se reduce provocando una disminución de la capacidad portante de la estructura.

Para obtener la probabilidad de corrosión se realizan los siguientes ensayos:

a. Resistividad

La resistividad eléctrica del hormigón ofrece una visión del grado de saturación de humedad en el hormigón que está directamente relacionada con la velocidad de corrosión del armado y es un indicador de que puede estar produciéndose un proceso despasivación y/o corrosión del acero. Para su medición se usa normalmente un sistema Wenner de 4 puntas dónde se aplica una corriente a través de dos sondas exteriores y se mide la diferencia de potencial entre las dos sondas interiores (Figuras 7 y 8).

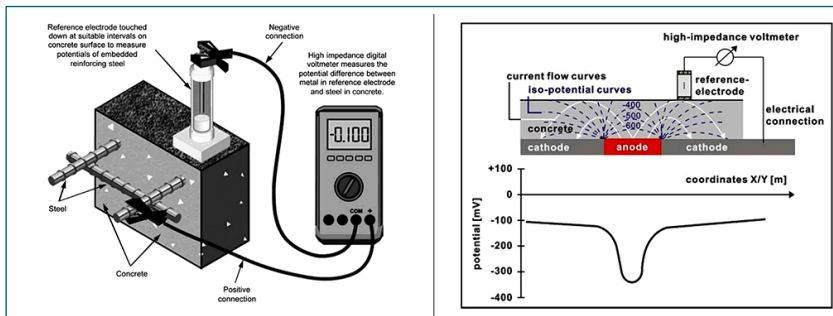


Figura 9. Metodología de medición del potencial de la armadura.

Estado de la armadura	Potencial (mV)
Pasividad	> -200mV
Intermedio	-200mV a -350mV
Alto riesgo de corrosión	< -350mV

Figura 10. Estado de corrosión en función del potencial.

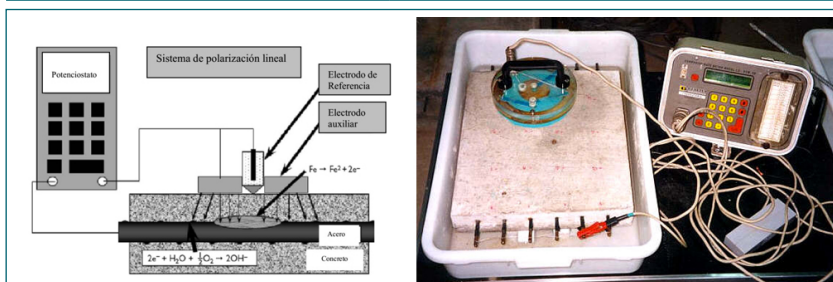


Figura 11. Metodología de medición de la velocidad de corrosión.

Nivel de corrosión	Intensidad de corrosión I_{CORR} ($\mu A/cm^2$)	Velocidad de corrosión V_{CORR} ($\mu m/año$)
Despreciable	<0,1 $\mu A/cm^2$	<1,16 $\mu m/año$
Baja	0,1 $\mu A/cm^2$ a 0,5 $\mu A/cm^2$	1,16 $\mu m/año$ a 5,8 $\mu m/año$
Moderada	0,5 $\mu A/cm^2$ a 1 $\mu A/cm^2$	5,8 $\mu m/año$ a 11,6 $\mu m/año$
Alta	>1 $\mu A/cm^2$	>11,6 $\mu m/año$

Figura 12. Nivel de corrosión en función de la velocidad.

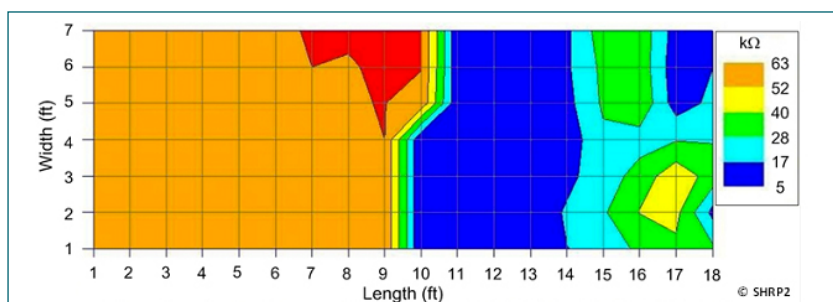


Figura 13. Mapas que resumen los resultados obtenidos en la superficie inspeccionada.

b. Potencial de corrosión

La medida del potencial de la armadura, o de media celda, se utiliza normalmente como un indicador de la presencia de corrosión. Proporciona información cualitativa sobre el riesgo de corrosión, pudiéndose establecer unos límites para los cuales la probabilidad de corrosión es elevada. Se emplea un electrodo conectado eléctricamente a la armadura y en contacto con el hormigón. Si la medida del potencial del electrodo es igual o menor a -350mV se considera que está ocurriendo un proceso de corrosión (Figuras 9 y 10).

c. Velocidad de corrosión

Existen diversos métodos que se utilizan actualmente para la medición de la velocidad de corrosión que proporcionan la cantidad de metal que se transforma en óxido por unidad de tiempo y superficie. En el caso de los métodos electroquímicos se aplica un estímulo externo, en forma de señal eléctrica a través de un electrodo conectado al armado del hormigón y se mide la respuesta del mismo con otro electrodo ubicado en la superficie del hormigón. Entre estos métodos se encuentra la polarización lineal o resistencia a la polarización, que es uno de los más fiables. Esta técnica se basa en la polarización de la armadura aplicando una corriente eléctrica y monitorizando su efecto sobre el potencial captado por el electrodo ubicado en la superficie del hormigón. Este cambio de potencial se encuentra relacionado con la velocidad de corrosión, cuyo valor es mayor cuanto más intensa sea la corrosión (Figuras 11 y 12).

Estas mediciones se obtienen mediante un equipo que consiste en una serie de electrodos que se ubican en la superficie del hormigón, conectados directamente a la armadura y a un multímetro, a través de los cuales se obtiene el valor buscado.

Los valores pueden ser analizados y se pueden interpretar gráficamente, agrupando los resultados y obteniendo mapas de contornos equipotenciales, de velocidades de corrosión y de resistividad o, de riesgo de corrosión cuando se correlacionan todos los datos. Estas gráficas permiten analizar e interpretar los resultados más fácilmente, pudiendo detectar en qué áreas hay una mayor probabilidad de que la armadura sufra un proceso de corrosión (Figura 13).

MÉTODOS FÍSICOS

Los métodos físicos de END son aquellos que se basan en la interacción del componente a inspeccionar con un pa-

rámetro físico tales como capilaridad, absorción, ondas acústicas, elásticas, electromagnéticas... En general se pueden clasificar entre superficiales y volumétricos, aunque como veremos a continuación hay métodos que se pueden cubrir ambos alcances.

a. Visual remota

Se trata de una inspección superficial para detección de fisuras, manchas de grasa, fugas en tendones... en grandes estructuras como la contención o en áreas inaccesibles. Los últimos métodos de inspección remota utilizan drones en dos formas:

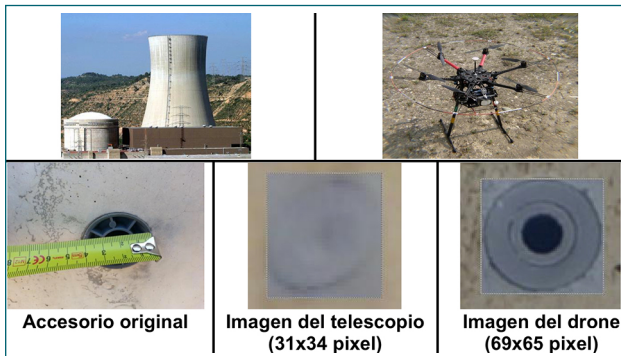


Figura 14. Inspección visual remota con drones en el exterior.

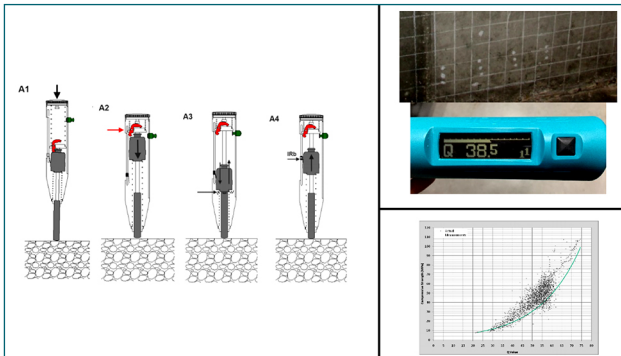


Figura 16. Ilustración de la realización del ensayo esclerométrico y ejemplo de obtención de la resistencia de compresión de una estructura.

- Inspección de exteriores (Figura 14): como la de una torre de refrigeración con un sistema multirrotor equipado con una cámara de video y de fotografía de alta definición.
- Inspección de interiores (Figura 15): como la inspección de contención con un dron protegido para inspección del liner, conductos de ventilación, soportes...

b. Dureza superficial

El ensayo de dureza superficial, también llamado esclerométrico o índice de rebote, es un ensayo mecánico no destructivo que evalúa la resistencia superficial del hormigón y la zona inmediatamente tras ella.

El equipo utilizado para su realización, el esclerómetro, es un equipo muy extendido y que ofrece un método de inspección rápido y sencillo. Utiliza como medición la distancia de rebote de un martillo impulsado mediante un muelle tras impactar con la superficie de hormigón: una masa impacta con una energía sobre una superficie, y su rebote está directamente relacionado con la dureza superficial del material (Figura 16).

Para la ejecución del ensayo se realizan una serie de impactos en el área de interés siguiendo un patrón determinado, obteniendo el valor de resistencia de compresión del material.

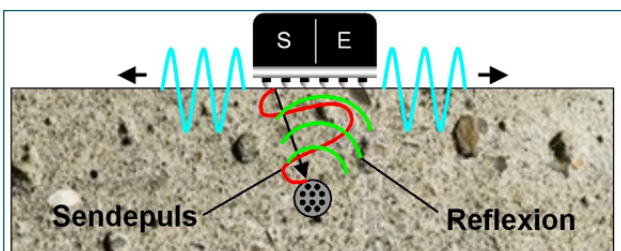


Figura 18. Esquema de la técnica Pulso-Eco y vista general del equipo utilizado.

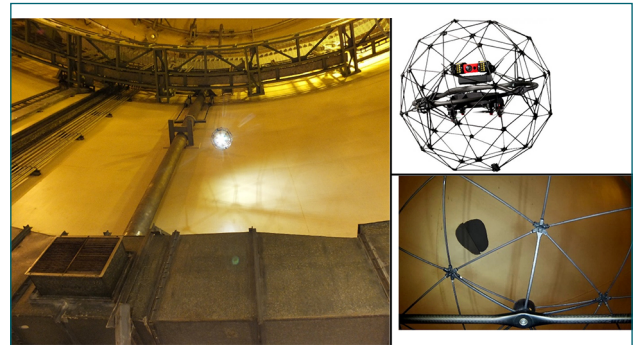


Figura 15. Inspección visual remota con drones en el interior.

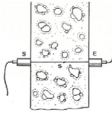
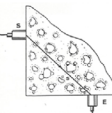
Configuraciones	
	
Velocidad del sonido (m/s)	Calidad del hormigón
> 4570	Excelente
3650 – 4570	Buena
3050 – 3650	Regular o dudosa
2130 – 3050	Pobre
< 2130	Muy pobre

Figura 17. Relación entre velocidad del sonido y estado de la estructura.

c. Ultrasonidos

Los métodos de ultrasonidos se basan en la emisión de una onda elástica de presión de frecuencia superior al límite audible (>20 kHz) y registrar su interacción con el componente. Existen varias técnicas, la más sencilla es el ensayo de ultrasonidos por transmisión, que consiste en medir la velocidad del sonido en el material y permite realizar una primera evaluación del estado interno de una estructura de hormigón en función de la velocidad a la que se desplaza la onda ultrasónica en el material (Figura 17).

Esta técnica de inspección se ha utilizado en campo para la determinación del estado elementos que están sometidos a fuertes compresiones debidas a los movimientos del terreno y otras zonas de características físicas similares (vigas y pilares).

Por otro lado, se han desarrollado las técnicas basadas en Pulso-Eco de ondas de baja frecuencia (50 a 200 KHz) para el análisis de materiales basado en la emisión y recepción de ondas transversales de ultrasonidos (Figura 18).

Dichas inspecciones sirven para localizar delaminaciones y coqueras producidas en el hormigón estructural durante su construcción, puesta en servicio y operación, cubriéndose un rango de profundidades de 2 cm hasta 90 cm en función de la densidad del armado de la estructura (Figura 19).

d. Georradar

Se trata de un método de Ensayos No Destructivos para el análisis de materiales basado en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas de banda ultra ancha (10-3000 MHz). Para ello se analiza la parte de la onda electromagnética que atraviesa el compo-



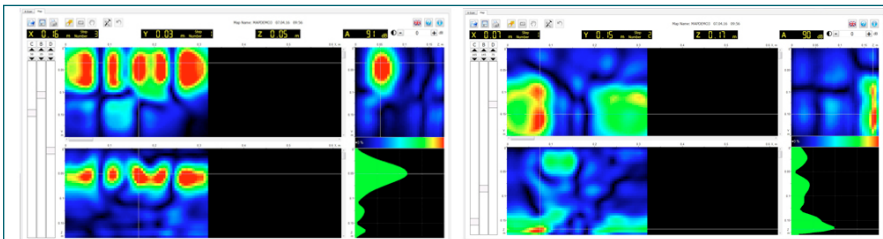


Figura 19. Ejemplo de detección de discontinuidades internas con Ultrasonidos Pulso-Eco.

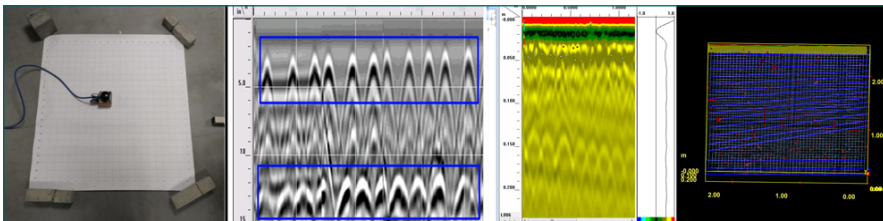


Figura 20. Ejemplo de inspección realizada con Georadar.

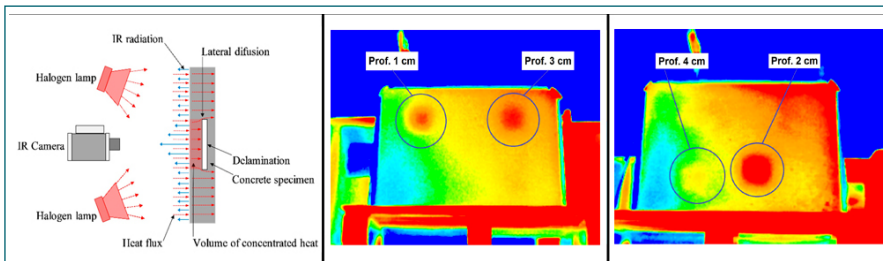


Figura 21. Ejemplo de detección de delaminaciones subsuperficiales con Termografía Infrarroja Activa.

nente que se refleja cuando se alcanza un límite entre dos materiales con diferentes propiedades eléctricas (permeabilidad dieléctrica, conductividad eléctrica y permeabilidad magnética).

como bajo ésta (subsuperficiales a pocos centímetros), tales como huecos, delaminaciones y grietas en estructuras de hormigón como edificios, líneas de tuberías, puentes y pavimentos de carreteras (Figura 21).■

REFERENCIAS

La documentación más relevante relacionada con la construcción e inspección de las estructuras de hormigón en centrales nucleares es la siguiente:

• NRC (Nuclear Regulatory Commission):

- “Requirements for monitoring the effectiveness of maintenance at nuclear power plants”. 10 CFR 50.65.
- “Primary Reactor Containment Leakage Testing for Water-Cooled Power Reactors”. 10 CFR 50 Appendix J.
- “Generic Aging Lessons Learned”. NUREG 1801.
- “Standard Review Plan for Review of License Renewal Applications for Nuclear Power Plants”. NUREG 1800.

• ASME (American Society of Mechanical Engineers):

- “Requirements for Class MC and Metallic Liners of Class CC Concrete Components of Light-Water Cooled Power Plants”. ASME code, Section XI, Subsection IWE.
- “Requirements for Class CC Concrete Components of Light-Water Cooled Power Plants”. ASME code, Section XI, Subsection IWL.

• IAEA (International Atomic Energy Agency)

- “Guidebook on nondestructive testing of concrete structures”. Training Courses Series N°17. 2002.

- “Ageing Management of Concrete Structures in Nuclear Power Plants”. NP-T-3.5. 2016.
- “Non-destructive testing for plant life assessment”. Training Course Series N°26.

OTROS DOCUMENTOS RELEVANTES:

- Normativa española EHE-08: “Instrucción de hormigón estructural”. REAL DECRETO 1429/2008, de 21 de agosto.
- EPRI (Electric Power Research Institute): “Nondestructive Evaluation Inspection of Concrete Structures Subjected to Corrosion”.
- EPRI (Electric Power Research Institute): “Nondestructive Evaluation: Automated Inspection of Concrete Structures”.
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory): “Non-destructive Testing of Nuclear Power Plant Concrete Structures - State of the Art Report” (BAM Federal Institute).
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory): “Inspection of Nuclear Power Plant Structures - Overview of Methods and Related Applications”.
- ACI (American Concrete Institute): “Evaluation of existing nuclear safety-related concrete structures”. ACI 349.3R.
- ACI (American Concrete Institute): “Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures”. ACI 228.2R-13.■

Con este método se puede cubrir un rango de profundidades desde 3 cm hasta 60 cm en función de la frecuencia de la antena utilizada. La señal reflejada se registra y se analiza para determinar la causa de la reflexión, que puede ser objetos embebidos en el hormigón (armaduras, tendones, tuberías...) así como algunos tipos de defectos (coqueras y delaminaciones) (Figura 20).

e.Termografía

La termografía infrarroja (TIR) es un método de Ensayo No Destructivo ampliamente empleado en el campo de la ingeniería civil mediante el cual se analiza la radiación IR emitida por la superficie de una estructura con el propósito de obtener información de su interior.

Junto con la inspección visual, es la única técnica que permite realizar una inspección de manera remota, sin contacto con la superficie de la estructura, y cubriendo un área grande en cada inspección. Se emplea para la detección de anomalías, tanto en la superficie de la estructura como