Evaluación de Integridad Estructural mediante Tomografía Tridimensional Ultrasónica (MIRA)

Las estructuras de concreto reforzado cobran cada vez más fuerza en todo el mundo, por lo que se hace muy necesario prolongar su vida de servicio.

(Primera parte)

O. Aguirre, I. Vidaud, L. Peña y E. Vidaud.

Dada la importancia y trascendencia de las estructuras de concreto reforzado, es necesario prolongar su vida de servicio. Una de las maneras es mediante el estudio de su integridad estructural. Para ello es requisito la evaluación de estas estructuras una vez fraguado el concreto, para comprobar si los aspectos que se especifican en el proyecto han sido satisfactoriamente cumplidos en el proceso de construcción. Tal comprobación se recomienda que se realice sin dañar la estructura; por esta razón se acude a las llamadas Técnicas No Destructivas (Non Destructive Techniques. NDT por sus siglas en inglés).

Mediante la aplicación de las NDT, pueden evaluarse en las estructuras de concreto desde la densidad, módulo elástico y resistencia a la compresión, hasta propiedades como: la dureza y absorción de la superficie; la existencia y localización del acero de refuerzo (distribución, diámetros y recubrimientos); los niveles de corrosión (potencial, resistividad, velocidad de corrosión), y en algunos casos también es posible verificar la integridad estructural, llegando a descubrir oquedades, grietas u otras lesiones similares, que puedan llegar a quedar en el interior de la masa de concreto.

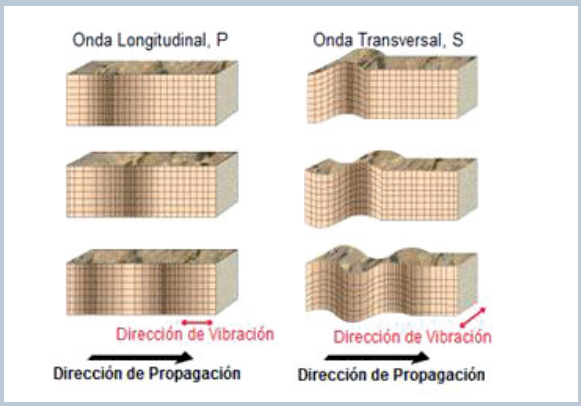
Pueden citarse entre las NDT más comunes: el método de Potenciales de Corrosión; la Esclerometría o Prueba de rebote con el Martillo Schmidt; el Ensayo de la profundidad de carbonatación; las pruebas de Permeabilidad; la Resistencia a la penetración o Pistola de Windsor; la Velocidad de pulso ultrasónico, la Termografía Infrarroja, entre otros. Es importante decir que en cualquier caso, es trascendental el desarrollo de una inspección visual de la estructura a evaluar.

Entre las más novedosas NDT se encuentran las pruebas con ondas ultrasónicas. Hasta hoy son significativos los avances de la técnica 3D en el campo de la medicina para obtener y analizar imágenes del cuerpo humano con vistas al diagnóstico de enfermedades. Sin embargo, la obtención y estudio de imágenes 3D de estructuras de concreto no ha corrido la misma suerte; y hasta hace pocos años se había visto limitada para evaluar el interior de estas estructuras.

Para la correcta implementación de estos métodos es necesario entender los principios de interacción de ondas de sonido entre materiales diferentes. Mediante la correcta utilización e interpretación de ondas de esfuerzo, se ha podido lograr la generación de imágenes tridimensionales del interior de la masa de concreto.

Cuando una onda de esfuerzo es inducida en un cuerpo sólido se producen tres tipos de ondas que se propagan mecánicamente (Fig. 1): Ondas de compresión (también conocidas como ondas *P* o longitudinales), Ondas de cortante (las llamadas ondas *S* o transversales), y Ondas superficiales (igualmente

Fig. 1:



Ondas de esfuerzo longitudinales (P) y transversales (S).

denominadas como ondas R o Rayleigh). Cada una de estas ondas viaja a velocidades distintas.

Las ondas P viajan a velocidades mucho mayores que las S y R. En estructuras de concreto, las velocidades de ondas transversales (C_s) y Rayleigh (C_r) viajan a velocidades de alrededor de 60 y 55 %, con respecto a las ondas longitudinales, tal y como lo muestran las Expresiones 1 y 2:

$$Cs = 0.6\ C_p \quad \textbf{(1)} \qquad\qquad Cr = 0.55\ C_p \quad \textbf{(2)}$$

Donde: Cp es la velocidad de ondas longitudinales.

En general, la velocidad de propagación de una onda se explica según la Expresión 3, y es directamente proporcional a la frecuencia de vibración de un transductor (f) y a la longitud de onda (λ):

$$V = f\ \lambda \quad \textbf{(3)}$$

Donde la frecuencia esta medida en Hertz (ciclos por segundo) y la longitud de onda en unidades de distancia. De manera similar, en sólidos elásticos, la C_p está en función del módulo de elasticidad de Young E, de la densidad (ϱ), y del módulo de Poisson (ν); según lo que se define en la Expresión 4:

$$C_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \qquad \textbf{(4)}$$

A medida que la onda se propaga a través de un medio sólido, como es el concreto, la energía se dispersa fuera de la trayectoria original de la onda cuando las propiedades del material cambian en el medio de transporte. Tal y como se muestra en la Fig. 2, cuando una onda de esfuerzo encuentra un vacío, grieta u otro defecto interno se produce una dispersión. A menor escala, la dispersión causada por la heterogeneidad inherente del concreto puede causar ruido y atenuación en las ondas de compresión. Algunos estudios han demostrado que usando ondas de cortante en lugar de ondas de compresión, se tiene la ventaja de que se reducen de atenuaciones en la dirección paralela a la propagación de la onda.

La frecuencia en conjunto con la velocidad de onda de un material específico, definen la longitud de onda. De manera que para que un defecto pueda ser detectado, la longitud de onda debe ser menor o igual al diámetro del defecto ($\lambda \leq$ Diámetro del defecto).

Las diferencias entre las propiedades acústicas de dos materiales adjuntos hacen que la onda de esfuerzo se refleje y/o se refracte (Fig. 3). Dicha propiedad es llamada Impedancia acústica (Z). La Impedancia acústica es el producto de la Velocidad de Onda (C_p), y la densidad (ϱ) de un material en específico, tal y como se expone en la Expresión 5:

$$Z = Cp\ \varrho \qquad \textbf{(5)}$$

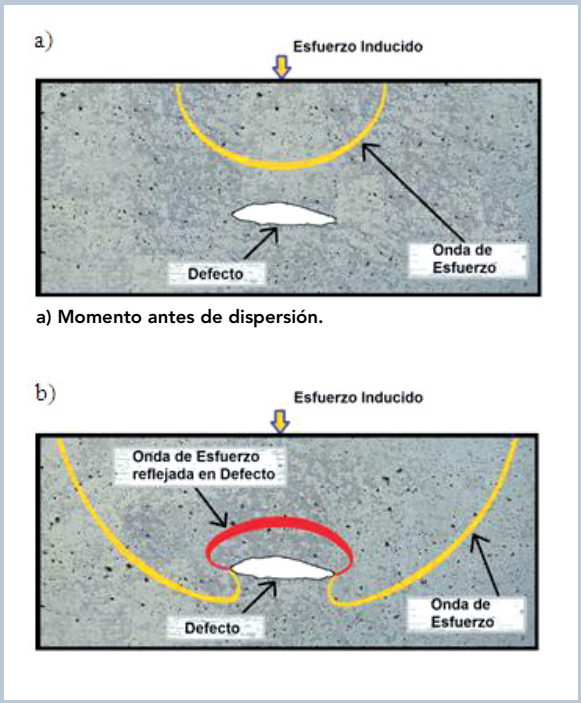
La amplitud con la cual la onda se refleja se indica por el coeficiente de reflexión (R), según se define en la Expresión 6:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \qquad \textbf{(6)}$$

En los últimos 15 años se ha avanzado en los Métodos de Tomografía Tridimensional en el Concreto, destacándose el sistema de Radar de Penetración (Ground Penetrating Radar, GPR), capaz de localizar acero de refuerzo, tuberías, líneas de gas, entre otros elementos; sin embargo, sus resultados no han sido satisfactorios para generar imágenes tridimensionales de defectos internos y de grietas.

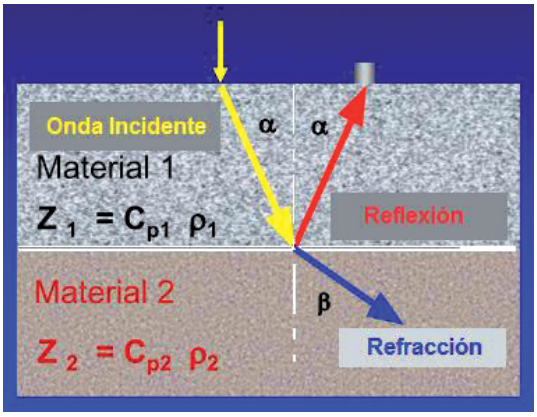
Actualmente, se han desarrollado Sistemas de Impacto-Eco (Impact-Echo) para generar imágenes 2D

Fig. 2:



Dispersiones de una onda de esfuerzo en el concreto.

Fig. 3:



Ejemplo de Reflexión y Refracción.

y 3D del interior de la masa de concreto. Este método consiste en inducir un impacto que provoca ondas de esfuerzo en el concreto. Se analiza la manera de vibrar de la estructura mediante el espectro de frecuencias generado por las ondas de compresión; posteriormente se determina la localización de vacíos y se estiman espesores mediante la utilización de algoritmos matemáticos. Puesto que este es un método puntual, es necesario analizar e interpretar cada punto de prueba de manera independiente.

Sistemas convencionales de Pulso Ultrasónico (Ultrasonic Pulse Velocity, UPV) también han sido implementados para generar imágenes tridimensionales de defectos internos del concreto; sin embargo, dicho método es más certero cuando se tiene acceso a ambas caras de la estructura. Por otra parte, requiere del desarrollo de un gran número de lecturas, considerando múltiples ángulos y con diferentes ubicaciones entre transmisor y receptor; además de que los transductores utilizados por este método requieren de un medio de acoplamiento. Actualmente este método es muy usado para la investigación de cimentaciones profundas.

La Tomografía Ultrasónica con Ondas Transversales (normalmente conocida como MIRA) es un sistema ingenieril multifuncional de baja frecuencia, diseñado para explorar y evaluar el interior de elementos de concreto y de concreto reforzado y presforzado, fundamentalmente (Fig. 4). Esta técnica, desarrollada por la compañía "Sistemas de Control Acústico Ltd", de Moscú en Rusia, se utiliza en la búsqueda de defectos (grietas, carcomidos, oquedades), o de objetos como acero de refuerzo o conductos embebidos en el interior de la masa de concreto. Cabe decir que el espesor para que éstos puedan ser detectado no debe superar los 2 metros.

Es un método novedoso que utiliza un arreglo patentado de transductores de contacto en seco; para generar imágenes en 2D y tomografías 3D de estructuras de concreto. Su empleo permite a los operadores obtener resultados *in-situ*, en tiempo real. En el MIRA se combinan perfectamente varias tecnologías novedosas; razón por la que hoy es considerado un enfoque revolucionario del ultrasonido en el concreto; constituye el equivalente en la construcción, de la exploración ultrasónica utilizada en las ciencias medicas.

Este equipo no sustenta su funcionamiento en una nueva teoría; sino en una integración de principios bien conocidos dentro de la propagación de ondas, y en la aparición de modernos hardware que aplican software avanzados. Representa una de las técnicas más revolucionarias en lo que respecta a las NDT en el concreto, fundamentalmente en estructuras de grandes dimensiones.

El MIRA está basado en el método eco-ultrasónico que utiliza transductores de emisión y recepción, tal y como se muestra en la Fig. 5. Un transductor envía una onda de esfuerzo y un segundo transductor recibe el pulso reflejado. Se mide el tiempo transcurrido desde el inicio del pulso hasta la llegada del eco. Si la velocidad de la onda (C) se conoce, la profundidad de la interfaz reflejante puede calcularse tal y como se muestra en la figura (la ecuación asume que los dos transductores están cerca uno del otro).

La mayoría de los sistemas que utilizan el método eco-ultrasónico trabajan a bajas frecuencias, haciendo vibrar sus transductores de 50 a 100 kHz; el sistema MIRA es capaz de operar de 15 a 150 kHz. De esta

Fig. 4:

Equipo MIRA para la inspección de estructuras de concreto. Fuente: Cortesía de Germann Instruments, Ins.

Comex®
Industrial Coatings

Recubrimiento base solvente retardante de fuego

FRA-10

Pintura base solvente de acabado mate que retarda la propagación de la flama a través de su acción intumescente. Perfecto para la protección en interiores de superficies de acero en hospitales, hoteles, escuelas, restaurantes, cines, teatros, torres departamentales, entre otros, donde ofrece la reducción de la penetración del calor al elemento de metal.

Cumple con las normas y códigos de protección contra el fuego en México.
Fácil de aplicar con brocha, rodillo o aspersión.

www.comexindustrialcoatings.com
Atención al consumidor:
Del D.F. y área metropolitana: 5864-0790 y 91
Del interior de la República: 01800-71-26639
solucionesretardantesdefuego@comex.com.mx
División Profesional

Fig. 5:

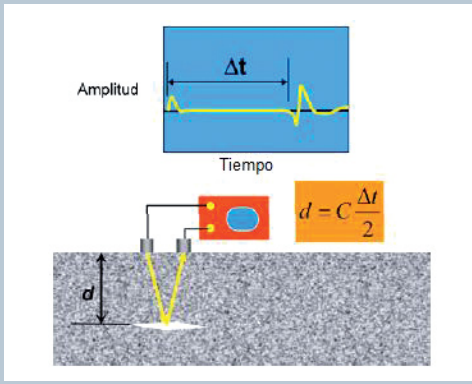


Ilustración del método ultrasónico con transductores de emisión y recepción. Fuente: Germann Instruments, 2010.

Fig. 6:

Distribución de transductores en MIRA-II. Fuente: Cortesía de Germann Instruments, Ins.

manera, para un concreto convencional con una velocidad de onda cortante de 2600 m/s, el tamaño de defecto mínimo detectable es de 1.7 cm de diámetro (operando el equipo a 150 kHz).

MIRA trabaja con ondas de cortante, debido a que estas producen reflexiones más intensas en el método eco-ultrasónico de emisión-recepción. Para producir ondas de cortante se requiere que los transductores vibren en dirección paralela a la superficie de prueba.

Este sistema cuenta con 48 transductores distribuidos en un arreglo de 4 x 12, tal y como se muestra en la Fig. 6. El conjunto de transductores se amolda a la superficie de concreto, debido al sistema de resortes que contiene la "cara de prueba".

El sistema es capaz de crear exploraciones transversales en 2D e imágenes 3D de los elementos de concreto, en menos de 4 segundos, después de la obtención de datos. De la misma forma, los datos recogidos en los puntos de inspección se recogen a una velocidad de unos 3 segundos por ubicación.

El equipo MIRA utiliza Transductores Ultrasónicos de Baja Frecuencia a Contacto en Seco (Low Frequency Dry Point Contact, DPC) que no requiere de ningún gel de acoplamiento (Fig. 7).

Con el empleo de estos transductores (DPC) la superficie de contacto con el concreto es de solamente 1 ó 2 mm. Estos transductores cuentan con un mecanismo de amortiguamiento, que consta de un compuesto líquido en el espacio libre, que rodea al elemento piezoeléctrico en la cubierta del transductor. Dicha adecuación incrementa la habilidad de percepción de ondas.

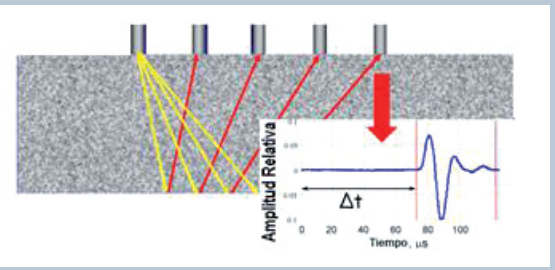
Basándose en el método ultrasónico de emisión-recepción, el arreglo de transductores permite la recolección rápida de muchas medidas de "tiempo de llegada" (Fig. 8). De esta manera, la gran cantidad de información recolectada permite la reconstrucción de una imagen del interior de un objeto.

El hecho de que los transductores de este dispositivo (MIRA) tienen la capacidad de emitir y percibir ondas de cortante, la primera columna de transductores dispara, y las siguientes once columnas perciben el tiempo de llegada de la onda. Después, la segunda columna dispara y las siguientes diez columnas perciben. Así sucesivamente hasta que solo la onceava columna dispara, y la doceava columna percibe la llegada de la onda cortante. C

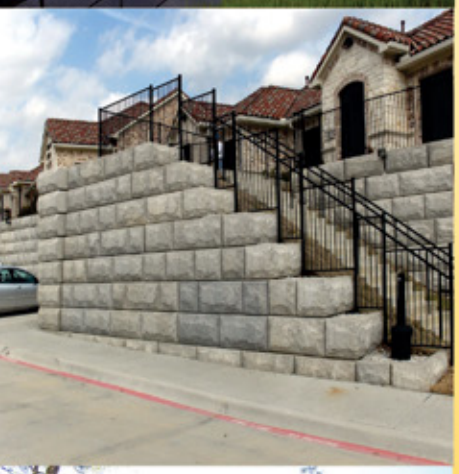
Fig. 7:

Transductores de Contacto en Seco.
Fuente: Cortesía de Germann Instruments, Ins.

Fig. 7:



Ejemplo de tiempo de llegada de la onda cortante desde el transmisor hasta cada uno de los receptores. Fuente: Adaptado de Germann Instruments, 2010.



STONE STRONG systems ®

- **Muros de Contención**
- **"Satisfacción" está escrito en piedra**
- **La única cosa más fuerte que nuestras paredes es nuestra reputación**
- **Disponibilidad a nivel nacional**
- **Sistema de bloques de fácil y rápida instalación**
- **Ingeniería aplicada en favor de un producto versátil, resistente y de alta calidad**

www.stonestrong.com.mx **ventasstone@stonestrong.com.mx**

DERECHOS RESERVADOS, ©, SOLUCIÓN Y MUROS EN CONCRETO, S. DE R. L. DE C. V.