

EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN UTILIZANDO EL EQUIPO EYECON
DE ULTRASONIDO, MEDIANTE TÉCNICAS COMPUTACIONALES
PARA LA RECONSTRUCCIÓN DE LA IMAGEN SAFT

EVALUATION OF CONCRETE STRUCTURES USING THE EYECON
ULTRASOUND EQUIPMENT BY MEANS OF COMPUTATIONAL TECHNIQUES
FOR SAFT IMAGE RECONSTRUCTION

ELBA J. COLQUE-ZACARIAS^{1,a†} & E. PALENQUE V.^{1,b‡}

¹ Instituto de Investigaciones Físicas,
Universidad Mayor de San Andrés,
c. 27 Cota-Cota, Campus Universitario,
La Paz - Bolivia

(Recibido 31 de julio de 2023; aceptado 9 de diciembre de 2023)

<https://doi.org/10.53287/mtti6534ud32j>

RESUMEN

Se propone un nuevo algoritmo con base en el método *SAFT* de *END*, que permite manejar y procesar los datos del equipo *EYECON*, sin la necesidad del programa original del mismo. Para poder caracterizar el comportamiento de la señal de las ondas dentro de un medio, se elaboró un bloque de hormigón de clasificación regular con un espesor de 30 cm. Se realizaron medidas a diferentes velocidades con una frecuencia de 50 kHz, con el fin de comparar los resultados del comportamiento de la intensidad de la señal de la onda, entre el programa original y el programa elaborado. Esto permitió identificar con mayor precisión las delimitaciones de las zonas: muerta, campo cercano y campo lejano, lo cual contribuyó a determinar las características de funcionamiento del equipo.

Palabras clave: Hormigón – Ultrasonido – Ensayos no destructivos.

ABSTRACT

A new algorithm is proposed based on the *SAFT* method of *END* that allows for the management and processing of data from the *EYECON* equipment without the need for the original device program. In order to characterize the behavior of the wave signal within a medium, a regular classification concrete block with a thickness of 30 cm was elaborated. Measurements were carried out at different speeds at a frequency of 50 kHz in order to compare the results of the behavior of the wave signal intensity, between the original program and the one developed in this study. This allows us to determine with greater precision the delimitations of the zones: dead, near field and far field, which helped us to determine the operating characteristics of the equipment.

Subject headings: Concret – Ultrasound – Ultrasonics in nondestructive testing.

1. INTRODUCCIÓN

La construcción es una de las principales actividades económicas en Bolivia que en los últimos años ha ido creciendo debido a las inversiones públicas y privadas. El material más utilizado es el hormigón, debido a sus cualidades de resistencia, durabilidad y versatilidad; sin embargo, se ha determinado que existen construcciones con deficiencias relacionadas con el proceso de elaboración del hormigón, lo cual

podría eventualmente generar fisuras, vacíos y algunos defectos que afectan la estructura de la construcción. Las principales razones para este tipo de problemas son: la mala dosificación de la mezcla, el sobre vibrado, mala distribución de capas de vaciado y segregación, entre otras. Por esta razón, es importante realizar pruebas mediante métodos de ensayos no destructivos (*END*), que ayuden a evaluar la calidad del hormigón (Kim et al. 2006). Uno de los métodos de *END* que permite determinar la resistencia real, vacíos, fisuras y otras anomalías en el interior del hormigón, es el del Pulso Ultrasónico mediante la técnica de pulso *ECO*, el cual consiste en enviar un pulso de ultrasonido de alta frecuencia a través

^a<https://orcid.org/0000-0003-0897-702X>

^b<https://orcid.org/0009-0008-8477-9483>

[†]Email: ecolque@fcpn.edu.bo

[‡]Email: epalenque@fiums.edu.bo

de transductores y recibir los pulsos reflejados (ecos) (De-La-Haza et al. 2013; Anoni et al. 2024). Existe una variedad de modelos de equipos que utilizan esta técnica de pulso, siendo los más utilizados los equipos que no necesitan gel de acoplamiento (contacto seco), donde además los transductores emisores y receptores están juntos y localizados en una misma cara, lo cual permite que el tiempo de viaje de la onda se mida de ida y vuelta.

En el presente trabajo, se reportan los resultados de la evaluación estructural de una muestra de hormigón elaborada bajo condiciones controladas, utilizando un equipo de ultrasonido *EYECON* que funciona con el método de pulso *ECO*. En la sección 2, se detallan las características técnicas del dispositivo utilizado, y en el Apéndice, se han incluido algunas características esenciales sobre su funcionamiento.

El equipo *EYECON* está provisto de una pantalla con diferentes modos de visualización directa de los registros obtenidos. No obstante, de modo preferente, los datos son transferidos a un computador para su procesamiento con el software *PlaneVisor*, que se distribuye junto con el equipo. Se evalúa el algoritmo del programa *PlaneVisor* disponible en laboratorio, el cual solo funciona bajo Windows XP, además que la calidad de colores en los gráficos no se muestra con buena resolución. En estas condiciones, se dificulta la observación de pequeñas fisuras o vacíos, y finalmente, no es posible un manejo flexible de la información obtenida.

Es por esta razón, que de manera adicional, el trabajo se enfoca en obtener registros de datos con el equipo de ultrasonido, para visualizar y procesar las imágenes “*scan B*”. Además, con el uso de técnicas computacionales combinadas con programas de procesamiento digital de imágenes, se puedan analizar las diferentes topografías de las fisuras o vacíos dentro de las muestras de hormigón, con un mayor detalle.

El artículo tiene el siguiente esquema: En la primera sección se describe el proceso de elaboración de una muestra de hormigón; en la segunda sección, las características del equipo de ultrasonido utilizado; en la tercera sección se explica el proceso de medición y la toma de datos; en la cuarta sección se detalla la técnica computacional elaborada para analizar los datos obtenidos. A continuación, en la quinta sección, se muestran los resultados relevantes, y finalmente, se presentan las principales conclusiones del trabajo.

2. ELABORACIÓN DE LA MUESTRA DE HORMIGÓN

Los insumos para elaborar la muestra fueron: cemento Viacha estándar de tipo *IP30*; agregado grueso proveniente de las canteras del Río Choqueyapu con piedras de tamaño máximo (*TM*) de $3/4''$; se utilizó agua potable en el desarrollo de las mezclas, cumpliendo las normas requeridas para obtener el hormigón con características *H21*, el cual lleva la proporción 1 : 2 : 4 (una parte de cemento, dos de agua y cuatro de arena y grava). Los equipos y herramientas necesarias para la elaboración de la muestra

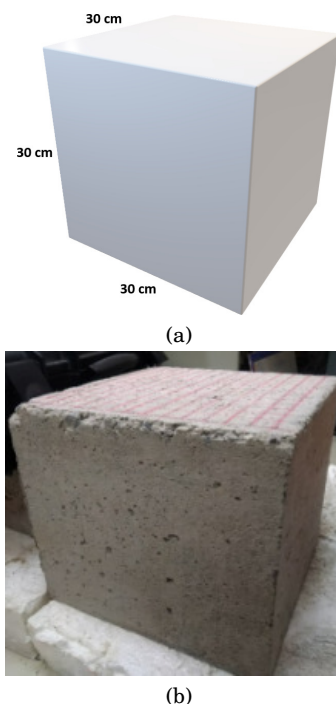


Fig. 1.— (a) Esquema 3D del diseño. (b) Vista lateral de la muestra de hormigón.

fueron proveídas por el Laboratorio de Materia Condensada.

Una vez elaborada la mezcla, se procedió al encofrado, utilizando aceite de motor como desmoldante. Para la compactación se utilizó una varilla de 2 cm de diámetro, además se golpeó los extremos del molde para poder distribuir uniformemente la mezcla y mejorar la compactación. Finalmente se esperó el tiempo adecuado de fraguado (18 días) según la norma establecida por el *IBCH*, luego se procedió a desmoldar la muestra, obteniéndose el bloque con dimensiones de $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 30\text{cm}$, mostrado en la Figura 1(b).

3. EQUIPO DE ULTRASONIDO

Para el escaneo de los pulsos *ECO*, se utilizó el equipo *A1220 MONOLITH* de la Germany Instruments, que cuenta con 12 emisores y 12 receptores que funcionan con transductores de punta, como se muestra en la Figura 2. Este dispositivo permite analizar muestras de hasta aproximadamente un metro de profundidad.

Para el escaneo con el equipo de pulso *ECO*, se analizó una sola cara del cubo, realizando mediciones solo en el centro de la muestra, con el fin de evitar reflexión de las ondas por caras transversales (Haach & Ramirez 2016), lo que podría producir distorsiones en las mediciones. Todas las mediciones fueron realizadas con frecuencia de 50 kHz como recomienda la literatura.

4. METODOLOGÍA

El escaneo con pulso *ECO* se visualiza mediante el programa *PlaneVisor*. La resolución de las franjas escaneadas es de muy baja calidad por lo cual es difícil distinguir algunas imperfecciones, rajaduras o



Fig. 2.— Vista frontal del equipo pulso Eco.

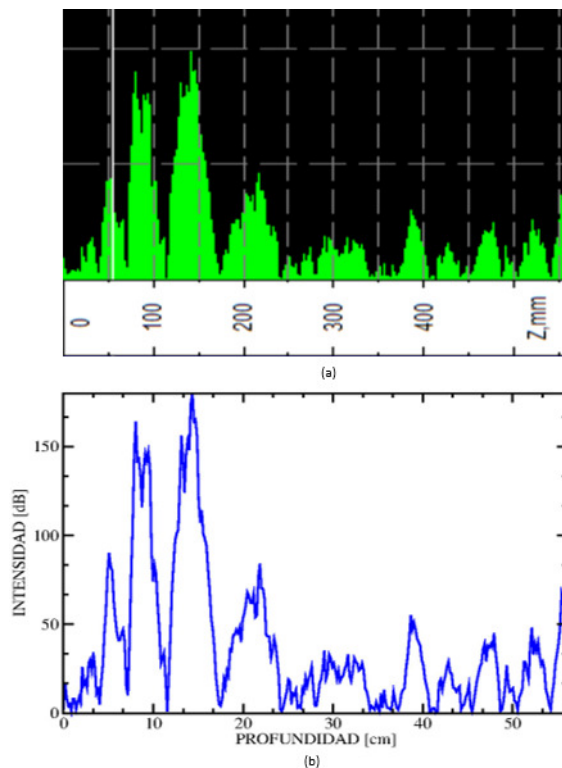


Fig. 3.— (a) Comportamiento de la intensidad (dB) en función de la profundidad (mm) dado en el programa PlaneVisor. (b) Comportamiento de la intensidad (dB) en función de la profundidad (cm) calculado por el algoritmo sugerido.

pequeños huecos (ver Apéndice Figura A1). Por este motivo, se elaboró un algoritmo capaz de realizar la lectura del archivo de datos para cada medición, con el propósito de procesarlos y, en primera instancia, replicar los gráficos de la intensidad de la señal de la onda generados por el programa PlaneVisor. La Figura 3, muestra la comparación de las intensidades de la señal de la onda generados por el algoritmo del programa original y el algoritmo propuesto, para una velocidad de 2500 m/s .

Una de las ventajas de haber replicado los resultados de la intensidad de la señal de la onda como lo muestra el programa PlaneVisor, es la facilidad de poder analizar de manera detallada el comportamiento de dichas intensidades para diferentes regio-

nes (profundidades).

Para realizar un análisis de la muestra de hormigón, sin la interferencia del agregado, se debe considerar la relación dada en la ecuación A2 (Apéndice). Lo ideal es que el TM del agregado sea menor que la mitad de la longitud de onda incidente (Lin & Wang 2020), para que así, el agregado no aparezca en las imágenes de ultrasonido. En nuestro caso, el valor de TM del agregado es de 19 mm . Para comprobar esta condición, se procedió a realizar el cálculo de los valores de la longitud de onda para distintas velocidades (desde 2000 m/s hasta 5000 m/s en intervalos de 200 m/s), usadas en el presente trabajo. Para la velocidad de 2000 m/s , la mitad de la longitud de onda es de 20 mm , la cual es mayor al TM del agregado, por lo que se pueden encontrar discontinuidades o posibles vacíos en el interior de la muestra de hormigón a partir de este valor. Para velocidades superiores, los valores de la media longitud de onda, son aún mayores.

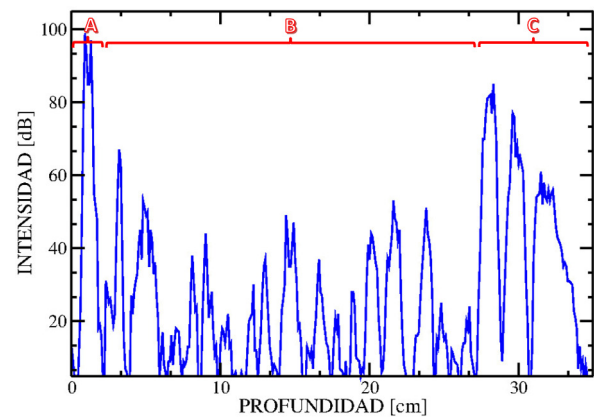


Fig. 4.— Comportamiento de la intensidad (dB) en función de la profundidad (cm) calculada por el algoritmo propuesto para la velocidad de 2200 m/s .

5. RESULTADOS

En esta sección, se analizan con el equipo de pulso *ECO*, las características de una muestra de hormigón de clasificación regular, según Graval (Malhotra & Carino 2003), que fue descrita en la sección 2. Para tal efecto, se realizaron medidas con diferentes velocidades, iniciando desde 2000 m/s hasta 5000 m/s en intervalos de 200 m/s , a una frecuencia de 50 kHz .

La Figura 4 muestra el comportamiento de la intensidad de la señal de la onda en función de la profundidad, para una velocidad de 2200 m/s , en la cual se pueden evidenciar tres zonas importantes. La zona muerta (A) en la cual se produce el eco de la emisión de la señal, muestra valores altos de intensidad, hasta cerca de 100 dB y se encuentra a poca distancia de la superficie de contacto, aproximadamente a 2 cm . Más allá de esta distancia, podemos observar la zona de campo cercano (B), en la cual la intensidad de la señal de la onda se regula en promedio a un valor de 30 dB , llegando hasta una profundidad

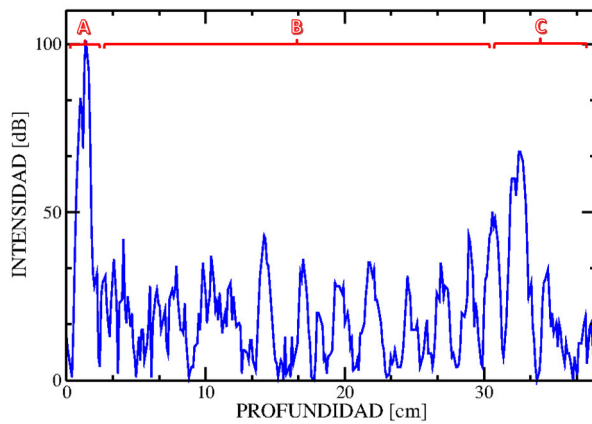


Fig. 5.— Comportamiento de la intensidad (dB) en función de la profundidad (cm) calculada por el algoritmo propuesto para la velocidad de 2400 m/s.

de aproximadamente 26 cm. Es importante destacar que en esta zona, existen oscilaciones en los valores de intensidad, debido a que la muestra no es totalmente homogénea. Finalmente, la zona de campo lejano (C), muestra un aumento de intensidad de la señal de la onda de aproximadamente 80 dB a partir de los 26 cm hasta los 35 cm de profundidad. La muestra tiene un espesor de 30 cm y el pico de intensidad se visualiza a una profundidad menor a este, por lo que se puede concluir que, con este valor de velocidad, no es posible analizar toda la profundidad de la muestra.

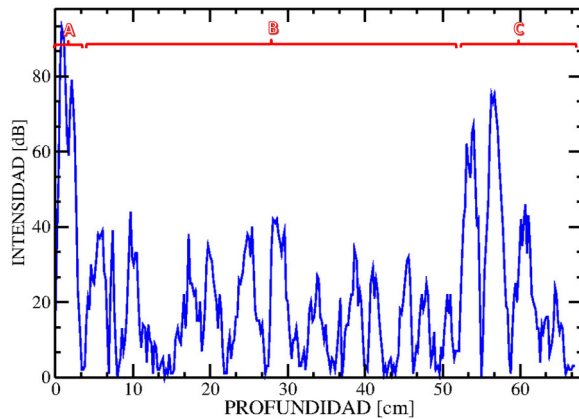


Fig. 6.— Comportamiento de la intensidad (dB) en función de la profundidad (cm) calculada por el algoritmo propuesto para la velocidad de 4200 m/s.

A continuación, en la Figura 5 se analiza el comportamiento de la intensidad de la señal de la onda en función de la profundidad a una velocidad de 2400 m/s, donde se identifican claramente las tres zonas. La zona (A) muestra una alta intensidad de la señal de la onda de aproximadamente 100 dB hasta una profundidad de aproximadamente 2.5 cm. Posteriormente comienza la zona (B), en la cual la intensidad de la señal de la onda se regula en un promedio de 20 dB hasta llegar a una profundidad de aproximadamente 30 cm. A partir de este punto comienza la zona C, en la cual ocurre una transición donde la in-

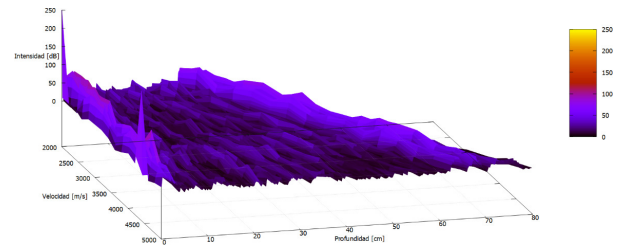


Fig. 7.— Comportamiento de la intensidad (dB) para velocidades desde los 2000 m/s hasta los 5000 m/s.

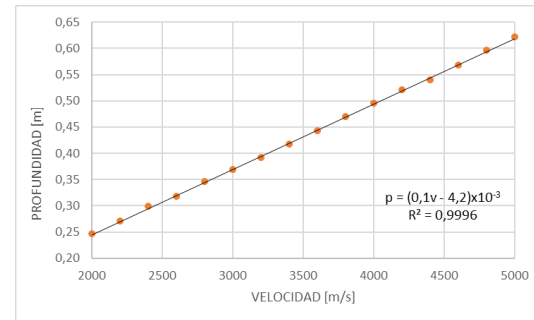


Fig. 8.— Representación de una regresión lineal simple para la relación entre velocidades y profundidades donde se produce la transición entre las zonas (B) y (C).

tensidad varía significativamente, la cual es generada por datos ficticios, tal como se explica en la sección A.5. del Apéndice. Para esta velocidad, la onda logra penetrar el espesor total de la muestra de hormigón, por tanto, se puede estudiar y visualizar con mejor precisión todas las diferentes características de la muestra.

Finalmente, la Figura 6 muestra los valores de la intensidad de la onda respecto a la profundidad para una velocidad de 4200 m/s, en la cual se puede observar que la zona (A) tiene una intensidad alta de 90 dB hasta aproximadamente 3.5 cm de profundidad. Seguidamente comienza la zona (B) en la cual la intensidad de la onda se regula, en promedio, a aproximadamente 20 dB a una profundidad de 52 cm. Posteriormente, inicia la zona (C), con un incremento de intensidad de 70 dB a una profundidad de 67 cm. Estos resultados muestran que, el pico de la intensidad de la onda se visualiza a una profundidad mayor al tamaño de la muestra, por lo cual se puede inferir que, para esta velocidad, no se puede analizar de manera correcta el espesor de la muestra.

Con todo lo mencionado anteriormente, se realizó un esquema que muestra el comportamiento de las intensidades de la señal de la onda (eje z) en función de las velocidades (eje y) y profundidades (eje x), como se muestra en la Figura 7, en la cual se puede observar que el eco de las intensidades en la zona (A) para diferentes velocidades no sobrepasa los 3.5 cm. Por el contrario, el límite entre la zona (B) y la zona (C), presenta diferentes valores. Se observa que el pico “ficticio” de alta intensidad cambia de profundidad en función de la velocidad en forma lineal.

Este comportamiento se puede analizar mediante un ajuste lineal entre las velocidades y las profundidades donde se encuentran los picos “ficticios” que

marcan la transición de intensidad entre las zonas (B) y (C). En la Figura 8 se muestran los resultados de la regresión lineal indicada para el presente caso. Estos resultados se constituyen en una técnica para estimar la velocidad mínima necesaria para analizar una determinada profundidad.

6. CONCLUSIONES

La visualización de defectos internos dentro de una muestra de hormigón es un problema muy frecuente en la práctica de la industria de la construcción. El uso de dispositivos ultrasónicos de onda ha demostrado ser imprescindible para el estudio de las imágenes de hormigón. Pese al avance en la tecnología relacionada con estos dispositivos, aun no se comprende bien algunas de las tecnologías empleadas y, como consecuencia, los equipos de ultrasonido pueden ser mal utilizados y ser considerados como ineficaces. En el presente trabajo se realizó una breve revisión de las principales conceptos y características de los dispositivos ultrasónicos (ver Apéndice). Se elaboró un nuevo algoritmo que ayuda a identificar con mayor detalle, anomalías, huecos y espesor de la muestra sin la necesidad de un programa específico, es decir, que se pueda extraer y procesar los datos directamente del equipo. Para probar el algoritmo, se elaboró una muestra de hormigón regular, para la cual se realizaron las respectivas mediciones con el equipo de ultrasonido. Se compararon intensidades de la señal de la onda obtenidas con el programa PlaneVisor y con el algoritmo propuesto, siendo favorables los resultados de esta comparación. Como consecuencia, se realizaron medidas para diferentes velocidades. Un resultado importante es la relación entre la velocidad y la profundidad, la cual, permite disponer de una técnica para evaluar las velocidades mínimas necesarias para diferentes profundidades, dependiente del tipo de dosificación de la muestra. Es evidente que a medida que se desarrolla la tecnología relacionada con la tomografía ultrasónica, se pueden obtener mejores imágenes sobre las estructuras de hormigón, pero aún se tienen muchos aspectos por evaluar, entre ellos, el tipo de dosificación y clasificación de las muestras de hormigón.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses respecto a la publicación de este documento.

APÉNDICE

En esta sección, se mencionan algunos conceptos importantes para el funcionamiento del equipo de Pulso Eco.

A. MEDICIÓN DE IDA Y VUELTA DE LA ONDA

Para determinar la distancia (x) donde se produce el eco se utiliza la siguiente ecuación:

$$x = \frac{v\Delta t}{2}, \quad (A1)$$

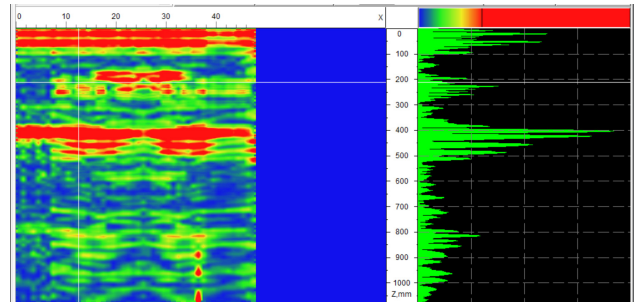


Fig. A1.— Pulso Eco. Fuente: Ejemplo del programa PlaneVisor.

donde v es la velocidad de la onda en el material y Δt es el tiempo de ida y vuelta de la onda.

En general, los equipos de ultrasonido necesitan de un programa con base en un algoritmo. Uno de los algoritmos más utilizados es el denominado como Técnica de Apertura Sintética de Enfoque (SAFT por sus siglas en inglés) (Tong et al. 2010), el cual es capaz de procesar la señal que optimiza el resultado de escaneo de área en el momento de localizar defectos o vacíos con el equipo de pulso *ECO* (Garg & Misra 2021). La Figura A1 muestra una imagen “scan B”, generada por el programa PlaneVisor, en la cual las zonas marcadas con color celeste corresponden al lugar donde no existen irregularidades, por lo que la señal se refleja casi en su totalidad. Por el contrario, si la coloración es rojiza indica que existen irregularidades que no permiten un total reflejo de la señal.

Para el proceso de escaneo se deben considerar ciertos aspectos que se describen a continuación.

A.1. Longitud de onda

Habitualmente los equipos de pulso *ECO* ultrasónico utilizan la frecuencia de 50 kHz (Hosseini et al. 2008; Snezhkov & Leonovich 2017) con el fin de evitar que las ondas reboten en el agregado del hormigón. Lo ideal es que el agregado tenga dimensiones menores a la longitud de onda, de esta forma el agregado no podrá aparecer en las imágenes de ultrasonido. La ecuación (A2) se utiliza para verificar que la longitud de onda media sea mayor que el tamaño máximo nominal del agregado (TM).

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{v}{2f} > TM, \quad (A2)$$

donde λ es la longitud de onda, v es la velocidad de la onda en el material y f es la frecuencia.

A.2. Velocidad de onda del ultrasonido

Si el espesor de la muestra de hormigón no es conocido, se puede estimar el tiempo de viaje de la onda en función a su velocidad. La ecuación utilizada para calcular el tiempo de la llegada de la onda entre el transductor y el receptor está dada por:

$$t_{aa} = \sqrt{\frac{2d_{aa}^2 + x_{aa}^2}{v_s^2}}, \quad (A3)$$

donde d_{aa} es el espesor del elemento, v_s es la velocidad de la onda en el hormigón, x_{aa} es la distancia

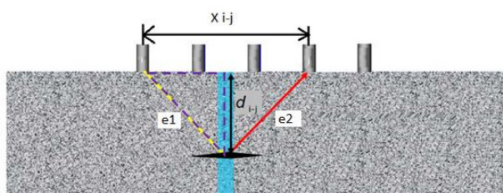


Fig. A2.— Esquema del funcionamiento del pulso *ECO* para determinar huecos. Fuente: Presentación “Stress-Wave Methods for Concrete Structures” (Sadri & Mirkhani 2009).

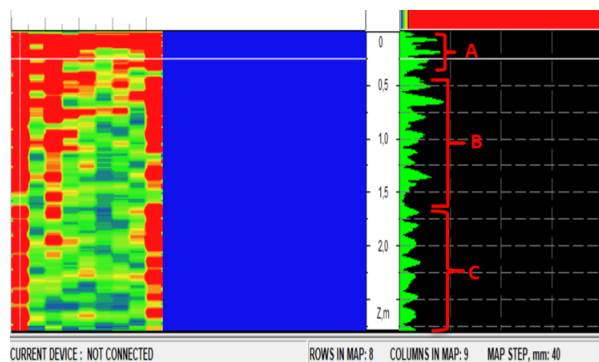


Fig. A3.— Pulso Eco. Fuente: Ejemplo del programa PlaneVisor.

entre los transductores emisor y receptor.

A.3. Obtención de discontinuidades

El algoritmo *SAFT* es capaz de realizar una composición de las señales obtenidas por cada par de transductores, lo cual permite detectar discontinuidades en la muestra de hormigón. La Figura A2 muestra un esquema del comportamiento de la señal de la onda cuando esta encuentra una discontinuidad; si no existiera la discontinuidad el equipo mide solo el espesor del elemento.

A.4. Compensación horizontal

Un equipo de pulso *ECO* genera una señal con componentes transversales y longitudinales, de igual manera que el receptor del equipo, recibe señales eco longitudinales y transversales. Lejos de las paredes, bajando a profundidades mayores, la principal contribución de señal de la onda del pulso eco es longitudinal. Cerca de las paredes la intensidad de las

ondas transversales es mayor, generando picos espurios, por lo cual es recomendable realizar medidas lejos de los bordes de la muestra. A mayores profundidades la intensidad del eco longitudinal disminuye por lo que las componentes transversales del eco contribuyen más a la señal de respuesta. Con todo lo mencionado anteriormente, lo recomendable es que el operador deba realizar el escaneo en las cercanías del centro de la muestra de hormigón.

A.5. Zona muerta, campo cercano y campo lejano

Debido a que las ondas de ultrasonido se generan en los puntos del plano de los transductores, la intensidad de la onda es afectada por fenómenos de interferencia entre dichos puntos. La interferencia genera una señal muy intensa en la zona cercana al cabezal. Este campo es conocido como zona muerta (A), donde es muy difícil poder detectar discontinuidades en el material debido a las señales espurias que se generan. El campo cercano (B), comienza desde la profundidad donde termina el pico de mayor intensidad de la zona muerta, hasta donde la intensidad de la señal se regula. Esta es la zona óptima para realizar medidas de las muestras. Debido a que la señal generada por el equipo es una onda mecánica, se sabe que esta se va disipando a medida que se propaga en el medio, hasta llegar a una región en la cual la onda no es capaz de generar un eco lo suficientemente intenso. A esta región se la conoce como la zona del campo lejano (C). Es importante mencionar que la distancia de propagación de la onda depende de la velocidad que el equipo le otorgue. Si la velocidad es baja, la transmisión de la señal de la onda es débil mientras que, para velocidades altas, esta transmisión de la señal de la onda es alta. Como se mencionó antes, los receptores del equipo reciben ecos longitudinales y transversales. Cuando el eco longitudinal es muy débil, la mayor contribución viene por parte del eco transversal, lo que el equipo interpreta como si fuese una irregularidad en la muestra, generando un pico ficticio que nos muestra el inicio del campo lejano. La figura A3 muestra las zonas mencionadas.

REFERENCIAS

- Anoni, L. G., Haach, V. G., & Khazanovich, L. 2024, *Construction and Building Materials*, 441
- De-La-Haza, A. O., Samokrutov, A. A., & Samokrutov, P. A. 2013, *Construction and Building Materials*, 38, 1276
- Garg, S. & Misra, S. 2021, *Nondestructive Testing and Evaluation*, 36(4)
- Haach, V. G. & Ramirez, F. C. 2016, *Construction and Building Materials*, 119, 61
- Hosseini, Z., Momayez, M., Hassani, F., & Lévesque, D. 2008, *AIP Conf. Proc.*, 975, 1298
- Kim, D. S., Seo, W. S., & Lee, K. M. 2006, *NDT & E International*, 39(2), 143
- Lin, S. & Wang, Y. 2020, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34(4)
- Malhotra, V. & Carino, N. J. 2003, *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete* (Taylor & Francis Group)
- Sadri, A. & Mirkhani, K. 2009, *Engineering, Materials Science*
- Snezhkov, D. Y. & Leonovich, S. N. 2017, *Science & Technique*, 16(4)
- Tong, J., Chiu, C., & Wang, C. 2010, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 57(11)