



Por I. Eduardo de J. Vidaud Quintana

Ingeniero Civil
Maestría en Ingeniería

Su correo electrónico es:
evidaud@mail.imcyc.com

Dr. I. Ingrid N. Vidaud Quintana

Ingeniero Civil
Doctorado en Ciencias

Su correo electrónico es:
ingrid@fco.uo.edu.cu

ULTRASONIDO:

Aplicación para la determinación del módulo de elasticidad dinámico



na de las propiedades del concreto en zona de alta sismicidad, resulta ser el módulo de elasticidad; en general el módulo de elasticidad de un material resulta ser una constante elástica, que relaciona los esfuerzos a los que está sometido el material con las deformaciones unitaria en el rango de comportamiento elástico; y representa la rigidez del material ante una carga impuesta sobre el mismo.

En general, cuando la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria a que está sometido el material es lineal, constante y los esfuerzos aplicados no alcanzan el límite de proporcionalidad, el material tiene un comportamiento elástico que cumple con la Ley de Hooke. El concreto para bajos niveles de carga, podría considerarse que cumple con la ley de Hooke.

Los materiales elásticos isótropos quedan caracterizados por un módulo elástico y un coeficiente elástico (o razón entre dos deformaciones). Es decir, conocido el valor de uno de los módulos elásticos y del coeficiente de Poisson se pueden determinar los otros módulos elásticos. Los materiales ortotropos o anisótropos requieren un número de constantes elásticas mayor.

El módulo de elasticidad es uno de los valores más importantes en el diseño de estructuras de concreto reforzado, puesto que este influye de manera determinante en las deflexiones, las distorsiones de entrepiso y en rigidez de una estructura; asimismo, el uso masivo de concreto como principal material de construcción hacen indispensable conocer todas sus propiedades mecánicas para tener diseños acertados



Figura 1

Esquema de principio de ensayo del método ultrasónico.

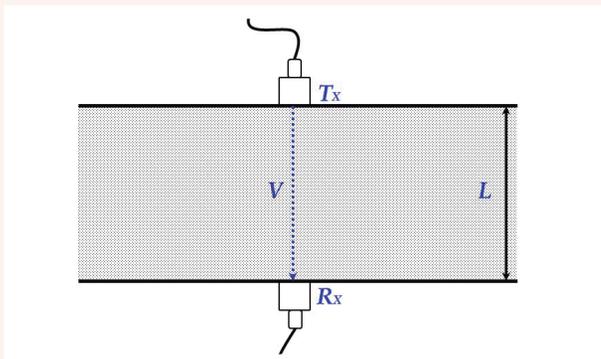
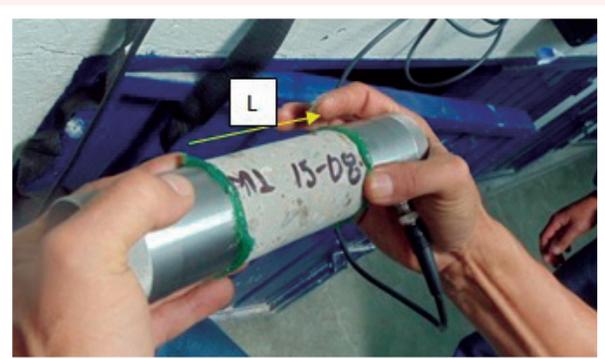


Figura 2



Desarrollo de una medición ultrasónica directa en una muestra de concreto extraída, de longitud "L".



Fuente: ATE IMCYC.

de los proyectos de construcción. En general, un punto importante del análisis y diseño de estructuras está asociado con las deformaciones que causan las cargas aplicadas a la estructura; de ahí que resulta importante evitar las deformaciones grandes que puedan impedir que la estructura cumpla con el propósito para el cual se concibió, pero el análisis de deformaciones puede emplearse también para el cálculo de los esfuerzos asociados a cualquier tipo de acciones, lo que resulta especialmente importante en estructuras hiperestáticas.

De acuerdo a lo referido anteriormente, la estimación de los niveles de deformabilidad en una determinada estructura, ante cualquier acción, estática o dinámica, está estrechamente relacionada con la rigidez del sistema, y por tanto con el módulo de elasticidad. Por otra parte, los ensayos no destructivos constituyen hoy en día una herramienta muy útil para determinar la calidad del concreto endurecido. Entre una gama variada de estos, el ultrasonido o método de medición de pulso ultrasónico ha sido utilizado con éxito desde hace más de 50 años en muchos países. Es un método que día a día ha ido incrementando sus aplicaciones en el campo de la tecnología del concreto, como una alternativa de ensayo no destructivo.

El método del ultrasonido fue desarrollado por primera vez en Canadá por Leslie y Cheesman entre los años 1945 y 1949; de la misma forma en que también fue utilizado por Jones y Gatfield en Gran Bretaña, prácticamente al mismo tiempo. Fue empleado con mucho éxito desde la década de los años 60 del siglo pasado para diagnosticar el estado del concreto utilizado en cortinas de presas. En general, ASTM tiene hoy entre sus especificaciones a la ASTM C – 597 (*Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*), reglas para el uso del método del pulso ultrasónico desde el año 1967; asimismo en la reglamentación británica, ha publicado también recomendaciones para la medida de la velocidad de pulsos de ultrasonido en el concreto.

Entre las ventajas del uso de este método puede referirse a que cualquiera que sea el medio de propagación de las ondas, con este método se necesita una única medida para obtener un valor representativo, es decir que la dispersión de este ensayo resulta muy baja. Por otra parte, resulta un ensayo de muy bajo costo pues el equipo es barato, con elevada confiabilidad y de fácil manejo; sin dejar a un lado que se refiere a uno de los ensayos no destructivos al concreto, con lo que además se garantiza repetitividad y versatilidad. Varios autores consideran que aunque este ensayo no permita evaluar directamente la resistencia del concreto, correlacionando las medidas ultrasónicas con la resistencia a partir de una combinación del método con calibración en laboratorio, podría ofrecerse una estimación de la resistencia característica del concreto ensayado con una precisión de $\pm 20\%$.

El método del pulso ultrasónico se basa en un fenómeno físico muy bien conocido: la propagación de ondas en un medio material; fenómeno que puede tornarse complejo cuando el medio de propagación es heterogéneo. Este hecho implica diferentes fases que componen al material, con diferentes propiedades elásticas relativas a la propagación de ondas; heterogeneidad que representa una limitación en el conocimiento de la forma del frente de onda, así como también en el camino seguido por la onda.

Las ondas de sonido se propagan en los medios sólidos a partir de excitaciones vibratorias en forma de: ondas longitudinales o de compresión, ondas transversales o de cortante, ondas superficiales o de Rayleigh, y las ondas de Lamb. La velocidad de estas ondas depende de las propiedades elásticas del medio en que se propagan, de forma que conociendo la velocidad del sonido y la masa del sólido, se pueden estimar las propiedades elásticas del medio, mismas que se pueden relacionar con los parámetros de calidad del material. Cada tipo de onda se caracteriza por su dirección, su velocidad y la energía transportada. Las diferentes velocidades de estas ondas se relacionan y dependen de los parámetros intrínsecos al material: módulo dinámico elástico, coeficiente de Poisson, módulo dinámico de cizalladura o de Coulomb G , y densidad.

El método de ultrasonido se basa entonces en la teoría de la propagación de las ondas compresionales en un medio infinito, homogéneo, isotrópico y elástico. De acuerdo a esta teoría física, la velocidad de las ondas depende principalmente de la densidad y de las características elásticas del medio que recorren, tal y como se relaciona en la Ecuación 1.

$$V = \sqrt{K \frac{E}{D}}$$

Dónde: V es la velocidad de pulso ultrasónico, E es el módulo de elasticidad dinámico del medio y D es la densidad del medio; siendo K , una constante que depende de la relación de Poisson del material.

El concreto es por naturaleza un material heterogéneo compuesto por cemento, agua y agregados, y cuyas propiedades evolucionan con el tiempo. Como antes se comentó, el método ultrasónico se adapta muy bien a los materiales homogéneos, como el acero, en los cuales es fácil determinar la trayectoria y el frente de onda; no siendo así en los heterogéneos como el concreto. La onda longitudinal o de compresión se propaga perpendicularmente al plano del transductor emisor, y las oscilaciones de las partículas ocurren en la dirección de propagación de la onda. También denominada onda de presión o de densidad, se considera que la energía transportada por esta onda es la más importante con respecto a los otros tipos. Este hecho se debe a que son estas las ondas más rápidas y las que ofrecen la mayor información posible sobre la estructura del concreto. La velocidad de propagación de la onda en un medio no heterogéneo como este material, viene dada entonces por la Expresión 2.

$$V = \sqrt{\frac{E(1 - \mu)}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)D}}$$

En esta ecuación μ es el coeficiente de Poisson.

La resolución de la ecuación de propagación supone entonces partir de la hipótesis de un medio de propagación homogéneo, con una velocidad uniforme de la onda en todo el medio, lo que no es el caso de la propagación de una onda ultrasónica en el concreto.

Consiste entonces el método en medir el tiempo que demora un pulso ultrasónico (frecuencia entre 20 y 150 kHz) al recorrer la distancia entre un transductor emisor Tx y un transductor receptor Rx, ambos acoplados al concreto en estudio (Fig. 1).

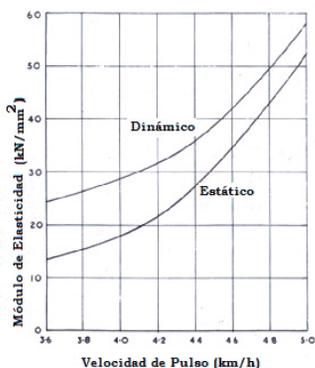
Mediante el transductor electroacústico emisor se genera un impulso de vibración longitudinal; después de recorrer una determinada distancia L, el segundo transductor Rx recibe la señal y, por medio de un circuito electrónico se mide el tiempo de tránsito o de propagación del impulso a través del material; de ahí que algunos especialistas lo establecen como una herramienta ideal, muy simple y versátil, para determinar la uniformidad en el concreto, tanto a nivel de campo como a nivel de laboratorio.

La velocidad de transmisión ó velocidad de propagación se determina en cada caso por el cociente entre la distancia ó separación "L" entre los transductores, y el tiempo de tránsito "t" para esta distancia según se evidencia en la Expresión 3.

$$V = L/t$$

En este caso, lo idóneo resulta ser la toma estratégica de muestras de concreto endurecido, evitando en cualquier caso la existencia de acero de refuerzo en la muestra; una vez desarrolladas las extracciones, se llevan a cabo mediciones directas en los especímenes y se obtiene así el tiempo de pulso ultrasónico en el espacio L, definido como ya se comentó, como el "tamaño" del espécimen.

✓ Figura 3



Curvas que correlacionan la velocidad de pulso ultrasónico con el módulo de elasticidad estático y dinámico.

Fuente: Tobio, 1967.

De acuerdo a lo anterior, conocida la velocidad de pulso ultrasónico V, y adicionalmente determinando la densidad del material por un simple pesado de los especímenes en estudio, y por supuesto conociendo el volumen de la muestra, por medio de la ecuación 2, se puede evaluar el módulo de elasticidad dinámico. Ahora bien, al realizar la evaluación faltaría conocer la magnitud del coeficiente de Poisson; en este caso dicho coeficiente, se podría estimar conocida la calidad del material, que se podría calificar en función de la misma magnitud de la masa volumétrica medida.

En general, marca la literatura especializada que, el coeficiente de Poisson podrá ser estimado de acuerdo a lo que se marca en la tabla #1. También se conoce que la masa volumétrica del concreto podría variar, en condiciones normales para el concreto de peso normal entre 1,800 y 2,500 kg/m³; de ahí que se puedan establecer, en base a esto, criterios para calificar el concreto en base a su calidad y con ello estimarse el coeficiente de Poisson.

Tabla 1: Estimación del coeficiente de Poisson en función de la calidad del concreto.

Condición General	Velocidad del Pulso V [m/s]
Excelente	0.15
Dudoso Bueno	0.28
Malo	0.33

Asimismo, a manera de complemento para la calificación del concreto, de los estudios realizados inicialmente en Canadá, existe una publicación, en donde se presenta un criterio de calificación para el concreto, sobre la base de la propia medición de la velocidad de pulso ultrasónico; el criterio de referencia se plasma a continuación en la tabla #2.

Tabla 2: Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica.

Condición General	Velocidad del Pulso V [m/s]
Excelente	> 4575
Bueno 3660	< V < 4575
Cuestionable	3050 < V < 3660
Pobre	2125 < V < 3050
Muy Pobre	< 2125

Adaptado de: Feldman R. F., "CBD-187. Non-Destructive Testing of Concrete", en National Research Council Canada, www.nrc-cnrc.gc.ca, publicado originalmente en mayo de 1977.

Tal y como se aprecia, conocida la velocidad de pulso ultrasónico, es posible calificar el concreto y con ello estimar una magnitud para el coeficiente de Poisson, a utilizar en la estimación del módulo de elasticidad dinámico del material, en base a lo que se formula en la ecuación #2.

El método de referencia constituye una importante herramienta para estimar de manera aproximada y representativa el módulo de elasticidad dinámico del concreto, magnitud que a la vez se podría usar para estimar el módulo de elasticidad estático, muy útil, como ya se comentó, para el proceso de análisis y de diseño de estructuras. En la literatura especializada del tema existen funciones que correlacionan, la velocidad de pulso ultrasónico, con las magnitudes de los módulos de elasticidad estáticos y dinámicos, similares a la que se muestra en la figura 3.

El módulo de elasticidad de referencia, se podría correlacionar a la vez con magnitudes obtenidas directamente de ensayos de laboratorio, en donde comúnmente se emplean anillos con deformímetros acoplados o strain gages; en ambos casos, integrados a un puente electrónico que mide deformaciones según se aplican escalones controlados de carga axial sobre la muestra en estudio. **C**

Referencias:

- International Atomic Energy Agency (2002), "Guidebook on non-destructive testing of concrete structures", Training Course Series No. 17. International Atomic Energy Agency, Wagramer Strasse 5, P.O. Box 100 A-1400 Vienna, Austria.
- Malhotra, V. M. y Carino, N. J. (2004), "Handbook on Nondestructive Testing of Concrete", Segunda edición. ASTM International – CRC Press.
- Peña, L. Vidaud, I., Vidaud E. (2011), "Técnicas para estimar la calidad del Concreto Endurecido", publicado en Revista: "Construcción y Tecnología en Concreto". Noviembre 2011. www.imcyc.com.
- Tobio, J. M. (1967), "Ensayos no destructivos: Métodos Aplicables a la Construcción", Primera edición. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. Madrid, España.
- Vidaud, E. (2015) "Pruebas no destructivas en las Estructuras de Concreto". Curso dictado en el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C en el mes de julio del año 2015.