

DETERMINACIÓN, INTERPRETACIÓN Y APLICACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL PULSO ULTRASÓNICO EN EL HORMIGÓN

Determination, interpretation and application
of the ultrasonic pulse velocity in concrete

ICS: 91.100.30; 91.220

1. Edición Noviembre 2002

REPRODUCCIÓN PROHIBIDA

Oficina Nacional de Normalización (NC) Calle E No. 261 Vedado, Ciudad de La Habana.
Teléf.: 830-0835 Fax: (537) 33-8048 E-mail: nc@ncnorma.cu

Prefacio

La Oficina Nacional de Normalización (NC), es el Organismo Nacional de Normalización de la República de Cuba que representa al país ante las Organizaciones Internacionales y Regionales de Normalización.

La preparación de las Normas Cubanas se realiza generalmente a través de los Comités Técnicos de Normalización. La aprobación de las Normas Cubanas es competencia de la Oficina Nacional de Normalización y se basa en evidencias de consenso.

Esta Norma Cubana:

- ◆ Ha sido elaborada por el Comité Técnico de Normalización NC/CTN 37 Hormigón Reforzado y Mortero, integrado por las siguientes instituciones:
 - Ministerio de la Construcción
 - Oficina del Historiador de la Ciudad
 - Ministerio de la Industria Azucarera
 - Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas
 - Centro Técnico para el Desarrollo de los Materiales de Construcción
 - Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría
 - Ministerio de las Fuerzas Armadas
 - Oficina Nacional de Normalización

- ◆ Responde a la necesidad de establecer un método para la determinación, interpretación y aplicación de la velocidad del pulso ultrasónico en el hormigón

- ◆ Contiene 8 figuras que son parte integrantes de la norma

© NC, 2002

Todos los derechos reservados. A menos que se especifique, ninguna parte de esta publicación podrá ser reproducida o utilizada por alguna forma o medios electrónicos o mecánicos, incluyendo las fotocopias o microfilmes, sin el permiso previo escrito de:

Oficina Nacional de Normalización (NC).

Calle E No. 261 Ciudad de La Habana, Habana 3. Cuba.

Impreso en Cuba

Indice

1 Objeto	1
2 Determinación de la velocidad del pulso en el hormigón	1
2.1 Principios físicos del método	1
2.2 Aparato	2
2.2.1 Componentes y disposición del aparato	2
2.2.2 Principio de funcionamiento del aparato	2
2.2.3 Calibración	3
2.2.4 Cables	3
2.3 Especificaciones para la realización del ensayo	3
2.4 Procedimiento	5
2.4.1 Definición del objeto de estudio	5
2.4.2 Calibración y corrección	5
2.4.3 Determinación del tiempo o velocidad de propagación	5
2.5 Expresión de los resultados	7
2.6 Informe a presentar	7
3 Interpretación y aplicaciones de la velocidad del pulso	8
4 Factores que afectan las mediciones de la velocidad del pulso	11

DETERMINACION, INTERPRETACION Y APLICACION DE LA VELOCIDAD DEL PULSO ULTRASONICO EN EL HORMIGON

1 Objeto

Esta Norma Cubana establece un método para la determinación de la velocidad de propagación del pulso ultrasónico a través de la muestra de hormigón, su interpretación y aplicación. Esta norma es aplicable para estimar:

- Homogeneidad del hormigón en los elementos estructurales
- Cambios de las propiedades en el tiempo
- Resistencia a la compresión
- Presencia de grietas y fisura
- Módulo de deformación estático.

2 Determinación de la velocidad del pulso en el hormigón

2.1 Principios físicos del método

Las ondas longitudinales son generadas por un transductor piezoeléctrico, el cual está en contacto con el hormigón. El efecto piezoeléctrico inverso consiste en la deformación mecánica del cristal al recibir la señal de voltaje, esta deformación es transmitida a la muestra por el emisor, el efecto piezoeléctrico directo consiste en transformar la deformación mecánica que recibe el receptor en una señal de voltaje. El pulso durante su propagación se deforma como consecuencia de las múltiples reflexiones en el interior del hormigón, generándose ondas longitudinales y transversales. El equipo electrónicamente registra el valor del tiempo de propagación de la onda en el material o calcula la velocidad de propagación. El pulso emitido por el transductor se deforma a medida que se propaga por el hormigón, como resultado de las interacciones con las heterogeneidades del medio, surgiendo así un sistema complejo de ondas elásticas que incluye ondas longitudinales y transversales fundamentalmente.

Este valor de la velocidad del pulso (longitudinal o transversal) depende de las propiedades mecánicas del hormigón, fundamentalmente sus constantes elástica y la resistencia mecánica. Por esta razón a partir de los cambios en velocidad se pueden inferir los cambios en la masa de hormigón. Así una región de baja compactación, grietas o defectos le corresponde un valor bajo de velocidad. Por tanto el valor de la velocidad del pulso puede ser utilizado como criterio de calidad del hormigón. Comparado con los ensayos mecánicos, este método tiene ventajas pues permite realizar las mediciones primeramente en las probetas o testigos y después en los elementos, sin causar el deterioro de éstos. Esta relación directa de la velocidad con las propiedades mecánicas permite establecer la correlación experimental entre la velocidad y las propiedades mecánicas resistencia a compresión, módulo de deformación y coeficiente de Poisson).

2.2 Aparato

2.2.1 Componentes y disposición del aparato

El aparato está constituido por los siguientes componentes principales: Transductores (emisor y receptor), amplificador, pantalla y conexión de los cables. (Véase Figura 1).

Existen dos tipos de equipos:

- Medidor de tiempo: En la pantalla solo aparece el tiempo de propagación de la onda.
- Medidor de velocidad con visualización del frente onda recibido.

El aparato debe ser utilizado según las características técnicas diseñadas por el fabricante, para que las mediciones sean confiables.

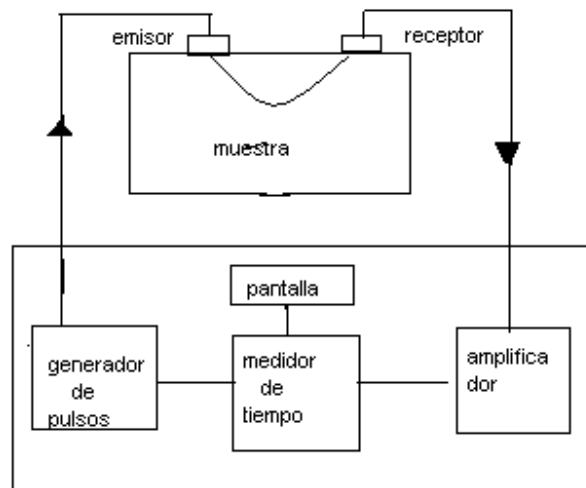


Figura 1 — Aparato para realizar las mediciones de la velocidad del pulso ultrasónico en el hormigón

2.2.2 Principio de funcionamiento del aparato

a) Generador de pulsos y transductores

Este consiste en un generador de pulsos de voltaje, los cuales son emitidos a intervalos y al ser recibidos por el cristal provocan el efecto piezoeléctrico inverso, la frecuencia de las vibraciones mecánicas está acorde con las características del cristal. La construcción del cristal puede ser de sales de Rochelle, cuarzo, titanato de bario, zirconato –titanato de bario (PZT) y exteriormente cubiertos con un protector metálico. La frecuencia de los transductores está en el rango de 30 KHz a 200 KHz , utilizando los de más baja frecuencia para las mayores distancias, pues los pulsos de mayor frecuencia se atenúan más. Se recomienda utilizar transductores de 50 KHz a 60 KHz .

El acoplamiento con la muestra tiene que ser con ayuda de un lubricante (aceite, grasa, vaselina, etc), de forma tal que la película de este medio acoplante sea delgada y a la vez garantice que no exista aire entre el transductor y la muestra, para que las pérdidas sean mínimas.

Es necesario tener en cuenta que en el lugar de acoplamiento transductor – muestra, debe percibirse que no existan irregularidades en la superficie.

b) Transductor - receptor

Convierte las vibraciones mecánicas recibidas desde la muestra en una señal de voltaje, la cual es transmitida al amplificador a través del cable.

c) Medidor de tiempo

El reloj comienza a funcionar automáticamente con el envío de la señal de voltaje al transductor emisor y se detiene al recibir la señal desde el amplificador, en la pantalla se presenta el valor del tiempo de propagación de la onda a través de la muestra. La unidad de medida del tiempo es en μseg .

2.2.3 Calibración

Existen dos métodos para calibrar los equipos:

- a) Con ayuda de un patrón. Se debe medir el tiempo de propagación de la onda en el patrón y realizar las correcciones correspondientes, según la metodología del fabricante.
- b) Uniendo ambos transductores frontalmente: En la pantalla se muestra 0 μseg , lo cual indica que el equipo está calibrado.

Si en ambos casos la medición realizada no coincide con lo planteado por el fabricante, debe corregirse el equipo. Hasta tanto no se realice la corrección técnica del equipo, el operario debe ser muy cuidadoso con la calibración, la cual debe realizar al comienzo de cada secuencia de mediciones.

2.2.4 Cables

Los cables son de baja capacidad y debe verificarse que las conexiones estén en buen estado, para garantizar un buen contacto y traspaso de la señal.

2.3 Especificaciones para la realización del ensayo

Los transductores pueden colocarse en las siguientes posiciones:

- a) Método directo, véase figura 2.
- b) Método indirecto, véase figura 3. Si no se tiene acceso a la cara opuesta de la muestra, este método permite estimar la calidad del hormigón y la detección de grietas superficiales.
- c) Método semidirecto, véase figura 4. Algunas fuentes plantean que con este método se generan ondas transversales, lo cual no es correcto, existen transductores que generan este tipo de ondas. La velocidad medida con este método es la velocidad de la onda longitudinal.



Figura 2 — Método directo

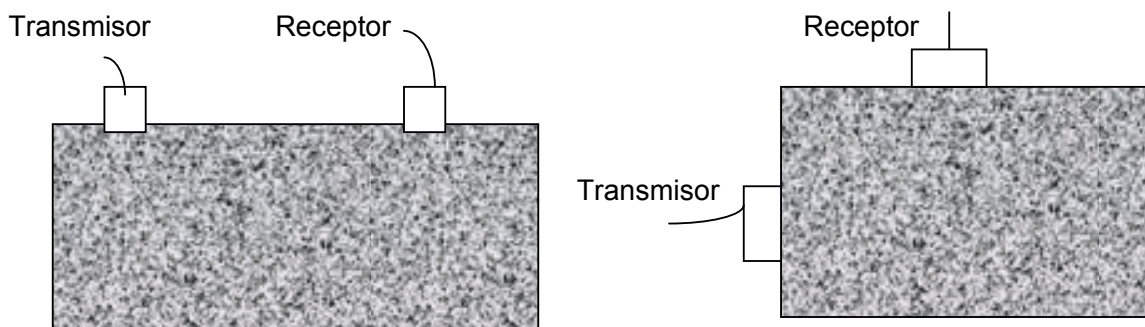


Figura 3 — Método superficial o indirecto

Figura 4 — Método semidirecto

La medición de las muestras se realiza por las caras paralelas. Si la muestra tiene más de 2 caras paralelas, se mide a través de todas sus caras. Si no se tiene acceso a la cara opuesta de la muestra se aplica el método superficial o indirecto.

La superficie de medición debe estar seca, a temperatura ambiente. Si el ensayo es sobre testigos, este debe realizarse en condiciones similares a las del elemento.

Si el ensayo se realiza en estructuras debe realizarse al menos 10 mediciones (teniendo en cuenta los criterios estadísticos) en cada punto, situados a una distancia de no más de 10 cm.

Las áreas de ensayo se sitúan en los elementos que están cargados a compresión y flexión, y cuya carga este distribuida uniformemente por todo el elemento. Es obligatorio tomar las zonas a compresión.

Antes de comenzar el ensayo en estructuras se debe convocar a una sesión de trabajo con todo los especialistas que participan en la inspección con el objetivo de lograr un resultado estadísticamente confiable.

Debe detectarse la presencia de aceros de refuerzo con la ayuda del pacómetro, con el objetivo de conocer sus dimensiones y distribución (longitudinal y transversal).

La superficie en los puntos de ensayos debe ser lisa y limpia, si no cumple con estas condiciones, debe pulirse la superficie, esta no debe contener poros mayores de 6 mm. No es correcto realizar el ensayo a través de recubrimientos decorativos.

Si se aplica el método directo, los transductores deben coincidir con un margen de error de menos de 1cm .

2.4 Procedimiento

2.4.1 Definición del objeto de estudio

En función del objeto de estudio se deben escoger los transductores a utilizar en el proceso de medición, por lo que es necesario caracterizar debidamente estos transductores. La selección del transductor (frecuencia) está en función del objetivo de la investigación, de la composición y estado de la estructura interna del hormigón, por lo que se debe cumplir el compromiso entre frecuencia- distancia a auscultar- atenuación de la onda.

2.4.2 Calibración y corrección

Se debe seguir el procedimiento indicado por el fabricante, tal como se señala en el aparato 4.4. Si existe diferencia entre el valor real y el valor medido, debe asumir éste como cero y verificarse que durante toda la jornada este valor se ha mantenido constante.

2.4.3 Determinación del tiempo o velocidad de propagación

Se debe acoplar los transductores (emisor y receptor) con ayuda del acoplante (grasa, aceite) de forma tal que no quede aire en la interfase transductor- muestra, además debe lograr que esta capa sea delgada presionado la muestra con el transductor. Debe garantizarse un buen acople; una posible fuente de errores es la variabilidad en la presión que haga el operario sobre los transductores, por esta razón las mediciones deben ser realizadas por una sola persona.

Los transductores pueden colocarse en las siguientes posiciones:

- a) Método directo: Siempre que se pueda debe utilizarse este método, pues ocurre la máxima transferencia de energía entre el emisor y el receptor, y la precisión del valor de la velocidad depende sólo de la exactitud en la medición de la longitud.
- b) Método indirecto: La velocidad medida por este método es cerca del 15% menor que por el método directo. Sobre este valor de la velocidad incide directamente las características de las capas cercanas a la superficie, por lo que este método permite delimitar la calidad del hormigón por capas. Además existe alguna incertidumbre en la medición de la longitud entre ambos transductores, debido al área del transductor. Para disminuir esta incertidumbre deben realizarse mediciones a longitudes crecientes, de la siguiente forma: el emisor se coloca en un punto fijo, moviéndose el receptor cada 10 cm a lo largo de la línea recta en la superficie, (véase figura 5).

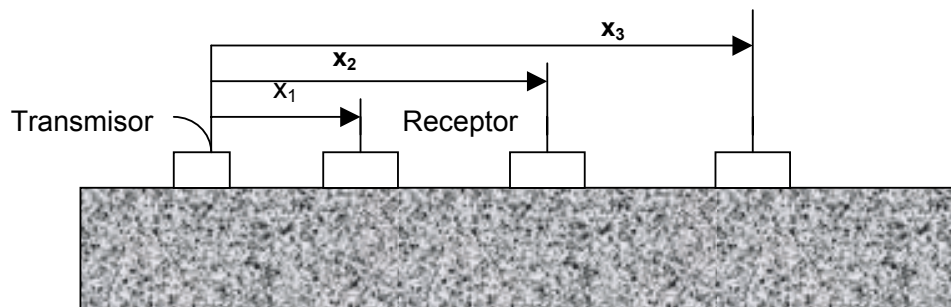


Figura 5— Medición de la velocidad aplicando el método indirecto

Los resultados se plotean en una gráfica longitud v_s . Tiempo (véase figura 6) en la cual la pendiente es la velocidad, si la recta tiene una única pendiente, esto implica que el hormigón es homogéneo en profundidad. De existir un punto de inflexión en la recta, este representa que existen capas de diferentes calidades, se puede estimar la profundidad de estas capas aplicando la siguiente expresión:

$$H = \frac{x_0}{2} \sqrt{\frac{V_s - V_d}{V_s + V_d}}$$

donde

- H espesor de la capa defectuosa (m);
- x_0 proyección del punto de inflexión sobre el eje X (m);
- V_s velocidad en el hormigón por debajo de la capa defectuosa (m/s);
- V_d velocidad hormigón en la capa defectuosa (m/s).

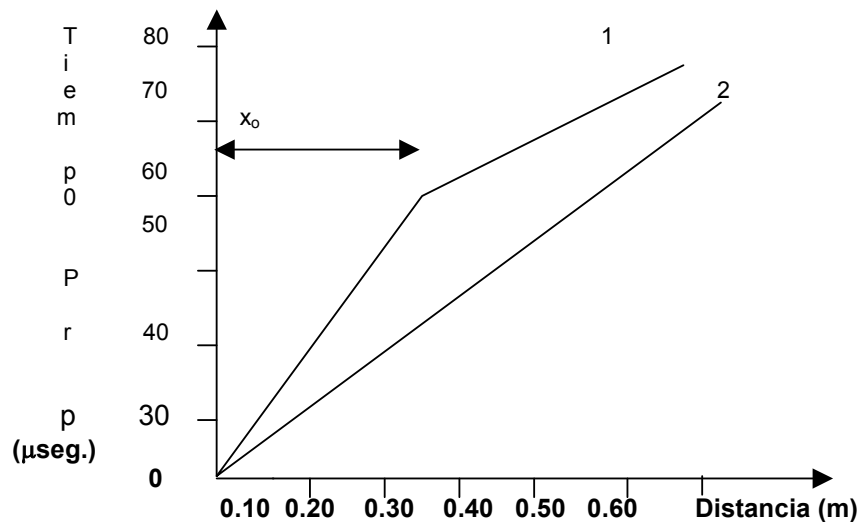


Figura 6 — Resultados experimentales obtenidos (1 hormigón con capas de diferentes calidades, 2 hormigón homogéneo)

2.5 Expresión de los resultados

Si el equipo utilizado solo mide el valor del tiempo de propagación, es necesario aplicar la siguiente fórmula para obtener el valor de la velocidad

$$V = L / t$$

donde

L longitud de la muestra (m);

t tiempo de propagación. (Tiempo necesario para que el pulso emitido por el traductor emisor se propague a través del hormigón hasta el receptor en metros).

Otros equipos calculan la velocidad a partir de introducir el valor de la longitud. En ambos casos es necesario aplicar el procesamiento estadístico de los datos (teoría de errores), que permita validar los resultados. El error en el valor de la velocidad depende del error en la medición de la distancia entre los transductores.

2.6 Informe a presentar

- ◆ El informe debe incluir los siguientes aspectos:
- ◆ Fecha y lugar de la investigación.
- ◆ Descripción técnica de la muestra ensayada (sí es posible fotos, esquema).
- ◆ Dosificación, características de los materiales (origen, propiedades).
- ◆ Condiciones de elaboración y curado de la muestra, edad.
- ◆ Indique si existen aceros de refuerzos y sus características (diámetro, posición).

- ◆ Características técnicas del equipo utilizado (marca, frecuencia de los transductores, exactitud)
- ◆ Cantidad de valores de tiempo o velocidad, tomados en cada punto, exactitud en la medición de la longitud de la muestra.

3 Interpretación y aplicaciones de la velocidad del pulso

Es recomendable combinar esta técnica con otros ensayos destructivos y no destructivos con el objetivo de obtener resultados confiables. En este sentido se recomienda combinar con esclerometría, método de resonancia, interferometría holográfica, análisis espectral de ondas de superficie, absorción superficial inicial, permeabilidad in situ, resistividad, y ensayos de roturas de especímenes (testigos, probetas, etc.). A continuación se dan algunos ejemplos de aplicación práctica de la velocidad del pulso ultrasónico.

a) Estudio de homogeneidad

La heterogeneidad en el hormigón causa la variación de la velocidad del pulso en los diferentes puntos. Para conocer si existen diferencias significativas entre los valores de la velocidad se utilizan los estadígrafos correspondientes (desviación estándar, coeficiente de variación). Si existen diferencias significativas entre los valores de la velocidad en los diferentes puntos de la estructura o entre las diferentes poblaciones de probetas de similares dimensiones y dosificaciones, implica que el hormigón en estudio no es homogéneo.

b) Cambio de las propiedades en el tiempo

Los cambios de las propiedades de hormigón que ocurren en el tiempo causados por la hidratación, el ambiente de trabajo, pueden ser detectados con la medición de la velocidad a diferentes edades, con el mismo equipo y en el mismo punto. Los cambios en la velocidad del pulso es consecuencia de los cambios en las propiedades mecánicas del hormigón y tiene como ventaja que se pueden realizar progresivamente en el tiempo, sobre todo en las primeras edades, en las cuales ocurren importantes cambios físico-químicos. La variación de la velocidad (aumento o disminución) está directamente relacionada con la variación de las propiedades mecánicas del hormigón.

c) Correlación de la velocidad del pulso y la resistencia a la compresión

Generalmente la calidad del hormigón se expresa a través de la resistencia mecánica, la cual se puede estimar a partir del valor de la velocidad del pulso ultrasónico. La relación entre ambos parámetros puede ser afectada por una serie de factores (se mencionan posteriormente). La correlación velocidad-resistencia es un resultado puramente experimental que se obtiene después de ensayar un número suficiente estadísticamente de probetas o testigos. Para realizar esta correlación se pueden utilizar modelos estadísticos sencillos o modelos autorregresivos. A partir del modelo obtenido para cada dosificación se puede estimar la resistencia a la edad deseada con solo medir la velocidad, sin tener que realizar ensayos de rotura.

d) Presencia de grietas y fisuras

La detección de grietas aplicando el método de emisión – recepción se fundamenta en la existencia o no de diferencias significativas en el valor del tiempo (velocidad) de propagación medido en los diferentes puntos del elemento. Las zonas donde existen grietas o fisuras el tiempo de propa-

gación es mayor como resultado de la difracción del haz en los bordes del defecto, lo cual depende de la relación entre la longitud de onda y las dimensiones del defecto. Los defectos relativamente pequeños carecen de importancia ingenieril y generalmente no son detectables a partir del valor de la velocidad.

Un método más eficiente para la realizar esta tarea es utilizar algoritmos de procesamiento de señales, a partir de los cuales no solo se detecta el defecto sino que se puede caracterizar.

Si el defecto es visible y perpendicular a la superficie, lo que se puede conocer moviendo el transductor receptor por la superficie. Si la grieta no es perpendicular al mover el transductor se observa que el tiempo de propagación varía. Para determinar la profundidad de la grieta en el primer caso, se sitúa el emisor y el receptor a la misma distancia del defecto (se recomienda 150 mm y 300 mm), según se muestra en la figura 7. La profundidad P del defecto se calcula por la expresión:

$$P = 150 \sqrt{\frac{(4t_1^2 - t_2^2)}{(t_1^2 - t_2^2)}}$$

- P profundidad de la grieta superficial (m);
 t_1 tiempo de propagación cuando $x = 0.15$ m (seg);
 t_2 tiempo de propagación cuando $x = 0.30$ (seg).

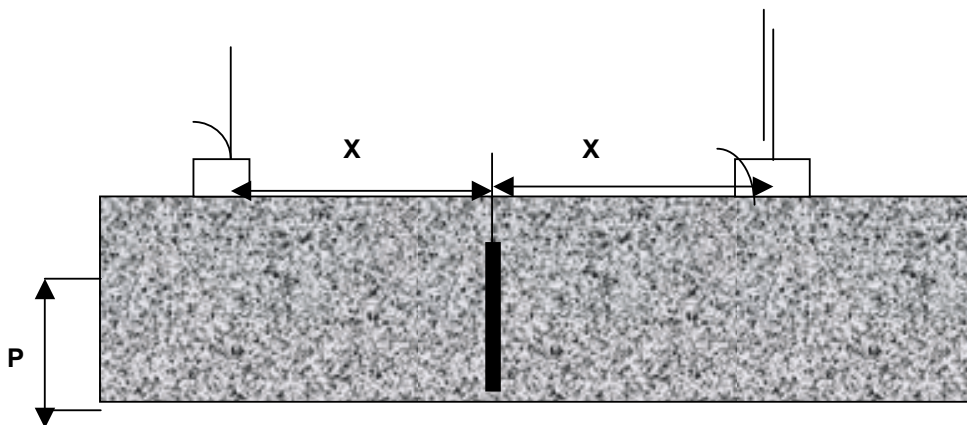


Figura 7 — Detección de grieta superficial

e) Estimación del módulo de deformación estático

A partir del valor de la velocidad del pulso se puede calcular el valor del módulo de deformación dinámico, el cual se puede correlacionar estadísticamente con el módulo de deformación estático, utilizando modelos estadísticos sencillos, modelos autorregresivos (sí desea hacer pronósticos).

El valor del coeficiente de Poisson se puede asumir o se puede calcular, pues existen algunos equipos con transductores P y S (P- generan ondas longitudinales, S—generan ondas transversales) que permiten el cálculo de este parámetro.

4 Factores que afectan las mediciones de la velocidad del pulso

a) Contenido de humedad

La velocidad del pulso depende de la cantidad de agua que tenga la muestra en el momento del ensayo, por tanto hay que cuantificar el contenido de agua para conocer la variación en m/s en la velocidad. Un mismo hormigón en estado seco y en estado saturado puede tener variaciones de velocidad de hasta el 7%, lo que se puede interpretar como hormigones de calidades diferentes, cuando realmente no lo son. Este estudio es necesario realizarlo para cada dosificación con el objetivo de conocer la relación: % de agua- variación en m/s.

b) Temperatura del hormigón

Se ha demostrado que las variaciones de la temperatura del hormigón entre 10 °C y 30 °C no introducen cambios significativos en la resistencia o elasticidad. Para temperaturas fuera de este rango deben realizarse las correcciones necesarias.

c) Longitud de recorrido

La longitud de la muestra ensayada debe ser lo suficientemente larga como para considerar la zona inspeccionada como homogénea, planteándose por algunos autores que la longitud de la muestra debe ser 4 ó 5 veces el tamaño del árido grueso. Un aumento significativo del valor de la longitud recorrida puede ocasionar variaciones en el valor de la velocidad, debido a la atenuación de los componentes de alta frecuencia que existen en el frente de onda, los cuales como resultado de la dispersión (scattering), se atenúan.

d) Forma y dimensiones del elemento a ensayar

La velocidad de propagación del pulso ultrasónico es independiente de la forma y dimensiones de la muestra. Si las dimensiones laterales de la muestra son del orden o menores que longitud de onda, es necesario probar la incidencia de este factor sobre el valor de la velocidad de propagación. Para esto se debe medir el valor de la velocidad de propagación en muestras de igual longitud y secciones transversales diferentes, mayores y menores que el valor de la longitud de onda. Los valores de velocidad obtenidos se analizan estadísticamente, para conocer si existen diferencias significativas o no. Otra vía para conocer la incidencia de este factor es digitalizando el pulso, tal como se muestra en la figura 8, en este caso se observa que las dimensiones laterales de la muestra no inciden significativamente en el valor de la velocidad. En este análisis se utilizaron transductores de 54 KHz en muestras cilíndricas de 20 cm de longitud y diámetros de 5, 8 y 10 cm respectivamente.

En la figura 8, se observa la incidencia del efecto de la frontera en el caso de la muestra de 5 cm. El pulso en líneas discontinuas representa la frontera libre y el pulso con trazos continuos representa cambios en la frontera. Se puede observar que el tiempo de propagación del frente de onda es el mismo para ambos casos, lo que implica igual valor de la velocidad de programación.

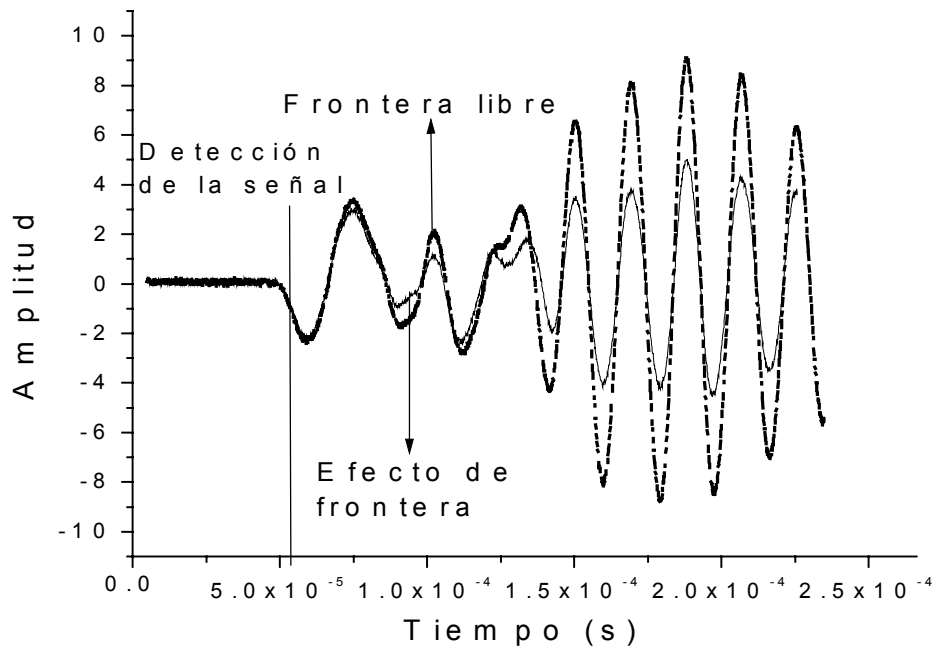


Figura 8 — Incidencia de las dimensiones laterales sobre el valor de la velocidad del pulso

e) Efecto de la frecuencia

Uno de los errores que más frecuentemente se han cometido por los especialistas en la producción, ha sido realizar el estudio de una misma muestra con diferentes equipo (transductor – equipo) o al menos con transductores de frecuencias diferentes. Es evidente que en estos estudios se obtengan valores diferentes de la velocidad del pulso para cada transductor utilizado. Esto está dado porque la velocidad depende de los parámetros mecánicos del medio. El comportamiento del hormigón responde a un sólido viscoelástico (no cumple con la ley de Hooke), lo cual provoca que los parámetros mecánicos sean función de la frecuencia de la perturbación por lo que la respuesta del medio ante los estímulos (deformaciones) externos dependa de la frecuencia de estos y por tanto la velocidad es también una función de la frecuencia del transductor utilizado.

f) Efecto de la tensión

La curva de tensión – deformación en el hormigón no es lineal, esto implica que el efecto de la tensión sobre la velocidad del pulso debe ser conocida para su correcta interpretación

Ante la presencia de cargas, existe una tendencia al aumento de la velocidad pequeñas carga un 20 % de la resistencia máxima. A esto le sigue primeramente una región prácticamente horizontal a cargas de mediana intensidad hasta un 70 % del nivel de tensión, luego una gran disminución en la velocidad del pulso a medida que el testigo comienza a fallar.

El hormigón no sigue el modelo esperado de la disminución gradual de la velocidad del pulso bajo la acción de tensiones que aumenten, esto se puede explicar, porque las cargas pequeñas no producen microgrietas de gran tamaño, pero se consolida el testigo lo que provoca que aumente al

velocidad del pulso. Posteriormente este aumento de la velocidad del pulso se desnivela debido a la propagación de microgrietas. Según estas se extienden, la velocidad disminuye.

En términos prácticos esto significa que el esfuerzo prevaleciente en el hormigón de una estructura no tiene que tomarse en cuenta cuando los datos de la velocidad del pulso se utilizan en la evaluación de la calidad del hormigón de una estructura.

g) Efecto de la heterogeneidad, viscoelasticidad y la anisotropía del hormigón

La aplicación del método del pulso en el hormigón consiste como ya sea planteado en transmitir directamente a través de este un pulso, a partir de aquí se mide el tiempo de propagación y la distancia recorrida por el pulso. Si el pulso se propaga por un medio sólido ideal desde el punto de vista elástico y las dimensiones son mucho mayores que la longitud de onda del pulso, entonces todas las frecuencias contenidas dentro del pulso se propagaran con la misma velocidad. En la realidad no existen estos medios ideales, por tanto durante la propagación del pulso este sufre variaciones.

En nuestro medio de estudio (el hormigón) como ya hemos visto anteriormente el pulso es difractado y deformado particularmente si la longitud de onda es comparable con las distancias entre los agregados. Esto trae como consecuencia que los valores del tiempo de propagación sea diferentes para trayectorias idénticas, el rango de estas variaciones depende de la relación entre la distancia recorrida y el tamaño de las heterogeneidades: cuando la distancia recorrida es muy pequeña se puede asumir que el medio es homogéneo.

Otro aspecto es la segregación interna el cual también se investiga con el comportamiento de la velocidad del pulso. La segregación interna consiste en que las partículas pesadas del agregado grueso tienden a moverse desde la superficie hacia el fondo del molde durante la colocación y compactación, esto se debe a que su densidad es mayor que la del resto de los elementos. Como resultado el fondo de una estructura de hormigón contiene más agregado grueso que la superficie o la parte media. Para testigos de hormigón la mayor velocidad se registra en la zona inferior, este valor de la velocidad es significativamente diferente con respecto al valor de las otras capas, debido a la segregación interna, aunque este fenómeno no influye notablemente en la resistencia.

El efecto de la visco-elasticidad lo podemos observar como resultado de la dispersión y la atenuación que sufre el pulso durante su propagación, lo cual trae consigo que el pulso se deforme y sea menos preciso. Este efecto tiene menos incidencia que las heterogeneidades.

Si el medio por el cual viaja el pulso es anisótropo, entonces la velocidad será diferente para las diferentes direcciones de propagación. Una posible causa de este fenómeno es que en las rocas que conforman el agregado la anisotropía es muy alta, por tanto la velocidad del pulso cambia en dependencia de la relación que exista entre la dirección de propagación y los planos de las rocas. Además el proceso de compactación causa alguna anisotropía aunque este efecto es pequeño: la velocidad de propagación es menor en la dirección de compactación.

h) Efecto de la Densidad

La calidad del hormigón, para una relación constante de los agregados, depende entonces del porcentaje de los poros de agua y aire en el hormigón. La velocidad del pulso varía con la densi-

dad. Se pueden obtener hormigones de diferentes densidades variando la relación árido fino- árido grueso, en este caso la velocidad aumenta con la densidad.

i) Efecto del curado y de las condiciones fraguado

El fraguado y la consolidación de la resistencia en el hormigón tiene lugar principalmente en el primer o segundo mes. La medida de la velocidad del pulso en períodos de tiempos diferentes en los testigos y estructuras demuestran que la velocidad del pulso aumenta con la edad. La relación entre la velocidad del pulso y la resistencia no están claramente definidas en el hormigón para las diferentes condiciones de fraguado para una misma composición.

Se recomienda entonces que los testigos de calibración para la inspección ultrasónica de la resistencia del hormigón, sean preparados en condiciones idénticas a la estructura o sea igual calor de desprendimiento, tratamiento de humedad, etc.

j) Relación agua- cemento

Al aumentar la relación agua- cemento aumenta la porosidad lo que conlleva a una disminución de la velocidad del pulso y de la resistencia. Este parámetro es uno de los factores que más influye en la resistencia a la compresión del hormigón

Por lo general en hormigones bien compactados a mayor cantidad de agua mayor será el número de poros que quede en el hormigón, porque en el hormigón siempre hay más agua que la necesaria para que el cemento reaccione. Hemos visto que la porosidad es la causa fundamental de la disminución de la resistencia.

k) Otros factores

El reforzamiento con acero influye en la velocidad del pulso, pues el paquete de ondas que salen del emisor y llegan al receptor, pasan a través del medio hormigón- acero- hormigón. Además en otro aspecto, la velocidad del pulso depende de la edad del hormigón, mientras que a su paso a través del acero siempre la velocidad permanece constante con un valor próximo a los 5200 m/seg. El hecho de medir la velocidad del pulso en el hormigón reforzado trae aparejado un aumento de 6% - 8 %, si la emisión del pulso ocurre sobre la barra situada en el centro del transductor de forma longitudinal. Para realizar estas correcciones existen en las fuentes especializadas expresiones para corregir los valores de la velocidad. Cuando la barra esta situada de igual forma pero algo alejada del transductor su efecto no se percibe, por la explicación del efecto de barra, o sea cambios en las fronteras que no influyen en el comportamiento del centro del pulso.

Si el acero esta de forma transversal y la suma de su espesor no excede como mínimo 125,4 cm, para transductores de 54 KHz, el equipo no es capaz de detectar la presencia de este.

Bibliografía

U.S.A. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. C 597-83 (Reapproved 1991).

Inglaterra. Bs 1881: Part 203:1986 recommendations for measurements of velocity of ultrasonic pulse in concrete.

España. Norma Española 83-308-86, Determinación de la velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos.

U.S.A. Popovics, S. and Popovics, J. The behavior of Ultrasonic Pulse in Concrete. Cement and Concrete Research. Vol. 20 pág. 25-30, 1990. U.S.A.

U.S.A. Popovics, S. and Popovics, J. Effect of Stresses on the Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete. Materials and Structures. 1991. Vol. 24, pág. 15-23.

U.S.A. Popovics, S. Diagnosis of Concrete Structure. Expertcentrum Czechoslovakia. 1990

U.S.A. Sandor Popovics, John Popovics. Effect of stresses on the ultrasonic pulse velocity in concrete. Materials and Structures. 1991. 24, 15-23