

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE BARRAS DE REFUERZO EN CONCRETO SOBRE LAS MEDIDAS DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU)

Julián Herrera^{1}, Ricardo Cruz², Luz A. Quintero³*

1: Ingeniero Metalúrgico, Msc Ingeniería de Materiales, Universidad Industrial de Santander (UIS). Bucaramanga, Colombia

2: Ingeniero Civil, PhD. Universidad Industrial de Santander (UIS). Bucaramanga, Colombia

3: Ingeniera Metalúrgica, Msc, Universidad Industrial de Santander (UIS). Bucaramanga, Colombia

*Contacto: juortiz25@gmail.com

RESUMEN

La Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) es un método no destructivo para la evaluación y caracterización del concreto; es influenciado por factores como: el diseño de la mezcla, la temperatura del concreto, longitud de la trayectoria y la presencia de barras de refuerzo, que producen imprecisión en la medida de la VPU. Por consiguiente, se evaluó el efecto de las barras de refuerzo en concreto sobre las medidas de VPU; las variables establecidas fueron: la cantidad de barras de refuerzo, la cercanía de los palpadores y la orientación de las barras respecto al viaje del haz ultrasónico. Se fabricaron probetas con dimensiones de 0.50 x 0.30 x 0.15 m, relación agua/cemento (a/c) de 0.5 con barras de refuerzo de 1/2 pulgada de diámetro y 0.50 m de longitud, variando la cantidad de refuerzos. En las pruebas se empleó un equipo de ultrasonido de baja frecuencia CNS FARNELL modelo Pundit Plus y un equipo de alta frecuencia KRAUTKRAMER USM 35 XS. La toma de datos por medio de VPU se realizó por el método de transmisión directa con ayuda de una cuadrícula de 5 x 5 cm. Se demostró que la VPU aumenta cuando el haz ultrasónico viaja paralelo a la barra de acero y cuando el transductor se encuentra cerca del acero de refuerzo; dependiendo de la orientación y cantidad de barras de refuerzo la VPU puede aumentar. La investigación también quiso mostrar la importancia y el cuidado a tener cuando se caracterizan las propiedades de concreto reforzado con VPU.

Palabras Clave: *Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU), Concreto Reforzado*

ABSTRACT

Ultrasonic Pulse Velocity (VPU) is a nondestructive method for the evaluation and characterization of the concrete, is influenced by factors such as the mix design, concrete temperature, path length and the presence of reinforcing bars, which produce inaccuracies in the measurement of the VPU. Therefore, we evaluated the effect of reinforcing bars in concrete on the steps of VPU, set variables were: the number of reinforcing bars, the proximity of the probes and the orientation of the bars relative to the ultrasonic beam trip. Specimens were fabricated with dimensions of 0.50 x 0.30 x 0.15 m, water / cement ratio (a / c) of 0.5 with reinforcing bars 1/2 inch in diameter and 0.50 m in length, by varying the amount of reinforcement. In the tests we used a low-frequency ultrasound FARNELL CNS Pundit Plus model and high-frequency equipment KRAUTKRAMER USM 35 XS. Data collection through VPU was performed by

direct transmission method using a grid of 5 x 5 cm. VPU showed that increases when the ultrasonic beam travels parallel to the steel rod as the transducer is located near the reinforcing steel, depending on the direction and amount of the VPU rebar may increase. The research also wanted to show the importance and care to have when characterizing the properties of reinforced concrete VPU.

Keywords: *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV), Reinforced Concrete*

1 INTRODUCCIÓN

El concreto es un material heterogéneo, durable y resistente, compuesto por varios materiales con diferentes granulometrías y propiedades; dado que se trabaja en su estado líquido o plástico, prácticamente puede adquirir cualquier forma, esta combinación de características lo convierte en el material más usado en construcción, aunque también dificulta su estudio y caracterización. El concreto simple, sin refuerzo, es resistente a la compresión, pero débil en tensión, lo que limita su aplicabilidad como material estructural. Para resistir tensiones, se emplea refuerzo de acero, generalmente en forma de barras, colocado en las zonas donde se prevé que se desarrollarán tensiones bajo las acciones de servicio, también se emplea en zonas de compresión para aumentar la resistencia del elemento reforzado, para reducir las deformaciones debidas a cargas de larga duración y para proporcionar confinamiento lateral al concreto, lo que indirectamente aumenta su resistencia a la compresión; demostrando una amplia aplicabilidad del uso de barras de refuerzo en el concreto para la solución de distintos problemas estructurales en diversos tipos de estructuras.

Es así, que en el desarrollo de la industria de la construcción se ha adelantado una búsqueda de métodos más efectivos y económicos de inspección (Ensayos No Destructivos-END) con los cuales no se cause daño a las estructuras objeto de estudio. Siendo la técnica de Velocidad de Pulso Ultrasónico-VPU [1, 2] una de las más empleadas ya que permite evaluar y caracterizar el estado del concreto con y sin refuerzo a diferentes elementos y sistemas estructurales como muros, columnas, vigas, etc; en aspectos tales como: presencia de fisuras, poros y huecos, los cambios en hormigón debidos a diferentes causas como ataques del fuego y bioquímicos, presencia o no de refuerzos, así como también la calidad del concreto [2].

La técnica de VPU mide el tiempo de vuelo de una onda ultrasónica que viaja a través del concreto, con frecuencias entre 20 y 150 KHz, las cuales son bajas comparándolas con las del acero. La velocidad de pulso (V) se calcula dividiendo la longitud (l) que recorre la onda sobre el tiempo (t) que gasta en recorrerla [1, 2].

$$V = \frac{l}{t} \quad (1)$$

De acuerdo con la posible configuración de transductores para realizar las mediciones, existen tres posibles formas de operación: transmisión directa, semi directa e indirecta [1, 2, 3]. En el caso de la presente investigación se utilizó el método directo, el cual implica la ubicación de los

dos transductores (transmisor y receptor) en las caras opuestas del material, este arreglo es el más deseable y satisfactorio porque la máxima energía del pulso transmitida será recibida.

Las barras de refuerzo presentes en el concreto, afectan considerablemente las medidas de VPU, la cuales en un concreto reforzado, en las proximidades de las barras de refuerzo es a menudo más elevada la VPU que en el concreto en blanco de la misma composición. Esto es porque la velocidad de pulso comprendida en un acero es 1.4 a 1.7 veces mayor que en el concreto en blanco.

A pesar que los resultados obtenidos en éste y otros trabajos realizados en esta área, han contribuido a la estimación del efecto que tienen las barras de refuerzo sobre el concreto cuando se emplean Ensayos No Destructivos, los estudios en este campo requieren mayor profundización para lograr resultados aún más concluyentes que permitan una evaluación acertada de estructuras fabricadas en concreto reforzado.

2 MATERIALES Y MEDOLOGÍA

Para este trabajo se realizó un diseño de mezcla donde se usaron cemento Portland tipo I y agua potable del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, las barras de refuerzo fueron varillas de acero corrugadas de uso común en obras civiles, además se emplearon agregados provenientes de la zona de Pescadero, Santander, realizando la caracterización de los mismos (módulo de finura, tamaño máximo de agregado grueso, gravedad y peso específico, y absorción), teniendo como base las normas NTC 92 [4], NTC 176 [5], NTC 237 [6], NTC 77 [7] y NTC 78 [8].

Se empleó una relación agua/cemento de 0.5, tamaño máximo nominal de agregado (TMN) de $\frac{3}{4}$ de pulgada y varilla de refuerzo de $\frac{1}{2}$ pulgada. Se diseñaron y elaboraron 5 probetas con y sin refuerzo como se muestra en la figura 1, las cuales se dejaron curar durante 28 días en condiciones ambientales bajo techo antes de ser evaluadas. Las dimensiones de las probetas fueron 0.15 x 0.30 x 0.50 m, las cuales se determinaron teniendo en cuenta el tamaño y frecuencia de operación de 54 KHz de los palpadores, la longitud de onda, el TMN, la orientación y la cantidad de refuerzos de acero en cada probeta. Se emplearon distribuciones uniformes de refuerzos longitudinales, no se realizaron amarres (o estribos) debido a su poco efecto sobre la VPU, según lo reportado por Raffaele Pucinotti en su investigación "Influence of steel reinforcement on ultrasonic pulses velocity" [9].

Los equipos utilizados para la realización de la pruebas fueron: un equipo de ultrasonido de baja frecuencia CNS FARNELL modelo Pundit Plus, para la evaluación del concreto reforzado, y un equipo de alta frecuencia KRAUTKRAMER USM 35 XS, para la caracterización del acero de refuerzo. La VPU se realizó siguiendo la Norma Técnica Colombiana. NTC 4325 "Método de ensayo para la determinación de la VPU a través del concreto" [10], para esto se trazó sobre cada probeta una cuadrícula de 5 x 5 cm como se muestra en la figura 2, donde se registraron 2 valores de VPU, teniendo en cuenta que la diferencia entre estos datos no superara el 2% de tolerancia.

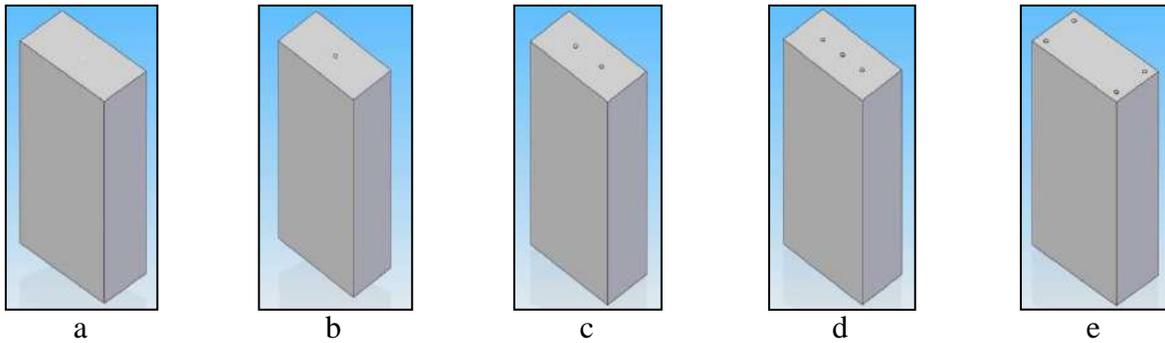


Figura 1. Probetas con diferente número de refuerzo [11]. a. sin refuerzo, b. un refuerzo, c. dos refuerzos, d. tres refuerzos, e. cuatro refuerzos



Figura 2. División de las probetas en todas superficies [11]. a. Diseño de las divisiones, b. Probeta real con divisiones de 5 x 5 cm

A partir de los datos obtenidos se realizó el análisis de resultados, el cual se comprobó a partir de estadística inferencial con el planteamiento de las siguientes hipótesis: [11]

$$\begin{aligned} H_0 &= \mu_v \leq \mu_B \\ H_1 &= \mu_v > \mu_B \end{aligned} \quad (2)$$

H_0 : No hay diferencia entre las VPU de la probeta sin barra y las probetas con 1, 2, 3 y 4 refuerzos

H_1 : Hay diferencia entre las VPU de la probeta sin barra y las probetas con 1, 2, 3 y 4 refuerzos

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizaron las pruebas para la varilla de refuerzo en forma paralela y normal al eje de la muestra de acero obteniendo una velocidad del sonido en el material de 5769.88 ± 81.41 m/s [11]. Todas las mediciones de VPU fueron realizadas por las caras frontal, lateral y superior de cada una de las probetas fabricadas [11]. En la figura 3 se muestra el comportamiento de la VPU vs la distancia para la probeta con una barra de refuerzo (figura 1b) sobre la cara superior, se aprecia en la figura 3a que a medida que los puntos de evaluación son más cercanos a la varilla se presenta un aumento significativo de la VPU, demostrando así, el efecto que tiene la cercanía de una barra de refuerzo sobre VPU. Este comportamiento se hace más evidente cuando la VPU es medida ubicando el palpador sobre la varilla de acero como se presenta en la figura 3b. Los

comportamientos anteriores demuestran que cuando el haz ultrasónico viaja a lo largo (en forma paralela a la dirección de propagación) de la barra de refuerzo una parte de la onda transmitida viaja por el concreto y la otra parte por el acero, siendo éste pulso, que viaja por el material metálico el primero en llegar al transductor receptor.

Contrario a lo anterior, las mediciones de VPU sobre las caras frontal y lateral no se afectaron significativamente por la presencia de una barra de refuerzo, lo cual se evidenció en que no se presentó aumento en estos valores, lo cual se da porque el pulso atraviesa transversalmente, según su dirección de propagación, al eje de la varilla de acero. Se deduce en este caso que no hay influencia del acero de refuerzo [11].

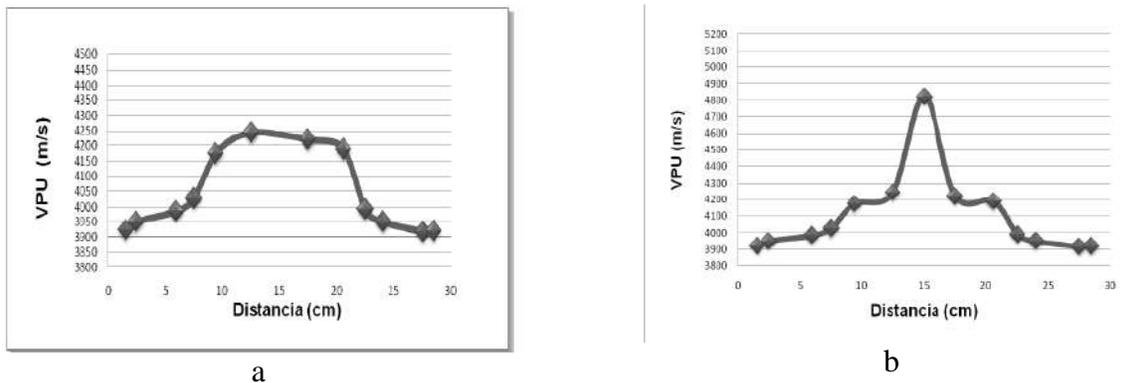


Figura 3. Comportamiento de la VPU para una barra de refuerzo [11]. a. Cara superior sin lectura sobre varilla, b. Cara superior con lectura sobre varilla

En la figura 4 se muestran las gráficas para dos (2) barras de refuerzo. En este caso los resultados de las mediciones realizadas por las caras frontal, lateral y superior fueron similares a los conseguidos para una (1) varilla, con la diferencia de que las mediciones presentaron tres (3) picos de velocidad de pulso (figura 4b), los dos de los extremos pertenecen a las medidas sobre las barras de refuerzo y el tercero corresponde a la VPU registrada en medio de las dos varillas, presentándose una VPU menor al viaje sobre las barras, pero mayor que los valores registrados en las cercanías de las varillas, esto se debe a que el haz sonoro viaja parcialmente en las dos barras dando una mayor velocidad al viaje de la onda.

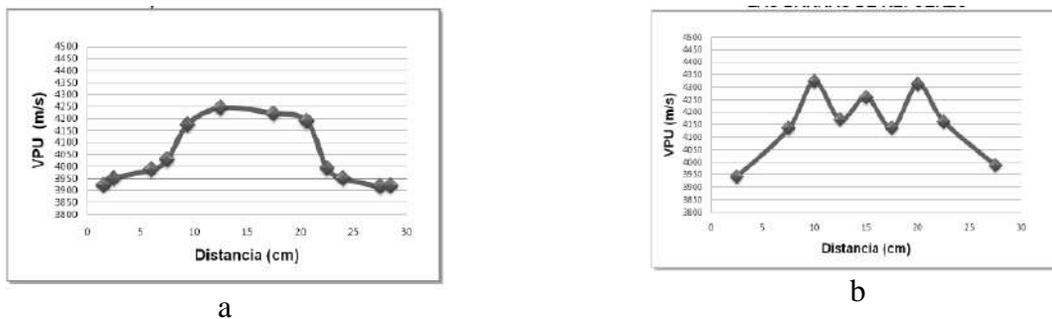


Figura 4. Comportamiento de la VPU para dos barras de refuerzo [11]. a. Cara superior sin lectura sobre varilla, b. Cara superior con lectura sobre varilla

En la tabla 1 se muestra el comportamiento de la VPU, por la cara frontal, para las probetas en estudio, en esta se aprecia que con tres (3) barras se produjo un aumento en la velocidad de pulso, efecto causado por la cantidad de refuerzos y por la distribución de éstos en la probeta (figura 1D), ya que las ondas que viajan en forma normal a las varillas tienen más probabilidad de encontrarse en su recorrido con una mayor área de las barras de acero. En cuanto a la vista lateral el mayor efecto sobre la VPU se presentó cuando se ubicaron los transductores sobre la misma línea de acción de las 3 barras de refuerzo, sin embargo éste no fue mayor que el presentado en la cara frontal. Este comportamiento se explica porque solo una pequeña fracción de la energía del pulso atraviesa realmente el diámetro pleno de cada barra.

Tabla 1. Comparación de valores promedio de VPU para la cara frontal de las probetas [11]

	VPU promedio (m/s) sin refuerzo	VPU promedio (m/s) 1 refuerzo	VPU promedio (m/s) 2 refuerzos	VPU promedio (m/s) 3 refuerzos
Vista Frontal	4052.4	4097.28	4044.63	4294.13

Para el caso de la probeta con 4 barras de refuerzo (figura 1E) las mediciones por la cara frontal y lateral mostraron un comportamiento similar al de las probetas estudiadas sin refuerzo, con uno y dos barras, sin poner de manifiesto un aumento en la VPU [11]. Al ser medidos sobre la cara superior se apreció un aumento de la VPU en los extremos de la probeta, lo cual corresponde a la ubicación de los refuerzos metálicos, este comportamiento era de esperarse según lo comprobado en las mediciones realizadas a la probeta con un refuerzo.

4 CONCLUSIONES

Cuando el haz sonoro viaja paralelo al acero de refuerzo se presenta un aumento gradual en la VPU a medida que los palpadores se van acercando a la posición donde se encuentra ubicada la varilla, esto sucede porque inicialmente el pulso ultrasónico viaja únicamente por el concreto, al acercarse a la barra de acero, el haz sonoro viaja parcialmente en el concreto y en el acero, y si se posicionan los transductores sobre la varilla el ultrasonido viaja en mayor proporción sobre esta, presentando un incremento de la VPU de hasta 21% [11] respecto a la velocidad del concreto.

Cuando el pulso ultrasónico se transmite en forma perpendicular al eje longitudinal de una o dos barras de refuerzo, no se presenta un efecto significativo sobre la VPU, debido al poco espesor de la varilla, en este caso de ½ pulgada, el cual lo hace casi imperceptible para el haz sonoro [11]. Sin embargo, para tres (3) barras de refuerzo se apreció un aumento en los valores de VPU ocasionado por la distribución y cantidad de las varillas, ya que la onda ultrasónica tiene mayor área de acero por la cual transmitirse.

Se demostró que la VPU depende de la orientación de las barras de refuerzo respecto a la dirección de propagación del haz ultrasónico, ya que es mayor cuando viaja paralela a la varilla de refuerzo, que cuando se transmite únicamente sobre concreto y que, cuando viaja perpendicular a la barra, efecto debido a que solo una fracción de la energía del pulso ultrasónico atraviesa el diámetro de cada varilla. Además se comprobó que la VPU depende de la cantidad de barras de refuerzo y de la cercanía de los palpadores a las varillas de acero [11].

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. International Atomic Energy Agency. Guidebook on non-destructive testing of concrete structures. Austria, IAEA, p.p. 100 – 128, 2002.
2. V.M. Malhotra; N.J. Carino. Handbook on nondestructive testing of concrete. Capítulo 8: The Ultrasonic Pulse Velocity Method. United States of America, ASTM INTERNATIONAL CRC PRESS, p.p. 8-1 a 8-19 , 2004.
3. American Society For Testing And Materials, “Standard Test method for pulse velocity through concrete”. USA, ASTM C597-02. 4 p.
4. Instituto Colombiano de Normas Técnicas “Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregado compactado”. NTC 92, Bogotá, Colombia, ICONTEC, 1994. p 121 – 122.
5. Instituto Colombiano de Normas Técnicas. “Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado grueso”. NTC 176, Bogotá, Colombia, ICONTEC, p.p. 139 – 140, 1994.
6. Instituto Colombiano de Normas Técnicas.” Método para determinar el peso específico y la absorción del agregado fino”. NTC 237, Bogotá, Colombia, ICONTEC, p.p. 142 – 143, 1994.
7. Instituto Colombiano de Normas Técnicas. “Tamizado de materiales granulados (agregados o áridos)”. NTC 77, Bogotá, Colombia, ICONTEC, p.p. 119 – 120, 1994.
8. Instituto Colombiano de Normas Técnicas. “Agregados para hormigón. Determinación del porcentaje del material que pasa tamiz”. NTC 78, Bogotá, Colombia, ICONTEC, p.p. 120 – 121, 1994.
9. Pucinotti R. “Influence of steel reinforcement on ultrasonic pulses velocity”, 4th International Conference on NDT (11 – 14 octubre, Chania, Crete - Grecia), Italy, 6 p., 2007.
10. Instituto Colombiano de Normas Técnicas. “Método de ensayo para la determinación de la VPU a través del concreto”. NTC 4325, Bogotá, Colombia, ICONTEC, 30 p. 1997.
11. Pardo, Francisco y Perez, Eduar. Evaluación del efecto de las barras de refuerzo del concreto sobre las medidas de velocidad de pulso ultrasónico. Bucaramanga, Colombia, Universidad Industrial de Santander, 123 p., 2010.