

# Estudio de Ultrasonido en Hormigón con Fibras de Polipropileno.

## *Ultrasound Study in Concrete with Polypropylene Fibers.*

Mary D. Martín Costales<sup>1</sup>, Ronald V. Torres Moreno<sup>2</sup>, Cesar A. Peñuela Martínez<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Msc. Ingeniería Civil, Fundación de Edificaciones y Dotaciones Educativas, [marydmart9@gmail.com](mailto:marydmart9@gmail.com)

<sup>2</sup> Prof. Dr. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, [ronald.imme@gmail.com](mailto:ronald.imme@gmail.com)

<sup>3</sup> Prof. Ing. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil, [cesarpenuela@gmail.com](mailto:cesarpenuela@gmail.com)

### RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la influencia de la incorporación de fibra de polipropileno sobre el hormigón endurecido mediante el uso de ensayos de ultrasonido, con el propósito de conocer si las propiedades de calidad de los especímenes mejoran con la adición de fibras después de 2 años y 2 meses de su elaboración. A través de un análisis de confiabilidad se estableció que existe una marcada dependencia entre la VPU (Velocidad de Pulso Ultrasonico) obtenida por medio del método directo y el resto de los métodos de medición, representada a través de un ajuste lineal, con valores de  $R^2$  comprendidos entre 0.95 y 0.99.

### ABSTRACT

The objective of this work is to study the influence of the incorporation of polypropylene fiber on hardened concrete by the use of ultrasound tests, in order to know if the quality properties of the specimens improve with the addition of fibers after 2 years and 2 months of its preparation. Through a reliability analysis, it was established that there is a marked dependence between the VPU (Ultrasonic Pulse Velocity) obtained through the direct method and the rest of the measurement methods, represented through a linear adjustment, with  $R^2$  values between 0.95 and 0.99.

**PALABRAS CLAVE:** Ultrasonido, Ensayos No Destructivos, fibras de polipropileno, Hormigón.

**KEYWORDS:** Ultrasound, Non-Destructive Tests, propylene fiber, Concrete.

## 1. Introducción.

La inspección de las estructuras por medio de los métodos de ensayos no destructivos, especialmente el basado en velocidad de pulso ultrasónico (VPU), se han venido implementando para ejercer un control y evaluación de los elementos estructurales elaborados en hormigón en las últimas décadas, esto permite conocer el comportamiento de este material conforme a las condiciones a las que este se encuentra sometido durante su

funcionalidad y vida útil. Sin embargo, las dudas o incertidumbres que generan los resultados mediante el uso de los ensayos no destructivos ha limitado, en cierta manera, su uso con mayor frecuencia.

A lo largo de los últimos 50 años se han venido implementado investigaciones referentes al comportamiento de las características del hormigón mediante el uso de pruebas no destructivas, con lo cual se pretende evaluar la

calidad del mismo. El procedimiento fue desarrollado en Canadá (Malhotra y Carino 2004 [3]) y se implementó con gran éxito desde la década de los 60 con el objeto de evaluar y ejercer un diagnóstico sobre el estado del hormigón utilizado en presas. Malhotra [4] publicó, en el año de 1985, un juicio de aceptación del hormigón hidráulico sobre la base de la medición de la velocidad ultrasónica, Sturup et al. 1984, Anderson y Seals 1981, realizaron investigaciones y estudios de correlación con el fin de alcanzar modelos con los cuales se permita predecir o estimar la resistencia a la compresión del hormigón basado en la velocidad ultrasónica, G. Castellanos, 1985, estudió la correlación entre la velocidad ultrasónica y la resistencia a la compresión en hormigones con propiedades físicas promedio, Solís y Baeza [5], obtuvieron una curva de regresión exponencial con buena correlación para hormigones preparados con seis diferentes muestras de agregados calizos triturados (similares a los usados en Venezuela). Aunque hay información referente al estudio de ultrasonido en hormigón, para el caso de fibras es escasa y no se presentan criterios para el control de calidad en obra o para evaluación de la homogeneidad de material mediante esta técnica.

Con el propósito de establecer un procedimiento para la estimación de la calidad del hormigón reforzado con fibra de polipropileno, se implementa como método de evaluación la utilización de técnicas de ultrasonido, describiendo los parámetros técnicos, requisitos de equipos, y criterios de aceptación y rechazo a un elemento de acuerdo a las normas y especificaciones existentes. Así mismo, este trabajo trata de conjugar la recopilación de los resultados obtenidos de

diferentes investigaciones con la experiencia y datos recogidos durante la realización de la campaña experimental, que permitan determinar el modelo probabilístico que caracteriza al hormigón con adición de fibras de polipropileno, a través de correlaciones de los resultados obtenidos con los hormigones tradicionales a través de los ensayos de ultrasonidos.

## 2. Metodología.

El modelo experimental diseñado, para probar las hipótesis de partida, consistió en una población de hormigón premezclado con una resistencia a la compresión de  $f_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ , variando la cantidad de fibra añadida en la muestras (0, 4, 5, 6, 7 y 8  $\text{Kg/m}^3$ ) y manteniendo constante la relación a/c y la dosificación de los agregados.

Para el desarrollo de la parte experimental se ensayaron un total de 35 especímenes, (elaboradas en fecha 27/03/2014) de los cuales 17 correspondían a elementos con geometría rectangular de 10x10x35 cm, denominadas probetas y 18 elementos con la misma geometría, pero con dimensiones de 15x15x45 cm, denominadas viguetas, esta geometría permite obtener elementos aislados y sencillos, en los que se puede aplicar la técnica de ultrasonido de manera sencilla (ver Tabla 1).

Los criterios de selección de las fibras se rigieron por la resistencia, ductilidad, tenacidad y por la trabajabilidad necesaria de la mezcla de acuerdo a las recomendaciones establecidas por el fabricante, cumpliendo con las propiedades físicas y mecánicas, por lo que se optó por una fibra multifilamento con la especificación que se indican en la Tabla 2.

Tabla 1. Número de Muestras según tipo de Ensayo y Dosificación en Hormigones con Fibras.

Tipo de Muestra	0 Kg/m <sup>3</sup> (Patrón)	4 Kg/m <sup>3</sup>	5 Kg/m <sup>3</sup>	6 Kg/m <sup>3</sup>	7 Kg/m <sup>3</sup>	8 Kg/m <sup>3</sup>
15x15x45 (Vigueta)	3	3	3	3	3	3
10x10x35 (Probeta)	3	3	2	3	3	2
Total	6	6	5	6	6	5
Denominación	Pre-Tox-000	Pre-Tox-004	Pre-Tox-005	Pre-Tox-006	Pre-Tox-007	Pre-Tox-008

Tabla 2. Características Fibra de Polipropileno Toxement - TOC-FIBRA 500.

Nombre	Características
<b>Características Físico-Químicas.</b>	
Material.	100% Polipropileno virgen.
Gravedad específica (g/m <sup>3</sup> ).	0.91 g/m <sup>3</sup> (ASTM D – 1505).
Índice de fluidez.	0.3 g/seg (ASTM D – 1238).
Resistencia química a bases y agentes Oxidantes.	Resistente a los rayos ultravioleta. Inerte a los álcalis del cemento ácidos agua de mar, aceites vegetales, resistente a hongos y bacterias. ASTM C -116.
<b>Características Mecánicas.</b>	
Módulo de Elasticidad (Kg/cm <sup>2</sup> ).	0.7x10 <sup>6</sup> psi.
Resistencia a la tracción (Kg/cm <sup>2</sup> ).	70,000 psi.
Resistencia a la tensión (Kg/cm <sup>2</sup> ).	70,000 psi.
Elongación hasta el rompimiento.	8% mínimo.
Resistencia a la abrasión.	Buena.

Para la determinación de la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) se evaluaron las probetas rectangulares de 10x10x35 cm y las viguetas rectangulares de 15x15x45 cm, midiendo el tiempo de propagación de ondas ultrasónicas con el equipo PUNDIT Lab (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Tester) en cada uno de los especímenes.

El procedimiento experimental consistió en la medición del tiempo de propagación del ultrasonido en los distintos especímenes siguiendo las normativas vigentes: “Método de Ensayo para Determinar la Velocidad de Propagación de Ondas en el Concreto” Norma COVENIN N° 1681-80 y “Método de Ensayo

para la Velocidad de Pulso en el Concreto” ASTM C-597-02. Con el valor del tiempo obtenido se calcula la velocidad de propagación del ultrasonido en el material.

Dado que el camino acústico que recorre la onda es uno de los datos necesarios para realizar la estimación de velocidad de la onda ultrasónica longitudinal, se tomaron las medidas del espesor en distintos puntos de los especímenes, de acuerdo al método utilizado (Directo, Semidirecto, Indirecto), para evitar errores por imperfecciones en el proceso de fabricación, considerando un intervalo de confianza menor al 0.02 mm para las referidas mediciones.

Para el Método Directo, se colocaron los transductores separados por el espesor (caras "A" y "B", Figura 1) del espécimen, alineados entre sí con el fin de garantizar propagación de la onda longitudinal y obtener los valores del tiempo.

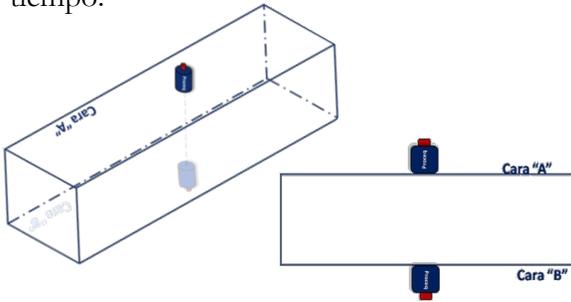


Figura 1. Colocación de los transductores -Método Directo-.

Método Indirecto o Superficial, se colocó el transmisor en un punto elegido (punto 1) y el receptor sobre los puntos sucesivos a lo largo de una misma línea de los especímenes, separadas a diferentes distancias (Figura 2).

Para este método se evaluaron dos arreglos para determinar el valor del tiempo: un primer arreglo modificando las distancias de forma manual y otro a través de mediciones realizadas directamente por la función de medición compuesta.

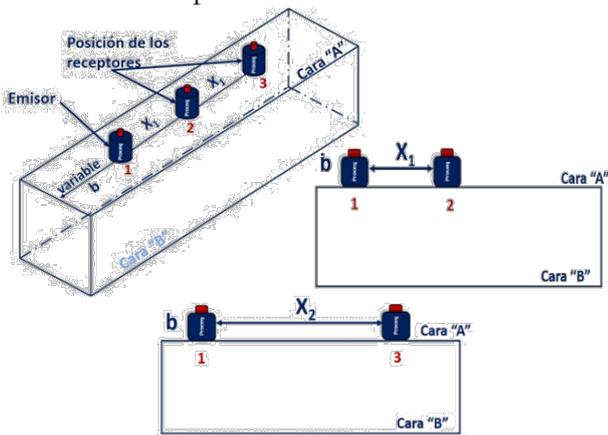


Figura 2. Colocación de los transductores -Método Indirecto-.

Método Semidirecto, se colocaron los transductores en superficies contiguas (cara "A" y uno de los frentes) del espécimen separados a diferentes distancias a lo largo de la longitud de la pieza, la distancia del recorrido será la

diagonal entre los transductores (Figura 3). Inicialmente esta distancia fue de 0.5 m. (formando un ángulo de 45° entre las caras contiguas) y posteriormente se fue separando diferentes distancias para obtener el tiempo transcurrido por medición.

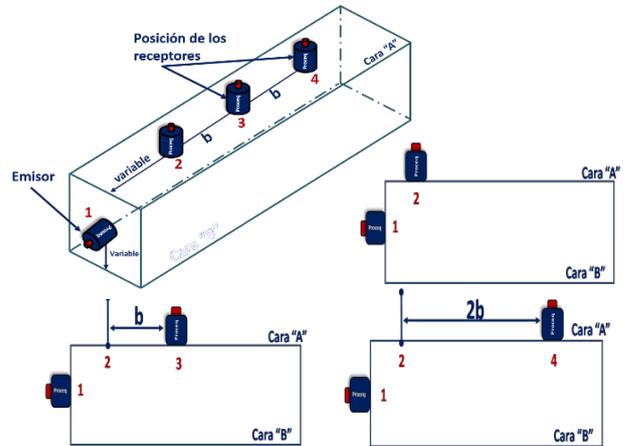


Figura 3. Colocación de los transductores -Método Semidirecto-.

De acuerdo con los resultados obtenidos para las velocidades de pulsos en los diferentes métodos de medición se presentan gráficas, donde se evidencia como la cantidad de fibra influencia la velocidad de pulso ultrasónico, en la medida que se incrementa la cantidad de fibra añadida el valor de la velocidad de pulso ultrasónico disminuye, Figura 4. Los valores de VPU tienen una variación sumamente pequeña entre especímenes de diferentes tamaños (probetas y viguetas).

### 3. Resultados y Discusiones.

De acuerdo con los resultados obtenidos para las velocidades de pulsos en los diferentes métodos de medición se presentan gráficas donde se evidencia como la cantidad de fibra influencia la velocidad de pulso ultrasónico, en la medida que se incrementa la cantidad de fibra añadida el valor de la velocidad de pulso ultrasónico disminuye, Figura 4. Los valores de VPU tienen una variación sumamente pequeña entre especímenes de diferentes tamaños.

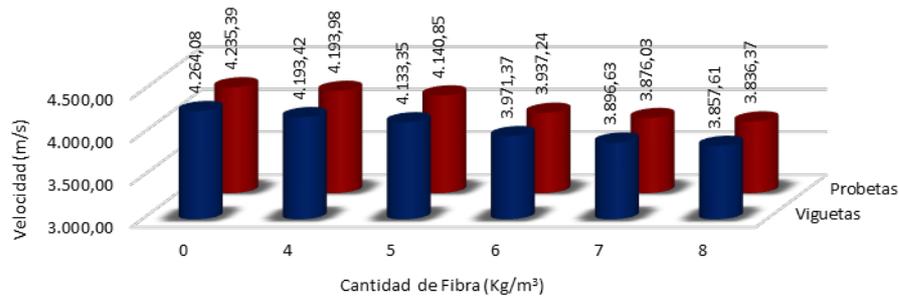


Figura 4. Comparación entre  $V_{patrón}$  Vs.  $V_{i-fibras}$ , -viguetas y probetas- Método Directo.

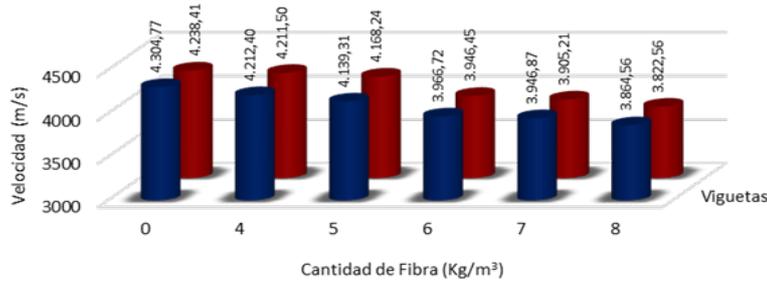


Figura 5. Comparación entre  $V_{patrón}$  Vs.  $V_{i-fibras}$ , - viguetas y probetas- Método Semidirecto.

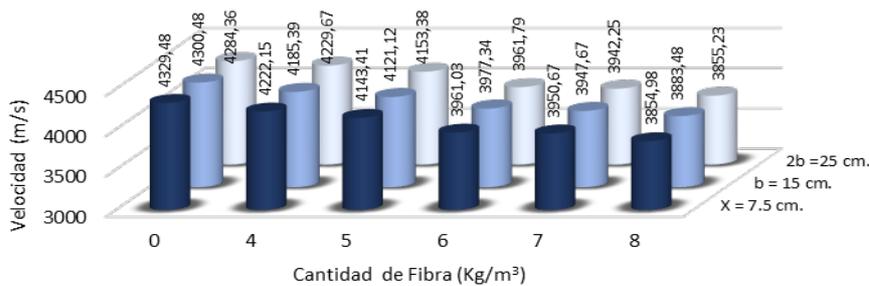


Figura 6. Comparación entre  $V_{patrón}$  Vs.  $V_{i-fibras}$ , Método Semidirecto con variación en las eparación (viguetas).

El método semidirecto presenta el mismo comportamiento que el método directo, Figura 5. Comparando los valores obtenidos para el método semidirecto se aprecia que

indistintamente donde se ubiquen los transductores la variación de la VPU es insignificante, Figura 6.

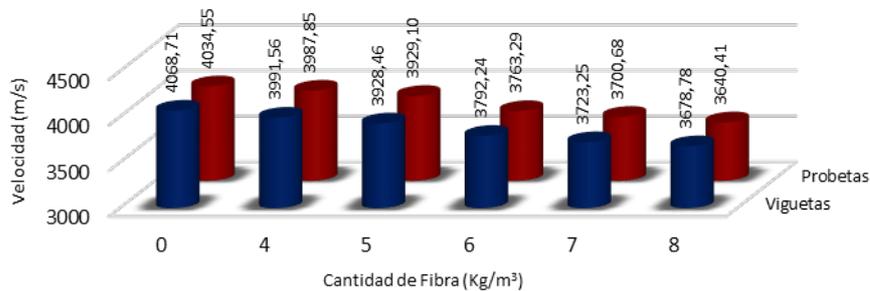


Figura 7. Comparación entre  $V_{patrón}$  Vs.  $V_{i-fibras}$ , -viguetas y probetas- Método Indirecto.

Como se puede apreciar en las figuras anteriores, la correlación entre las velocidades de pulso ultrasónico obtenidos para los especímenes (viguetas y probetas), entre el

método indirecto y el método directo presenta una relación de 0.99, mientras que para la correlación entre el método semidirecto y el directo presenta una relación de 1.05, lo cual

conlleva a establecer las siguientes expresiones  $V_D = V_{SD}$  y  $V_D = 1.05 V_I$ .

Se realizó un análisis de regresión que incluyó la población total de hormigones estudiados para los 6 grupos que fueron producto de la variación en la dosificación de fibra añadida manteniendo constante el resto de los componentes que conforman la muestra. Los modelos de aproximación que se probaron para efectuar el ajuste analítico de los datos experimentales se muestran a continuación con sus respectivas ecuaciones representativas:

- Modelo Lineal:  $V_D = a * V + b$ .
- Modelo Exponencial:  $V_D = a * e^{b*V}$ .
- Modelo Logarítmico:  $V_D = a * Ln(V) + b$ .

- Modelo Cuadrático:  $V_D = a + bV + c * V^2$ .

En donde:

$V_D$  = Velocidad de pulso ultrasónico obtenido a través del método directo.

$V$  = Velocidad de pulso ultrasónico obtenido a través de los métodos indirecto y semidirecto.

a, b, c y d = coeficientes de la ecuación.

Los gráficos mostrados (figuras 8 y 9) son el producto de la combinación de los resultados obtenidos de los especímenes donde los valores de VPU son tomados a través del método directo en comparación con los métodos indirecto y semidirecto en especímenes con diferentes cantidades de fibras.

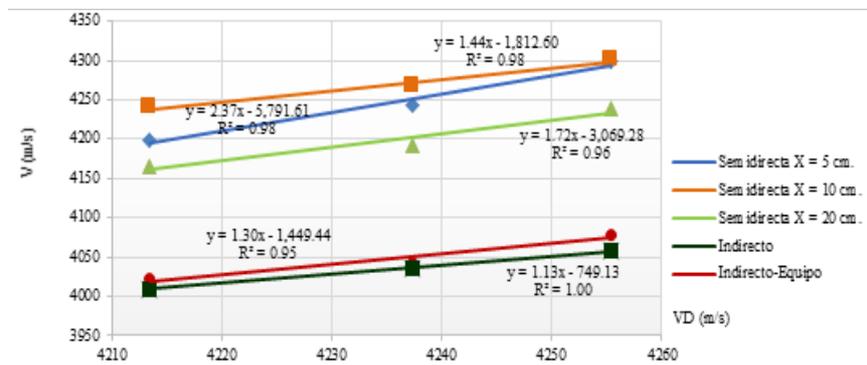


Figura 8. Correlación línea entre  $V_D$  Vs  $V_{SD}$ ,  $V_I$  y  $V_{I-Equipo}$  (sin fibras).

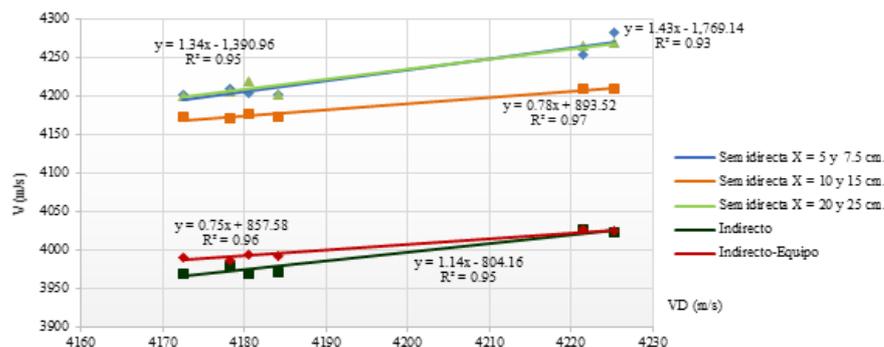


Figura 9. Correlación línea entre  $V_D$  Vs  $V_{SD}$ ,  $V_I$  y  $V_{I-Equipo}$  (4% fibras).

Tomando el Coeficiente de Determinación o Coeficiente de Pearson  $R^2$ , como criterio para juzgar el nivel de ajuste de los diferentes modelos matemáticos y para un nivel de confianza del 95% se encontró que las curvas de aproximación más representativas para la relación de las variables estudiadas fue el modelo cuadrático (polinomio de 2<sup>do</sup> orden).

Sin embargo, el ajuste lineal también presenta una fuerte dependencia ( $R$  varía entre 0.96 a 0.99), por lo que se puede asumir que este modelo tiene una buena aproximación entre los valores de VPU obtenido por el método de medición directo en correlación con los métodos de medición semidirecto e indirecto y es una formulación matemática más sencilla.

#### 4. Resultados y Discusiones.

Con base en los análisis de los resultados, se pudo evidenciar que para los casos de estudio con la misma relación a/c las mezclas que presentan un mejor comportamiento son aquellos especímenes que contiene entre 4 y 5% de fibra de polipropileno ya que no se aprecia una variación significativa en relación con la muestra patrón, lo que permite inferir que este tipo de fibra proporciona muy buenas propiedades a las mezclas de hormigón obteniéndose la misma calidad y homogeneidad que los especímenes sin fibras.

La relación obtenida entre la VPU de las viguetas versus las probetas es de aproximadamente 0.99 lo que infiere que la VPU es independiente de las dimensiones y geometría de los especímenes, confirmando así lo establecido por diferentes autores que señalan que los valores de velocidad dependen únicamente de las propiedades del material en el rango de dimensiones admisibles del equipo. De acuerdo a uno de los criterios de aceptación de muestras se puede establecer que los especímenes con diferentes porcentajes de fibras corresponden a muestras uniformes ya que cumplen con la relación  $V_i \geq 0.90V_{\text{patrón}}$ .

Con base en los resultados obtenidos de la medición de la VPU a través de los diferentes métodos de medición se puede establecer que la correlación entre las VPU obtenidas por el método directo ( $V_D$ ) y los métodos indirecto ( $V_I$  y  $V_{I\text{-equip}}$ ) se relacionan a través de la propuestas  $V_D = 1,05V_I$ , mientras que la relación entre el método directo ( $V_D$ ) y el método semidirecto ( $V_{SD}$ ) es  $V_D = V_{SD}$ . Un aspecto a destacar es que a través de esta campaña experimental, indistintamente de los tipos de mezclas utilizados se cumple con los requerimientos de relación entre  $V_D$  y  $V_I$  que están reglamentados según la norma UNE-EN: 12504-4.

Aunque la mejor representación de correlación corresponde al ajuste polinómico,

los valores de correlación obtenidos para el ajuste lineal también representa una excelente dependencia, por lo que se recomienda este tipo de ajuste por presentar una formulación matemática más sencilla al momento de cualquier análisis.

Finalmente, se puede establecer que para el caso estudiado (hormigón con fibras) se pueden seguir los lineamientos generales para inspección y seguimiento de calidad en obra mediante este ensayo no destructivo.

#### *Agradecimientos.*

Quiero mostrar especial agradecimiento al Ing. Miguel Castillejo, Director de la Escuela de Petróleos de la Universidad Central de Venezuela, así como al personal de la Nave de Ensayos del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) de la Universidad Central de Venezuela.

#### *Referencias.*

- [1] Malhotra, V.M. y Carino, N.J. (2004). Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, Boca Ratón, Florida USA: Edit CRC Press. 455 p.
- [2] Malhotra, V.M. (1985). Nondestructive Methods for Testing Concrete. Ottawa, Canada: Department of Energy, Mines and Resources. 385 p.
- [3] Norma Venezolana COVENIN 1681-80. Método de Ensayo para Determinar la Velocidad de Propagación de Ondas en el concreto.
- [4] Porrero J. y otros (2004). Manual del Concreto Estructural Conforme con la Norma COVENIN 1753:03, Caracas: SIDETUR, 503 p.
- [5]. Solís, C. y Baeza, J. (2003). Influencia de la Propiedades Físicas de los Agregados en la Técnica de Pulso Ultrasónico para Predecir la Resistencia a la Compresión del Concreto. Rev. Téc. Ing. Universidad del Zulia. Vol. 26, No, 1, 45-55 p.