

CARACTERIZACIÓN DE DISTINTOS TIPOS Y CLASES DE HORMIGONES MEDIANTE ENSAYOS DE ULTRASONIDO

Ing. Julio Cesar Tomás¹, Prof. Esp. Ing. Fernando J. Arrayago¹
1 UTN Facultad Regional General Pacheco, Tigre, Buenos Aires, Argentina,
tcesar@docentes.frgp.utn.edu.ar, farrayago@docentes.frgp.utn.edu.ar

RESUMEN

La falta de actualización de la base estadística sobre diferentes tipos y clases de hormigones en nuestro país se constituye en el principal obstáculo para la caracterización mediante END. En la etapa actual del proyecto de investigación y desarrollo se propuso sumar al valor obtenido del ensayo de compresión simple un análisis previo por ultrasonido para los hormigones de uso habitual en las obras de la zona norte del Area Metropolitana Buenos Aires que fueron elaborados con materiales locales por proveedores zonales, enviados a su destino, donde se toman las muestras y se envían al laboratorio de nuestra facultad regional. En este trabajo se presentan los resultados de los ensayos realizados en laboratorio sobre probetas cilíndricas 15x30 con su posterior análisis de datos, donde se demuestra que el método por ultrasonido aporta información valiosa para complementar el control de recepción y correlacionar con la calidad del hormigón ejecutado en obra.

Palabras claves: impedancia acústica, ultrasonido, resistencia del hormigón.

INTRODUCCIÓN

En este proyecto se propone desarrollar y validar un método para caracterizar y evaluar las estructuras de hormigón armado y pretensado utilizando técnicas de ensayos no destructivos. El actual reglamento CIRSOC 2001-2005 solo considera los END para la ubicación de armaduras, pero no para caracterizar la calidad del hormigón, sin embargo, en la reciente publicación de la norma UNE-EN 13791:2020 se considera a los END como herramienta de apoyo, contemplando la posibilidad de que si se realiza un análisis previo utilizando END, se puede disminuir la cantidad de testigos a extraer de la estructura en estudio.

Los END, en estructuras de hormigón constituyen una herramienta muy potente si se abordan de una manera conjunta entre varios tipos y modos de ensayos de manera de aprovechar la sinergia de un grupo de datos recolectados, tales como, la velocidad de la onda ultrasónica, la resistividad, el índice de rebote, la carbonatación y la permeabilidad al aire. Mientras no se pueda disminuir la incertidumbre de los resultados de END, estos deberán ser acompañados, por una cantidad mínima de valores de ensayo destructivos, hasta que podamos ampliar la base estadística de los END.

En la actualidad el análisis por ultrasonido de estructuras in situ, se limita a la búsqueda de oquedades y/o delaminaciones, pero se desestima el método al abordar la investigación de la resistencia del hormigón por la falta de control de las variables que influyen el resultado, debido a la dificultad de poder realizar las tareas necesarias para poder obtener valores

confiables, y además ante la ausencia de una normalización actualizada de dichas influencias sobre los valores obtenidos.

La velocidad del pulso ultrasónico, es una técnica comparativa que se basa en el análisis del paso, por la matriz del material, de ondas acústicas de idéntica naturaleza (mecánica - elásticas) que las ondas sónicas y se caracterizan además, por operar con frecuencias por encima de la zona audible $F > 20$ kHz, se trata de tomar el tiempo que tarda la onda entre el transductor emisor y el receptor, así como también estudiar la forma de la onda generada. Estas ondas son denominadas longitudinales o de compresión, ya que son aquellas en que las oscilaciones de las partículas ocurren en la dirección de propagación de la onda. La forma de la onda de propagación es indicación de lo que sucede en la matriz del material, por lo general en un hormigón sano la forma resultante es de forma armónica atenuada, en el presente trabajo no se analizan las ondas generadas.

La mayor energía se propaga en ángulo recto respecto a la superficie del palpador emisor, ondas de compresión, es decir que podríamos detectar impulsos que se propagan a través de la matriz del material en cualquier otra dirección [1]. En los trabajos de campo no siempre es posible realizar mediciones colocando el receptor de manera ideal. Es por esto que se establecen tres formas de realizar mediciones en estructuras de hormigón: *Directa*: El emisor y el receptor se ubican a cada lado del elemento analizado, de modo tal que conozcamos la distancia entre ellos, esta sería la forma ideal ya que el palpador receptor está ubicado de manera paralela al emisor, de modo de “escuchar” en el sentido de la mayor propagación de energía, por ejemplo para una losa con acceso de ambos lados, de igual manera para un tabique o una columna. *Semidirecta*: Utilizada, donde el emisor y el receptor están ubicados en caras adyacentes, por ejemplo para una columna de esquina. *Superficial o indirecta*: Es cuando el emisor y el receptor están colocados en la misma cara del elemento.

Cuando realizamos investigaciones en estructuras existentes, se busca recolectar la mayor cantidad de datos posibles para aprovecharlos en la etapa de análisis y la posterior toma de decisiones. El resultado de la velocidad del pulso es influenciado por factores que deben ser considerados según su grado de relevancia. Existen factores del material como: tamaño de agregado, grado de madurez, densidad, grado de compactación, continuidad del esqueleto granular, estado de tensión y factores de la pieza evaluada como: forma, tamaño, temperatura, longitud de la trayectoria y contenido de humedad.

La normativa argentina respecto a determinación de la velocidad del pulso ultrasónico, IRAM 1683[2], fue actualizada por última vez en 1990 y el reglamento CIRSOC 201-2005 no la tiene contemplada, por lo que la responsabilidad de usar la normativa recae sobre el profesional interviniente.

Desde el laboratorio de hormigón de nuestra facultad (UTN FRGP), el cual pertenece a la red INTI-SAC, se realizan servicios a terceros de ensayo a compresión simple según la norma IRAM 1546. Desde el año 2019 se tomó la decisión de ampliar los alcances del laboratorio hacia los END, comenzando por el ensayo de determinación de la velocidad del pulso ultrasónico según la norma ASTM C597 [3].

Este trabajo de investigación es el primero de un proyecto, promovido desde la cátedra de tecnología del hormigón, junto al laboratorio de hormigón, en el que tiene como objetivo general la formulación de un método de caracterización y evaluación de estructuras de hormigón mediante ensayos no destructivos, iniciando con la técnica UPV (Velocidad del Pulso Ultrasónico) con equipos de última generación.

Equipo utilizado

Se utilizó un equipo con las siguientes características, figura 1:

Marca: CONTROLS

Modelo: PULSONIC Pulse Analyzer 58 - E4900

Palpadores: 30 mm de diámetro - Frecuencia: 50 kHz.

Resolución: 0.1 μ s

Selección de pulso: 1, 2, 5 por segundo.

Gate: 0, 6, 14, 20, 26, 34, 40 dB

METODOLOGÍA

Dentro del marco de dicho alcance se comenzó a realizar el ensayo de ultrasonido a todas las probetas cilíndricas 15x30 y 10x20 recibidas en el laboratorio, de estas muestras se utilizaban las que estaban listas para el ensayo, a compresión, el día de su recepción. Como es de esperar se examinan un gran espectro de clases de hormigón y cantidades. Todas las probetas son de obras localizadas en los partidos de la zona norte del Area Metropolitana Buenos Aires y todos los hormigones evaluados fueron categorizados como convencionales.

A cada probeta se le tomaban los datos correspondientes al procedimiento de ensayo (diámetro, altura), aserrado de cara superior, y se le sumaban los datos necesarios para el ensayo de ultrasonido, Tabla 1.

Tabla 1: Datos a tomar de la muestra a ensayar

Altura	4 determinaciones	[mm]
Diámetro	2 determinaciones	[mm]
Peso	1 determinación	[kg]
Humedad superficial	1 cara superior y 1 en cara inferior	[%]
Temperatura	Superficial con termómetro laser	[°C]

Los ensayos se realizaron en ambiente controlado de laboratorio, según normas IRAM 1546, IRAM 1709 y ASTM C597. La humedad superficial fue obtenida con un higrómetro marca TRAMEX CimexPert II y, a los efectos de verificar de no tener lecturas distorsionadas por las variaciones de la temperatura, 21 ± 2 °C, la misma fue tomada con un termómetro laser marca KIMO-Kiray 100. Todas las probetas seleccionadas para realizar el ensayo ultrasónico fueron aserradas en su cara superior, para garantizar un buen apoyo del transductor.

Una vez ensayada la muestra a compresión, se analizaron los restos para determinar el tamaño máximo de agregado, verificando que todas hayan sido fabricadas con piedra partida granítica, y/o algún componente externo que alterase la lectura. Como no disponíamos de los datos de dosificación, ni de curado de cada hormigón, se realizó una agrupación según resultados de ensayo a compresión, densidad, tamaño de probeta, tamaño de agregado.

Se descartaron todos los valores de probetas que resultaren sospechosos del procedimiento de compactación, que no cumplieran la tolerancia dimensional, y las tipologías de roturas especificadas en la norma IRAM 1546. El rango de edad del hormigón evaluado

en todas las muestras ensayadas se encontraba entre los 28 y 32 días, por lo que no generó un motivo de agrupación.

Como acoplante se utilizó vaselina sólida provista por el fabricante del equipo ultrasónico, los parámetros de ensayo del equipo se fijaron en:

Decibeles: 0
Frecuencia de repetición de pulso (FRP): 2 Hz
Método: AIC [4]

Ensayo

Las lecturas de ultrasonido se realizaron siempre por el mismo operador, quien mantenía la presión justa hasta que la capa del acoplante se reducía al mínimo y la lectura de tiempo se mantenía constante. El equipo se calibraba todos los días a ser utilizado, con la barra de calibración provista por el fabricante, antes de comenzar y después de terminar, según la cantidad de muestras evaluadas. Todas las lecturas fueron realizadas en modo directo, es decir con el palpador emisor colocado en la cara superior, y en la base de la probeta el palpador receptor, ambos en el centro del círculo, asegurando así la distancia recorrida, Figura 1.

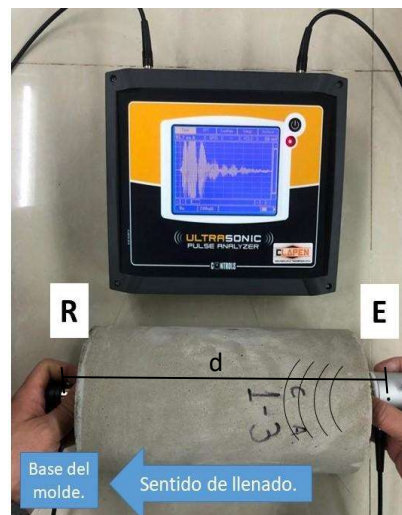


Figura 1: Equipo utilizado y esquema de ensayo.

Se realizaron correlaciones de datos obtenidos directamente e indirectamente como la impedancia acústica, que indica cuanto se opone a la vibración los elementos de masa, pero no a la propagación de la onda.

De cada una de las probetas se realizaron las siguientes determinaciones:

$$\begin{aligned} Z &= \delta \cdot C & (1) \\ \lambda &= C/F & (2) \\ C &= d/t & (3) \\ \delta &= p/v & (4) \\ f &= K/A & (5) \end{aligned}$$

(1) Impedancia acústica en $[t/sm^2]$

(2) Longitud de onda en $[cm]$

(3) Velocidad del pulso en $[m/s]$

(4) Densidad en $[\text{kg}/\text{m}^3]$

(5) Resistencia en $[\text{MPa}]$, carga K en KN y área, A, en mm^2

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS

Con los valores de ensayo recolectados se formó una base de datos según el tamaño de las probetas ensayadas, que en función de los servicios realizados y los criterios de descarte, al momento de la redacción de este trabajo constaba de 100 valores, probetas $15 \times 30 \text{ cm}$, en base a los cuales se desarrollan los análisis, gráficos y conclusiones.

En la Figura 2 se observa el gráfico velocidad-resistencia, la correlación es lineal y se considera aceptable por pasar el valor $R^2 > 0,8$.

En la Figura 3 se visualiza el histograma de resultados de ensayo de resistencia de compresión, donde se aprecia el rango de valores obtenidos.

La Figura 4 expresa la correspondencia de la velocidad-densidad, en la que se observa que para los mismos datos no se produce una buena correlación, con un $R^2 = 0,58$.

La Figura 5 es la relación de la impedancia con la resistencia, la que tuvo un comportamiento estadístico apropiado.

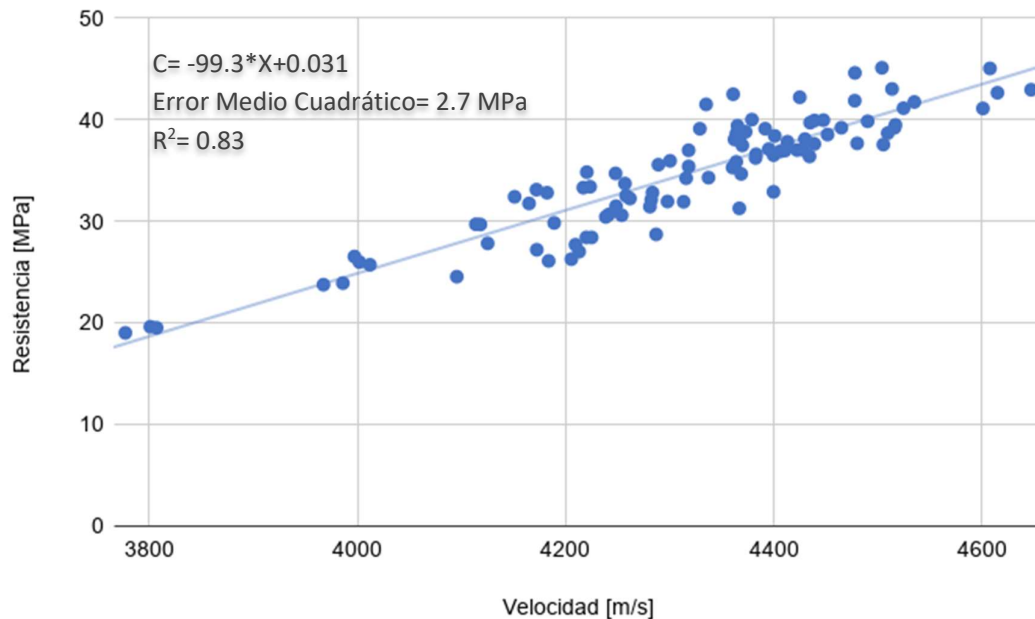


Figura 2: Gráfico de correlación velocidad - resistencia.

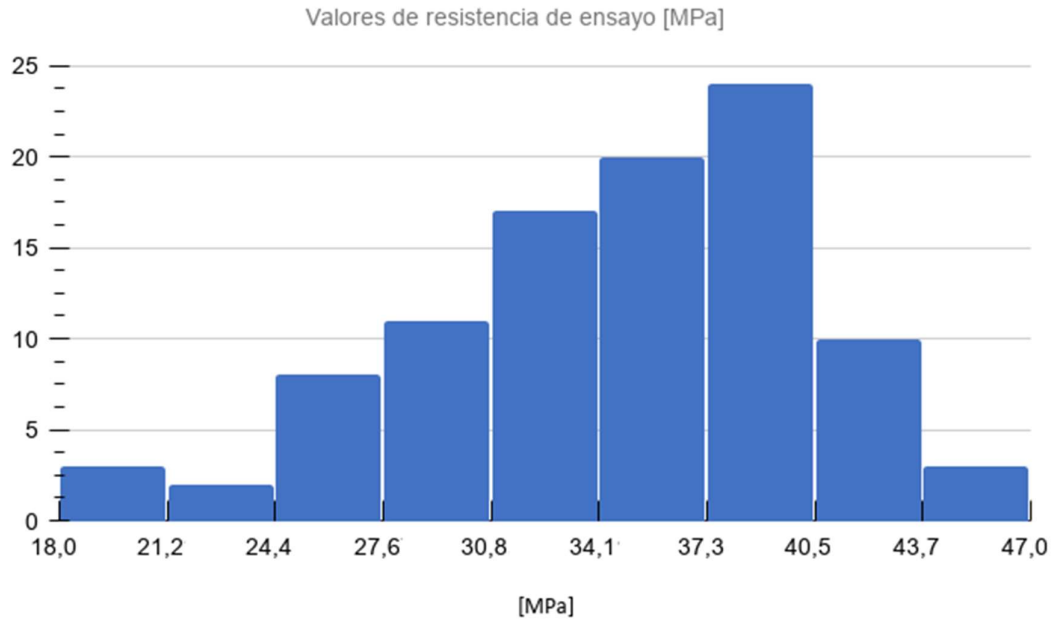


Figura 3: Histograma de los resultados de resistencia.

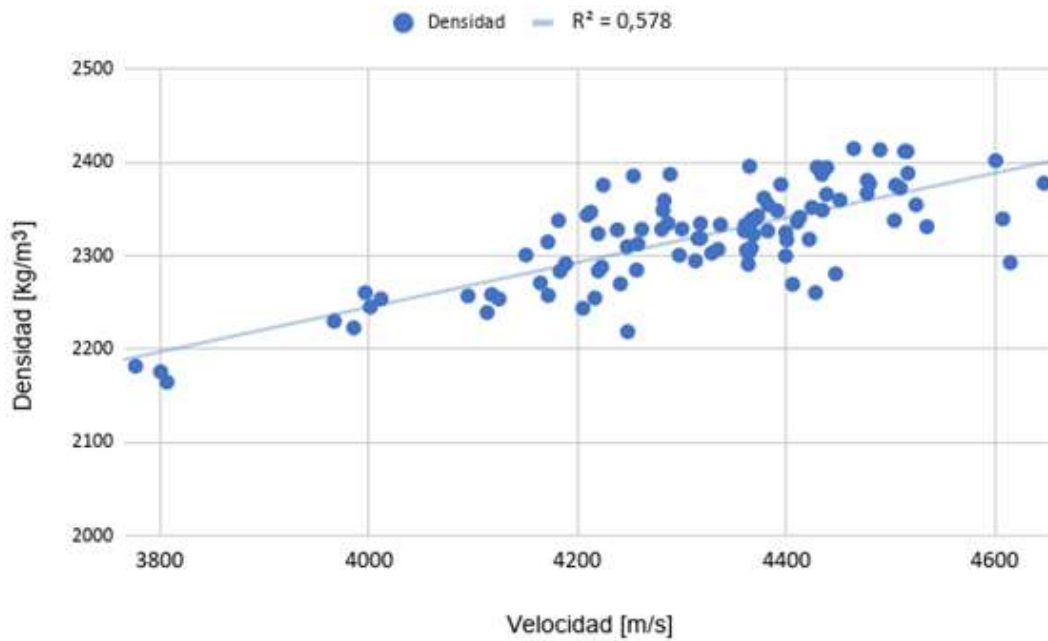


Figura 4: Gráfico velocidad-densidad.

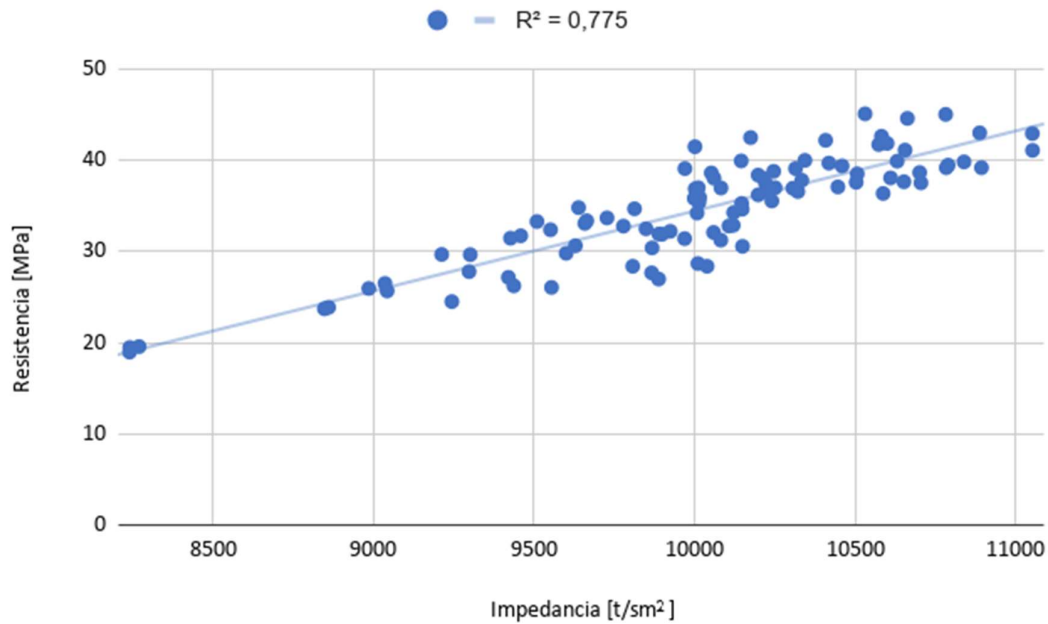


Figura 5: Gráfico Impedancia-Resistencia.

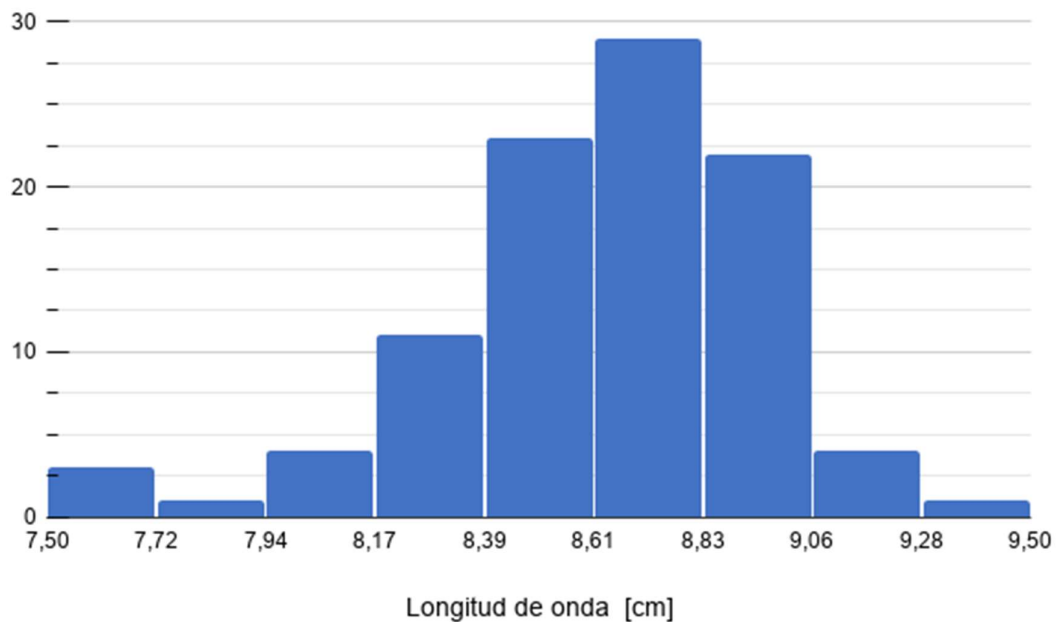


Figura 6: Histograma de los valores de longitud de onda [cm].

En la Figura 6 se observa el histograma de longitud de onda, según la frecuencia utilizada, 50 KHz, y las dimensiones de las muestras analizadas, probetas 15x30 cm. Todos los valores de longitud de onda obtenidos (2) son compatibles con la bibliografía [5].

Los valores de humedad superficial de las probetas estuvieron en un rango de entre 1 % y 3 %, lo cual, según la bibliografía [6] no generó un motivo de alteración de los valores. Todas las probetas ensayadas poseían agregados de tamaño máximo 19 mm, es por eso

que no se generó una agrupación particular por tamaño de agregado, este dato fue verificado con la información suministrada por los clientes y los remitos correspondientes.

CONCLUSIONES

- Se incorpora como ensayo de rutina la toma del tiempo de ultrasonido, previos al ensayo de rotura, en las probetas 15x30 cm, ya que los datos recolectados son correlacionales.
- La correlación velocidad - resistencia demostró una buena performance con un R^2 aceptable, pero resulta necesario aumentar la base estadística de hormigones mayores a clase H25.
- La relación de la resistencia - impedancia/densidad tuvo un comportamiento deficiente pero como ambas propiedades son función de la porosidad y compactación, se aumentará la base estadística para continuar el conocimiento de la correlación.
- Se aumentará la base estadística hasta asegurar la mejor fidelidad de la correlación en lo que respecta a la relación de la velocidad - resistencia.
- Se comenzará el estudio en hormigones de dosificaciones empíricas, ya que es necesario para estructuras existentes de más de 30 años de antigüedad, debido a que estos tienen velocidades menores a los 3800 m/s.
- Resulta necesario comenzar a correlacionar con valores de testigos y ensayos de campo, complementados con valores de I_r , resistividad y escaneos tomográficos.

REFERENCIAS

- [1] Brascetta J, "Curso de ultrasonido nivel 1", UTN FRD Grupo de Ensayos No Destructivos, OCA-UTN-FRD.
- [2] IRAM 1683, "Hormigón de cemento portland. Método para la determinación de la velocidad de pulsos ultrasónicos".
- [3] ASTM C597-16, "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete".
- [4] Malhotra VM, "Handbook on nondestructive testing of concrete", Kindle, CRC Press, p330
- [5] "Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures: 2 (Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering), Kindle, Elsevier Science.
- [6] Alexandre L, Francisco T, Da Silva Filho L, "Ultrasonic pulse velocity analysis in concrete specimens" Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais, UFRGS Porto Alegre, Rio Grande do Sul, CEP 90035-190, Brazil.