

## ANÁLISIS NUMÉRICO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN ENDURECIDO MEDIANTE ULTRASONIDOS

### NUMERICAL ANALYSIS OF THE HARDENED CONCRETE BY ULTRASONIC PULSE VELOCITY MEASUREMENTS

**Bernardo R. Soria<sup>b,c</sup> y Sonia M. Vrech<sup>a,b</sup>**

<sup>a</sup>*CONICET, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina*

<sup>b</sup>*CEMNCI, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán,  
Argentina*

<sup>c</sup>*Facultad Regional Tucumán, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina*

**Palabras clave:** Hormigón, propiedades mecánicas, ultrasonidos.

**Resumen.** En este trabajo se presenta el proyecto de fabricación de un dispositivo que integra un equipo de medición de pulsos ultrasónicos y elementos electrónicos para el cálculo indirecto de los parámetros elásticos: módulo de Young y coeficiente de Poisson, y de las propiedades mecánicas: resistencia a compresión y a tracción uniaxiales, mediante el análisis numérico de mediciones de la velocidad de una onda de 50 KHz a través de los elementos del hormigón endurecido (probetas, vigas, columnas, etc). Mediante la programación en C++ del microcontrolador se realizarán los cálculos de los parámetros elásticos y propiedades mecánicas con funciones de aproximación propuestas para tal fin. La calibración del equipamiento se realizará a partir de una serie de ensayos de laboratorio desarrollados en el marco de esta investigación.

**Keywords:** Concrete, mechanical properties, ultrasonic pulse.

**Abstract.** This work presents the manufacturing project of a device that integrates ultrasonic pulse measurement equipment and electronic elements for the indirect calculation of elastic parameters: Young modulus and Poisson coefficient and mechanical properties: uniaxial compression and tensile strengths, by means of the numerical analysis of measurements of a 50 KHz wave speed through hardened concrete elements (specimens, beams, columns, etc). Using the C++ programming of the microcontroller, calculations of the elastic parameters and mechanical properties will be made by approximation functions proposed for this purpose. The calibration of the equipment will be carried out based on a series of laboratory tests performed in the framework of this investigation.

## 1 INTRODUCCIÓN

Con el objeto de asegurar la seguridad de las estructuras de hormigón, resulta de vital importancia conocer los valores de sus propiedades elásticas y mecánicas mediante procedimientos no destructivos de fácil aplicación y suficiente precisión.

Un procedimiento medianamente difundido en nuestro país es la medición de la velocidad de pulsos ultrasónicos a través de la masa del hormigón para la posterior inferencia de su resistencia a compresión uniaxial y en ciertos casos, sus parámetros elásticos.

Numerosas relaciones numéricas entre la resistencia a la compresión uniaxial y valores de mediciones de velocidades de pulso ultrasónico han sido propuestas en la literatura, entre las que se destacan las pertenecientes a [Del Río et al. \(2004\)](#) y [Bogas et al. \(2013\)](#).

Otras relacionan la porosidad con la velocidad el pulso ultrasónico, ver [Yaman et al. \(2002\)](#) y [Lafhaj et al. \(2006\)](#), y establecen además su relación con otras propiedades como la relación agua/cemento, el grado de hidratación del cemento, el volumen de aire atrapado y las cantidades de agregados finos y gruesos y del cemento, ver [Neville y Brooks \(1998\)](#). Si bien la porosidad es uno de los principales factores que influyen en la resistencia y durabilidad del hormigón ([Hincapie y Montoya \(2005\)](#), [Mehta y Monteiro \(1998\)](#)), es dificultosa su medición e implica la realización de ensayos de laboratorio o la aplicación de equipamientos costosos de difícil acceso.

En este trabajo se propone la fabricación de un equipamiento basado en el desarrollo de funciones de aproximación para el cálculo de las resistencias uniaxiales a compresión y tracción, como así también del módulo de Young y del coeficiente de Poisson, en términos de una única variable a medir: la velocidad del pulso ultrasónico de una onda de 50Khz a través de la masa de hormigón endurecido.

Se presentan en la Sección 2 funciones de aproximación propuestas por otros autores, mientras en la Sección 3 se describe el equipamiento a desarrollar, en la Sección 4 la campaña experimental propuesta para la calibración del mismo y en la Sección 5 el análisis numérico a partir de los resultados de la misma. Las conclusiones se enuncian en la Sección 6.

## 2 RELACIONES ENTRE PROPIEDADES ELÁSTICAS Y MECÁNICAS DEL HORMIGÓN Y LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO

De las numerosas relaciones numéricas propuestas por diferentes autores entre la resistencia a la compresión uniaxial  $f'_c$  y valores obtenidos de mediciones de velocidades de pulso ultrasónico  $v$ , se presenta en primer lugar la perteneciente a [Del Rio-Jimenez \(2004\)](#), correspondiente a mediciones sobre ondas de ultrasonidos de 40 KHZ, de acuerdo a

$$f'_c = e^{[(-5,4 \pm 0,8) + (0,00185 \pm 0,00018)v]} \quad (1)$$

que posee un alto coeficiente de determinación,  $R^2=92,31\%$ . El mismo establece estadísticamente la calidad del modelo para replicar los resultados y la proporción de variación de los resultados que puede explicarse por el modelo.

A continuación se resume la relación propuesta por [Bogas et al. \(2013\)](#), expresada de acuerdo a

$$f'_c = 3.38e^{[0.62v]} \quad (2)$$

donde  $v$  está expresada en km/s y  $f'_c$  en MPa y siendo el coeficiente de determinación correspondiente  $R^2=62\%$ .

Otros autores, como [Yaman et al. \(2002\)](#) y [Lafhaj et al. \(2006\)](#) establecen relaciones similares pero incorporando valores de densidad, de difícil estimación en estructuras construidas de hormigón. También plantean relaciones indirectas entre la propagación de ondas ultrasónicas longitudinales y transversales,  $v_L$  y  $v_T$  respectivamente, y los parámetros elásticos del hormigón, de acuerdo a

$$v_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (3)$$

$$v_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}}$$

siendo  $\rho$  la densidad del material,  $E$  el módulo de Young y  $\nu$  el coeficiente de Poisson. Por otro lado, [Cazalla et al. \(1999\)](#) al igual que otros autores, determinaron la resistencia del hormigón en función de la relación agua/cemento, masa de grava, gravilla, arena y de la velocidad de onda, resultando expresiones de difícil aplicación práctica.

### 3 EQUIPAMIENTO A DESARROLLAR

Se propone la fabricación de un dispositivo de medición y cálculo conformado por los siguientes componentes, indicados en la [Figura 1](#):

- Sensor ultrasónico (emisor-receptor).
- Placa Arduino UNO con microcontrolador programable en C++.
- Pantalla de presentación LCD y teclado numérico.

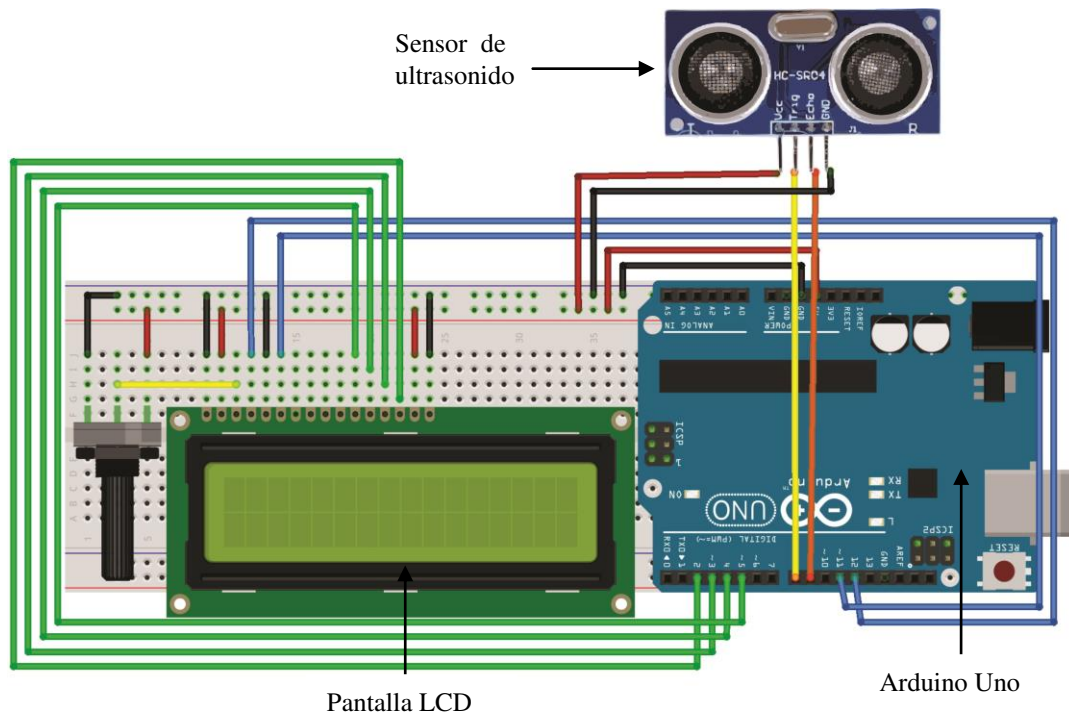


Figura 1: Dispositivo de medición y cálculo a desarrollar

#### 4 CAMPAÑA EXPERIMENTAL PROPUESTA

La campaña experimental que se propone tiene por objeto calibrar el equipamiento diseñado de modo tal que al tomar la medición del pulso ultrasónico, otorgue los valores del módulo de Young y coeficiente de Poisson como así también la resistencia uniaxial a compresión y a tracción.

El procedimiento propuesto para lograr la obtención de dichos objetivos es el siguiente:

- Elaborar 24 probetas de hormigón de 30 cm de largo por 15 cm de diámetro de acuerdo Normas Cirsoc 201-IRAM 1546 para la fabricación, curado y control probetas. Se dividirán en tres grupos de acuerdo a su resistencia:  $f'_c = 20, 25$  y  $30$  MPa.

- Medir de la velocidad de una onda ultrasónica de 50 Khz. Se realizarán tres mediciones de velocidad de ultrasonidos longitudinal y transversalmente en cada probeta. Se utilizarán dos equipos para la medición simultánea: un Smart Sensor AS840, Intell Instruments Pro y el equipo fabricado con Arduino UNO, para verificar el correcto funcionamiento del segundo.

- Realizar ensayo a compresión uniaxial en prensa hidráulica a los 28 días con el objeto de determinar la resistencia  $f'_c$ . El mismo se realizará en 7 probetas de cada grupo.

- Calcular el módulo de elasticidad en una probeta de cada grupo mediante ensayo de laboratorio.

- Establecer las funciones de aproximación de la resistencia a compresión uniaxial y el módulo de Young en términos de la velocidad del pulso ultrasónico mediante análisis numérico.

#### 5 ANÁLISIS NUMÉRICO Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS

El objeto del análisis numérico es la obtención de las ecuaciones que expresen la relación de la resistencia a compresión uniaxial y el módulo de Young en función de la velocidad de propagación del pulso ultrasónico. Con los valores de  $f'_c$  y  $E$  obtenidos en los ensayos experimentales y las correspondientes velocidades de propagación del pulso de ultrasonido medidas longitudinalmente, se propondrán aproximaciones numéricas por mínimos cuadrados. Los valores de  $f'_c$  también se calcularán mediante las funciones propuestas por [Del Río et al. \(2004\)](#) y [Bogas et al. \(2013\)](#), de acuerdo a Ecs. (1) y (2) respectivamente, para establecer una comparación.

Los valores del coeficiente de Poisson se calcularán a partir de las mediciones de  $v_L$  y  $v_T$  mediante la propuesta de [Yaman et al. \(2002\)](#), como

$$\nu = \frac{v_L^2 - 2v_T^2}{2(v_L^2 - v_T^2)} \quad (4)$$

y la resistencia a tracción uniaxial se estimarán a partir de  $f'_c$ , de acuerdo a

$$f'_t = \left( 0.25 \text{ a } 0.42 \right) \sqrt{f'_c (\text{MPa})} \quad (5)$$

Todas las funciones obtenidas serán programadas en lenguaje C++ en el microcontrolador del equipo Arduino UNO. Cabe destacar que se recomienda realizar tres mediciones de cada velocidad en cada punto de interés para descartar errores involuntarios.

En la [Figura 2](#) se presentan las etapas del análisis numérico a realizar.

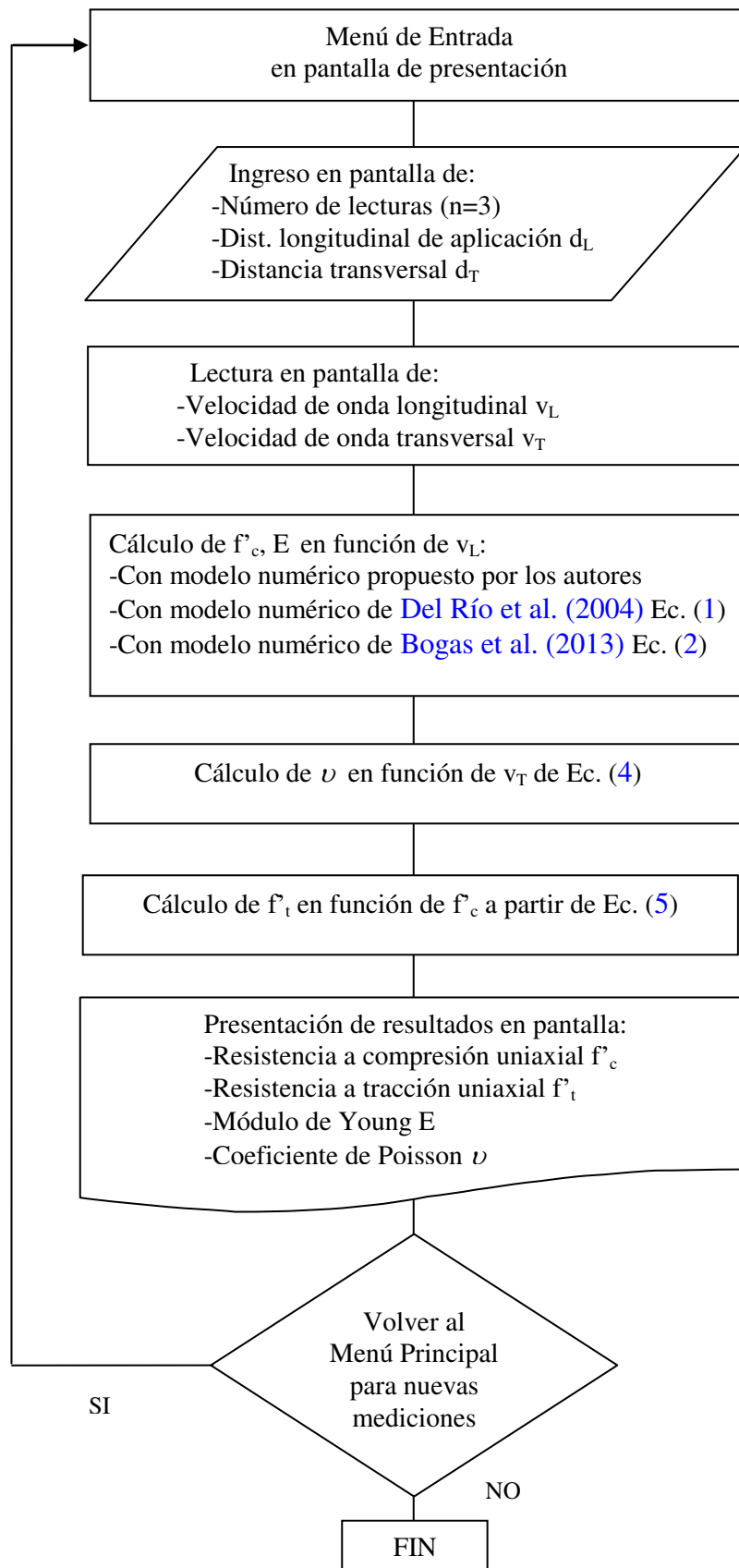


Figura 2: Etapas del análisis numérico para el cálculo de los parámetros mecánicos y elásticos del hormigón.

## 6 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la propuesta de fabricación de un dispositivo que integra un sensor de medición de velocidad de pulsos ultrasónicos y una placa Arduino UNO para el cálculo indirecto de la resistencia a compresión y tracción uniaxiales y los parámetros elásticos de estructuras de hormigón: módulo de Young y coeficiente de Poisson, presentando la ventaja de tratarse de un método no destructivo. Dicho equipamiento será calibrado con los resultados de una serie de ensayos experimentales realizados por los autores, que consistirá en la medición de la velocidad del pulso ultrasónico a través de probetas de hormigón endurecido a las que se someterá posteriormente a ensayos de compresión uniaxial para conocer los valores de resistencia a la compresión y módulos elásticos reales. A partir del análisis numérico de los mismos, se propondrán funciones de aproximación por mínimos cuadrados. Mientras el valor del coeficiente de Poisson se calculará como función directa de las velocidades longitudinales y tangenciales, la resistencia a tracción uniaxial se computará a partir de relaciones existentes en la literatura. Todas las funciones obtenidas se programarán en C++ en el microcontrolador de una placa Arduino UNO de modo tal que a partir de la medición de la velocidad de una onda de 50Khz se obtendrán como resultados los parámetros materiales citados anteriormente.

El equipamiento podrá calibrarse posteriormente para ser aplicado en la medición de parámetros similares correspondientes a estructuras de otros materiales.

## REFERENCIAS

- Bogas, A., Gomes, G., Gomes, A., Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method, *Ultrasonics*, 53:962-972, 2013.
- Cazalla O., Sebastián E., Cultrone G., Nechar M., Bagur M., Análisis de interacción de ANOVA de tres vías y pruebas ultrasónicas para evaluar los morteros-cal utilizados en proyectos de conservación del patrimonio cultural, *Cem. Hormigón Res.*, 29:1749-1752, 1999.
- Del Río L, Jimenez A., Lopez F., Rosa F., Rufo, Paniagua J., Characterization and hardening of concrete with ultrasonic testing, *Ultrasonics*, 42 (1-9),527-530, 2004.
- Hincapie A.M., Montoya Y.D., La microestructura de los prefabricados de concreto, *Revista Universidad EAFIT*, 41(140): 95-105, 2005.
- Lafhaj, Z., Goueygou, M., Djerbi, A., Kaczmarek, M., Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water / cement ratio and water content, *Cement and Concrete Research*, 36(4):625-633, 2006.
- Mehta K. y Monteiro P., *Concreto: Estructura, Propiedades y Materiales*, 1° Edición. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C., México, D.F., 33-40, 1998.
- Neville A. y Brooks J., *Tecnología del Concreto*, 1° Edición, Editorial Trillas, México, D.F., 81-90, 1998.
- Yaman I.O., Aktan H.M., Hearn N., Active and non-active porosity in concrete: Part II. Evaluation of existing models, *RILEM Journal of Materials and Structures*, 35(246):110-116, 2002.