

## **PLATAFORMA EXPERIMENTAL PARA INSPECCIÓN DE MORTERO CON ULTRASONIDOS (ICONUS)**

Vicente González Ayala\*, Enrique Vargas\*, Sergio Toral§, Raúl Gregor\*.

\* Laboratorio de Electrónica Digital (LED). Facultad de Ciencias y Tecnología. Universidad Católica "Nuestra Señora de la Asunción". Asunción – Paraguay. vgonzale@uca.edu.py.

§ Departamento de Ingeniería Electrónica. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. Sevilla – España.

**Palabras claves:** Hormigón, ensayos no destructivos (END), Ultrasonidos

### **RESUMEN**

En el hormigón, los END con ultrasonidos se utilizan ampliamente, aunque sus aplicaciones presentan problemas para las cuales no se han encontrado aún soluciones adecuadas. Por esta razón, el uso de los ultrasonidos en END de materiales no homogéneos constituye hoy en día un área de investigación activa.

Este trabajo presenta el diseño e implementación de una plataforma experimental para el estudio de nuevas técnicas de análisis de señal aplicadas a los END en materiales no homogéneos, así como la experimentación y el uso de nuevas tecnologías de transductores ultrasónicos

Los ensayos realizados sobre probetas de mortero han demostrado una correlación entre la velocidad de propagación y la resistencia a la compresión. Además se ha podido corroborar la capacidad del sistema para detectar discontinuidades de aproximadamente 1 cm. introducidas ex profeso. Actualmente, se realizan trabajos para extender los resultados de las probetas de mortero a las probetas de hormigón.

## 1. INTRODUCCIÓN

Según la ASNT (American Society of Nondestructive Testing), la evaluación no destructiva es el examen de un objeto utilizando tecnologías que no afectan al uso de ese objeto luego de la evaluación. Por lo tanto, las pruebas no destructivas no alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de un material [1].

Existen varios métodos de ensayos no destructivos utilizados en la inspección de estructuras de hormigón. Entre los que caben citar el método de inspección visual, el esclerómetro, la termografía infrarroja, la radiografía con rayos X o gamma, los radares penetrantes, la emisión acústica y los ultrasonidos. Una revisión de estos métodos puede encontrarse en [2]. Los métodos más utilizados en la práctica son la inspección visual, el esclerómetro y los ultrasonidos debido a la simplicidad del método, su facilidad de aplicación e implementación.

Un método de ensayo no destructivo ideal [3] para su utilización en estructuras de hormigón debe ser capaz de detectar las siguientes características o tipo de fallas:

- Anchura de una pieza cuando no se tiene acceso a la parte posterior de la misma.
- Posición de elementos estructurales como ductos para tensores, posición de las armaduras de acero, etc.
- Corrosión de las piezas de acero, tanto tensores como refuerzos o armaduras.
- Fracturas de las piezas, detectando posición, tamaño, profundidad y anchura de la misma.
- Exceso de poros de aire que debita el hormigón (fenómeno conocido como "honeycomb").
- Espacios vacíos en los ductos de los tensores que, con el tiempo, pueden provocar corrosión de estos tensores.
- Microfisuras que se producen como resultado de ciertos procesos químicos propios del hormigón.
- Determinación de límites y anchura de capas de hormigón de diferentes características.
- Resistencia a la compresión, que es la característica de diseño más importante del hormigón.
- Módulo de elasticidad que es otro parámetro de cálculo y diseño importante.
- Nivel de endurecimiento o fraguado que permite determinar el si la pieza puede ser sometida a carga.

Además, el sistema debe ser de tamaño pequeño, fácil de operar, sus resultados deben ser fáciles de interpretar y todo esto con un costo razonable.

En la actualidad, no existe ningún sistema que sea capaz de cumplir con todas las características mencionadas. Los END con ultrasonidos constituyen una herramienta importante en la evaluación del estado de las estructuras, siendo un área de investigación activa [3].

Este trabajo presenta el desarrollo y la implementación de una plataforma experimental para realizar investigación en el área de los ensayos no destructivos en materiales no homogéneos, tales como el hormigón. Los objetivos específicos del trabajo son: (a) diseñar una plataforma experimental que permita el estudio de nuevas técnicas de procesamiento de señal aplicadas a los END en materiales no homogéneos, y (b) evaluar nuevas tecnologías de transductores ultrasónicos.

El trabajo está organizado de la siguiente forma: en primer lugar se exponen los avances en inspección de hormigón con ultrasonidos y se describe la estructura interna del hormigón y se presentan los problemas de propagación de ondas mecánicas en ese medio. En la siguiente sección, se presenta la plataforma experimental desarrollada. Para validar la plataforma experimental se realizaron ensayos sistematizados sobre probetas de mortero para contrastar el sistema desarrollado, presentando y discutiendo los resultados obtenidos. Por último, se presentan las conclusiones y los trabajos futuros.

## 2. INSPECCIÓN DEL HORMIGÓN CON ULTRASONIDOS

Las técnicas ultrasónicas en los END se utilizan desde hace más de cuatro décadas. Originariamente, se utilizaban la velocidad de propagación y la atenuación de la señal tratando de correlacionarlas con características del hormigón, como la resistencia a la compresión. Durante los últimos quince años se vienen desarrollado nuevas técnicas que posibilitan la detección y localización de componentes estructurales o la presencia de discontinuidades, las cuales gradualmente van siendo incorporadas a la práctica [3].

El hormigón es un material compuesto de una matriz de cemento que rodea los áridos y los refuerzos de acero.

Desde el punto de vista de la propagación de ondas mecánicas, el hormigón es un material heterogéneo y altamente dispersivo debido a la gran diferencia que existe entre las impedancias acústicas de los distintos materiales que lo componen.

La estructura de la matriz de cemento en el hormigón contiene poros cuyo tamaño varía entre 5nm a 1µm. En la fabricación el hormigón se utilizan áridos, los cuales forman entre el 65% al 85% del volumen del hormigón y sus tamaños varían desde 0,08mm hasta 50mm. Las formas de los áridos dependen si son naturales o producidos artificialmente. Además deben considerarse los refuerzos de acero, que muchas se utilizan en las estructuras de hormigón [4].

Lo expuesto anteriormente constituye la causa principal de la atenuación que sufre la señal ultrasónica a su paso por el hormigón, la cual es del orden de 6 dB/(MHz cm), cinco a diez veces superior a la atenuación en los tejidos biológicos blandos [3].

Otro aspecto importante a tener en cuenta para maximizar la eficiencia de los END con ultrasonidos es lograr un acoplamiento acústico adecuado entre el transductor y el hormigón. Normalmente se utiliza grasas, jaleas o vaselina para mejorar el acoplamiento. Los transductores del tipo de contacto puntual seco (Dry point contact DPC) eliminan la necesidad del agente acoplante estableciendo un contacto directo, puntual con la pieza de hormigón [5].

El hormigón, al ser un material sólido, permite la propagación de ondas longitudinales, transversales y de Rayleigh. En los bordes de la pieza así como en los bordes internos de contacto entre la matriz de cemento, los poros y los agregados se producen conversiones de modo. Como la señal recibida contiene una superposición de la señal original propagada, señales reflejadas y señales producto de la conversión de modos, la identificación de las señales no es tarea fácil.

### 3. MÉTODOS DE INSPECCIÓN

Se pueden clasificar en dos grupos, los de transmisión y los basados en pulso – eco [6].

Los equipos que utilizan el método de transmisión disponen de un transductor emisor y otro receptor. Los transductores se ubican uno frente al otro a cada lado de la pieza a inspeccionar. Los parámetros medidos en este tipo de inspección son la velocidad del pulso ultrasónico que atraviesa

el hormigón y la atenuación de la señal. Las frecuencias normalmente utilizadas se encuentran entre 20 a 100 kHz.

Los sistemas basados en pulso – eco pueden utilizar uno solo transductor como emisor – receptor o dos como en los dispositivos de transmisión. Estos sistemas se basan en la emisión de una señal ultrasónica de corta duración que se propaga por el material, ante un cambio de impedancia acústica, parte de la energía se refleja produciendo un eco que es captado por el receptor. Para alcanzar una alta resolución axial se utilizan transductores de gran ancho de banda, con frecuencias centrales entre 50 kHz y 400 kHz.

Para la determinación de la velocidad de propagación se requiere de la medición del tiempo de vuelo (TOF, por sus siglas en inglés), conocida la disposición relativa los transductores se puede calcular la velocidad de propagación según (1)

$$v = \frac{e}{TOF} \quad (1)$$

Siendo  $e$  el espacio recorrido por la onda. Un problema común a ambos métodos es la detección precisa del instante de llegada de la señal emitida o el eco para el cálculo del TOF, ya que dependiendo de la técnica de detección utilizada el grado de incertidumbre puede ser mayor o menor.

#### 3.1. Aplicaciones de los END utilizando ultrasonidos

En este apartado se presentan algunas aplicaciones prácticas de los END utilizando ultrasonidos en la evaluación del hormigón.

##### 3.1.1. Medición de la resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es la característica más importante del hormigón, ya que es variable de diseño de las piezas de una estructura. El hormigón es un pseudosólido elasto–visco–plástico, por lo que su comportamiento tensión – deformación no es lineal. Por esta razón, no se puede definir un único módulo de elasticidad, estableciéndose normalmente tres módulos, el tangente, el secante y el inicial. Los dos primeros son variables dependiendo del tramo de la curva que se considere. El módulo inicial se encuentra bien definido y coincide con el módulo tangente o secante en el origen [4] [7].

Cuando se trata de resistencia el hormigón se lo puede considerar como formado por tres zonas, una es la pasta endurecida de cemento, otra son los áridos y, por último, la

interfaz o zona de contacto entre la pasta endurecida de cemento y los áridos. Esta última zona es la más débil del hormigón y es por donde se producen microfisuras que, al aumentar la tensión, crecen para formar fisuras más amplias que finalmente destruyen la pieza [4].

Por otro lado, en los materiales homogéneos e isotrópicos la velocidad de propagación, el módulo de Young ( $E$ ), el coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) y la densidad del material ( $\rho$ ) están relacionados según (2).

$$v = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (2)$$

Aunque el hormigón no es un material homogéneo, en la literatura se utiliza la expresión (2) para calcular el módulo de Young dinámico, valor que es correlacionado empíricamente con la resistencia a la compresión [4].

Esta ha sido una de las primeras aplicaciones en las que se ha utilizado los END con ultrasonido en el hormigón, aunque el método presenta dificultades, debido a que son numerosos los parámetros que afectan esta correlación [4], [3].

Solís, et. al. presenta un ejemplo de correlación entre resistencia y velocidad, en el cual se identifican como los parámetros más influyentes la calidad de los agregados y la relación agua-cemento utilizada en la mezcla [8].

### 3.1.2. Fraguado del hormigón

Determinar el avance del proceso de endurecimiento es otra aplicación exitosa. Un método de medida consiste en medir la velocidad de propagación de una onda ultrasónica longitudinal, obteniéndose una menor velocidad cuando el hormigón está aún húmedo y aumentado a medida que va adquiriendo resistencia.

Otra técnica utilizada para esta aplicación es la medida del coeficiente de reflexión de las ondas transversales ya que este tipo de ondas no pueden propagarse en los líquidos [3].

### 3.1.3. Detección de fisuras

La caracterización de una fisura en una pieza de hormigón es muy importante para conocer el estado de la misma. Utilizando la técnica pulso – eco es posible estimar la profundidad o ubicación de la fisura midiendo el tiempo de vuelo. Un ejemplo se presenta en la Figura 1.

Sin embargo, la presencia de los refuerzos de acero puede distorsionar la medida.

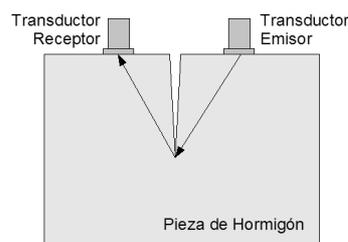


Figura 1. Estimación de profundidad de fisura midiendo tiempo de vuelo.

Además, se han detectado exitosamente fisuras en los refuerzos de acero utilizando la técnica pulso eco, aplicando la señal a lo largo del refuerzo [3].

### 3.1.4. Obtención de imágenes bidimensionales

La técnica de focalización utilizando apertura focal sintética (SAFT por sus siglas en inglés), permite obtener imágenes bidimensionales del interior de una pieza estructural gracias a que la focalización coherente de ondas obtenidas de un escaneo A. El objetivo de esta técnica es identificar y ubicar los elementos estructurales, como ser refuerzos de acero, ductos de tensores o dimensión de la pieza cuando esta no está completamente expuesta. Los resultados utilizando esta técnica son prometedores, aunque los tiempos de adquisición y procesamiento para la toma de la imagen son elevados.

Esta técnica combinada con técnicas de realce de imágenes basadas en modelado del ruido y umbral de ruido mejoran la imagen minimizando el efecto de la dispersión en los agregados y poros, produciendo una imagen más nítida [3].

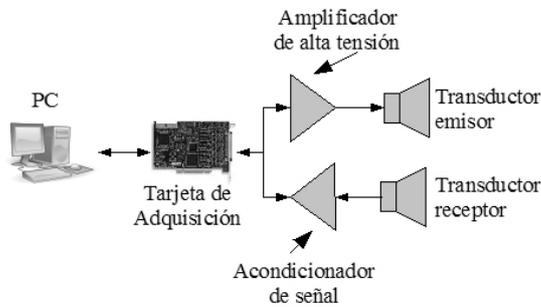
## 4. PLATAFORMA EXPERIMENTAL

La Figura 2 muestra un esquema general de la plataforma experimental desarrollada.

El elemento central de la plataforma experimental lo constituye una computadora IBM PC compatible corriendo el sistema operativo Windows XP. Se ha desarrollado un software usando la herramienta LabWindows de National Instruments, que facilita el desarrollo de aplicaciones con interfaz gráfica amigable y dispone de las librerías necesarias para el manejo de tarjeta de adquisición de datos. Además, disponen de herramientas para el análisis de las señales obtenidas.

Para generar las señales de excitación para el emisor y la posterior digitalización de las señales recibidas, así como de sincronización

y temporización general del sistema, se ha optado por una tarjeta PCI-6111E, de la firma National Instruments. Esta tarjeta ha sido seleccionada ya que posee 8 (ocho) entradas analógicas con 12 bits de resolución con una tasa máxima de muestreo de 5Ms/s (Ms/s sigla en inglés de millones de muestras por segundo) y salidas analógicas de 16 bits con una tasa máxima de 4Ms/s.



**Figura 2.** Diagrama de bloques de la plataforma experimental.

Además, se han diseñado un amplificador de alta tensión para la excitación del transductor emisor y un circuito de acondicionamiento de señal para el transductor receptor.

#### 4.1. Transductores ultrasónicos

Los transductores para la generación y recepción de ultrasonidos constituyen uno de los componentes más críticos, en el diseño de un sistema sensorial basado en técnicas ultrasónicas [6]. Existen tres tipos básicos de sensores ultrasónicos según la propiedad física utilizada para la generación de ultrasonidos: los magnetoelásticos, los piezoeléctricos y los capacitivos. La mayoría de los transductores ultrasónicos utilizados en END son piezoeléctricos. Las cerámicas piezoeléctricas son las más comunes, ya que presentan mayores factores de conversión electromecánica y tienen las propiedades más favorables para aplicaciones de potencia.

Además de las cerámicas piezoeléctricas se están desarrollando otras tecnologías de transductores ultrasónicos muy prometedoras, entre ellas resaltan los basados en gases piezoeléctricos [12] y los polímeros de floruro de polivinilideno (PVDF).

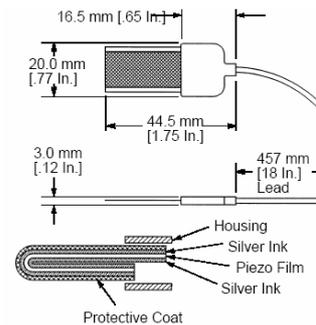
Por sus características técnicas, los PVDF han sido seleccionados para esta plataforma y se presentan con mayor detalle a continuación.

##### 4.1.1. Transductores de PVDF

Las características piezoeléctricas de ciertos polímeros ha sido observada por Fukada. En

1.969 Kawai observó el fuerte efecto piezoeléctrico en el floruro de polivinilideno (PVDF o PVF2) [6].

Las películas de PVDF son finas y flexibles, lo que le permiten adaptarse fácilmente a superficies alabeadas. Su respuesta frente a cargas externas es bastante lineal, presenta un ancho de banda considerable, un gran rango dinámico ( $10^{-8}$  a  $10^6$  psi o  $\mu\text{torr}$  a Mbar), baja impedancia acústica, alta elasticidad y alto voltaje de salida. En la Figura 3, muestra el sensor PVDF de la empresa Measurement Specialties [9], utilizado en este trabajo.



**Figura 3.** Sensor PVDF.

#### 4.2. Hardware para acondicionamiento de señales

Las funciones de los circuitos de acondicionamiento de señales son dos: (a) acondicionar la señal generada por la tarjeta PCI-6111E para excitar al transductor emisor y (b) acondicionar la salida del transductor receptor a los valores de tensión eléctrica adecuados para la tarjeta de adquisición de datos.

##### 4.2.1. Amplificador de emisión

Eléctricamente, los transductores PVDF se presentan como capacitancias y requieren de alta tensión para su excitación. El amplificador emisor debe ser capaz de manejar una carga capacitiva de 2,8nF, con un ancho de banda de 500kHz a una tensión de 250V de pico.

Para el efecto, se ha diseñado e implementado un amplificador lineal de alta tensión con las características mencionadas. El circuito implementado está basado en un diseño publicado en [10]. Las principales modificaciones realizadas al circuito original son tres, por un lado, la estabilización térmica de una parte muy importante del circuito. En segundo lugar, se han cambiado los amplificadores operacionales LF411 por los LM7171 que tiene un mayor producto ancho de banda ganancia. Finalmente, se ha utilizado un esquema de fuente de corriente

en paralelo para aumentar la capacidad de corriente del circuito [13].

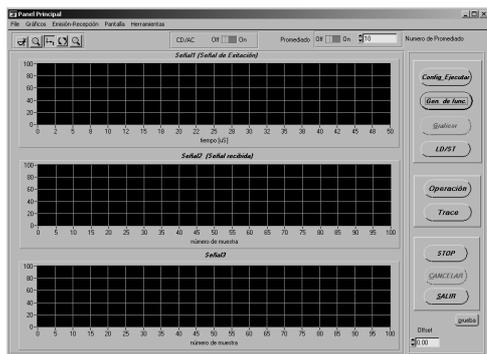


Figura 4. Panel principal del software de adquisición.

#### 4.2.2. Amplificador para el receptor

El amplificador para la recepción de la señal ultrasónica es un amplificador diferencial de transresistencia [11]. Debido a que estos transductores poseen considerarse como un generador de carga, requieren de amplificadores de carga con una baja impedancia de entrada [9].

El circuito propuesto incluye amplificadores diferenciales de carga, seguidos por un amplificador diferencial de salida simple, la topología diferencial reduce el ruido en modo común. Se utiliza además un esquema de guarda activa para compensar los desbalances en los terminales del transductor y una pantalla alrededor del elemento transductor que actúa como una jaula de Faraday, conectada a la guarda activa [13].

#### 4.3. Software de control y procesamiento

El panel principal del software se muestra en la Figura 4. En el gráfico superior se dibuja la señal de eco ultrasónico recibida. Los botones a la izquierda de la ventana permiten iniciar el proceso de emisión – recepción y configurar el sistema.

Algunas funcionalidades del software son:

- Permite configurar la señal de excitación que será aplicado al amplificador de alta tensión y finalmente al emisor. Se pueden emitir salvas senoidales, salvas de ondas cuadradas y formas de onda arbitraria descrita en un archivo de texto.
- Es posible guardar y recuperar adquisiciones realizadas en el disco fijo de la computadora.
- El software permite realizar las operaciones matemáticas de convolucion, correlación y FFT entre señales adquiridas.
- Finalmente puede seleccionarse diferentes técnicas de detección de la

señal de eco para la determinación del tiempo de vuelo.

Se ha realizado una evaluación de las distintas técnicas para la detección del instante de llegada de la señal y se han implementado en la plataforma los métodos del umbral, umbral con envolvente, cruce por cero y la transformada tiempo-frecuencia [6], que han demostrado ser métodos adecuados que utilizan relativamente pocos recursos computacionales.

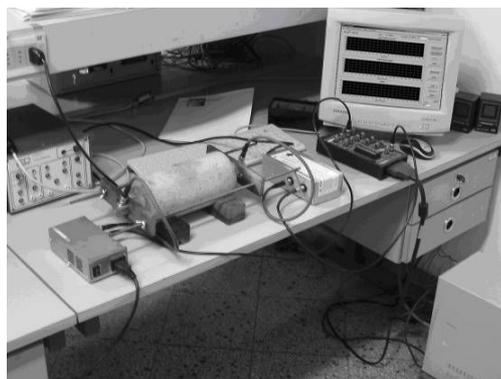


Figura 5. Plataforma experimental.

## 5. RESULTADOS OBTENIDOS

A fin de validar la plataforma se ha realizado ensayos con probetas de mortero. Debido al tamaño del árido grueso del hormigón el efecto de la dispersión y la atenuación de la señal son mayores, por esta razón se optó por utilizar mortero (cemento y arena) para las pruebas iniciales de funcionamiento del sistema.

Para comprobar el correcto funcionamiento de todos los elementos del sistema se realizaron dos experimentos, en primer lugar, la medición de la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas a través de las probetas de mortero y, en segundo lugar, la detección de discontinuidades introducidas *ex profeso* en las probetas. A continuación se describe en detalle los resultados de estos experimentos.

### 5.1. Medición del tiempo de vuelo

Como se ha indicado en el punto 3.1.1 del presente trabajo, una de las aplicaciones más conocidas de los ultrasonidos aplicados a los END en el hormigón es la medición de la resistencia. Aunque la correlación es solamente empírica, se puede afirmar que a mayor resistencia mayor es la velocidad de propagación.

Para realizar esta experiencia se han elaborado 10 probetas cilíndricas de mortero de 20 x 10 centímetros. Las proporciones de arena y cemento utilizadas y las

denominaciones para las diferentes probetas se detallan en la Tabla 1. Estas probetas han sido sometidas al ensayo con ultrasonidos y posteriormente a ensayo destructivo de compresión en el Laboratorio de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la UC.

Probeta	Proporción arena y cemento
Probeta3_1_1	uno arena y uno cemento
Probeta2_1_1	uno arena y uno cemento
Probeta3_1_2	dos arena y uno cemento
Probeta2_1_2	dos arena y uno cemento
Probeta2_1_3	tres arena y uno cemento
Probeta3_1_3	tres arena y uno cemento
Probeta3_1_4	cuatro arena y uno cemento
Probeta2_1_4	cuatro arena y uno cemento
Probeta2_1_5	cinco arena y uno cemento
Probeta1_1_5	cinco arena y uno cemento

**Tabla 1.** Denominación de las probetas ensayadas y la proporción de arena y cemento para cada una.

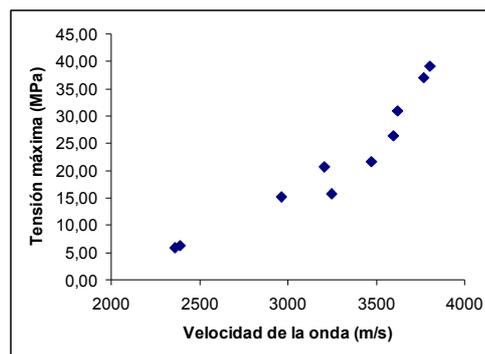
La velocidad de propagación es obtenida midiendo el tiempo de vuelo de la señal desde su emisión hasta su recepción, utilizando la plataforma experimental desarrollada. En la Figura 5 se presenta una fotografía de la plataforma, donde se puede apreciar la disposición utilizada de los transductores. La medida del tiempo de vuelo es realizada en la dirección longitudinal de la probeta cilíndrica, colocando el transductor emisor en una en las caras y el receptor en la otra cara opuesta, disposición conocida como de transmisión. En la Tabla 2 se presentan la velocidad de propagación de la onda longitudinal ultrasónica y la tensión de rotura para cada probeta ensayada.

Probeta	Velocidad (m/s)	Tensión máxima (MPa)
Probeta3_1_1	3803,57	39,17
Probeta2_1_1	3769,91	37,01
Probeta3_1_2	3620,68	31,01
Probeta2_1_2	3600,00	26,32
Probeta2_1_3	3471,07	21,73
Probeta3_1_3	3206,10	20,69
Probeta3_1_4	3250,00	15,80
Probeta2_1_4	2964,02	15,12
Probeta2_1_5	2393,06	6,17
Probeta1_1_5	2358,38	5,82

**Tabla 2.** Velocidad de propagación de la onda ultrasónica y tensión máxima para cada probeta ensayada.

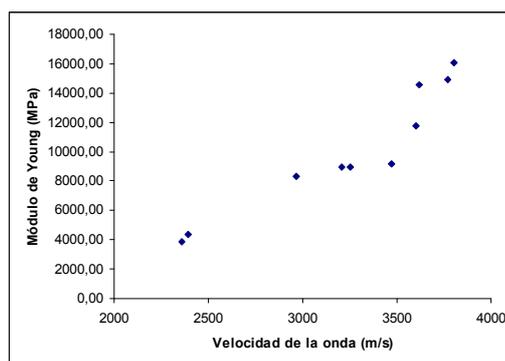
En la Figura 6 se presenta la velocidad de propagación de la señal ultrasónica versus la tensión de rotura. Puede observarse que la

velocidad de propagación aumenta a medida que la resistencia de la probeta aumenta.



**Figura 6.** Velocidad de propagación de la señal ultrasónica vs. la tensión máxima soportada por la probeta.

En la Figura 7 se presenta la velocidad de propagación de la señal ultrasónica versus el módulo de Young calculado utilizando la expresión (2). Como puede observarse existe una correlación directa entre ambos parámetros.



**Figura 7.** Velocidad de propagación de la señal ultrasónica vs. módulo de Young.

## 5.2. Detección de defectos

Para verificar el funcionamiento del sistema para la detección de discontinuidades, se han simulado defectos disponiendo esferas de poliestireno de 1 cm. de diámetro en posiciones conocidas en el interior de las probetas de mortero de 20 x 10 cm.

La Figura 8 muestra la ubicación de la esfera en una probeta. En la Figura 9a se ve la señal de la parte de la probeta donde no se encuentra el defecto, el eco que se puede observar corresponde a la parte posterior de la probeta. En la Figura 9b se ve el eco producido por el defecto introducido. El emisor ha sido excitado con una salva senoidal a la frecuencia de 500kHz.

En este caso puede verse que el defecto se encuentra en el centro de la probeta, lo que también puede determinarse con las señales

ultrasonicas gracias al eco recibido del defecto y de la cara posterior de la probeta. Similares resultados se han obtenido con probetas en las que los defectos fueron ubicados en distintas posiciones.

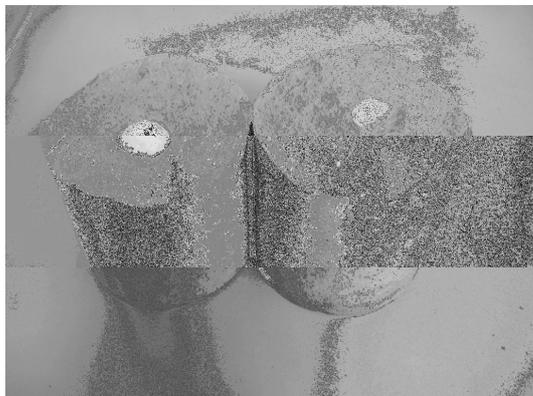


Figura 8. Ubicación del defecto en la probeta.

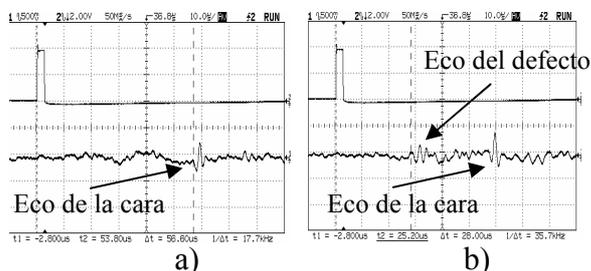


Figura 9. Señal de eco de a) la zona sin defecto, b) la zona con defecto.

## 6. CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

Los ensayos realizados han demostrado una correlación entre la velocidad de propagación, la resistencia a la compresión de la probeta y el módulo de Young. Además, se ha podido corroborar la capacidad del sistema para detectar discontinuidades de aproximadamente 1cm. introducidas *ex profeso*. Actualmente, se realizan trabajos para extender los resultados de las probetas de mortero a las probetas de hormigón.

El estudio de la propagación de ondas mecánicas en medios sólidos no homogéneos es de interés creciente por el amplio campo de aplicación que conlleva. En algunos de ellos, en la inspección de medios sólidos altamente dispersivos, como es el caso del hormigón, se requiere de modelos de propagación de ondas mecánicas que expliquen los complejos mecanismos de codificación de las características físicas en las ondas.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] American Society of Nondestructive Testing. <http://www.asnt.org/>

[2] Robert Long. PhD Thesis. Imperial College of Science, Technology and Medicine. University of London. Marzo de 2000.

[3] Martin Schickert. Ultrasonic NDE of Concrete. 2002 IEEE Ultrasonic Symposium. Año 2002.

[4] John M. Illston y P.L.J. Domone (Editores). Construction Materials: Their Nature and Behaviour. Editorial Routledge. 2001.

[5] A. A. Samokrutov, V. N. Kozlov, and V. G. Shevaldykin, "Ultrasonic Defectoscopy of Concrete by Means of Pulse-Echo Technique," in Proceedings, 8th ECNDT 2002, Madrid: Spanish Society for NDT (AEND), CD-ROM, 2002, pp. 1-9.

[6] E. Vargas, "Caracterización de Reflectores e Irregularidades Superficiales por Ultrasonidos en Aire", Tesis Doctoral, Univ. Complutense de Madrid, 1999.

[7] P. Jimenez Montoya, A. García Meseguer y F. Morán Cabré. Hormigón Armado. Tomo I. 11ª Edición. Editorial Gustavo Gili, S.A. 1981.

[8] Rómel Solís, Éric Ivan Moreno y William Castillo. Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasonico y un índice de calidad de los agregados. México: Red Ingeniería Revista Académica. Año 2006.

[9] Measurement Specialties, Inc, "Piezo Film Sensors Technical Manual", Sensor Products Division. P/N 1005663-1 REV B 02 APR 99.

[10] Duggal, Bipin. High-voltage amplifier drives piezo tubes. Electronic Design News Magazine. Diciembre de 2004.

[11] Sergio Franco. Design with Operational Amplifier and Analog Integrated Circuits. Ed. McGraw - Hill 1998.

[12] The Ultrason Group. <http://www.ultrasongroup.com/>

[13] E. Vargas, S. Toral, V. González, R. Gregor. Design and Implementation of an Experimental Test Bench for Ultrasonic Non-Destructive Evaluation. XXIII Conference on design of circuits and integrated circuits. Sevilla – España. 21al 23 de noviembre de 2007. Aceptado para publicación.