

## **MÉTODOS DE END MEDIANTE ULTRASONIDOS PARA CARACTERIZAR LA DURABILIDAD DEL MORTERO**

REFERENCIA PACS: 43.35.Zc

L.Vergara <sup>1</sup>; R.Miralles <sup>1</sup>; J.Gosálbez <sup>1</sup>; F.J.Juanes <sup>1</sup>; L.G. Ullate <sup>2</sup>; J.J. Anaya <sup>2</sup>;  
M. G. Hernández <sup>2</sup>; M.A.G. Izquierdo <sup>2</sup>

1 E.T.S.I. de Telecomunicaciones. Universidad Politécnica de Valencia

Camino de Vera s/n

46071 Valencia. España

E-Mail: lvergara@dcom.upv.es

2 Instituto de Automática Industrial. CSIC

La Poveda

28500, Arganda del Rey (Madrid)

E-Mail: luisg@iai.csic.es

### **ABSTRACT**

Premature damage of mortar and concrete structures demands techniques to estimate durability of this type of components. Durability is related to porosity, which determines the interaction of aggressive agents and the material. In this work several END ultrasonic methods to estimate porosity are presented and evaluated. In these methods porosity is related to (1) the material structural noise, (2) sound velocity and (3) ultrasonic attenuation. All methods consider that mortar is formed by only two phases: solid and pores.

### **RESUMEN**

El deterioro prematuro en estructuras de mortero y hormigón debido a la acción ambiental, requiere procedimientos para estimar la durabilidad de este tipo de componentes. La durabilidad está relacionada con la porosidad, que determina la intensidad de las interacciones del material con los agentes agresivos. En este trabajo se plantean métodos de END mediante ultrasonidos para caracterizar la porosidad del mortero, en los cuales se relaciona la porosidad con (1) el ruido granular de la señal de eco, (2) la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas a través del material y (3) la atenuación de las ondas ultrasónicas en mortero. Todos los métodos consideran que el mortero está formado por dos fases: sólido y poros.

### **INTRODUCCION**

En los últimos años el creciente número de estructuras con síntomas de deterioro prematuro por acción de diferentes procesos agresivos lleva a la necesidad de incrementar el conocimiento científico tanto de los mecanismos físico-químicos que deterioran el hormigón como de los procedimientos para evaluar su durabilidad con el fin de paliar los elevados costos de reparación y mantenimiento de las estructuras de hormigón. La mayor parte de los procesos que afectan a la durabilidad del hormigón están relacionados con su estructura porosa, la cual determina la intensidad con la que se desarrollarán las interacciones del hormigón con el ambiente que le rodea. La existencia de poros y capilares en el interior del hormigón facilitará los procesos destructivos que generalmente comienzan en la superficie. Los agentes agresivos son transportados a través de la estructura porosa, constituida por canales, poros y fisuras de distintas dimensiones. La distribución del tamaño de los poros influye particularmente sobre el

tipo y velocidad de los mecanismos de transporte de líquidos y gases. En términos generales, se pueden clasificar los distintos poros según su tamaño en:

*Microporos* (Aproximadamente de  $10^{-7}$  a  $10^{-10}$  m.)

*Poros capilares* (Aproximadamente de  $10^{-4}$  a  $10^{-7}$  m.)

*Macroporos* (Aproximadamente de  $10^{-4}$  a  $10^{-2}$  m.)

De todos ellos, los poros capilares y los macroporos son los más estrechamente relacionados con la durabilidad. Independientemente de su tamaño, no todos los poros contribuyen de igual forma a la penetración de los agentes agresivos en el interior del hormigón ya que un hueco aislado puede influir en la resistencia del material y en su fractura y en cambio no tener ninguna efectividad como medio de penetración de agentes agresivos, puesto que no tiene comunicación con el exterior.

Este artículo presenta el trabajo desarrollado dentro de un proyecto coordinado [1], entre el Grupo de Tratamiento de Señal (GTS) y el Instituto de Automática Industrial (IAI), con la participación del Instituto Tecnológico de la Construcción de Valencia (AIDICO), orientado a la obtención de técnicas ultrasónicas no destructivas para medir la porosidad en hormigón. En realidad, dada la complejidad de este material, se decidió comenzar considerando un material más simple, el mortero. Como veremos, a pesar de su menor complejidad, el mortero ofrece ya significativas dificultades que hicieron necesario centrarnos en este material a lo largo de todo el proyecto.

El mortero tiene en su composición dos elementos básicos: arena y cemento. Si además consideramos los posibles poros que aparecen en el cemento podemos modelar el mortero como un material compuesto por tres fases: arena, cemento y poros (Figura 1).

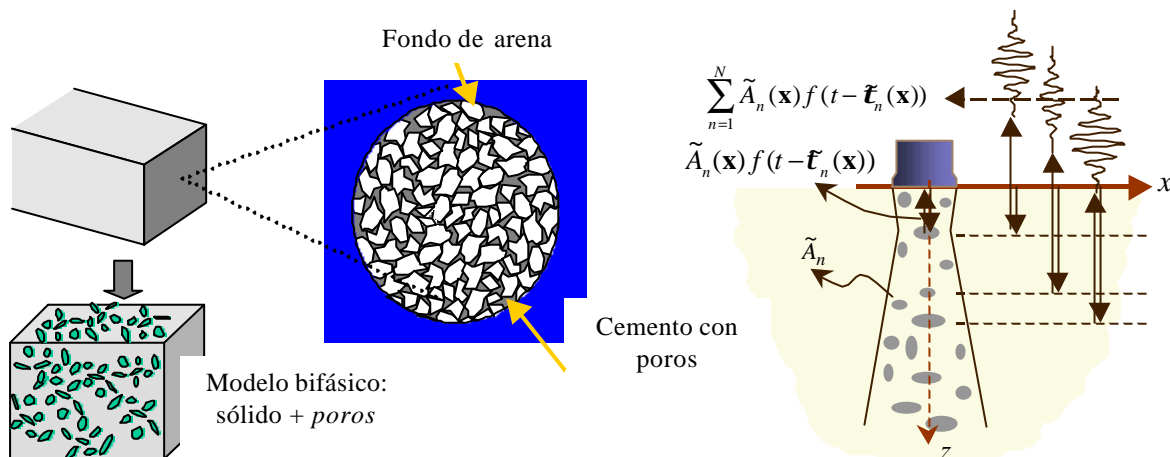


Figura 1. Probetas de mortero

Figura 2. Modelo de generación de la señal ultrasónica

Por otra parte el proyecto abordó dos aproximaciones al problema:

- análisis del ruido granular ultrasónico generado por pulso-eco, extrayendo parámetros estadísticos que pudieran estar correlados con los niveles de porosidad (aproximación desarrollada por el GTS);
- estudio de la relación velocidad ultrasónica-porosidad y atenuación ultrasónica-porosidad, a partir de medidas por transmisión (aproximación desarrollada por el IAI).

Para la verificación experimental AIDICO preparó un conjunto de 120 probetas de mortero con arena normalizada (prismas de dimensiones 16x4x4 cm) con diferentes porosidades ajustadas a partir del porcentaje de agua utilizado en la preparación de la pasta de cemento. Se consideraron cinco porcentajes de agua/cemento: 0.45, 0.50, 0.55, 0.60 y 0.65, generándose 24 probetas por cada porcentaje: 12 utilizadas por AIDICO para los ensayos destructivos de medida de porosidad, 6 para el GTS y 6 para el IAI, para los ensayos no destructivos.

Aunque, cómo ya se ha mencionado, el mortero es un material trifásico, en una primera aproximación se ha optado por modelos bifase por su mayor sencillez: la señal ultrasónica se propaga en un entorno constituido por un material sólido (una de las fases constituida por arena más masa de cemento) y un conjunto de dispersores constituidos por poros. En los apartados siguientes presentamos respectivamente los resultados más relevantes obtenidos con cada una de las mencionadas aproximaciones.

### CARACTERIZACIÓN BASADA EN EL RUIDO GRANULAR

El análisis estadístico del ruido de grano ultrasónico generado por la microestructura de dispersores en un sistema pulso-eco es algo habitual en la caracterización de tejidos y de ciertos materiales, pero muy poco utilizado hasta ahora en hormigón o mortero. En este material se considera más bien como un problema que limita la aplicación de los ultrasonidos, utilizándose éstos para la detección de defectos internos, con frecuencias ultrasónicas relativamente bajas (típicamente hasta 200 KHz). En esta aplicación, sin embargo, el ruido granular pretende ser una posible fuente de información sobre la porosidad. Para ello debemos hacer ciertas hipótesis de forma que el modelo del material sea suficientemente sencillo y verificar posteriormente la validez de forma experimental. Tal y como se indicó en el apartado anterior, asumiremos un material bifásico compuesto por una fase sólida más los poros. A partir de esta hipótesis, podemos suponer que los registros de ruido granular son resultado de la superposición de los ecos generados en los dispersores (figura 2). Adicionalmente, debe tenerse en cuenta que el pulso ultrasónico se modifica a medida que penetra en el material, en el caso más simple experimenta una atenuación, aunque en general, esta atenuación es distinta para cada una de las componentes frecuenciales del pulso, por lo que éste se deforma. Dicha deformación puede estar relacionada también con la porosidad. Por todo ello y de forma un tanto concisa, en esta aproximación se llevaron a cabo dos tipos de trabajos que se pasan a

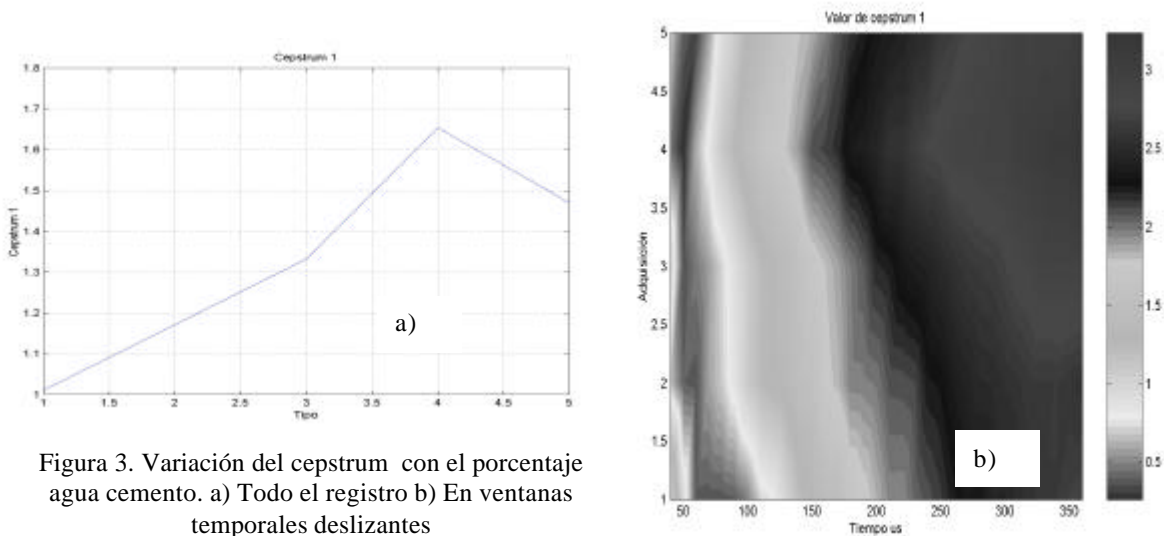


Figura 3. Variación del cepstrum con el porcentaje agua cemento. a) Todo el registro b) En ventanas temporales deslizantes

describir.

El primer trabajo consistió en la extracción de parámetros estadísticos de la señal ultrasónica vinculados al espectro del pulso y su modificación con la profundidad (frecuencia instantánea, ancho de banda, medida sobre el cepstrum, atenuación,...), utilizando para ello un programa desarrollado por el GTS cuyas características se describen en otra contribución de este mismo congreso, conjuntamente con las características del hardware utilizado para la adquisición de las medidas ultrasónicas [2]. Los parámetros extraídos correspondían a un registro completo, o bien a diferentes segmentos de un mismo registro obtenidos mediante una ventana deslizante, lo que permitía observar posibles variaciones sobre un mismo registro. A modo de ilustración, la figura 4, muestra la dependencia medida entre el parámetro correspondiente al primer valor del cepstrum y el porcentaje de agua/cemento, en 4a se considera todo el registro y en 4b se considera una ventana deslizante para observar las posibles variaciones con la profundidad de las posibles dependencias. La frecuencia del

transductor era 1 MHz y la frecuencia de muestreo 5 MHz. Las curvas son el resultado de promediar 10 medidas tomadas sobre una misma cara de una de las probetas para cada porcentaje de agua/cemento. Curvas similares han sido obtenidas con otros parámetros espectrales o con la atenuación. En general se observan tendencias claras en la variación de los parámetros con el porcentaje agua/cemento, si bien no con el grado de monotonicidad (creciente o decreciente) que sería necesario para considerar una técnica fiable de medida de porosidad.

El segundo trabajo se centró en la deducción de las relaciones matemáticas existentes (bajo la hipótesis bifase ya mencionada), entre los estadísticos de los registros ultrasónicos medidos y la estadística de las secciones cruzadas de los dispersores. En concreto se dedujeron las ecuaciones que relacionan los cumulantes hasta orden 3 de la señal recogida en el sensor y los momentos hasta orden 3 de la función densidad de probabilidad de la sección cruzada de los granos [3],[4]. Dichas ecuaciones permiten establecer técnicas de estimación de los momentos del grano y comprobar, en nuestro caso, su relación con el porcentaje agua /cemento. La tabla 1 muestra los momentos extraídos en función de la porosidad. En este caso la frecuencia del transductor era 5 MHz y la frecuencia de muestreo 25 MHz. Las curvas son también el resultado de promediar 10 medidas tomadas sobre una misma cara de una de las probetas para cada porcentaje de agua/cemento. Pueden obtenerse conclusiones similares a las anteriores en cuanto al grado de correlación parámetros estadísticos-porosidad.

**Tabla I** Estimación de los momentos de orden 1, 2 y 3 correspondientes a las diferentes probetas

Probeta	$m_1^A$	$m_2^A$	$m_3^A$
P45	65.69e12	0.273	15.71e12
P50	85.95e12	0.251	51.16e12
P55	68.23e12	0.274	36.47e12
P60	97.34e12	0.295	98.39e12
P65	86.41e12	0.298	40.31e12

**CARACTERIZACION BASADA EN LA VELOCIDAD DEL SONIDO**

La velocidad acústica ha sido usada frecuentemente como indicativo de las características mecánicas de los materiales. En este sentido, existen expresiones analíticas que ligan la velocidad con las constantes de Lamé [5]. También existen algunos trabajos que a partir de la micromecánica alcanzan una relación analítica que relaciona la velocidad acústica y la porosidad en materiales compuestos [6]. En nuestro caso, usaremos estos últimos métodos para el caso de los compuestos de cemento.

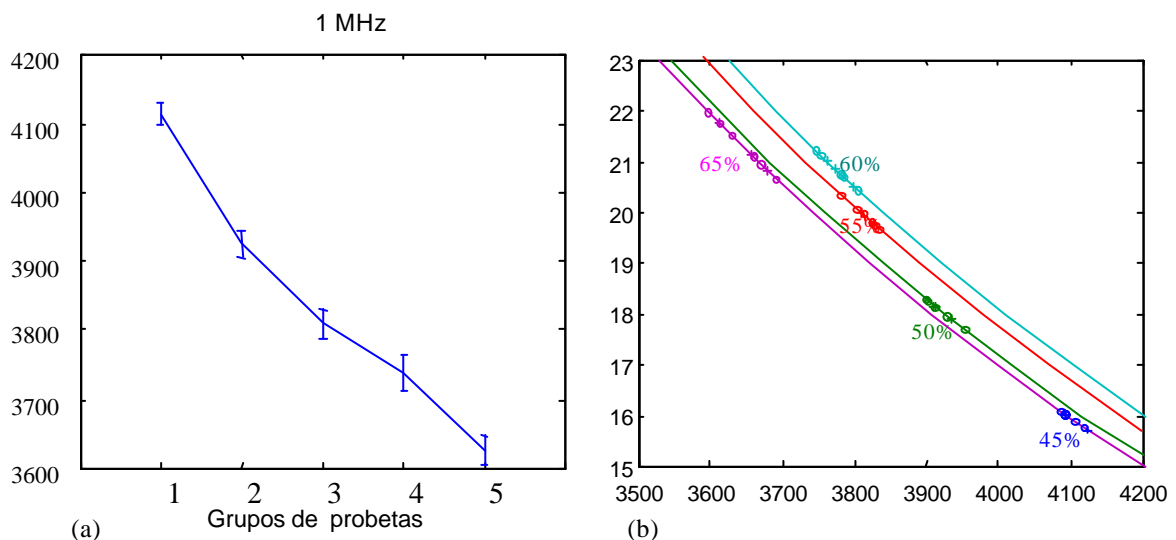


Figura 4. (a) Medidas de velocidad de los 5 grupos de probetas. (b) Curvas de porosidad-velocidad aplicando el modelo micromecánico, (los puntos indican las medidas destructivas de porosidad)

Para aplicar un modelo micromecánico al mortero, consideramos que el material está formado por una fase sólida que ocupa un volumen  $V^m$  más los poros que ocupan un volumen  $V^i$  ( $V^m + V^i = 1$ ). También consideramos que los poros capilares (de tamaño inferior a una micra) son cilíndricos y alargados, y que su distribución en la fase sólida es aleatoria. A partir de estas hipótesis se puede alcanzar una expresión que relaciona la velocidad de propagación en el medio con la porosidad [7], de la siguiente forma:

$$V_l = f(C_{i,j}^m, T_{klmn}, \mathbf{r}, X)$$

en la que  $V_l$  indica la velocidad de propagación de las ondas acústicas,  $C_{ij}^m$  determinan las constantes elásticas de la fase sólida,  $T_{klmn}$  indican los términos del tensor que contiene el tamaño, distribución y orientación de los poros en el material.

La medida de la velocidad de propagación se ha realizado sobre las seis probetas de cada grupo, mediante dos transductores operando en transmisión, en seco, utilizando un acoplante de caucho. Se han medido tres puntos por probeta. La figura 4a muestra, para un transductor de 1 MHz, la distribución de las medidas de velocidad por grupos de probetas, y la varianza de las medidas en cada grupo. Se observa que la velocidad de propagación es un parámetro capaz de discriminar los grupos de probetas con diferentes porcentajes agua cemento. En 4b se observan las curvas que relacionan la porosidad y la velocidad a partir de la micromecánica. En ellas se han trazado también los puntos obtenidos a partir de la medida de la porosidad por métodos destructivos y medida de la velocidad por ultrasonidos.

## CARACTERIZACION BASADA EN LA ATENUACION DEL MATERIAL

La atenuación acústica ha sido usada para caracterizar materiales mediante ultrasonidos. En particular, este método se ha utilizado para estimar la densidad de poros y su tamaño en materiales cerámicos [8]. En nuestro caso consideraremos al mortero compuesto por una fase sólida y por poros cuyo diámetro medio  $D_m$  es muy inferior a una micra. En conjunto, el mortero se comportará como un material dispersivo, cuyos dispersores se encuentran en la zona de Rayleigh caracterizada porque la longitud de onda ultrasónica es muy superior al tamaño medio de los dispersores ( $\lambda \gg D_m$ ). En esta zona, el coeficiente de atenuación es proporcional a la cuarta potencia de la frecuencia  $f$  de la señal:

$$a_D(f) = c_2 \cdot D_m^3 \cdot f^4$$

y en consecuencia, la atenuación de las ondas ultrasónicas en el material actúa como un filtro que amortigua más las componentes más altas del espectro.

La medida de la atenuación se ha realizado sobre todas las probetas (seis para cada porcentaje agua cemento), sumergiendo las probetas en agua y barriendo las piezas en una piscina con ejes controlados. En cada probeta se realizaron diez medidas usando un par de transductores en transmisión en diferentes posiciones a lo largo de las probetas.

Agua

Mortero

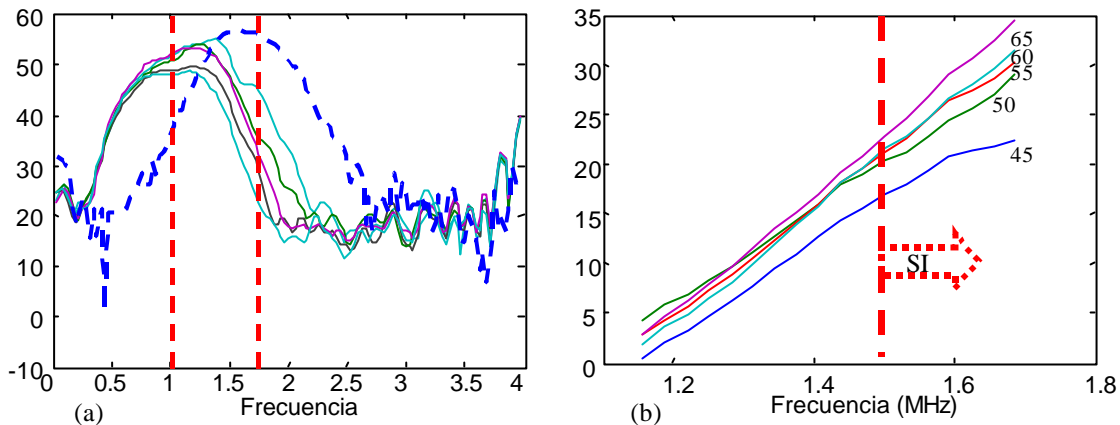


Figura 5. (a) Amplitud del espectro en los casos de propagación en agua y en mortero con distintas relaciones agua-cemento. (b) Curvas atenuación-frecuencia media con distintas relaciones agua-cemento

La figura 5a muestra para cinco probetas de mortero (una de cada grupo), el espectro del pulso ultrasónico después de atravesar un espesor de cuatro centímetros de material, usando transductores de 2 MHz con un 50% de ancho de banda. La figura también muestra el espectro cuando se retira la probeta y queda el agua como único medio de transmisión. El desplazamiento del espectro hacia la izquierda al atravesar el pulso la pieza de mortero es muy notable (entre 0.5MHz y 0.75 MHz). Las curvas de atenuación-frecuencia que se muestran en la figura 5b corresponden a los cinco grupos de probetas. Se han realizado a partir de los transductores de 2MHz, y promediando las señales medidas para cada grupo (seis probetas por grupo y diez medidas por probeta). Dichas curvas se han obtenido tomando la respuesta en el agua como referencia, es decir, restando a la amplitud del espectro en agua la amplitud correspondiente de cada grupo de probetas, dentro de unos límites en los que se estima que ambos espectros están libres de ruido (marcados en la figura 5a por líneas verticales). De esta forma, a partir de los transductores de 2 MHz se puede deducir la atenuación del material para las frecuencias comprendidas 1MHz y 1.7 MHz.

Usando tres tipos de transductores cuya frecuencia central es de 0.5 MHz, 1MHz y 2MHz, se han barrido todas las frecuencias entre 400KHz y 1.7MHz. De los resultados se desprende que en el rango de frecuencias más altas (entre 1.5 y 1.7 MHz) en los que existe mayor atenuación en las piezas, es posible discriminar los grupos de probetas a partir de los datos de la atenuación. En cambio, para las frecuencias entre 0.4MHz y 1.5MHz no es posible realizar una clasificación completa de los grupos de probetas aunque sí existen tendencias especialmente en los grupos extremos.

## CONCLUSIONES

Se han presentado tres métodos basados en ultrasonidos para estimar la porosidad del mortero. De los tres, el método basado en la medida de la velocidad de propagación acústica muestra buenos resultados a la hora de estimar la porosidad del mortero, mientras que los métodos basados en el análisis del ruido granular y en la atenuación del material presentan tendencias claras, si bien no con la monotonía que sería necesario para considerar una técnica fiable de medida de porosidad. Aplicando estos mismos métodos sobre un material bifásico (p.e. masa de cemento hidratada) nos permitirá avanzar en el conocimiento científico de los procedimientos para evaluar la durabilidad de los compuestos de cemento.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo esta subvencionado por CICYT TAP97-1128

**REFERENCIAS**

- [1] Informe final proyecto TAP-1128: "Aplicación de técnicas ultrasónicas pulso-eco y tratamiento de señal a la determinación de la durabilidad en mortero y hormigón", Oct. 1999.
- [2] J. Gosálvez, F.J. Juanes, L.Vergara, R.Miralles: "Sistema modular de adquisición y procesamiento de señales ultrasónicas: SMAPSU", II Congreso Iberoamericano de Acústica, Madrid, Octubre 2000.
- [3] Ramón Miralles, Luis Vergara. "Material Classification By HOS Analysis of Ultrasonic Signals". European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2000) Pendiente de Publicación, Tampere, Finlandia, Septiembre 2000.
- [4] Ramón Miralles, Luis Vergara. "Ultrasonic Characterization of Scattering Media by Higher Order Spectra: A Cumulant Derivation". IEEE Workshop on Higher Order Statistics 99, Ceasarea, Israel, Junio 1999.
- [5] J. Krautkrämer, H. Krautkrämer. "Ultrasonic Testing of Materials". Springer-Verlag. 1990. pág 522-524.
- [6] H. Jeong and D. K. Hsu, "Quantitative estimation of material properties of porous ceramics by means of composite micromechanics and ultrasonic velocity". NDT & E. International, Vol 29, No 2, pág. 95-101, 1996.
- [7] M. G. Hernández, M.A.G. Izquierdo, A. Ibáñez, J.J. Anaya, L.G. Ullate, "Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDE", Ultrasonics, num. 38 (2000), 531-533
- [8] J. E. Michaels, T. E. Michaels and S. Jönson. "Ultrasonic Methods for Detection of Microporosity in Composite Materials" Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, vol 12, pág. 1281-1287, 1993.