



**FIA 2018**

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre**

## **INFLUENCIA DEL GRADO DE SATURACIÓN EN LA PROPAGACIÓN DE ONDAS EN MEDIO SÓLIDO**

**PACS:** 43.35.Zc

Miró, Marina; Carbajo, Jesús; Poveda, Pedro; De Vera, Guillem, Segovia, Enrique; Ramis, Jaime, Climent, Miguel Ángel

Institución: Universidad de Alicante

Dirección: Carretera de San Vicente del Raspeig s/n, 03690

Población: San Vicente del Raspeig – Alicante

País: España

Tel: +34 965903400 (ext. 1121)

E-Mail: m.miro@ua.es

**Palabras Clave:** Mortero, Humedad, Ultrasonidos, No lineal

### **ABSTRACT**

The characterization of a solid medium sometimes involves studying the propagation of sonic or ultrasonic elastic waves. The degradation of materials such as concrete due to physical or chemical processes is affected by environmental factors. One factor affecting the wave propagation through porous media is the water content. Hence, a wide study of the moisture effect on ultrasonic wave propagation has been carried out both on inert samples, not affected by degradation processes, and on materials suffering from sulphate attack. This will allow isolating the water content effect on degradation processes. Moreover, vibroacoustic techniques have been used for contrast and verification.

### **RESUMEN**

La caracterización de un medio sólido a veces implica el estudio de la propagación de ondas elásticas sónicas o ultrasónicas. La degradación de los material como el hormigón debido a procesos físicos o químicos está relacionada con factores medioambientales. Uno de estos factores que afectan la propagación de ondas a través de medios porosos es el contenido de humedad. Por ello, se ha llevado a cabo un amplio estudio del efecto del contenido de humedad en probetas inertes, que no sufren un proceso de degradación y en materiales que han sufrido un ataque por sulfatos. Esto permitirá aislar el efecto del contenido de humedad en los procesos de degradación. Además, se han empleado técnicas vibroacústicas para contraste y verificación.



**FIA 2018**

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre**

## 1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO

El hormigón, como todos los materiales, se degrada con el tiempo por distintos procesos físicos y químicos que conducen a una limitación de la durabilidad de las estructuras de hormigón, generando daño y fisuración. Esta fisuración es atribuible a numerosas causas, pudiendo afectar únicamente a la apariencia de una estructura, pero también pueden indicar fallas estructurales significativas. Algunos procesos que provocan mermas de la durabilidad del hormigón son la corrosión de armaduras o el ataque por sulfatos con formación de ettringita [1].

La detección temprana de la fisuración es necesaria para evitar mayores daños que puedan resultar irreversibles y más costosos. Los métodos basados en ondas elásticas sirven para evaluar propiedades mecánicas y para detectar daño en materiales y estructuras, ya que las ondas son reactivas a defectos y discontinuidades, tales como fisuras [2]. No obstante, estos métodos convencionales solo pueden detectar fisuras de tamaño de milímetros, mostrando poca o ninguna sensibilidad a las microfisuras iniciales de los procesos de degradación [3].

Recientemente se ha demostrado que las técnicas ultrasónicas no lineales (UNL) pueden aplicarse a la detección no destructiva de la degradación de materiales en edades tempranas, al ser sensibles a las microfisuras a diferencia de las técnicas clásicas [4]. Esto se debe a que las discontinuidades se pueden relacionar con la aparición de no linealidades mediante el análisis de los armónicos de orden superior de una onda propagada a través de un material.

No obstante, existen numerosas variables que influyen en el comportamiento de las ondas en el medio y que pueden interferir en los resultados de las medidas UNL a la hora de detectar la fisuración. Uno de estos factores que afectan la propagación de ondas a través de medios porosos es el contenido de humedad, ya que los cambios en la interfase sólido, líquido y aire, producen modificaciones en la impedancia. Por ello, se ha llevado a cabo un estudio del efecto del contenido de humedad en probetas inertes, que no sufren un proceso de degradación y en materiales que han sufrido un ataque por sulfatos con el fin de aislar el efecto del contenido de humedad en los procesos de degradación utilizando técnicas ultrasónicas y vibroacústicas, que se describirán en la sección 3, para contraste y verificación.

Este estudio se enmarca en un proyecto de investigación (BIA2016-80982-R), en el que se pretende consolidar la propuesta de utilización de técnicas ultrasónicas no lineales (UNL) a la detección no destructiva de la fisuración del hormigón debida a corrosión de armaduras y otros procesos físico-químicos que conducen a expansiones internas.

## 2. MARCO TEÓRICO

En las técnicas clásicas lineales se puede observar como las microfisuras en el hormigón tienden a producir la difusión de las ondas ultrasónicas, limitando su velocidad y amplitud. Lo mismo ocurre con el porcentaje de humedad, ya que en las primeras etapas, una disminución de la cantidad de agua presente lleva a un descenso en la velocidad de propagación de las ondas debido a la reducción de la densidad y del módulo elástico del material. No obstante, esta situación se invierte para contenidos de humedad muy bajos, ya que al incrementarse las fuerzas capilares, el módulo elástico crece. En esta situación la velocidad de propagación de las ondas alcanza valores cercanos a los de la muestra saturada [5].

Cuando el medio de estudio tiene un comportamiento no lineal, en una escala macroscópica, la ley constitutiva deja de ser lineal y para caracterizar el comportamiento elástico no lineal de un material, se vuelve necesario el uso de parámetros no lineales. En una escala microscópica, la

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

velocidad de las ondas también depende del nivel de deformación y la onda tiende a distorsionarse [5].

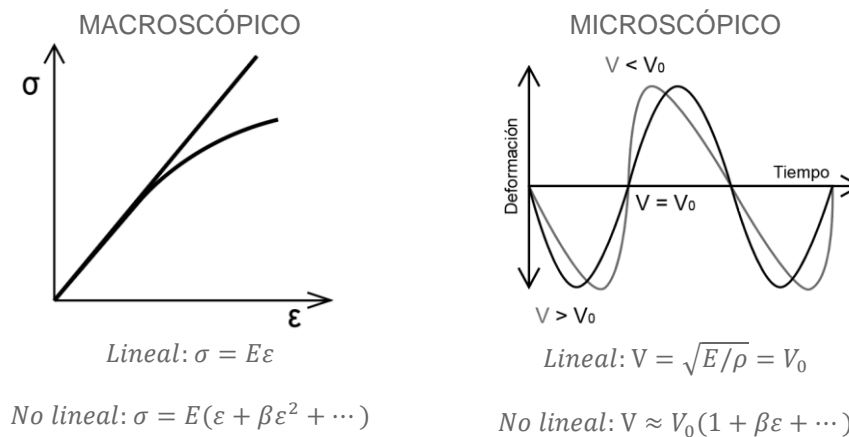


Figura 1. Efectos no lineales a escala macroscópica y microscópica [5].

Se ha comprobado que en un medio no lineal, al emitir una onda ultrasónica, en la señal recibida se generan armónicos de orden superior. El análisis de estos armónicos, permite determinar los parámetros de no linealidad ( $\beta_1$  y  $\beta_2$ ) indicadores de la aparición de no linealidades en el medio, que aquí definimos como:

$$\beta_1 = \frac{A_2}{A_1^2} \quad \beta_2 = \frac{A_3}{A_1^3} \quad (1)$$

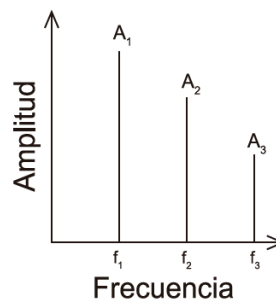


Figura 2. Frecuencia fundamental ( $f_1$ ) y generación de armónicos de orden superior ( $f_2$  y  $f_3$ ) en la señal.

### 3. MATERIALES Y METODOLOGÍA

#### 3.1. Muestras

Las probetas utilizadas fueron de dos tipos. Por un lado, probetas prismáticas de piedra biocalcarena de dimensiones 8x6x35 cm. Por otro lado, se emplearon probetas prismáticas de 8x8x35 cm de mortero. Para la fabricación de estas últimas se realizan tres amasadas, y la dosificación de cada amasada es de 408,6 g de cemento CEM I 52,5 R, 1350g de arena normalizada CEN, 41,4 g de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  y 225g de agua destilada. La preparación de cada amasada se realiza mediante la mezcla y homogeneización del cemento y el  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  y su amasado con el agua y la arena según la norma UNE-EN 196-1:2005 para, posteriormente proceder a su curado durante 7 días.

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

### 3.2. Configuración de medida

Se han realizado dos tipos de medidas. En el primer caso, se realizan medidas en media-baja frecuencia, mediante el uso de un actuador electrodinámico (Figura 3a) como emisor y un acelerómetro como receptor. Estas medidas se han llevado a cabo con el software comercial CLIO, emitiendo una señal MLS (Maximun Length Sequence). Este tipo de configuración experimental ya ha sido contrastada con otras habitualmente utilizadas [6]. El otro tipo de medidas se ha realizado mediante un transductor emisor y un receptor del tipo IDK09 [7]. La señal ultrasónica generada por la tarjeta, es amplificada y excita el transductor emisor. Se emite la señal a distintos voltajes entre 120 y 200 V.

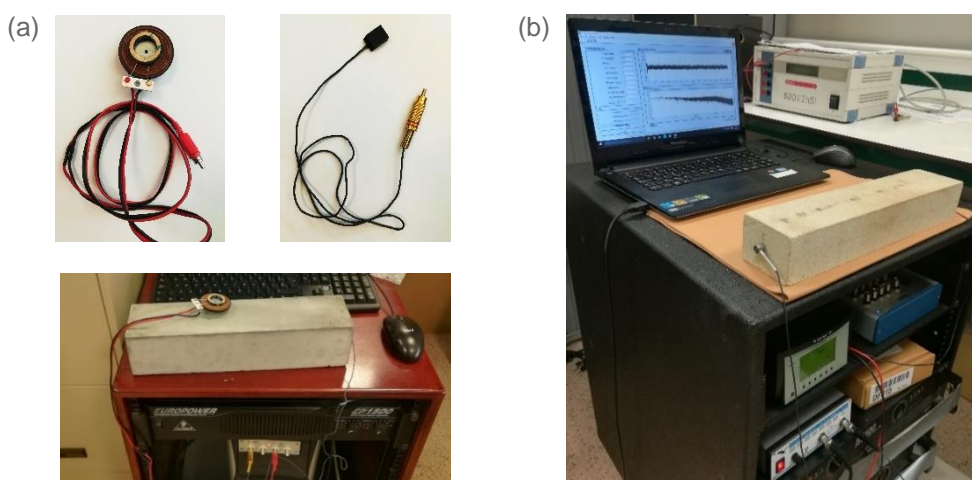


Figura 3. Configuración de las medidas vibroacústicas (a) y de ultrasonidos (b).

### 3.3. Procedimiento

Las probetas de estudio una vez pesadas en seco, se sumergen en agua durante, al menos, 7 días para conseguir su completa saturación. A continuación, se extraen del agua, se secan superficialmente y se vuelven a pesar para conocer la masa saturada. En ese momento se realizan los ensayos y se dejan a temperatura ambiente. Una vez hecho esto se procede a realizar medidas periódicas por ambos métodos y el pesado de las muestras, para conocer por diferencia de pesadas el porcentaje de humedad para cada medida.

Hay que tener en cuenta que los ciclos de humectación y secado para los dos materiales deben de ser diferentes por sus características. La piedra biocalcarenita es mucho más porosa y de menor sección, por lo que pierde gran parte del agua en las primeras horas (del orden del 70% en las primeras 48 horas), mientras que el mortero es más compacto y de mayor sección, por lo que conseguir su secado total a temperatura ambiente es prácticamente imposible, necesiándose una semana para conseguir una reducción del 50%.

Las medidas vibroacústicas se repetían cinco veces por probeta, a cada humedad de estudio y de la señal recibida se extraía información de la frecuencia fundamental y del factor de calidad (definido como el cociente entre la frecuencia fundamental correspondiente al primer modo y el ancho de banda de potencia mitad - diferencia entre las frecuencias para las cuales la amplitud cae 3dB -  $Q = f_0 / (\Delta f)_{-3dB}$ ). Las medidas ultrasónicas consistían en la emisión de una señal sinusoidal de 30 kHz, a diferentes voltajes y, de la señal recibida, se ha estudiado la señal en el tiempo y la respuesta en frecuencia, determinando la amplitud de la frecuencia fundamental y los dos primeros armónicos generados, con el objeto de obtener los parámetros de no linealidad (1).

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados de las medidas vibroacústicas en ambos tipos de probetas. Se observa un aumento tanto de la frecuencia fundamental como del factor de calidad a medida que la probeta de biocalcarenita pierde agua y que, para todas las series, se repiten los mismos valores. No obstante, en las probetas de sulfatos se observa que, aunque la tendencia creciente de los valores a menor humedad se repite, éstos además aumentan para cada serie, siendo este efecto mayor a humedades bajas (Figura 4).

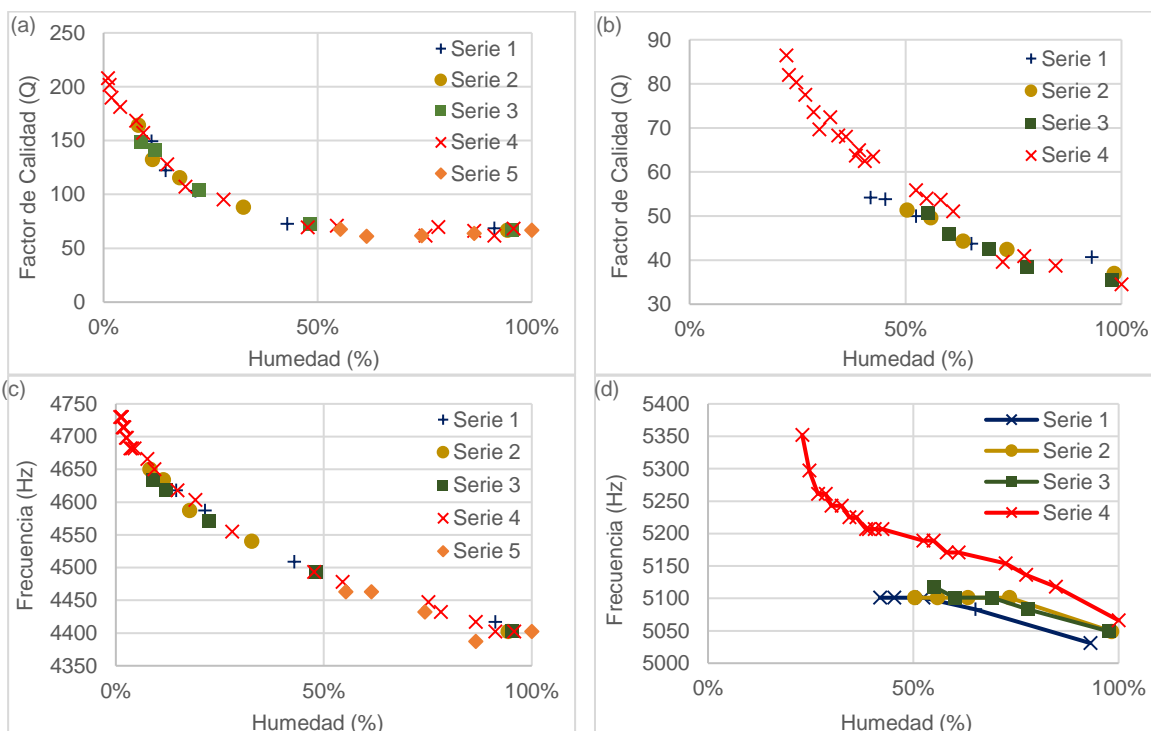


Figura 4. Resultados de las medidas vibroacústicas. Factores de calidad: (a) Probeta de sulfatos, (b) Probeta de biocalcarenita. Frecuencia fundamental: (c) Probeta de sulfatos, (d) Probeta de biocalcarenita.

En cuanto a las medidas de ultrasonidos, primeramente, cabe destacar que para el caso de las probetas de biocalcarenita, el parámetro de no linealidad crece de forma exponencial a humedades muy bajas. Sin embargo, en las probetas de sulfatos, el parámetro de no linealidad parece crecer a humedades medias (40-55% de humedad) y volver a disminuir para humedades muy bajas (Figura 5).

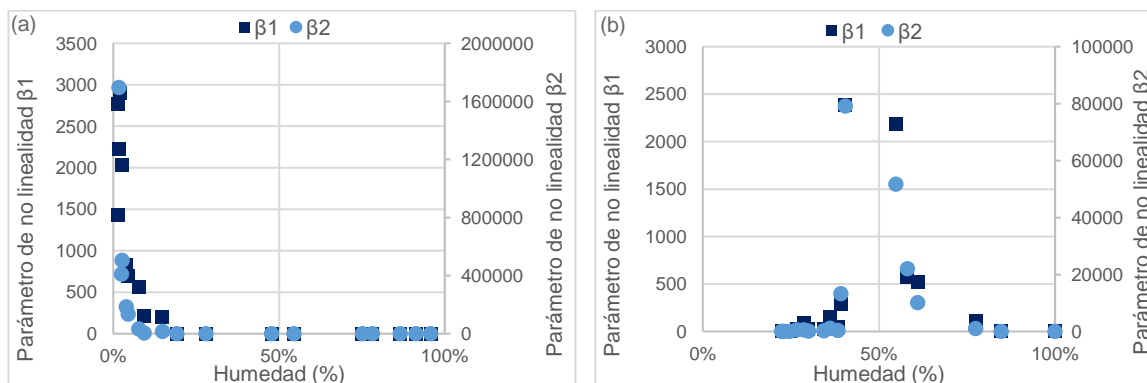


Figura 5. Parámetros de no linealidad  $\beta_1$  y  $\beta_2$ . (a) Probeta de biocalcarenita (b) Probeta de sulfatos.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

En las probetas de biocalcarenita se observa claramente como la amplitud de la señal recibida disminuye con el contenido de agua a porcentajes de humedad medios, volviendo a aumentar para porcentajes muy bajos. Sin embargo, como se podía esperar del estudio de los parámetros de no linealidad, la señal en el tiempo se distorsiona cada vez más a medida que disminuye el porcentaje de humedad y que esta distorsión aparece con un menor voltaje de la señal emitida (Figura 6).

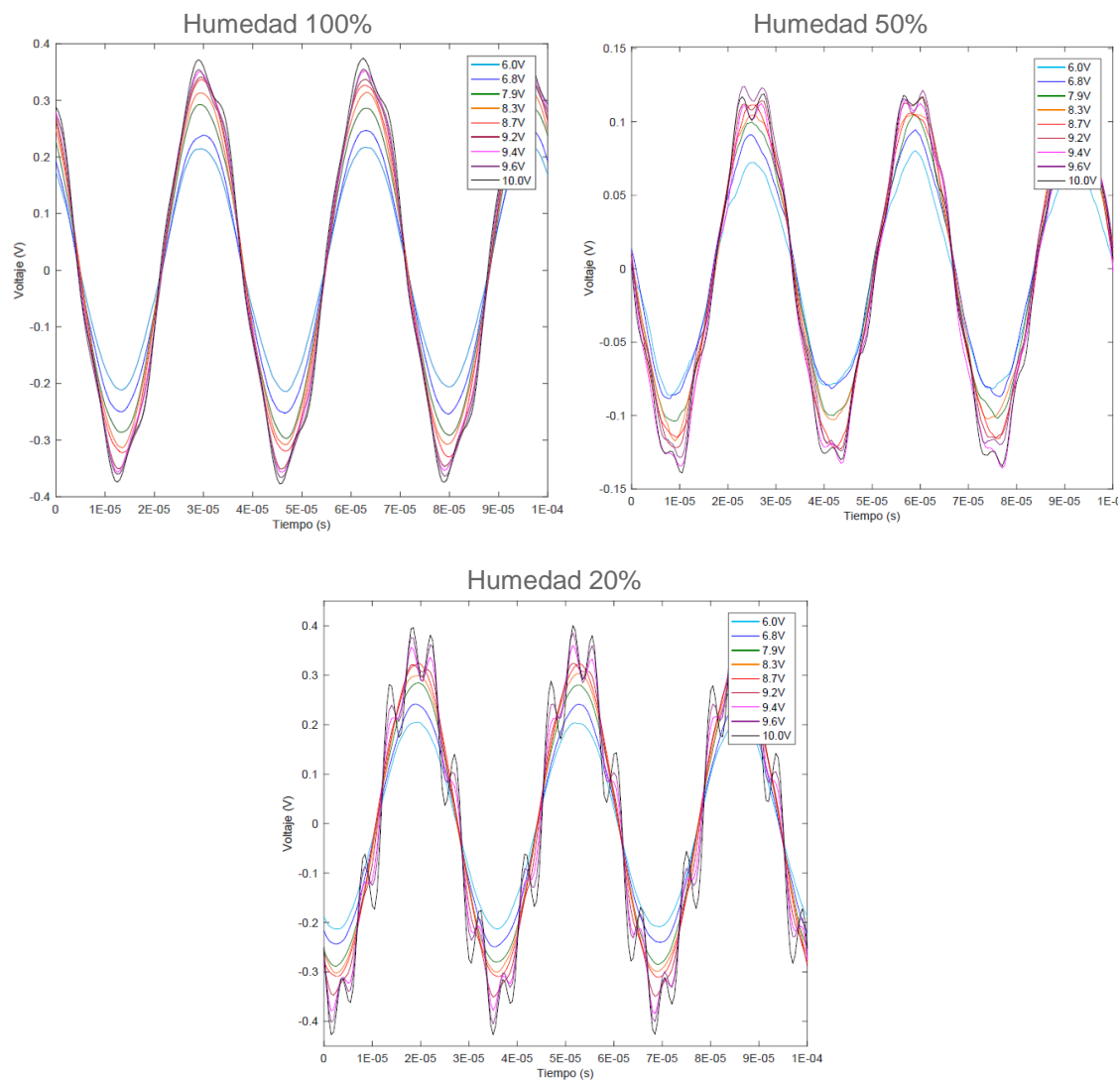


Figura 6. Variación de la señal en el tiempo de las probetas de piedra biocalcarenita, para diferentes voltajes en la señal emitida, según el contenido de humedad.

En el caso de las probetas de sulfatos se aprecia que las amplitudes de la señal recibida también disminuyen entre la situación de la probeta totalmente saturada y cuando alcanza una humedad media. Posteriormente, la amplitud vuelve a crecer. No obstante, en estas probetas se comprueba como la amplitud de la señal en cada ciclo va disminuyendo, a medida que la probeta se degrada y aparecen las microfisuras por el efecto de los sulfatos. Además, en este caso la distorsión de la señal se maximiza a humedades medias en el último ciclo, cuando además la amplitud de la señal recibida es mínima (Figura 7).

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

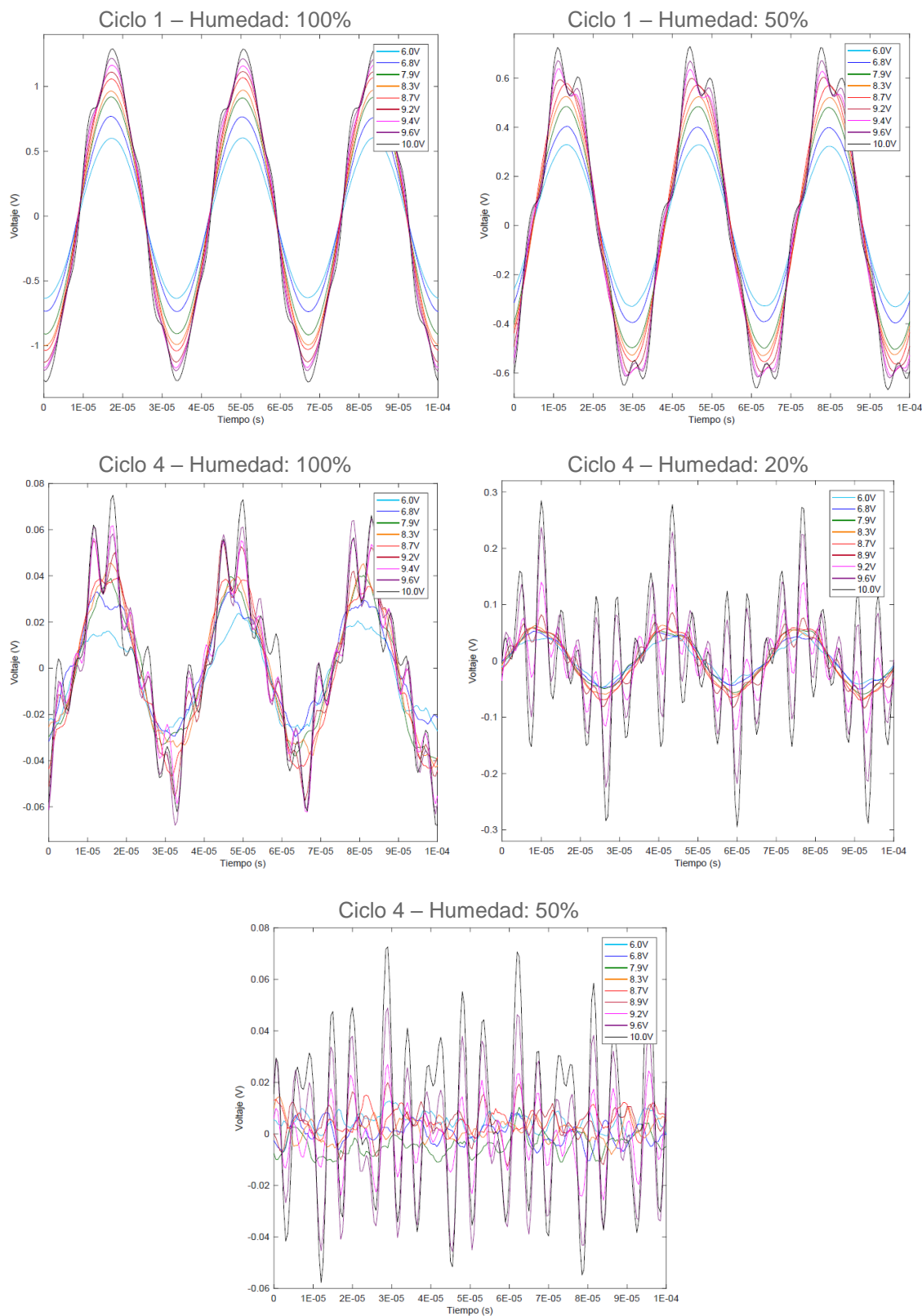


Figura 7. Variación de la señal en el tiempo de las probetas de mortero con sulfatos, para diferentes voltajes en la señal emitida, según el contenido de humedad y el grado de degradación.



## FIA 2018

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18- 24 al 26 de octubre**

### 5. CONCLUSIONES

El grado de humedad es un factor que influye altamente en la señal recibida, por lo que podría inducir a error en el análisis de las medidas de ultrasonidos cuando se estudian otros procesos de degradación. Los resultados aquí expuestos muestran algunos procesos de interacción de los efectos en la señal entre la humedad y un proceso de degradación. No obstante, para conseguir controlar la influencia del contenido de agua en un proceso de degradación hará falta el análisis de más muestras y una profundización en el análisis de los resultados.

### AGRADECIMIENTOS

Se agradecen los fondos recibidos para esta investigación de la Agencia Estatal de Investigación (AEI) y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del proyecto BIA2016-80982-R. Además, este trabajo ha podido ser realizado gracias al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, a través de la beca de Formación de Profesorado Universitario (FPU16/04078). Finalmente, se agradece a Lafarge-Holcim España por proporcionar las muestras de cemento para preparar las probetas de mortero.

### REFERENCIAS

- [1] J. Marchand, I. Odler, J.P. Skalny, Sulfate attack on concrete, CRC Press2003.
- [2] A. Zaki, H.K. Chai, D.G. Aggelis, N. Alver, Non-Destructive Evaluation for Corrosion Monitoring in Concrete: A Review and Capability of Acoustic Emission Technique, Sensors 15(8) (2015) 19069-19101.
- [3] J. Jin, M.G. Moreno, J. Riviere, P. Shokouhi, Impact-Based Nonlinear Acoustic Testing for Characterizing Distributed Damage in Concrete, Journal of Nondestructive Evaluation 36(3) (2017).
- [4] A.A. Shah, Y. Ribakov, S. Hirose, Nondestructive evaluation of damaged concrete using nonlinear ultrasonics, Materials & Design 30(3) (2009) 775-782.
- [5] J.-P. Balayssac, V. Garnier, Non-destructive testing and evaluation of civil engineering structures, Elsevier2017.
- [6] J. Torres-Romero, W. Cardenas, J. Carbajo, E.G. Segovia Eulogio, J. Ramis-Soriano, An Experimental Approach to Vibro-Acoustic Study of Beam-Type Structures, Archives of Acoustics 43(2) (2018) 283-295.
- [7] Dakel., IDK09., (s.f.). <http://www.dakel.cz>. (Consultado en agosto de 2018).