

# CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES REOLÓGICAS DE PASTAS DE CEMENTO POR ULTRASONIDOS

Carles Gallardo<sup>1</sup>, Alicia Carrión<sup>1</sup>, Alba Font<sup>2</sup>, Jordi Payá<sup>2</sup>, Jorge Gosálbez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (ITEAM-UPV)  
{ email: cargall2@teleco.upv.es, algarca4@upv.es, jorgocas@dcom.upv.es }

<sup>2</sup> Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH-UPV)  
{ email: alpefron@upv.es, jjpaya@cst.upv.es }

## Resumen

En este trabajo se presenta el diseño de una celda óptima para la monitorización del proceso de fraguado de pastas de cemento por ultrasonidos junto con el registro continuo y simultáneo de parámetros ambientales (presión, humedad y temperatura) aplicado a diferentes relaciones agua/cemento (0.4, 0.5 y 0.6). Las señales de ultrasonidos empleadas han sido sinusoidal continua, sinusoidal burst y sinusoidal con variación lineal de frecuencia (chirp) en el rango frecuencial, entre 20 y 400 kHz. Esta última, permite analizar el mismo rango frecuencial que el resto, optimizando la tasa de adquisición en el tiempo. Los resultados de velocidad de propagación obtenidos para las distintas pastas de cemento permiten identificar la evolución propia del material a lo largo del tiempo, caracterizada así mismo mediante la temperatura y la humedad. Además, la conversión de onda S a onda P, permite caracterizar la transición de estado líquido a sólido de la mezcla bajo estudio.

**Palabras clave:** pastas de cemento, ultrasonidos, velocidad, propiedades reológicas.

## Abstract

This work presents the design of an optimal cell for the monitoring of cement pastes by ultrasound along with the continuous and simultaneous recording of environmental parameters (pressure, humidity and temperature) applied to different water to cement ratios (0.4, 0.5 and 0.6). The input ultrasound signals used have been continuous sinusoidal, burst sinusoidal and sinusoidal with linear variation of frequency (chirp) in the frequency range between 20 and 400 kHz. The latter allows the same frequency range to be analyzed as the rest, optimizing the acquisition rate over time. The propagation speed results for the different cement pastes, allows identifying the material's evolution over time, also characterized by temperature and humidity. In addition, the progressive conversion from S wave to P wave, depending on the proper composition of each of the mixtures, also allows characterizing the progressive transition from liquid to solid state of the mixture under study.

**Keywords:** Cement paste, ultrasounds, velocity, rheological properties.

**PACS no. 43.35.Bf**

## 1 Introducción

El hormigón es el material sintético más ampliamente utilizado en la actualidad a nivel mundial. Nuevas aplicaciones especiales (hormigones autocompactantes, hormigones de altas prestaciones, hormigones para impresión 3D, etc.) requieren del aumento del conocimiento del comportamiento del material, concretamente en situaciones de pre-fraguado (estado fresco) relacionadas con aspectos reológicos de morteros y hormigones. Por todo ello en los últimos años se han propuesto diferentes técnicas de medidas de ultrasonidos para la monitorización del proceso de hidratación y formación de la estructura de dichos materiales cementicios.

Hasta la fecha la mayoría de los estudios se han centrado en el análisis de la variación de la velocidad de ondas de presión (u ondas primarias) debido a razones técnicas ([1-2], [4-9]). Los resultados alcanzados han permitido de forma aproximada identificar el instante de setting y hardening del material. Sin embargo, la sensibilidad de las ondas de presión a las burbujas de aire, y al equipamiento involucrado también ha quedado patente [3]. Se ha demostrado que con 1% de burbujas la velocidad de las ondas P se reduce drásticamente en los instantes iniciales de fraguado (de 1500 m/s a 200 m/s). También ha quedado demostrado que en las ondas S (o secundarias), cuya velocidad es menor que la de las ondas primarias, las burbujas tienen un efecto menor sobre su variación [3].

La mejora del equipamiento empleado, así como la capacidad de control de todas las variables involucradas ha permitido que en los últimos años se propongan nuevos métodos de ultrasonidos que no sólo analizan el instante de llegada de la señal, sino que además extraen información del resto de la señal temporal. Grosse y Reinhardt [5] señalan que el uso de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) permite identificar dos frecuencias principales durante el endurecimiento del hormigón. Resultados similares han sido probados por Kamada et al. [10] con pastas de cemento. De acuerdo con Robeyst et al. [11] en la primera parte del experimento cuando el material está todavía en suspensión líquida solo se pueden propagar señales de bajas frecuencias y con poca energía, mientras que las altas frecuencias se atenúan completamente. Cuando el material se empieza a fijar, las altas frecuencias aparecen gradualmente. Robeys et al. [11] indican que los cambios en el espectro frecuencial deben estar, de alguna manera, relacionados con el fenómeno de endurecimiento de los materiales cementicios.

Todos estos estudios constituyen la base del presente trabajo, y sin lugar a dudas demuestran la posibilidad del empleo del espectro frecuencial para la monitorización del proceso de fraguado, sin embargo, más experimentales son necesarios para extrapolar el enfoque frecuencial a un estudio en función de la frecuencia de la señal de entrada. El presente estudio propone analizar el comportamiento de las ondas longitudinales y transversales en función de la frecuencia de la señal de entrada. En la parte experimental, ambas ondas primarias y secundarias (ondas P y ondas S, respectivamente) han sido monitorizadas en pastas de cemento con tres ratios agua/cemento distintos ( $a/c=0.4, 0.5$  y  $0.6$ ). El desarrollo óptimo de una celda de medida propia ha permitido extrapolar el análisis por ultrasonidos de la velocidad al parámetro de la atenuación de la señal. El estudio ha permitido comparar los resultados cuando se trabaja con señales de banda estrecha variando la frecuencia de la señal de entrada (señal burst), y señales de banda ancha (señal chirp).

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera. En la Sección 2, se describen matemáticamente las señales empleadas además del post-procesado empleado para su análisis. La Sección 3 recoge el experimental empleado para el estudio, así como la descripción de las muestras bajo estudio. En la Sección 4 se describen los resultados alcanzados tanto para los parámetros ambientales analizados como en función de la señal de ultrasonidos empleada. Por último, en la Sección 5 se describen las conclusiones alcanzadas y las líneas de trabajo futuras.

## 2 Antecedentes matemáticos

Los distintos parámetros que se pueden extraer de una señal de ultrasonidos permiten caracterizar propiedades físicas y mecánicas del material bajo estudio. En el presente estudio se propone la comparación de la caracterización de la evolución de las pastas de cemento mediante pulsos modulados en frecuencia (señales burst) y pulsos con variación lineal en frecuencia (señal chirp). Una única señal chirp permite hacer un barrido frecuencial equivalente al de las señales burst aplicando un óptimo procesado de señal incrementando la resolución temporal para la monitorización del experimento [12].

La señal burst es una configuración habitual en el ámbito de los END ya que permite simultáneamente observar diferentes parámetros de la señal (energía, velocidad, atenuación, etc.). La expresión teórica corresponde con una señal sinusoidal limitada en el tiempo:

$$s_{tx}(t) = A_{tx} \cdot \text{sen}(2\pi f_0 t) \cdot \text{rect}\left(\frac{t - \frac{NT_0}{2}}{NT_0}\right) \quad (1)$$

donde  $A_{tx}$  es la amplitud de la señal,  $f_0$  es la frecuencia fundamental de la señal,  $T_0 = 1/f_0$  es el periodo fundamental,  $N$  es el número de ciclos de la señal y  $\text{rect}(\cdot)$  es la función rectangular.

La expresión matemática de la señal chirp es:

$$s_{tx}(t) = A_{tx} \cdot \text{sen}(2\pi f_0 t + \pi \Delta f_{max} t^2) \cdot \text{rect}\left(\frac{t - \frac{T}{2}}{T}\right) \quad (2)$$

dónde

$$\Delta f_{max} = \frac{f_{max} - f_0}{T} \quad (3)$$

y  $A_{tx}$  es la amplitud de la señal,  $f_0$  es la frecuencia fundamental de la señal,  $\text{rect}(\cdot)$  es la función rectangular,  $T$  es la duración de la señal en activo, y  $\Delta f_{max}$  controla el valor de la frecuencia máxima ( $f_{max} = f_0 + T\Delta f_{max}$ ) que se alcanzará a los  $T$  segundos (Eq. 3).

Para señales no continuas, la velocidad de propagación,  $v \left[ \frac{m}{s} \right]$ , se calcula como el cociente entre la distancia del material recorrida,  $d_{mat}[m]$ , y el instante de llegada de la señal,  $\tau_a[s]$  (Eq. (4)). La llegada de la señal se estima como el instante de tiempo en el que la señal supera el 50% del nivel de ruido.

$$v \left[ \frac{m}{s} \right] = \frac{d_{mat}[m]}{\tau_a[s] - \tau_{calib}[s]} \quad (4)$$

Nótese que el tiempo de vuelo ha de ser normalizado respecto al retardo introducido por el sistema empleado  $\tau_{calib}[s]$  estimado mediante un proceso previo de calibración.

La atenuación característica de la mezcla bajo estudio no se puede caracterizar de una manera global, sino que hay que tener en cuenta la atenuación introducida a cada frecuencia. La atenuación en función de la frecuencia  $\alpha(f)$  se puede modelar de la forma (Eq. (5)):

$$\alpha(f)[dB/m] = \frac{10 \cdot \log(S_{tx}(f)) - 10 \cdot \log(S_{rx}(f)) - \alpha_{equip}(f)}{d_{mat}} \quad (5)$$

donde  $S_{tx}(f)$  y  $S_{rx}(f)$  son la densidad espectral de energía de las señales transmitida y recibida, respectivamente, a la frecuencia bajo estudio,  $d_{mat}[m]$  es la distancia recorrida por la señal y  $\alpha_{equip}(f)$  es la atenuación introducida por el equipamiento de medida en función de la frecuencia. En cada caso, señal burst y señal chirp, el espectro de la señal transmitida teórico será calculado de la forma correspondiente. Para más detalles de este proceso véase [12].

A costa de disminuir la relación señal a ruido (SNR), las señales de banda ancha permiten excitar múltiples frecuencias simultáneamente, y mediante el óptimo procesado de señal permiten calcular la atenuación en función de la frecuencia a partir de una sola señal. La banda de frecuencia a la cual podemos trabajar viene determinada por el transductor de excitación. Es necesario por tanto transductores de banda ancha, que permitan excitar en un amplio abanico de frecuencias simultáneamente [13].

### 3 Experimental

Este estudio implica no solo tener el control absoluto de las señales de excitación y señales medidas, y del conocimiento exhaustivo del equipamiento involucrado para el cálculo de la velocidad y la atenuación sino además la capacidad de medir simultáneamente las variables ambientales (temperatura, presión y temperatura). Para poder hacer todo ello de forma óptima ha sido necesario desarrollar un sistema completo de medida que combine la celda de medida, el equipamiento de ultrasonidos y los sensores ambientales. Además en este apartado también se describe la naturaleza de las pastas de cemento analizadas, así como el protocolo de mezclado que asegura la reproducibilidad entre experimentos.

#### 3.1 Celda de medida

Para poder realizar las medidas se necesita una celda que contenga tanto a los transductores pegados de forma firme y que al mismo tiempo contenga la mezcla de cemento lo más estanca posible. Para ello, se diseña una celda partiendo de la base de las recomendaciones RILEM [4]. De acuerdo con la Figura 1 y desde el exterior al interior, nos encontramos primeramente dos placas realizadas con PLA (Ácido Poliláctico) empleando un diseño propio de impresión 3D y con un agujero central donde quedan fijados los transductores ultrasónicos. El grosor de cada una de estas placas es de 10 mm. A continuación, nos encontramos dos láminas de metacrilato (PMMA) de 1mm cada una que evitan el contacto directo de los transductores con el material. Finalmente, se añade una placa más ancha de poliestireno expandido (corcho) de 60mm de espesor con forma de U donde se vierte la pasta de cemento.

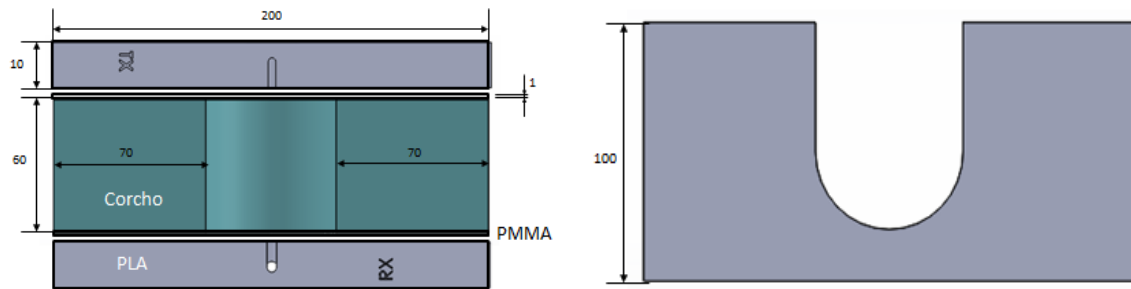


Figura 1. Dimensiones de la celda de medida en alzada y planta.

En cada experimento se emplearán dos celdas idénticas: una para la medida de ultrasonidos, y otra para la medida de los parámetros ambientales (véase Figura 1 y Figura 4, respectivamente). Los sensores ambientales no se introducen en la celda de US para evitar interferencias de ningún tipo.

### 3.2 Equipamiento de ultrasonidos

El equipamiento de ultrasonidos empleado está representado esquemáticamente en la Figura 2. Para la inspección ultrasónica se utilizan transductores *Panametrics NDT v151 0.5 MHz 1'' VIDEOSCAN* de onda S. Para mejorar el acoplamiento de energía entre el transductor y la superficie de contacto, se emplea un gel acoplante específico para onda S (OLYMPUS COUPLANT SWC-2).

La adquisición y generación de señales se realiza mediante un osciloscopio y un generador de señales arbitrarias USB (Handyscope HS3), controlado mediante un software, que permite realizar barridos en amplitud y en frecuencia. Además, para mejorar la relación señal a ruido se introducen amplificadores tanto en transmisión como en recepción. En transmisión se emplea un amplificador de tensión FALCON WMA-300, y en recepción un amplificador de pequeña señal de señales ultrasónicas Panametrics 5600B, con un factor de ganancia de 40 dB.

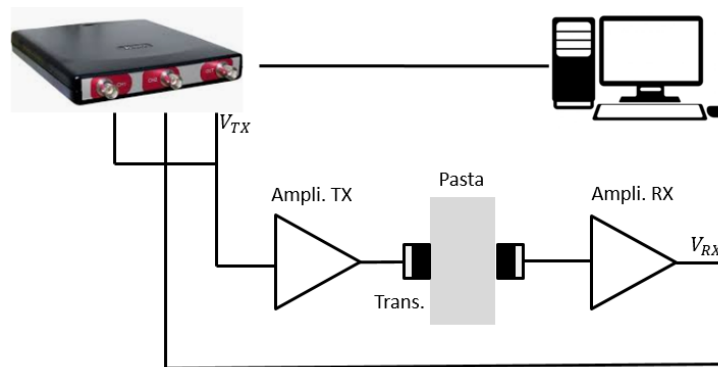


Figura 2. Esquema del sistema de generación y adquisición de señales de ultrasonidos.

De acuerdo con la descripción matemática de la Sección 2, las señales de excitación empleadas son: señales burst con barrido frecuencial entre 20 kHz y 400 kHz con incrementos de 5 kHz y señal chirp de banda ancha con variación lineal en frecuencia entre 20 kHz y 400 kHz. En ambos casos la amplitud de la señal es igual a 2V, frecuencia de muestreo igual a 10 MHz y promediado de 16 señales. En total cada inspección implica 77 medidas, las cuales tardan en realizarse 6 minutos aproximadamente. Nótese que la señal chirp implica solamente 10 segundos que son debidos al tiempo de estabilización de la señal. La monitorización se realiza durante 24 horas del experimento.

### 3.3 Sensores ambientales

Este sistema está formado por un Arduino MEGA 2560. A éste se le conectan diferentes sensores, así como un reloj externo y una tarjeta SD para ir guardando los datos de los diferentes sensores. El sensor de temperatura empleado es el DS1820 capaz de medir temperaturas entre -55 y 125 °C, con una precisión de  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  y con un tiempo de captura inferior a 750 ms. En nuestro caso se han colocado tres sensores de temperatura: dos que se colocan dentro de la propia mezcla (centro y esquina inferior derecha, véase Figura 4) y otro que se pone en el exterior de la mezcla para monitorizar la temperatura ambiente. En la Figura 3 se muestran dos imágenes de este bloque: la implementación del datalogger (Figura 3a) y el sensor de temperatura DS1820 (Figura 3b).

Por otro lado, el sensor de humedad, presión y altitud empleado es el BME280. Este sensor puede medir la humedad relativa de 0 a 100 %, con una precisión de  $\pm 3\%$ , la presión barométrica de 300 hPa a 1100 hPa con una precisión absoluta de  $\pm 1$  hPa, y además también mide temperatura en el rango de  $-40^\circ\text{C}$  a  $85^\circ\text{C}$  con una precisión de  $\pm 1$  °C. También posee la funcionalidad de altímetro que no ha sido empleada en esta aplicación.

Para tener una referencia del tiempo de captura y evitar reinicializaciones ante posibles fallos de alimentación, se emplea un reloj externo y autónomo conectado al sistema. Con ello, podemos ir registrando el instante de tiempo de las medidas de los sensores, pudiendo así configurar el intervalo temporal entre las mismas.

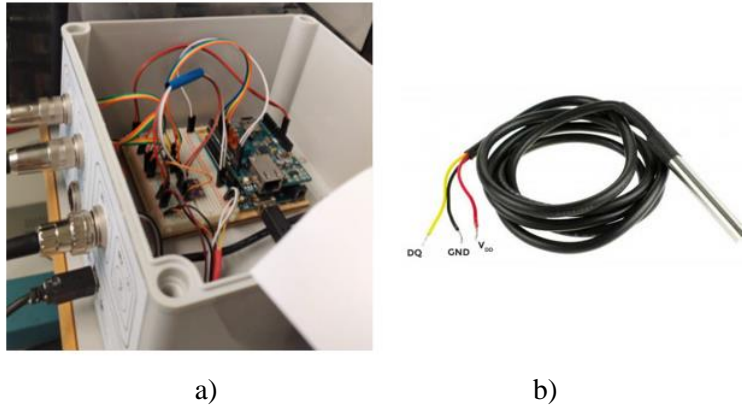


Figura 3. a) Implementación del datalogger. b) Sensor de temperatura DS1820.

### 3.4 Pastas de cemento

Se pretende monitorizar la temperatura, humedad y presión atmosférica, así como las señales ultrasónicas que atraviesan el sistema durante el proceso de fraguado de pastas de cemento. Para ello, se ha empleado cemento CEM I-52.5-R y agua a temperatura ambiente combinadas en diferentes dosificaciones resultando diferentes relaciones agua/cemento: 0.4, 0.5 y 0.6. Las proporciones empleadas en cada una de las mezclas son:

Tabla 1. Proporciones de agua/cemento empleadas.

	0.4	0.5	0.6
Cemento [gr]	700	650	600
Agua [ml]	280	325	360

Un aspecto fundamental para que el procedimiento sea reproducible es el protocolo de mezclado, el cual se describe a continuación:

1. Echar la cantidad total de agua para la mezcla en un recipiente. Nótese que dependerá de la relación agua/cemento.
2. Separar la cantidad total de cemento en dos partes iguales.
3. Echar la primera mitad del cemento en el recipiente con agua y mezclar durante 2'.
4. Añadir la segunda mitad del cemento al recipiente y mezclar durante 4'.
5. Dejar la mezcla en reposo durante 1'30''.
6. Mezclar durante 2'30''.
7. Rellenar las dos celdas de medida.
8. Dejar en reposo durante 5' antes de empezar a realizar las medidas.

En la Figura 4 se muestra un esquemático del sistema completo. Véase que las celdas de medida están dentro de armario estanco (dry keeper) que permite mantener el experimento aislado de las variaciones ambientales que pueda haber en el entorno de trabajo.

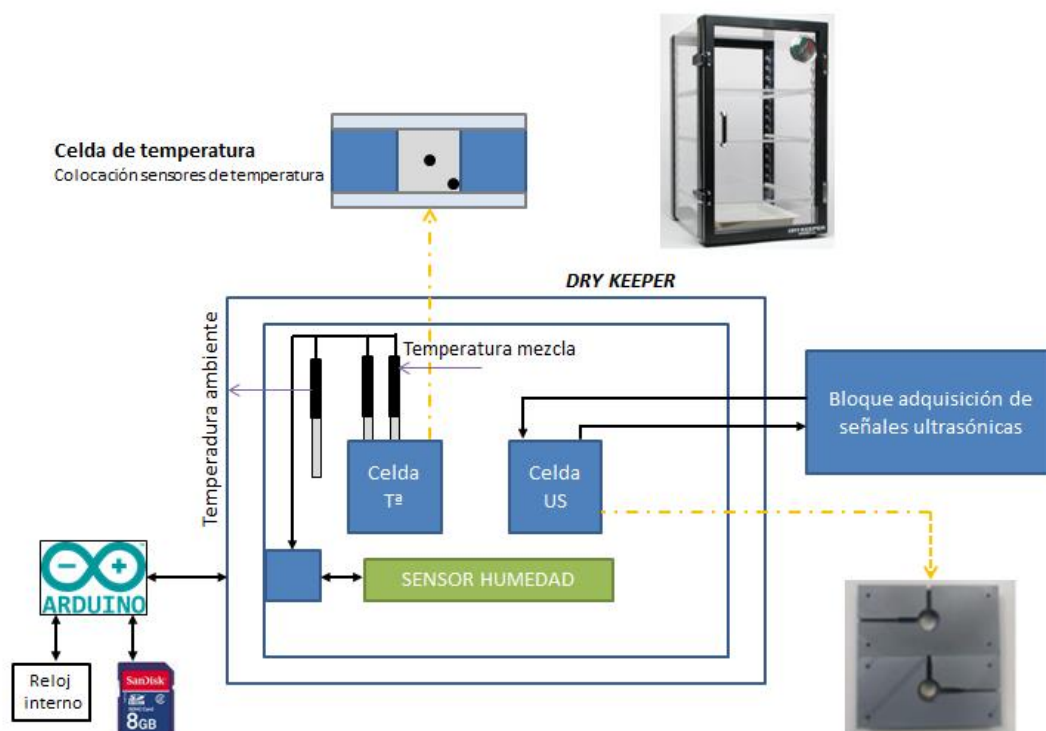


Figura 4. Diagrama de bloques del sistema completo de monitorización.

## 4 Resultados

A continuación se exponen los resultados, por un lado de las variables ambientales (temperatura y humedad), y por otro los correspondientes a la inspección ultrasónica.

### 4.1 Temperatura y humedad

La Figura 5 recoge los valores de temperatura y humedad registrados a través de los sensores descritos en la Sección 3.2. La comparación entre los registros de las distintas pastas demuestra que la pasta con menor relación agua/cemento (0.4) alcanza mayor temperatura y además en menor tiempo. Sin embargo, las pastas 0.5 y 0.6 tienen un comportamiento muy similar. Estos resultados demuestran que la presencia de mayor cantidad de agua en la mezcla regula en mayor medida la temperatura de la reacción de la pasta de cemento. Las pastas con relaciones 0.5 y 0.6 presentan un comportamiento muy similar en cuanto a temperatura debido al exceso de agua.

Los resultados de humedad dentro del armario estanco demuestran que a mayor relación a/c antes se alcanza un valor de humedad ambiente del 100%. En el caso de la pasta con relación a/c 0.4 se alcanza el 100% de humedad a las 8h49min, en la relación a/c 0.5 a las 3h27min y para la relación a/c 0.6 la humedad completa se alcanza a las 2h17min. Esto demuestra que la mezcla proporcionará agua al ambiente, y en mayor medida para mayores relaciones a/c.

La variación de presión a lo largo del experimento también se ha registrado, obteniendo valores entre 1010 y 1020 bar, sin cambios significativos relacionados con el estudio realizado.

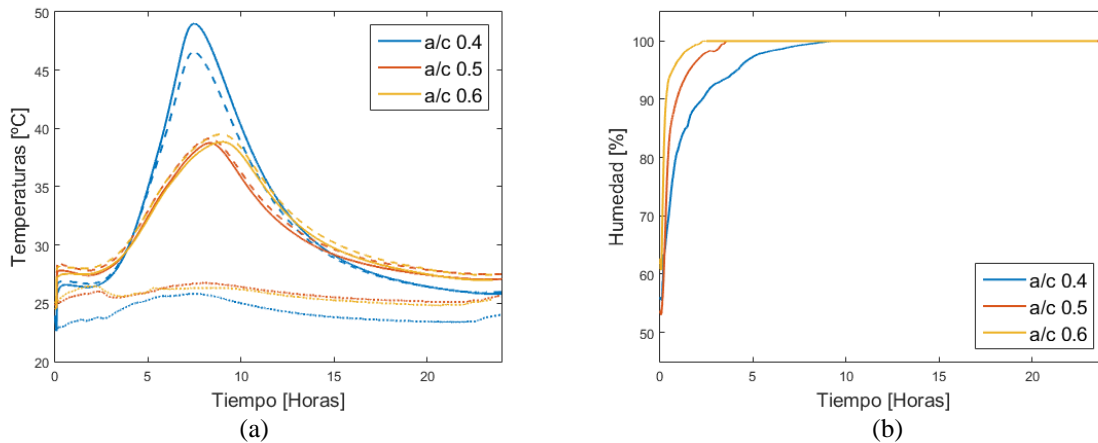


Figura 5. Resultados de temperatura y humedad obtenidos para cada una de las relaciones a/c estudiadas (0.4 azul, 0.5 rojo, 0.6 amarillo). Las medidas de temperatura se han registrado con diferentes sensores situados en distintas posiciones de la celda de medida (línea continua, sensor posicionado en la esquina inferior; línea de rayas, sensor posicionado en el centro y, línea de puntos, sensor de ambiente).

## 4.2 Ultrasonidos

A continuación, se comparan los resultados obtenidos en función de la frecuencia y la forma de onda de la señal de ultrasonidos empleada en la excitación.

### 4.2.1 Señal Burst.

La Figura 6, siguiendo la recomendación de [3], presenta los B-scan adquiridos para un pulso de frecuencia determinada (25 kHz, 200 kHz, y 400 kHz) a lo largo del tiempo del experimento, con el objetivo de identificar la propagación de la onda S y la onda P. En todos los casos se identifican las tres fases del experimento, en cuanto a lo que a la aparición de ondas de ultrasonidos se refiere. Una primera fase donde no se tiene señal recibida, exceptuando una oscilación inicial, de frecuencia elevada, debida a la aparición de burbujas de aire en la mezcla. Una segunda fase, donde aparece la onda S. Y una tercera fase donde aparece la onda P. Sin embargo, el instante de tiempo de transición entre fases depende no solo de la relación a/c de la pasta bajo estudio sino además de la frecuencia de excitación. En el caso de excitación a una frecuencia igual a 25 kHz, en los tres casos de relación a/c, predomina la aparición de la onda S. Cuando se excita a 200 kHz, en las primeras horas del experimento aparece la onda P. Para a/c 0.4 esto ocurre a las 4h, para a/c 0.5 a las 5h, y para a/c, a las 5h 30min. Igualmente, para una frecuencia de excitación igual a 400 kHz primero se observa la presencia de la onda S y posteriormente la onda P. En este caso para a/c 0.4 esto ocurre a las 4h30min, en a/c 0.5 5h, y a/c 0.6 6h. A partir de estas gráficas se observa que la transición de onda S a onda P depende también de la frecuencia de la señal de entrada.

La propagación de la onda S está relacionada exclusivamente con la evolución sólida del material. Por lo tanto, el instante de su aparición se puede correlacionar con el instante de setting [3]. Comparadas con las ondas P, las ondas S son menos sensibles a la presencia de burbujas en la mezcla y el empleo de esta configuración junto con el análisis de imágenes B-scan [3] ha permitido identificarlas en las primeras horas de ensayo. La Figura 7 presenta la estimación de la velocidad de la onda S y P para cada una de las mezclas. Nótese que las ondas S se detectan a partir de las 1h50' de experimento hasta las 7h, y las ondas P desde las 2h hasta las 10h. En el caso de los resultados de ultrasonidos no se presentan datos más allá de las 10h debido al efecto de la retracción que tiene lugar en las experiencias. Los resultados demuestran que la velocidad de los dos modos de propagación, P y S, disminuyen a medida que aumenta la relación a/c.



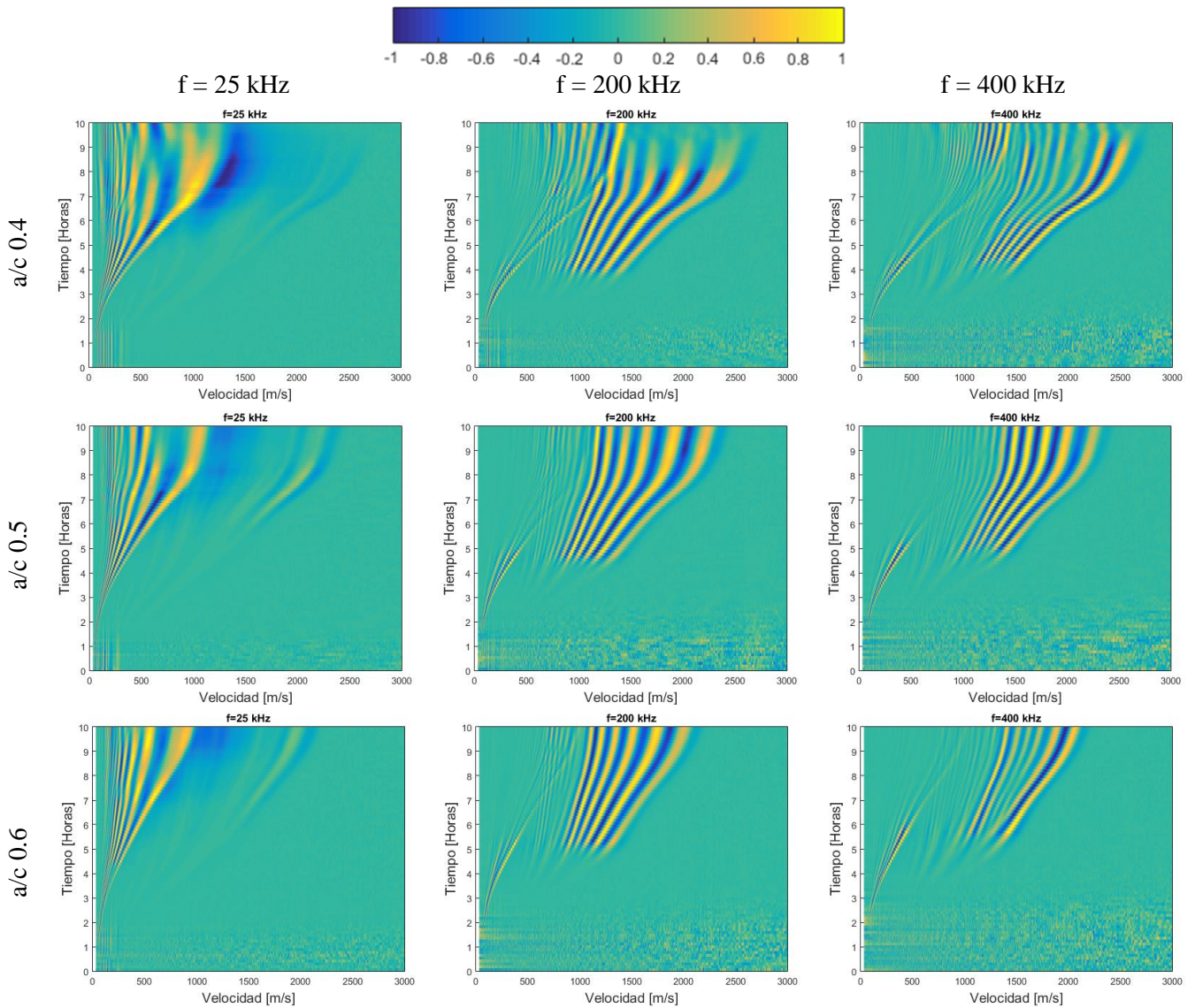


Figura 6. Diagramas de velocidad-tiempo de experimental obtenidos para cada relación agua/cemento y para señales burst a distintas frecuencias de excitación. Cada fila representa una relación agua/cemento (0.4, 0.5 y 0.6, respectivamente).

El barrido frecuencial empleando señales burst permite una excitación del experimento de banda estrecha. La Figura 8 recoge los valores de la frecuencia máxima de la señal de salida en función de la frecuencia de la señal de entrada y a lo largo del experimento. Los resultados demuestran que a pesar de excitar en una banda estrecha en las primeras horas del experimento la frecuencia máxima de las señales de salida corresponden con señales de más baja frecuencia.

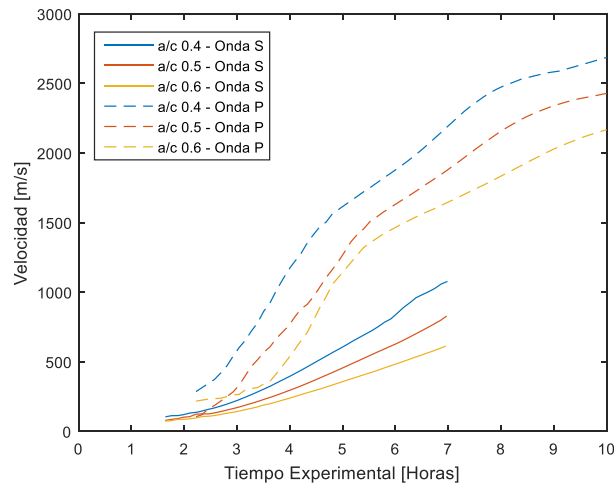


Figura 7- Velocidad de propagación [m/s] detectada para ondas S (líneas continuas) y ondas P (líneas de rayas) en cada una de las relaciones a/c (0.4 – azul, 0.5 – rojo, 0.6 - amarillo).

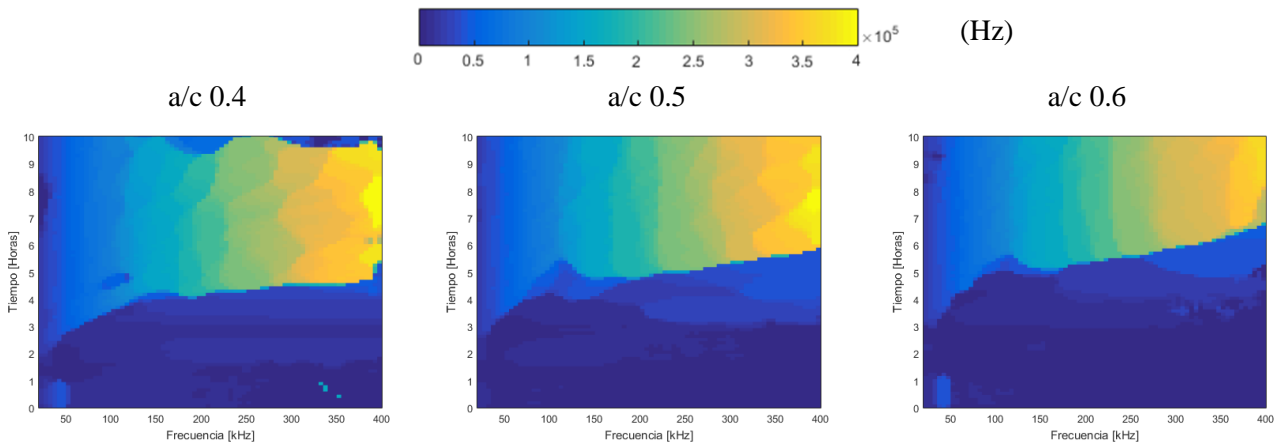


Figura 8. Frecuencia máxima de las señales de salida en función de la frecuencia de la señal de entrada y el tiempo del experimento.

El objetivo del artículo no solo es caracterizar las pastas de cemento a partir del parámetro tradicional, la velocidad de propagación, sino que además se ha empleado un experimental óptimo para la caracterización de las pastas de cemento a partir de la atenuación de la señal. La Figura 9 presenta los mapas de atenuación,  $\alpha \left[ \frac{dB}{m} \right]$ , para cada una de las pastas de cemento bajo estudio. De forma análoga a la Figura 8, se observa que en las primeras horas de experimento la atenuación de la señal es mucho mayor [ $\sim 23 \text{ dB/m}$ ] y a medida que el material se endurece este valor disminuye. Así mismo, la transición ocurre antes para bajas frecuencias y a menor relación agua/cemento.

#### 4.2.2 Señal Chirp

El empleo de señales de banda ancha y el óptimo procesado de señal permite el estudio de la atenuación para la caracterización de pastas de cemento mejorando significativamente la resolución temporal en la adquisición de muestras consecutivas. La Figura 10 muestra el resultado de la variación frecuencial de la atenuación  $\alpha[f]$  calculada a partir de la señal chirp. Como en la Figura 9, la atenuación varía entre 15 y 25 dB, y aparece una frontera característica para cada relación a/c. La atenuación disminuye significativamente antes para menor relación a/c y menor frecuencia de excitación.

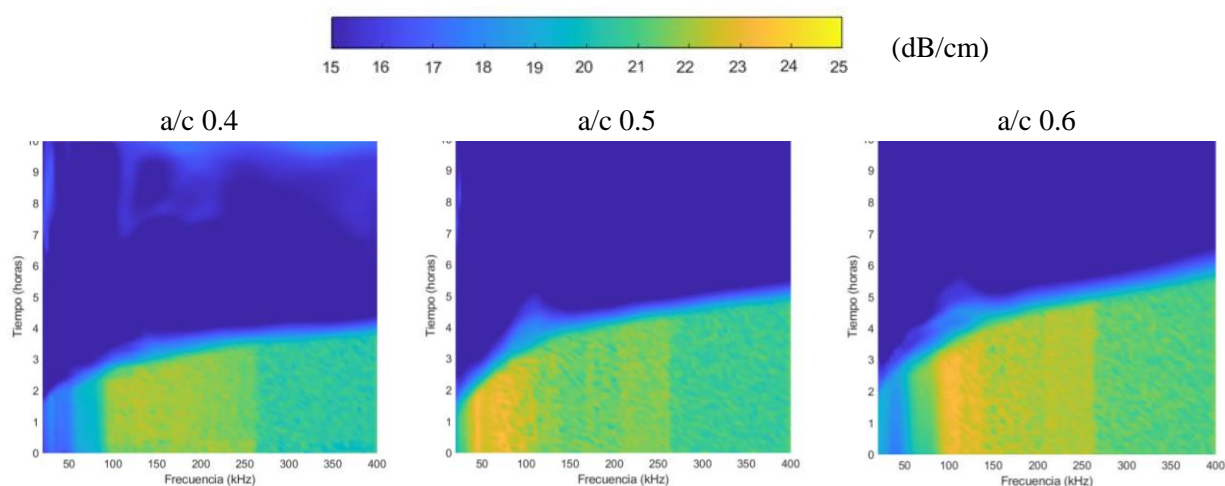


Figura 9. Atenuación de ultrasonidos calculada a partir de la señal burst en función de la frecuencia de la señal de entrada y el tiempo del experimental.

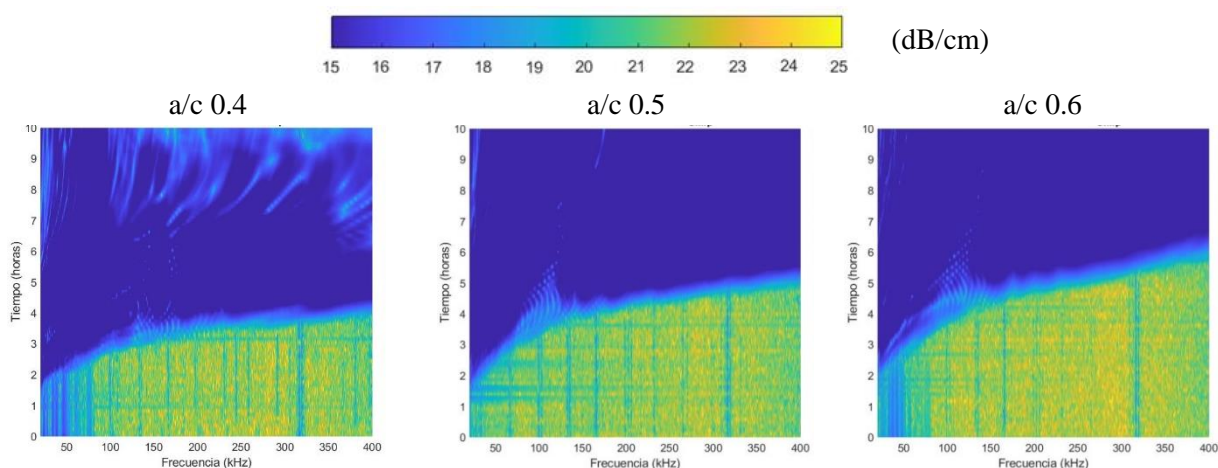


Figura 10. Atenuación de ultrasonidos calculada a partir de la señal chirp en función de la frecuencia de la señal de entrada y el tiempo del experimental.

## 5 Conclusiones

Este trabajo representa un estudio preliminar de caracterización de pastas de cementos a través de señales de ultrasonidos con variación en frecuencia. De acuerdo con los resultados previos se ha comprobado que la velocidad de las ondas P y S disminuye a medida que aumenta la relación a/c. De la misma forma, se ha comprobado la transición de energía de frecuencias bajas a frecuencias altas a medida que se solidifica la pasta. La principal contribución de este trabajo es la demostración del empleo de la atenuación de la señal de ultrasonidos como parámetro de caracterización de la evolución de la pasta de cemento. Se ha demostrado que las pastas de cemento han de ser debidamente caracterizadas no solo a lo largo del tiempo sino también en función de la frecuencia de la señal de entrada. Así mismo, se ha planteado el uso de señales de banda ancha logrando resultados equivalentes a los obtenidos con señales burst y mejorando por tanto la resolución temporal del experimento haciendo uso del óptimo procesado de señal. Las líneas futuras de este trabajo son la correlación de los resultados de ultrasonidos con parámetros reológicos tradicionales (VICAT, viscosidad, tiempo de flujo). También sería necesaria la correcta caracterización del factor de rechazo de la onda P de los transductores de onda S empleados en el experimental diseñado.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la administración nacional española a través de las ayudas BIA2017-87573, PAID-10-19 y fondos FEDER.

## Referencias

- [1] Boumiz, A.; Vernet, C.; Tenoudji F. Mechanical Properties of Cement Pastes and Mortars at Early Ages. *Evolution with Time and Degree of Hydration*, Vol. (3), 1996, 94-106.
- [2] Sun, Z; Voigt, T.; Shah, S. P. Rheometric and ultrasonic investigations of viscoelastic properties of fresh Portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*, Vol. (36), 2006, 278-287.
- [3] Zhu, J; Kee, S; Han, D; Tsai, T. Effects of air voids on ultrasonic wave propagation in early age cement pastes. *Cement and Concrete Research*, Vol. (41), 2011, 872-881.
- [4] RILEM Technical Committee. Recommendation of RILEM TC 218-SFC: Sonic methods for quality control of fresh cementitious materials. *Materials and Structures*, Vol. (44), 2011, 1047-1062.
- [5] Krüger, M.; Grosse, C.U.; Lehmann, F. Automated Shear-Waves Techniques to Investigate the Setting and Hardening of Concrete in Through- Transmission. *Nondestructive Testing of Materials and Structures*. Vol. (6), 2013, 431-436.
- [6] Trtnik, G; Gams, M. The use of frequency spectrum of ultrasonic P-waves to monitor the setting process of cement pastes. *Cement and Concrete Research*, Vol. (43), 2013, 1-11.
- [7] Carette, J.; Staquet, S. Monitoring the setting process of mortars by ultrasonic P and S-wave transmission velocity measurement. *Construction and Building Materials*, Vol. (94), 2015, 196-208.
- [8] Iliopoulos, S.N.; De Smet, L. Aggelis, D.G. Investigating ultrasonic wave dispersion and attenuation in fresh cementitious materials: A combined numerical, analytical, and experimental approach. *NDT and E International*, Vol. (100), 2018, 115-123.
- [9] De Beile, N.; Grosse, C. U.; Kurz, J.; Reinhardt, H.-W. Ultrasound monitoring of the influence of different accelerating admixtures and cement types for concrete on setting and hardening behavior. *Cement and Concrete Research*, Vol. (35), 2005, 2087-2094.
- [10] Kamada, T.; Uchida, S; Rokugo, K.; Nondestructive Evaluation of Setting and Hardening of Cement Paste Based on Ultrasonic Propagation Characteristics. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. (3), 2005, 343-353.
- [11] Robeyst, N.; Grosse, C.U.; De Belie, N. Monitoring fresh concrete by ultrasonic transmission measurements: Exploratory multi-way analysis of the spectral information. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, Vol. (95), 2009, 64-73.
- [12] Genovés, V.; Gosálbez, J.; Carrión, A.; Miralles, R.; Payá, J. Optimized ultrasonic attenuation measures for non-homogeneous materials. *Ultrasonics*, Vol. (65), 2019, 345-352.
- [13] Sondas ultrasónicas monoelemento y duales de Olympus dedicadas a la detección de defectos y medición de espesores. (n.d.). Retrieved September 7, 2020, from <https://www.olympus-ims.com/es/ultrasonic-transducers/>