

# EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA Y CALIDAD

Máster Universitario en Estructuras. Universidad de Granada. Curso 2009-2010

Alumna: Susana López García

## ÍNDICE

1. Introducción
2. Metodología
  - experimental
  - simulación numérica
    - Velocidad
    - Atenuación
3. Conclusiones

Bibliografía

## 1. Introducción

En el siglo XIX Málaga era una de las más importantes ciudades industriales de España. En su perfil destacaban más de cien chimeneas correspondientes a otras tantas industrias de distintos tamaños. De ese pasado industrial perviven en la ciudad los restos de 13 chimeneas industriales en distinto estado de conservación, que el ayuntamiento pretende restaurar y proteger.

Se pretende estudiar el cambio de comportamiento experimentado por un material cerámico tradicional (ladrillo), proveniente de una de estas chimeneas, después de haber estado sometido a altas temperaturas, al formar parte de la estructura de una antigua chimenea industrial.

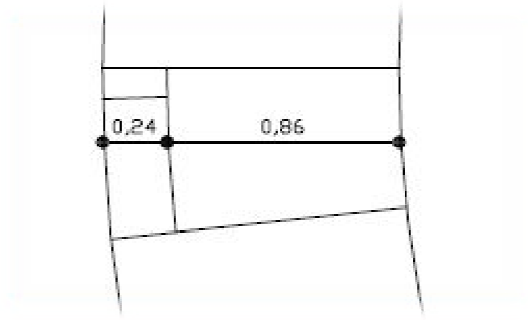
Se trata en concreto de dos unidades de ladrillo cerámico provenientes de los restos de la antigua fábrica conocida como La Cross, creada en el año 1884 en la que se trataban fosfatos de origen animal y superfosfatos de origen mineral, con ácido sulfúrico, para obtener los abonos artificiales que se empleaban en la agricultura. La chimenea, de 39,25 m de altura, se encuentra en un estado de conservación deficiente.

Se utilizan para el estudio dos muestras diferentes:

- **Muestra 1.** Se trata de un fragmento de ladrillo macizo, tomado del antiguo horno industrial situado junto a la chimenea, de 38,7 mm de espesor. El ladrillo se ha tomado de la parte exterior del horno, de la zona que no ha estado sometida a

altas temperaturas. Se han pulido las caras para un mejor desarrollo de las pruebas.

- **Muestra 2.** Fragmento de ladrillo de la antigua chimenea, perteneciente al mismo conjunto que el horno de la muestra anterior. El fragmento tiene un espesor de 49,2 mm, después de alisadas y pulidas las caras. El ladrillo estaba colocado en la base de la chimenea, donde ha estado sometido a altas temperaturas. La posición original del ladrillo con respecto a la chimenea era la siguiente:



## 2. Metodología

### Experimental.

Para comparar la degradación debida a las altas temperaturas producida en el ladrillo con el que no ha estado sometido al calor, y ver cómo influye en sus características mecánicas, se procede a ensayar por ultrasonidos cada una de las muestras.

Se realiza un primer ensayo con una frecuencia de 0,5 MHz, con la que se ensayan tres puntos en cada una de las muestras. Debido al gran tamaño de estos transductores, y al pequeño tamaño y degradación de las muestras, no se pueden tomar más de tres puntos, pero se toma un punto adicional de la muestra 2 en la zona que ha estado más cerca al foco de calor, desplazándolo ligeramente de la primera posición. De este modo se aseguran los resultados obtenidos, y se ve como pueden variar estos en una superficie pequeña.

Se realiza un segundo ensayo con frecuencia 1 MHz. Con esta frecuencia se toman los mismos tres puntos en la muestra 1. Al ser menor el tamaño del transductor se pueden tomar más puntos en la zona dañada y zonas adyacentes. Se toman hasta un total de 5 puntos en la muestra 2.

En cada uno de los puntos se realizan un total de 5 repeticiones.

Para la calibración de los aparatos se utilizan los siguientes parámetros:

**f= 0,5MHz**

Energy: 10V

Periodo: 80e-6

Volt\_oscil: 500e-3

Burst period: 1000 mus

**f= 1MHz**

Timebase: 12000e-9

Periodo: 60e-6 (muestra 1); 200e-6 (muestra 2)

Burst period: 1000  $\mu$ s

Energy: 10V; {10 mV, 50mV, 100mV, 1V, 10V}

Timebase: 12000e-9 (muestra 1); 6000e-9 (muestra 2) Volt\_oscil: {5000e-3, 5000e-3, 5000e-3, 5000e-3, 5000e-3}

La distribución de puntos en ambas muestras se hace según el siguiente esquema:



**Puntos de medida Muestra 1**



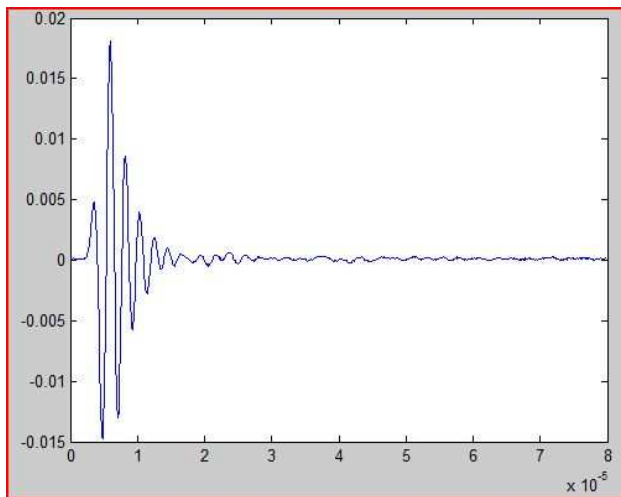
**Puntos de medida Muestra 2**

Obtenemos distintos tipos de gráficos señal/tiempo, dependiendo del punto de la muestra que se toma, y del daño que presenta la misma.

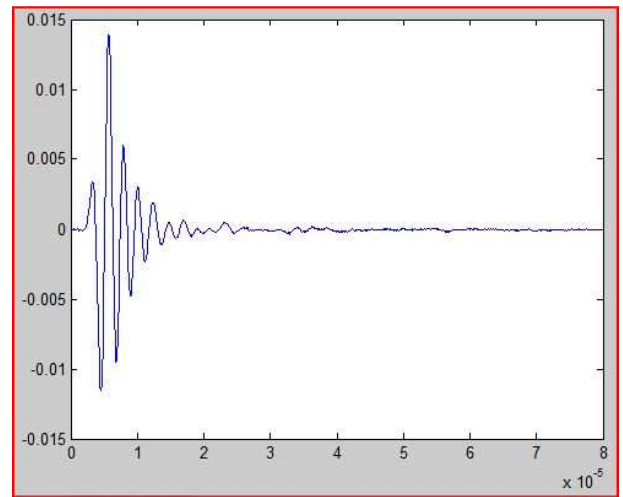
La señal de la muestra 1 tiene una forma de onda más regular, en la que la señal se apaga rápidamente, después de una onda bastante uniforme.

En la señal de la muestra 2 la onda no se llega a apagar, se continua transmitiendo dentro del espécimen en toda la ventana de tiempo que tomamos. La onda está muy distorsionada, con muchos picos. Esto es mucho más acusado en los puntos de medida de la muestra más cercanos a la zona dañada por las altas temperaturas.

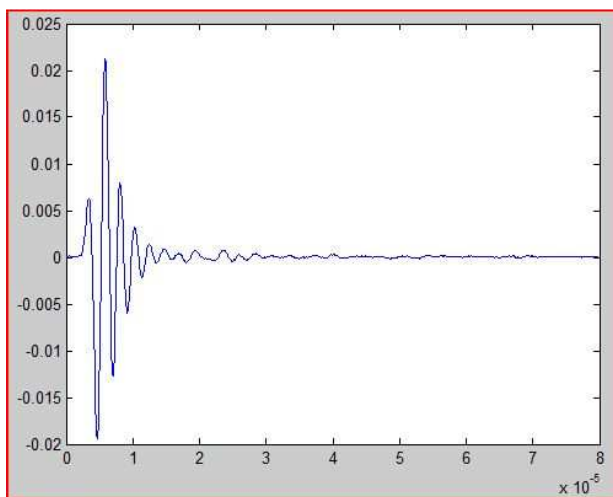
La señal de respuesta en el dominio del tiempo, con las dos intensidades, en los distintos puntos de medida, tiene la siguiente forma:



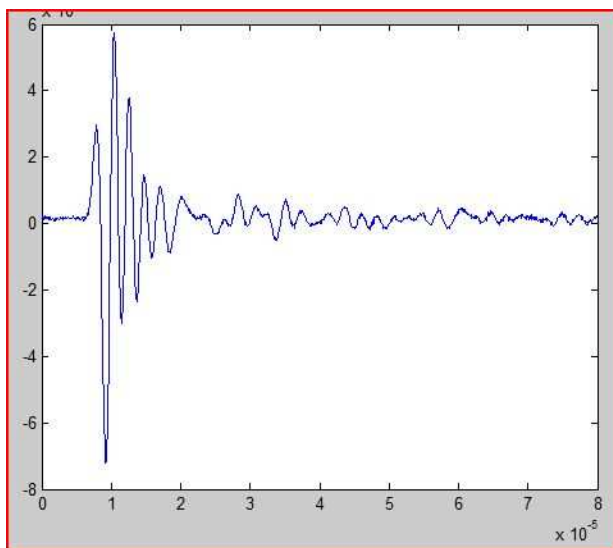
**0,5MHz \_Muestra 1-punto 1**



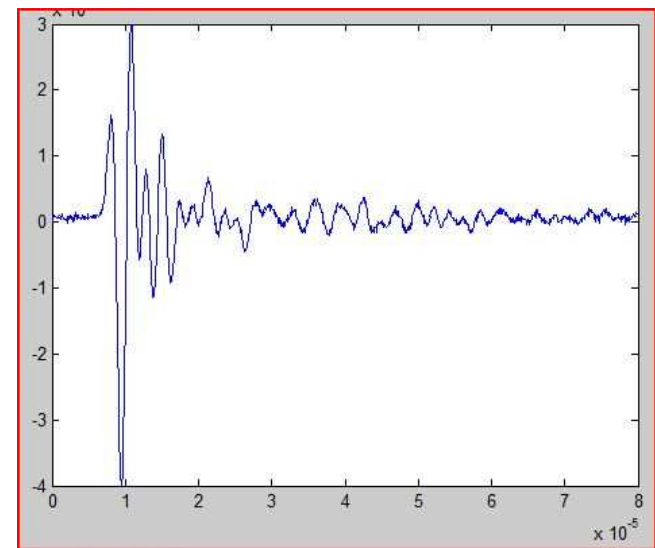
**0,5MHz \_Muestra 1-punto 2**



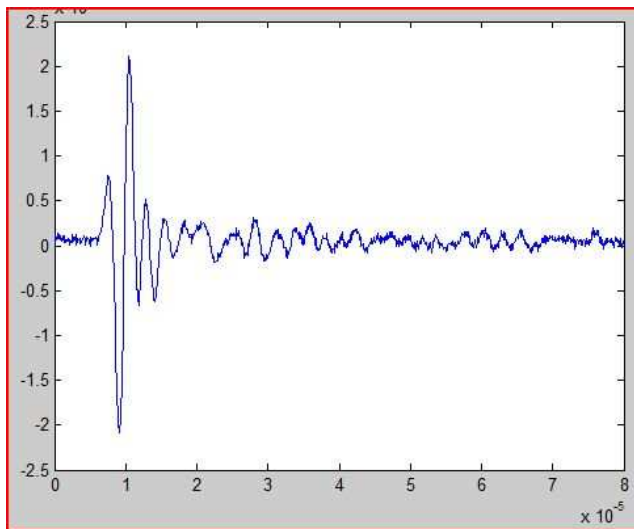
**0,5MHz \_Muestra 1-punto 3**



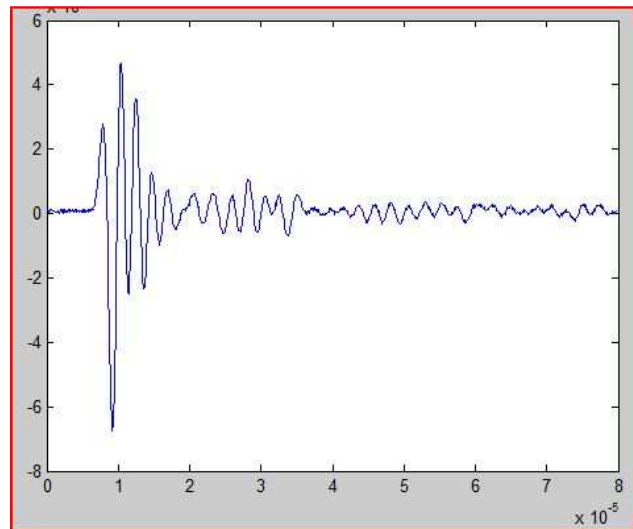
**0,5MHz \_Muestra 2-punto 1**



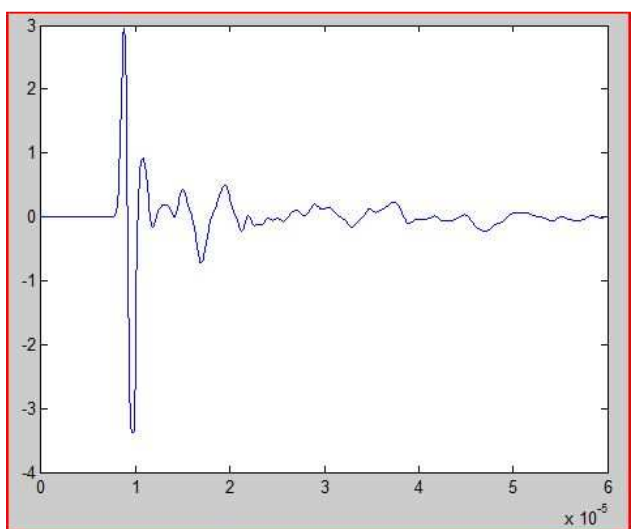
**0,5MHz \_Muestra 2-punto 2**



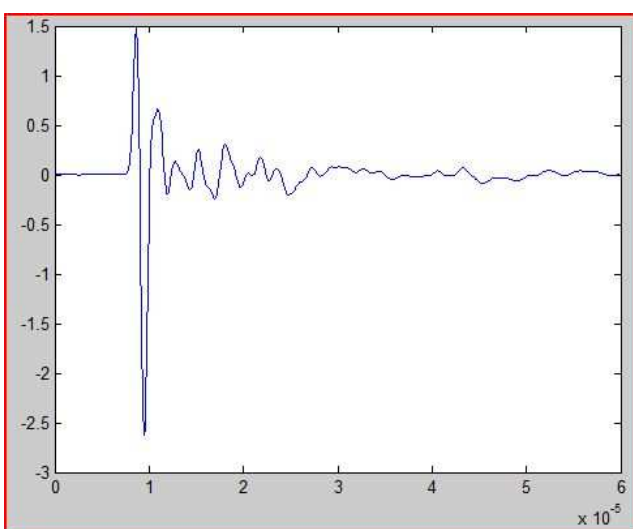
**0,5MHz \_Muestra 2-punto 3**



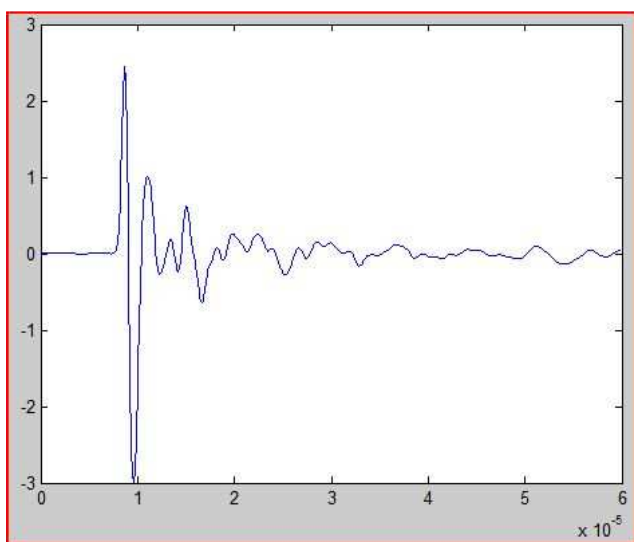
**0,5MHz \_Muestra 2-punto 4**



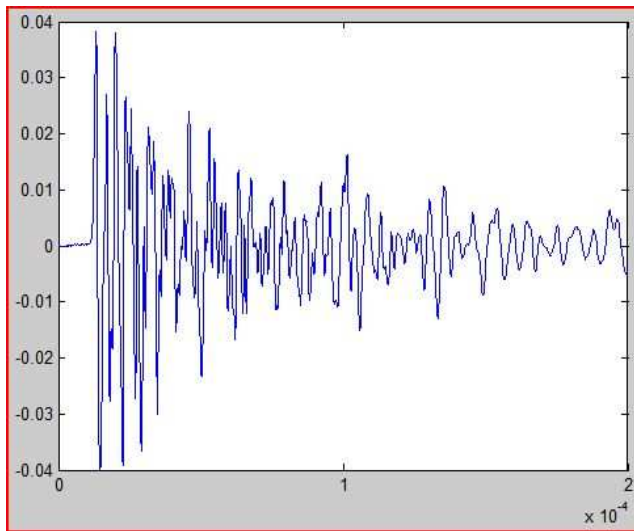
**1MHz \_Muestra 1-punto 1**



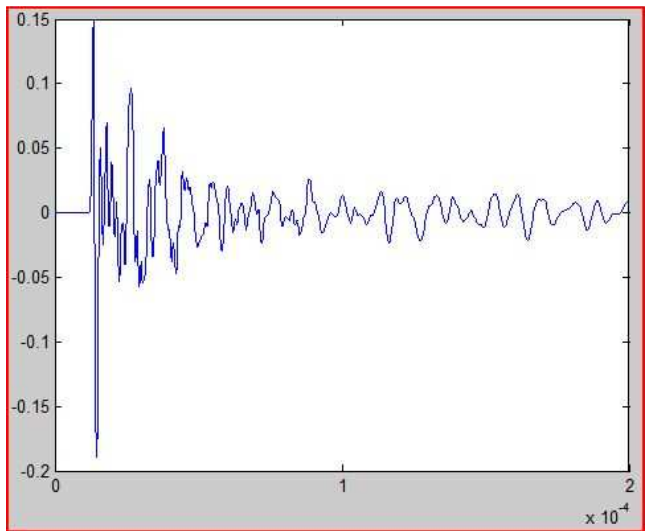
**1MHz \_Muestra 1-punto 2**



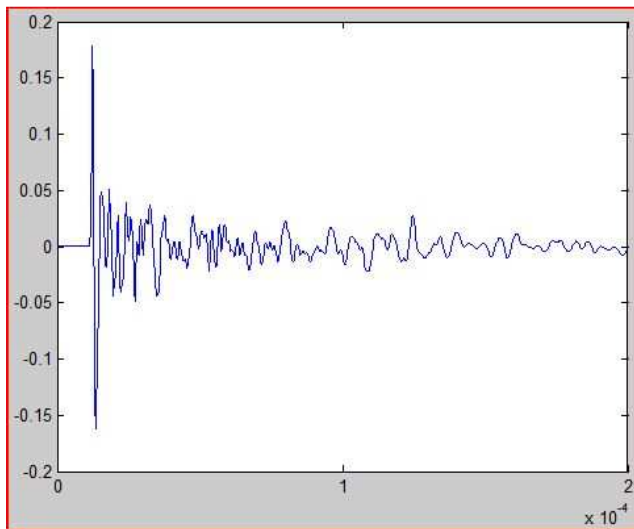
**1MHz \_Muestra 1-punto 3**



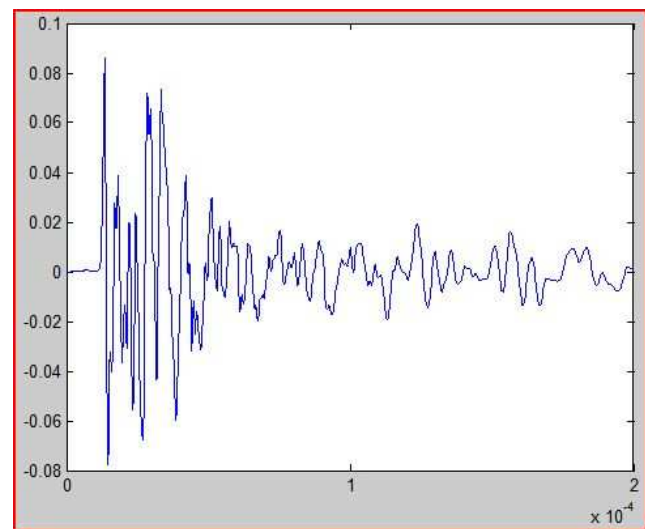
**1MHz\_Muestra 2-punto 1**



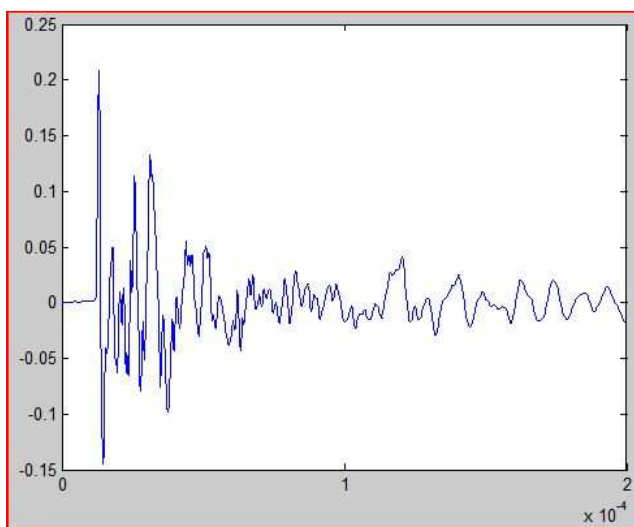
**1MHz\_Muestra 2-punto 2**



**1MHz\_Muestra 2-punto 3**



**1MHz\_Muestra 2-punto 4**



**1MHz\_Muestra 2-punto 5**

Como primera aproximación cualitativa al daño, en la imagen del gráfico se puede apreciar como la señal se transmite de manera diferente en las dos muestras, y se aprecia mucho más esta distorsión en la señal en la parte más próxima a la zona dañada.

Obtenemos de esta manera la constatación de que la muestra está dañada. Para cuantificar el nivel de daño pasamos a hacer una aproximación numérica.

### **Simulación numérica.**

- **Velocidad**

La velocidad de transmisión de una onda a través de un medio y la atenuación son importantes propiedades acústicas usadas en la caracterización de materiales. La determinación de ambas tiene importantes aplicaciones en la caracterización de materiales por métodos no destructivos.

La velocidad de fase es la velocidad de propagación de una onda sinusoidal a una frecuencia dada en un medio [A.S. Birks, R.E. Green]. Para calcular la atenuación se utiliza el espectro de amplitud de dos señales consecutivas, y para calcular la velocidad de fase se utiliza el espectro de fase de la señal.

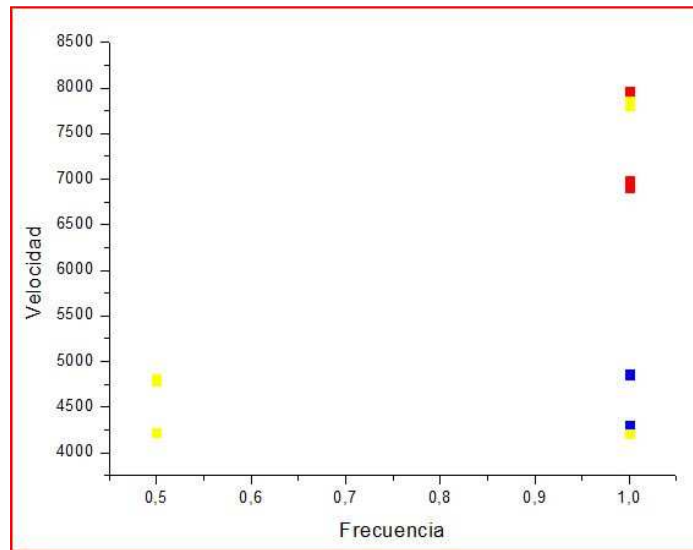
Para determinar la velocidad y atenuación se utiliza como principal información el espectro de amplitud de una señal pulso-eco. Cuando una onda de un pulso de ultrasonidos de un determinado ancho de banda pasa a través de un medio, su velocidad de onda cambia como resultado de la dispersión y atenuación del medio.

Se utiliza el método del tiempo de vuelo (TOF-time-of-flight method), que es uno de los métodos más empleados en la medida de velocidades de ultrasonidos en materiales. Con este método de medida de la velocidad de ultrasonidos se detecta el tiempo que tarda en llegar un pulso emitido, y a partir de este tiempo se pueden estimar valores del material como la velocidad de transmisión de dicha señal a través del mismo. Para calcular la velocidad de fase de transmisión calculamos la diferencia de tiempo transcurrida entre dos picos consecutivos, teniendo en cuenta que el espesor del espécimen es conocido.

Si calculamos el tiempo de respuesta entre la señal que enviamos y el primer eco que medimos de la misma, obtenemos un tiempo de respuesta de  $9,54 \mu s$  ( $9,54 \times 10^{-6} s$ ). Teniendo en cuenta que para medir esa respuesta la onda recorre dos veces el espesor del espécimen, la longitud a considerar es de  $0,075 m$ . La velocidad de la onda para una frecuencia de  $1 MHz$ , en ese punto de la muestra será pues:

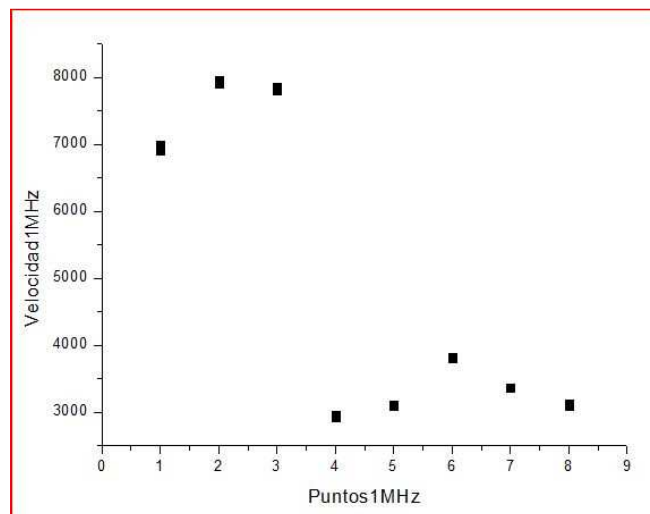
$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{l}{t} = \frac{0,075}{9,54 * 10^{-6}} = 7861,64 m / s$$

Se repite eso mismo para todos los puntos de medida indicados antes, y en cada uno de ellos se toman varias mediciones. Se obtiene una gráfica en la que se comparan las distintas velocidades calculadas para cada punto en función de la frecuencia a la que se emite la señal.



Cuando se emite la señal a 0,5 MHz la velocidad de transmisión de la onda en la muestra 2 (muestra dañada) es menor que en la muestra 1, aunque la diferencia no es muy grande, en torno al 20%. Cuando repetimos la pruebas con una frecuencia de 1MHz la velocidad de la onda en la muestra dañada es significativamente menor que en la muestra 1, de entre 40-50%.

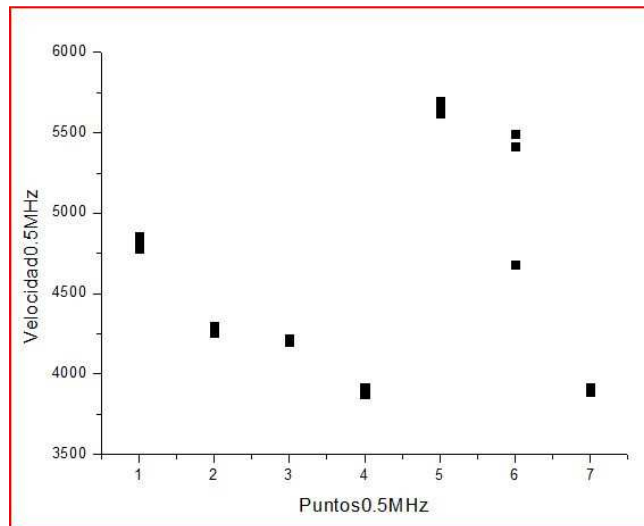
Si vemos el gráfico de velocidades en función de los puntos en que se ha tomado, en la frecuencia de 1MHz tiene la siguiente forma:



Los tres primeros puntos corresponden a la muestra 1 y los otros 5 a la muestra 2. La velocidad en la muestra dañada es inferior a la velocidad de la onda en el ladrillo en buen estado. Se puede apreciar que el descenso de la velocidad es más acusado en los puntos 4, 5 y 8, que son los del extremo de ladrillo en contacto directo con las altas temperaturas.

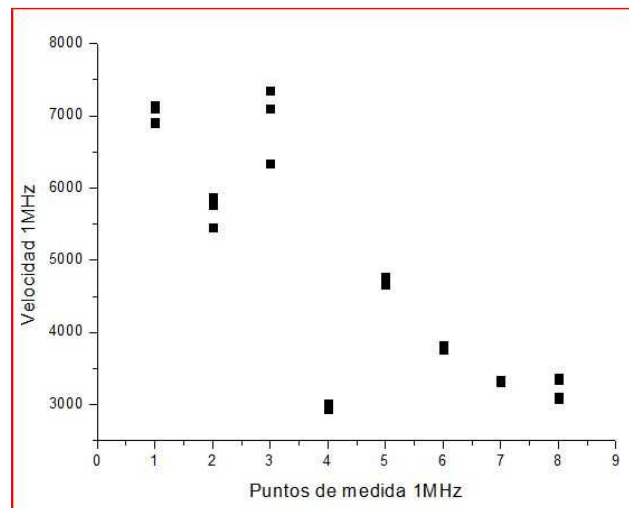
Si vemos el mismo gráfico pero con una frecuencia de onda de 0,5 MHz, el gráfico obtenido tiene la siguiente forma:





Los tres primeros puntos corresponden a la muestra 1 y los puntos 4-7 corresponden a la muestra 2. Con esta frecuencia se han tomado medidas en menos puntos, ya que el tamaño del transductor es mayor. Vemos que los resultados obtenidos para esta frecuencia son muy dispersos en ambas muestras. Esto se puede deber a que para que estos métodos sean válidos para la caracterización de materiales, la longitud de onda debe ser pequeña comparada con el espesor del material en la dirección de la propagación, o a que se pueden producir pérdidas de la señal por los laterales de las muestras, que al ser de pequeño tamaño están próximas al núcleo del transductor desde el que se emiten y reciben las ondas.

Otra manera de calcular la velocidad de onda es medir la respuesta en la base de la onda, en lugar de en el punto máximo de esta. Con esta doble medición podemos comprobar que los resultados obtenidos en ambos casos son coherentes. Como ya hemos comprobado previamente que los resultados obtenidos con 0,5 MHz plantean problemas debido al tamaño de los transductores con respecto al de la muestra, este nuevo cálculo de velocidades se realiza solamente para los resultados obtenidos con la frecuencia 1MHz. La gráfica obtenida tiene la siguiente forma:



Con este nuevo cálculo salen resultados similares. En la muestra 1 (puntos 1, 3) las velocidades calculadas están en torno a 7.000 m/s en dos de los puntos, y algo menores en el punto 2 (en

torno a 5.500 m/s). En la muestra 2 (puntos 4, 5, 6, 7 y 8), la velocidad calculada es inferior, en torno a los 3.000 – 4.000 m/s, similar a lo que ocurría en el cálculo anterior.

- **Atenuación**

Registrando la amplitud de una frecuencia determinada en cada momento, podemos obtener información de propagación del componente de la frecuencia en el tiempo. Físicamente, la energía recibida en un punto dado alcanza el máximo cuando la señal enviada pasa a través del punto. La amplitud de la señal alcanza el máximo en ese momento. Si indicamos la diferencia de tiempo y amplitud entre los dos picos de una determinada frecuencia en el tiempo, la cual corresponde a la señal recibida en dos puntos separados entre sí una distancia dada, se puede calcular la atenuación del medio.

Cuando una señal de ultrasonidos de un determinado ancho de banda pasa a través de un determinado material, su forma cambia como resultado de la dispersión y atenuación del medio.

La atenuación se puede calcular como la diferencia de energía entre dos valores pico (el segundo sobre el primero), como una función de la frecuencia. La atenuación depende de muchos parámetros físicos, y es proporcional al cuadrado de la frecuencia. Se calcula como:

$$\frac{P}{P_0} = e^{-\alpha l}$$

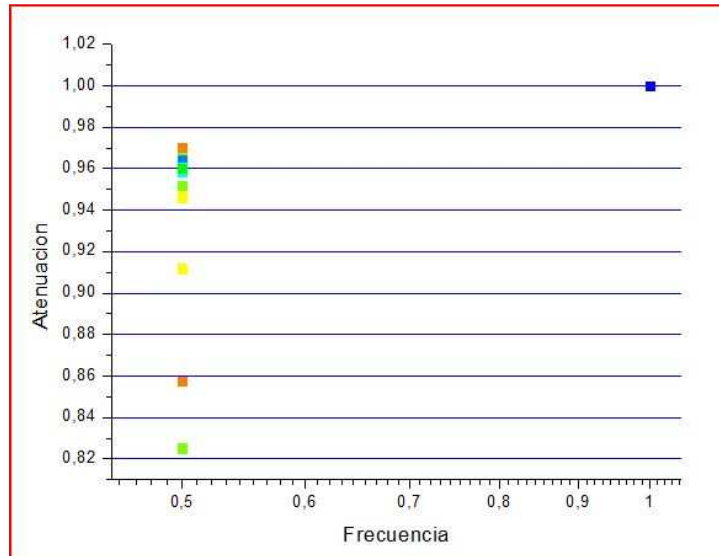
Donde el coeficiente de atenuación  $\alpha$  es:

$$\alpha = \frac{0,1151}{v} U_t, \quad \text{y} \quad U_t = \frac{E_2}{E_1} L$$

$E_1$  y  $E_2$  representan la diferencia de energía entre dos picos consecutivos.

$L$  representa el espacio recorrido por la onda (dos veces el espesor del espécimen)

Con las sucesivas mediciones realizadas en todos los puntos de medida indicados antes, se realiza el cálculo de todos estos parámetros en cada punto de cada una de las muestras, obteniendo el siguiente gráfico en el que se comparan las atenuaciones en las diferentes frecuencias en ambas muestras.



Los resultados de cálculo de la atenuación se expresan como diferencia de energía entre dos picos consecutivos, en función de la frecuencia de la onda emitida.

Vemos que con la medición realizada a 1MHz la señal se mantiene más estable, la atenuación en las dos muestras está en torno a 0,9999. Cuando utilizamos la señal de 0,5MHz la atenuación en la muestra 1, la que no está dañada, se mantiene en torno a esos mismos números. En la muestra 2 la atenuación varía ligeramente, oscilando entre 0,9992 y 0,99973.

En la muestra dañada se produce una mayor atenuación de la velocidad de la onda al transmitirse por el material ensayado.

### 3. Conclusiones

Una vez calculada la velocidad y atenuación que ha sufrido una señal emitida al transmitirse a través de un medio podemos interpretar a través de estos parámetros como varían algunos de los valores que caracterizan el material, como el módulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad se relaciona con la velocidad longitudinal de la onda transmitida a través de la siguiente fórmula:

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

La velocidad y el módulo de elasticidad se relacionan de manera directa, pero  $E$  está dentro de una raíz cuadrada, y multiplicado por un coeficiente que estará entre 0 y 1, por lo que va a variar de manera mucho más lenta que la velocidad.

De la fórmula anterior podemos despejar el módulo de elasticidad, con lo que tenemos:

$$E = \frac{V^2(\rho(1+\mu)(1-2\mu))}{(1-\mu)}$$

Podemos hacer una aproximación de la variación del módulo de elasticidad en función de la reducción de velocidad que hemos constatado en la realización de los ensayos. Tomamos para la densidad el valor de  $\rho = 1900 \text{ kg} / \text{m}^3$  y para el coeficiente  $\mu = 0,4$ . Si tomamos un velocidad media de las obtenidas en el ladrillo 1, que es el que no ha sufrido daño, p.e.  $V = 6.350 \text{ m/s}$ , obtenemos un valor del módulo de Young de  $E = 35.600 \text{ kg/cm}^2$ .

Si buscamos en bibliografías el valor del módulo de elasticidad para ladrillo macizo tenemos valores de  $E$  que oscilan entre  $30.000$  y  $50.000 \text{ kg/cm}^2$ , por lo que podemos dar por válida esta aproximación.

Si hacemos de nuevo el cálculo del módulo  $E$ , con los valores de velocidad obtenidos al ensayar el ladrillo 2, que está dañado, obtenemos valores que varían entre  $E = 12.900 \text{ kg/cm}^2$ , para la zona menos dañada, que tiene velocidades en la respuesta de alrededor de  $3.800 \text{ m/s}$ , y  $E = 8.000 \text{ kg/cm}^2$ , para la zona más dañada, en la que habíamos calculado velocidades de entre  $2.900 \text{ m/s}$  y  $3.100 \text{ m/s}$ .

## **Bibliografía**

Fort, R., Álvarez de Buergo, M., López de Azcona, M.C., Mingarro, F., Varas, M.J., Soriano, J., Caracterización de la Fábrica de Ladrillo del Palacio del Infante Don Luis, Boadilla del Monte, Madrid. *Boletín de la sociedad española de Cerámica y Vidrio*, 43: 578-582, 2004.

He, P., Measurement of acoustic dispersion using both transmitted and reflected pulses. *J. Acoust. Soc. Am.*, 107: 801-807, 2000

Wanner, A., Elastic modulus measurements of extremely porous ceramic materials by ultrasonic phase spectroscopy. *Materials Science and Engineering*, A248: 35-43, 1998.

Zhao, B., Basir, O.A., Mittal, G.S., Estimation of ultrasound attenuation and dispersion using short time Fourier transform. *Ultrasonics*, 43: 375-381, 2005.