

# Aplicación de los Ensayos No Destructivos por Ultrasonidos en Cerámicas Arqueológicas

B. Carrascosa Moliner<sup>1</sup>, R. Miralles Ricós<sup>2</sup>, A. Salazar Afanador<sup>2</sup>, M. Lastras Pérez<sup>1</sup>, A. Parra Crego<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Conservación y Restauración de Bienes Culturales,

<sup>2</sup>Departamento de Comunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia

[becarmo@crbc.upv.es](mailto:becarmo@crbc.upv.es), [rmiralle@com.upv.es](mailto:rmiralle@com.upv.es)

## RESUMEN

Este artículo presenta una aplicación de los ultrasonidos para encontrar parámetros relacionados con características físicas de materiales cerámicos arqueológicos y en la evaluación de materiales consolidantes usados en el proceso de restauración. Los materiales arqueológicos estudiados provienen de la región de Requena y consisten en piezas de distintas épocas como son la edad de bronce, ibérica, romana y medieval. Las piezas han sido medidas mediante el esquema de inspección transmisión-recepción utilizando varias frecuencias de trabajo de los ultrasonidos. Las señales ultrasónicas medidas se han procesado por técnicas tiempo-frecuencia con el fin de derivar firmas de las características del material. Se ha calculado la velocidad de propagación de los ultrasonidos encontrando diferencias en los distintos materiales. Se han encontrado parámetros que parecen estar relacionados con propiedades físicas del material como la porosidad de las piezas cerámicas. La aplicación de los ultrasonidos se ha hecho experimentando con diferentes tipos de acoplamiento: gel, inmersión y utilizando un adaptador de goma.

En el proceso de restauración de piezas cerámicas arqueológicas pueden aplicarse diferentes tipos de productos consolidantes. Es recomendable que el material agregado en los tratamientos de restauración tenga una buena penetración y elasticidad apropiada a las características de porosidad matérica de la pasta cerámica.

En esta comunicación se presenta un estudio comparativo de varios parámetros extraídos de las señales ultrasónicas en probetas de distintas pastas cerámicas con diferentes consolidantes y en proporciones variables.

El análisis de esta información puede contribuir y facilitar el trabajo del restaurador en la selección del producto consolidante y de su proporción adecuada, consultando únicamente la nueva tabla de proporciones y variables, el restaurador solo tendrá que tener en cuenta las características de porosidad de la pieza cerámica que se tenga que restaurar.

## 1. INTRODUCCIÓN

El trabajo que aquí presentamos recoge parte de los resultados obtenidos mediante un Proyecto de Investigación Interdisciplinar de I+D+I subvencionado por la Universidad Politécnica de Valencia titulado “Integración de las Tecnologías de Información y

Comunicaciones en el ámbito de la Conservación y Restauración de Materiales Arqueológicos y Etnográficos”, y realizado por: El Grupo de Tratamiento de Señal (GTS) del Departamento de Comunicaciones (DCOM)) y el Taller de Intervención de Materiales Arqueológicos y Etnográficos (TIMAE) del Departamento de Conservación y Restauración de Bienes Culturales (DCRBC), pertenecientes a la Universidad Politécnica de Valencia (U.P.V).

Toda intervención conservativa debe estar precedida y avalada por un estudio lo más completo posible del objeto en cuestión, debiéndose realizar una serie de pruebas y análisis que nos faciliten información sobre el mismo y que nos ayuden a definir el tipo de tratamiento más idóneo [1]. En este sentido, la incorporación de los análisis no destructivos por ultrasonidos al ámbito de la conservación de objetos arqueológicos resulta de gran interés, ya que, a diferencia de otros tipos de análisis, facilita su estudio sin causar daños [2].

Este artículo recoge e incorpora los resultados obtenidos mediante estos análisis no destructivos por ultrasonidos en distintos fragmentos cerámicos correspondientes a diversos periodos históricos. La información que aquí mostramos es el resultado de una primera aproximación a la viabilidad de este tipo de ensayos en cerámica arqueológica a diferentes niveles: En un primer nivel, nuestro objetivo ha sido el de ser capaces de clasificar y agrupar los distintos fragmentos correspondientes a de cada una las piezas, según la época a la que pertenecen mediante la lectura de su porosidad; y en un segundo nivel, poder establecer dicha clasificación aun estando estas tratadas, con diferentes tipos de consolidantes, a concentraciones distintas y mediante diversos tratamientos de penetración.

Para ello, el planteamiento inicial del presente trabajo se basó, en primer lugar, en la selección de diversos fragmentos cerámicos correspondientes a piezas de barro cocido de la Edad del Bronce, ibéricas, romanas y medievales pertenecientes al Museo Arqueológico de Requena. La elección de estas piezas vino dada en primer lugar por ser las más comunes que rescatamos en la Comunidad Valenciana, además de diferenciarse entre ellas por los distintos niveles de porosidad de sus pastas, derivadas a su vez del tipo de material utilizado y de la técnica de fabricación empleada. Por todo ello podemos plantear tres grados de porosidad en las piezas seleccionadas:

- Porosidad alta.- Edad del bronce e ibéricas
- Porosidad Media.- Medieval
- Porosidad Baja.- Romana.

A continuación se escogieron varios consolidantes de entre los más usados en estos tratamientos para este tipo de piezas [3], como son Paraloid B-72, Acril 33 y Estel 1000.

*Paraloid B-72* es una resina acrílica al 100% a base de etil-metacrilato (en granos transparentes) con óptimas condiciones de dureza, brillo y adhesión sobre una amplia gama de soportes, por lo que es muy utilizado para la consolidación y protección de objetos de madera,

piedra, mármol, metal y cerámica, que es el caso que nos ocupa. Es soluble en acetona, ésteres, hidrocarburos aromáticos y clorurados.

*Acril 33* es una resina acrílica pura al 100% en dispersión acuosa, de aspecto líquido lechoso blanco. Se caracteriza por su estabilidad química y una óptima resistencia a los agentes atmosféricos. Resulta particularmente apta para aplicaciones con ligantes hidráulicos. Es una resina muy utilizada en todos los sectores de la restauración como aditivo para morteros de inyección y estucado, ligante para pigmentos, adhesivo y consolidante y fijativo [4].

*Estel 1000* es un producto consolidante a base de silicato de etilo en solución en *white spirit*, y está particularmente indicado para el tratamiento consolidante y preconsolidante de materiales pétreos de naturaleza silícea, ladrillo, cerámica e intónacos degradados. Su aspecto es líquido incoloro.

El siguiente paso fue la elaboración de una serie de probetas, las cuales se realizaron aplicando dichos consolidantes sobre cada una de las piezas (pertenecientes a las cuatro épocas antes mencionadas) a diferentes concentraciones. Para completar el estudio, se usaron dos sistemas de consolidación diferentes, impregnación e inmersión, en baños de 24 horas (Tabla 1).

Sistema de consolidación	Material de consolidación		
	Acril 33 en agua	Paraloid B-72 en acetona	Estel1000 en white spirit
Impregnación	5 y 10 %	5 y 10 %	10 %
Inmersión	5,10,20,40 %	5,10,20 %	10,40,60,80 %

**Tabla 1. Sistemas y materiales de consolidación**

Así, se obtuvieron 16 probetas de cerámica consolidada de cada uno de los 4 períodos históricos, preparándose un total de 64, que se sometieron a estudio mediante el subsiguiente análisis.

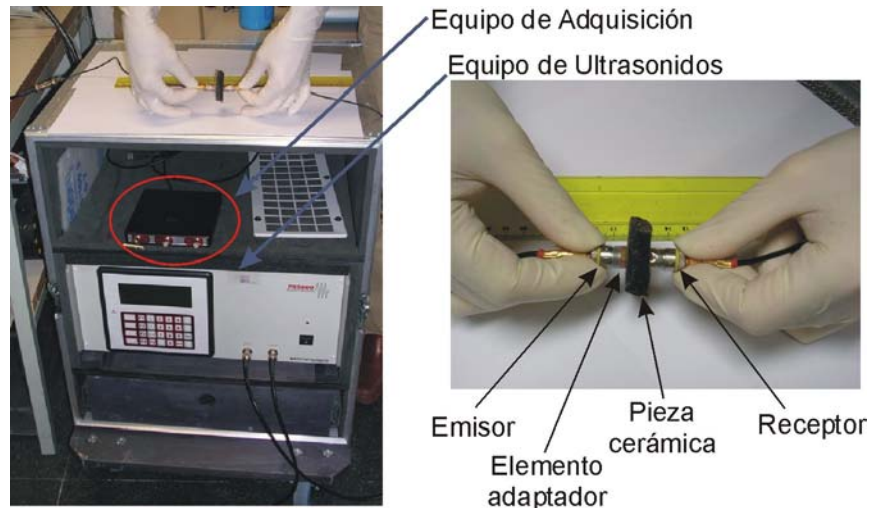
## 2. EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE LAS SEÑALES ULTRASÓNICAS

Los parámetros de configuración y equipamiento usados en la evaluación no destructiva por ultrasonidos [5] de las 64 piezas cerámicas fueron los siguientes (Tabla 2).

Parámetros del equipo de ultrasonidos		Parámetros del equipo de adquisición	
Equipo de ultrasonidos:	<i>Matec PR5000</i>	Equipo de adquisición:	<i>Osciloscopio Handyscope HS-3</i>
Transductores:	<i>2.25 MHz - Krautkrämer</i>	Frecuencia de muestreo:	<i>100 MHz</i>
Ancho del pulso	<i>4 us</i>	Número de muestras:	<i>10.000</i>
Amplitud del pulso	<i>100%</i>	Tiempo adquirido:	<i>1ms</i>
Filtro analógico	<i>Sin filtros</i>	Resolución de la amplitud:	<i>16bits</i>
Señal de excitación	<i>Ráfaga de tonos de 1.050 MHz</i>	Rango dinámico:	<i>100 mV/división</i>
Modo de operación:	<i>Transmisión-Recepción</i>	Promediado:	<i>16 adquisiciones</i>
Ganancia del amplificador:	<i>43dB</i>		

**Tabla 2. Parámetros de configuración y equipamiento**

Además de este equipamiento, se utilizó un PC estándar para la transferencia y almacenamiento de las señales comunicadas con el osciloscopio a través del bus de datos USB. Cada pieza fue medida una vez mediante la técnica transmisión-recepción, donde un transductor de ultrasonidos actúa como emisor y un segundo transductor como receptor (Figura 1).



**Fig 1. Equipamiento y detalle de la medición por ultrasonidos**

El acoplamiento de los transductores con el material mediante una goma adaptadora de impedancia acústica fue seleccionado después de ensayar varios métodos de acoplamiento. Las ventajas e inconvenientes de los métodos ensayados se muestran en la Tabla 3.

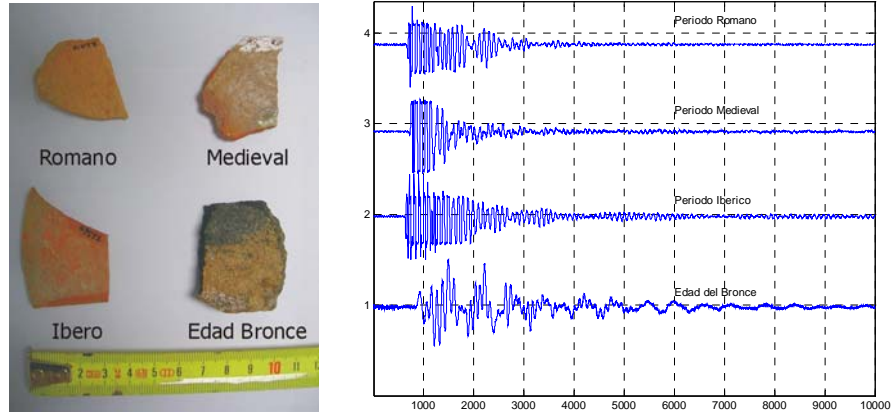
Tipo de acoplamiento	Ventajas	Inconvenientes
Gel	Muy buena adaptación	-Los residuos de gel son difíciles de eliminar -Se acorta el tiempo de medida debido a la absorción del gel por la pieza
Agua	Buena adaptación	-Con los medios disponibles el tiempo de medida es más alto que los otros métodos
Goma adaptadora	Buena adaptación en superficies lisas	-Si la superficie es muy irregular se produce una mala adaptación

**Tabla 3. Tipos de acoplamiento de ultrasonidos**

La Figura 2a muestra algunas de las piezas medidas y la Figura 2b muestra las señales ultrasónicas extraídas de dichas piezas. A partir de las señales adquiridas se extrajeron, mediante técnicas tiempo-frecuencia [6], varios parámetros para ser usados en un proceso de clasificación y comprobar la sensibilidad de las señales ultrasónicas a los cambios en las características físicas de los materiales de las diferentes épocas estudiadas. Los parámetros o características extraídas de las señales fueron los siguientes:

- Velocidad de propagación (calculada con base en el tiempo de llegada de la onda después de viajar por el material y el espesor de la pieza).
- Frecuencia principal (componente dominante del espectro calculada a partir de la Transformada de Fourier de la señal).

- Atenuación de la frecuencia principal.
- Potencia de la señal.
- Atenuación de la señal.
- Valor inicial en dB de la curva de atenuación de la señal.



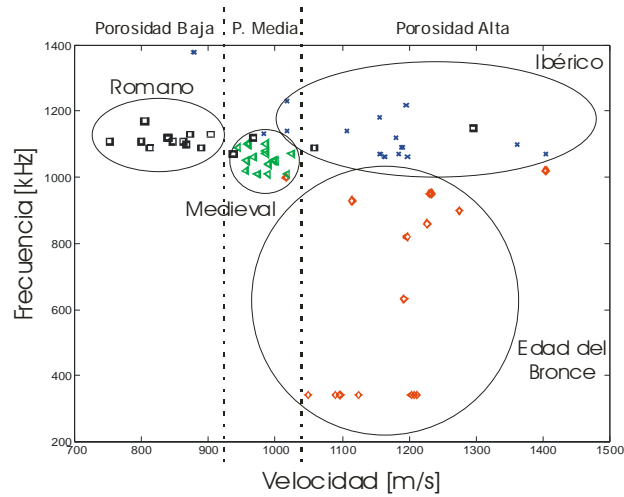
2a. Algunas piezas estudiadas

2b. Señales ultrasónicas extraídas de las piezas

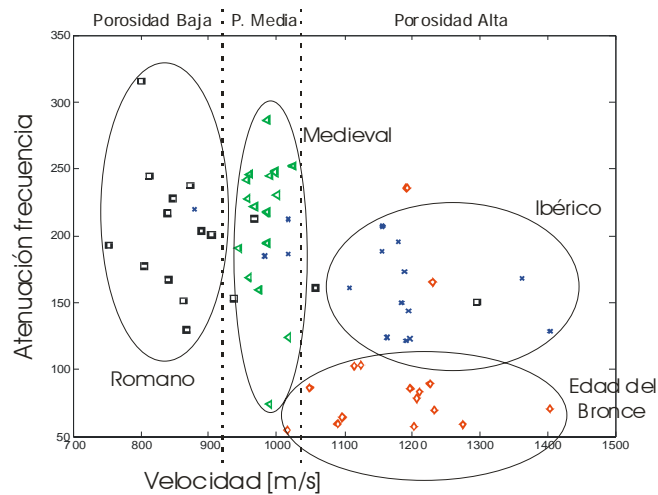
**Fig 2. Señales ultrasónicas adquiridas en cerámicas arqueológicas**

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DEL PROCESO DE CLASIFICACIÓN

La Figura 3 muestra dos segmentaciones del conjunto de piezas cerámicas utilizando dos de las características extraídas de las señales (Velocidad vs. Frecuencia principal y Velocidad vs. Atenuación de la Frecuencia principal). En estos subespacios bidimensionales de características se aprecia que las piezas cerámicas pueden ser clasificadas según su época histórica con un alto porcentaje de acierto. Sin embargo algunas piezas son mal clasificadas en una clase (época) que no corresponde. En la Figura 3 también se muestran dos valores de velocidad de propagación de los ultrasonidos, en torno a 920 y 1040 m/s, que pueden servir como umbrales para determinar diferencias de porosidad en las cerámicas de las distintas épocas.



3a. Velocidad vs. Frecuencia

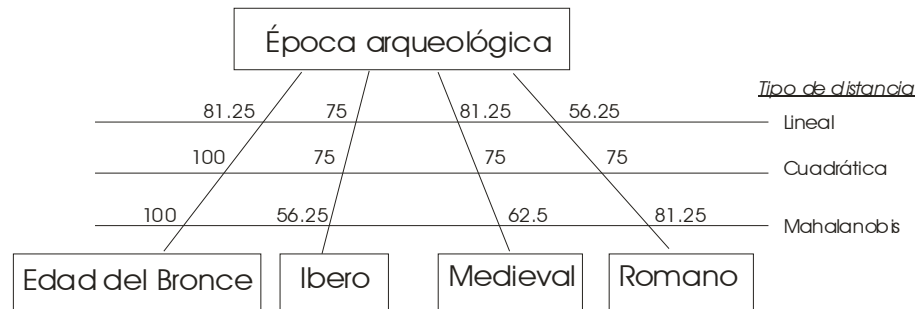


3b. Velocidad vs. Atenuación de la Frecuencia

**Fig 3. Segmentación en espacios bidimensionales**

La precisión en la clasificación se mejora agregando más características en el espacio de clasificación, como en este caso hasta un espacio de seis dimensiones, que permite aumentar la separación de los espacios disjuntos o clases a que pertenecen las piezas [7].

El conjunto total de características, es decir 6 características por cada una de las 64 señales, consistió en 384 datos que fueron procesados por un clasificador basado en análisis lineal discriminante [8]. El espacio de clasificación se definió en cuatro clases correspondientes a cada una de las épocas de las cerámicas arqueológicas. El clasificador calculó una época estimada para cada pieza. Dado el conocimiento *a priori* de la época a que pertenecía la pieza, fue posible calcular un porcentaje de acierto en la clasificación. El clasificador básicamente funciona calculando *distancias* entre las piezas y separándolas en espacios de clasificación disjuntos. Se probaron varias distancias (lineal, cuadrática, mahalanobis), obteniendo diferentes resultados en la clasificación, pero siempre con altos porcentajes de acierto en la asignación de la época histórica de la pieza (Figura 4).



**Fig 4. Clasificación de las piezas cerámicas por edades**

La clasificación de las piezas cerámicas a partir de características extraídas de las señales ultrasónicas de dichas piezas ha funcionado bien, independientemente del tratamiento con consolidantes ha que han sido sometidas dichas piezas. Adicionalmente se probaron otras clasificaciones (Tabla 4).

No. clases	Descripción clases	Resultado	Análisis
12	<u>Época-material consolidante:</u> Bronce-acril, bronce-paraloid, bronce-silicato, ibero-acril, etc.	Bajos porcentajes de acierto	Al aumentar el número de casos de clasificación, aumentará el porcentaje de clasificación
8	<u>Época-método consolidación:</u> Bronce-inmersión, bronce-impregnación, ibero-inmersión, etc.	Bajos porcentajes de acierto	Al aumentar el número de casos de clasificación, aumentará el porcentaje de clasificación
3	<u>Material consolidante:</u> Acril, paraloid, silicato	Muy bajos porcentajes de acierto	Los resultados no podrán mejorarse dado que las características de las señales de piezas de diferentes épocas dividen en espacios disjuntos diferentes a los definidos por los materiales consolidantes
2	<u>Método de consolidación:</u> Inmersión-impregnación	Muy bajos porcentajes de acierto	Idem. que el anterior, pero comparado con los espacios definidos por los sistemas de consolidación

**Tabla 4. Análisis de varias clasificaciones**

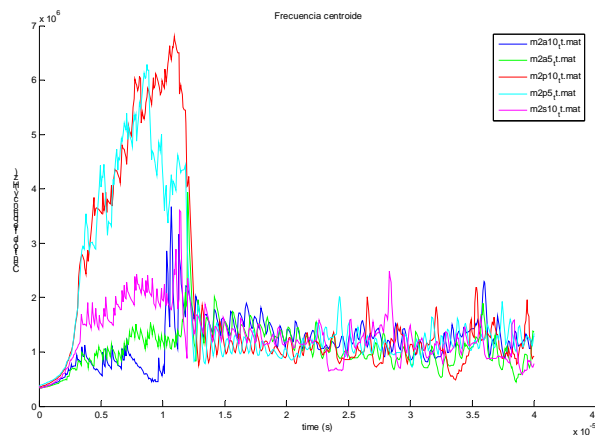
#### 4. ANÁLISIS DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS PIEZAS POR FIRMAS ULTRASÓNICAS

En este análisis se pretende estimar una firma de alguna característica física del material a partir del cálculo de la firma ultrasónica, consistente en la curva de evolución de la frecuencia central del pulso ultrasónico inyectado en el material, a medida que se propaga por el interior del mismo. Dicha evolución está vinculada a la forma en que progresivamente se atenúan las diferentes componentes frecuenciales del espectro del pulso. En general, lo hacen de forma diferente, lo que supone variaciones en el espectro y, en consecuencia, en su frecuencia central. Estas variaciones son inherentes a las características del material y pueden permitir su caracterización. La técnica de obtención de la firma ultrasónica se realiza mediante un análisis (no estacionario) del ruido granular a cada profundidad y tiene dos

aspectos claramente diferenciados: estimación del espectro del pulso y estimación de la frecuencia central a partir de dicho espectro [9].

El ruido granular se genera por la superposición de múltiples ecos originados por la microestructura del material, cuando se inyecta en este último un pulso ultrasónico de frecuencia adecuada. Dicho ruido admite un modelado estocástico y puede aplicarse sobre él técnicas de análisis espectral, para la extracción de parámetros que puedan correlarse con propiedades físicas del material, permitiendo su caracterización. Un método clásico de abordar el análisis de la dependencia de la atenuación con la frecuencia es la medida de la frecuencia representativa a lo largo del espectro del ruido granular. La frecuencia centroide, instantánea, la correspondiente a la máxima energía y la frecuencia de resonancia muestran cierta variación con la profundidad debido a la dependencia con la atenuación de la frecuencia [10].

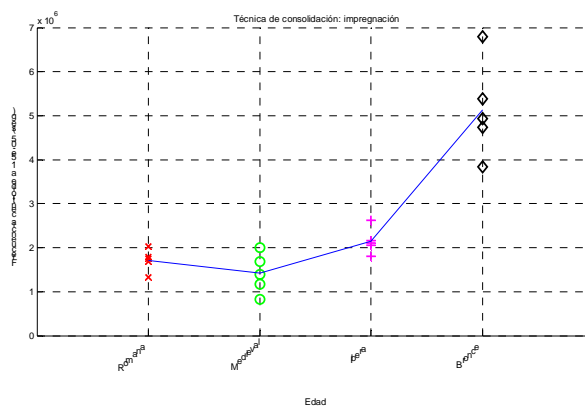
La Figura 5 muestra la evolución de la frecuencia centroide en el tiempo de registro de la señal para las cerámicas medievales consolidadas con el método de impregnación. En este conjunto de 5 piezas puede apreciarse una firma ultrasónica distinta en cada caso, es decir, puede llegar a distinguirse la firma del material consolidante utilizado (acril, paraloid, silicato). Sin embargo este resultado de alta correlación entre la firma ultrasónica y las características del material pudo encontrarse en algunos subconjuntos de las piezas estudiadas.



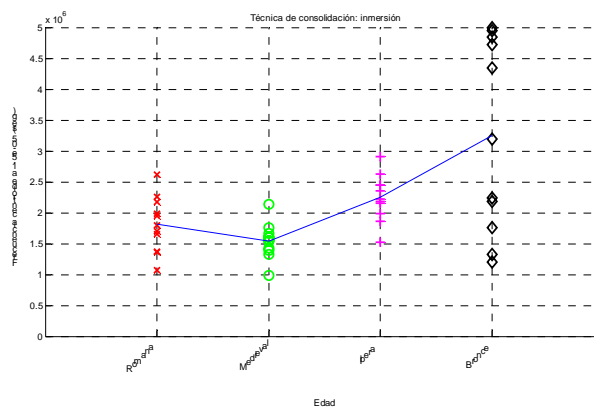
**Fig 5. Evolución de la frecuencia centroide en piezas medievales**

Los valores de la frecuencia centroide evaluados a una profundidad del material correspondiente a 15  $\mu$ s del registro de la señal se representan en las Figuras 6a y 6b, respectivamente para los métodos de consolidación por impregnación y por inmersión. Parece existir una correlación entre las edades y los valores de la frecuencia centroide, que a su vez podría relacionarse con la característica de porosidad de las piezas. Tanto para el método de impregnación como para el método de inmersión, la curva obtenida al unir los valores medios de la frecuencia centroide en las distintas edades es monótonamente creciente excepto por los valores de la época romana.





6a. Edad vs. Frecuencia centroide – Consolidación por impregnación



6b. Edad vs. Frecuencia centroide – Consolidación por inmersión

**Fig 6. Frecuencia centroide a 15  $\mu$ s del registro de la señal**

La tendencia de las curvas de la Figura 6 podría variar al realizar más experimentos. Si así sucediera y pudiera eliminarse el punto de inflexión ocasionado por los valores de la frecuencia centroide de las piezas romanas, podría concluirse, para todas las edades estudiadas, que a mayor porosidad de la pieza cerámica, los valores de frecuencia centroide calculados son más altos.

## 5. CONCLUSIONES

Se ha comprobado la validez de la utilización de la técnica de evaluación no destructiva por ultrasonidos en el análisis de piezas cerámicas arqueológicas. Se han encontrado parámetros extraídos de las señales ultrasónicas que parecen estar relacionados con la porosidad de las piezas estudiadas. Dichos parámetros son la velocidad de propagación de los ultrasonidos y la frecuencia centroide.

La clasificación de las piezas cerámicas en periodos arqueológicos a partir de características extraídas de las señales ultrasónicas de dichas piezas ha funcionado bien, independientemente del tratamiento con consolidantes ha que han sido sometidas dichas piezas. Se ha

trabajado con un conjunto de seis características, pero este número podría ampliarse para mejorar los resultados de la clasificación. Los hallazgos encontrados abren una línea de investigación muy importante en la restauración de piezas cerámicas arqueológicas. Estos resultados tendrán que corroborarse en estudios que cubran un número más amplio de casos, con el objetivo final de obtener una herramienta que contribuya a optimizar el uso de materiales consolidantes en calidad y proporción en el proceso de restauración.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por la Universidad Politécnica de Valencia bajo el proyecto interdisciplinar 2004-0900.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] CARRASCOSA, B. et al., “Recuperación de materiales arqueológicos y acción formativa en el Parque Nacional de Tikal. (Guatemala)” XIII Congreso de Restauración y Conservación de Bienes Culturales. Lleida 2000.
- [2] GOSALBEZ, J. et al., “Ensayos no destructivos por ultrasonidos aplicados a la caracterización de maderas arqueológicas sumergidas”, XV Congreso de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, Murcia 2004.
- [3] CARRASCOSA, B.; PASIES T., “Liria: Conservación y restauración de la cerámica romana” XII Congreso de Restauración y Conservación de Bienes Culturales. Alicante 1998.
- [4] CARRASCOSA, B.; LASTRAS, M., “Socarrats”. Restauración & Rehabilitación. Revista internacional del Patrimonio Histórico nº 100, 2005.
- [5] VERGARA, L. et al., “NDE Ultrasonic Methods to Characterize the Porosity of Mortar”. NDT&E International (Elsevier), 34(8):557-562, Agosto 2001.
- [6] COHEN, L., “Time-frequency analysis”, Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1995.
- [7] DUDA, R.; HART, P.E.; STORK, D.G., “Pattern Classification”, Wiley-Interscience, 2nd edition, 2000.
- [8] RIPLEY, B.D., “Recognition and Neural Networks”, Cambridge University Press, 1997.
- [9] VERGARA, L., et al., “On Estimating the Center Frequency of Ultrasonic Pulses”. Ultrasonics, 42:813-818, 2004.
- [10] VERGARA, L., et al., “Measurement of cement porosity by centroid frequency profiles of ultrasonic grain noise”. Signal Processing (Elsevier), 84(12):2315-2324, Diciembre 2004.