

## **METODO ACUSTICO COMPARATIVO DE LA CALIDAD DE MADERAS PARA CONSTRUCCION DE INSTRUMENTOS MUSICALES**

A. Moreno, C. de la Colina, F. Simón

Instituto de Acústica, CSIC  
Serrano 144, Madrid 28006  
Tel. 1-5618806; Fax: 1-411 76 51

### **SUMMARY**

A new tentative method for the objective measure of wood quality, with regard to musical instruments, is developed. The method is mainly intended to differentiate effects of wood nature or (chemical/physical) treatments on acoustic properties by using like-plate samples, on the basis on non-destructive testing. The main features of the method includes frequency response to flexural vibrations, internal damping and radiated energy.

### **ANTECEDENTES Y OBJETIVOS**

El conocimiento de magnitudes de valoración de la calidad de la madera como material de construcción de instrumentos musicales así como de métodos idóneos de medición es de una gran vigencia. En las revistas mas prestigiosas han aparecido estos últimos años publicaciones sobre el tema en las que se siguen haciendo propuestas de clasificación de calidad mediante rangos de valores de las constantes elásticas.

Dentro de los instrumentos musicales de cuerda constituyen un mito, probablemente justificado, ciertas denominaciones, entre las que stradivarius ocupa, sin duda, un lugar por méritos propios. Se aprecia entre los luthiers del momento un interés creciente en atribuir el mayor mérito de los instrumentos a la calidad de las maderas usadas mas que al propio proceso de construcción, que suponen conocer a la perfección. Por tanto de una u otra manera pretenden disponer de tratamientos especiales de las maderas que les permitan una posición de partida favorable a fin de obtener instrumentos en el límite superior de calidad. Por otra parte estos tratamientos, permitirían el uso de maderas de menor calidad inicial con perspectivas adicionales de ampliar tanto las técnicas de construcción como el repertorio de materiales a usar, entre los que ya se han comenzado a introducir materiales de diseño dentro de los denominados materiales compuestos.

En esta comunicación nos planteamos el desarrollo de un método de medición de magnitudes acústicas objetivas relacionadas con la calidad acústica de la madera. Como punto de partida analizaremos magnitudes de radiación a ondas de flexión de probetas talladas en placa y los requisitos experimentales fundamentales para obtener una capacidad de discriminación diferencial suficiente entre maderas de distinta naturaleza o de la misma madera con distinto tratamiento.

## FUNDAMENTOS TEORICOS

La madera es un material típicamente anisótropo en el que la dirección dominante de las fibras es el factor principal que ha inducido a modelarlo en la categoría de materiales ortotrópicos. Dentro de esta categoría otra aproximación válida para algunos tipos de madera consiste en considerar que en el plano transversal a las fibras el material es isótropo con lo que puede realizarse su descripción general mediante cinco constantes elásticas para cuya determinación experimental se han ideado varios métodos acústicos [1], [2].

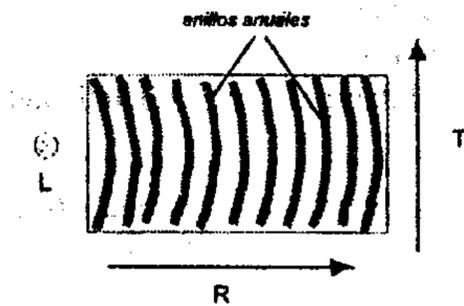
Se admite generalmente que una madera es tanto mas interesante para uso en instrumentos musicales cuanto mas sonora, de buen timbre y brillante sea. Estos atributos perceptivos, aunque con un cierto grado de interacción mutua, pueden variar en su importancia relativa de una tipología de instrumentos a otros, siendo máxima en instrumentos de percusión tales como xilófonos por ejemplo [3] y prácticamente cambian a la posición opuesta en instrumentos de viento [4]. En lo que aquí nos concierne consideraremos instrumentos de cuerda con una cierta polarización respecto a los violines.

Como magnitudes acústicas objetivas proponemos usar

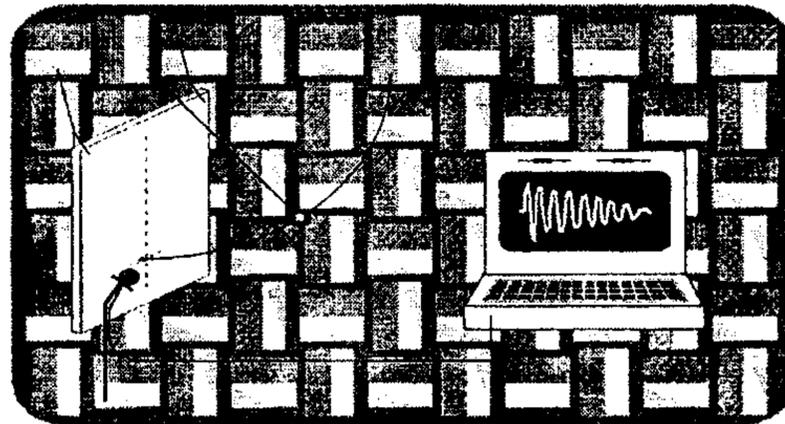
- La distribución espectral de su respuesta, que está relacionada con aspectos perceptivos del timbre
- La energía total radiada que está relacionada con la sonoridad y brillo del sonido
- El amortiguamiento de la energía radiada, relacionado también con la sonoridad y brillo

Proponemos este conjunto de magnitudes objetivas en relación a las vibraciones a flexión, como elementos de exploración y su variaciones como discriminación de la calidad, ya que además implican la interacción madera-fluido circundante fundamental en todos los procesos de radiación. Los planteamientos en vigor consideran exclusivamente magnitudes elásticas, tales como un cubo según las magnitudes  $E$ ,  $A$ ,  $\rho$  [5] o las variables  $E(\rho)$ ,  $\eta(f)$  [3], debiendo una madera poseer valores dentro de ciertos rangos para poder considerarse adecuada.

Ahora bien el carácter anisótropo de la madera causa variaciones importantes en la vibración resultantes dependiendo de cómo esté tallada la probeta en estudio. Se distinguen tres direcciones principales denominadas L, R y T, que corresponden respectivamente a la dirección longitudinal de las fibras, a la dirección radial y a la perpendicular a ésta (tangente a los anillos anuales de crecimiento). (Véase la *Figura 1*).



*Figura 1. Direcciones principales en la madera*



*Figura 2. Esquema tridimensional del montaje*

Para probetas en placa, de materiales ortotrópicos, las frecuencias de resonancia vienen dadas por [4]:

$$f_{r(ij)} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\rho h}} \left( D_{11} a_{1(ij)} a^{-4} + D_{22} a_{2(ij)} b^{-4} + 2D_{12(ij)} a_{3(ij)} a^{-2} b^{-2} + 4D_{66} a_{4(ij)} a^{-2} b^{-2} \right)^{0.5}$$

en donde,  $\rho$  es la densidad,  $h$  el espesor,  $a$  la longitud,  $b$  la anchura,  $a_{1(ij)}$ ,  $a_{2(ij)}$ ,  $a_{3(ij)}$ , y  $a_{4(ij)}$  coeficientes que dependen de las condiciones de montaje,  $D_{11}$ ,  $D_{22}$  y  $D_{12}$  los coeficientes de rigidez a flexión del material y  $D_{66}$  el coeficiente de rigidez a torsión. Para suspensiones de bordes libres, los coeficientes  $a_{1(ij)}$  a  $a_{4(ij)}$  están tabulados [6].

Cualquier estado vibratorio de la placa se compone de las contribuciones de los diferentes modos propios correspondientes a las frecuencias anteriores. Diferentes modos de excitación dan lugar a diferentes estados vibratorios en función del contenido energético y de la distribución espacial de la excitación. En general se producirán vibraciones dominantes de flexión acompañadas de vibraciones de otras categorías, torsión sobre todo.

## CARACTERISTICAS EXPERIMENTALES DEL METODO Y PRIMEROS RESULTADOS

Para la determinación de constantes elásticas mediante ultrasonidos, los *tamaños de las probetas* pueden ser extremadamente pequeños. Se ve en la literatura que bastan barras prismáticas con longitudes de orden del decímetro y secciones del orden del centímetro cuadrado [7].

Hay una práctica difundida entre los luthiers de percutir, con los dedos, tablillas de unos 20 cm de longitud para, a oído, juzgar la calidad resonante de las maderas [8]. La sustitución de constantes elásticas de maderas típicas en la fórmula anterior, para estas dimensiones en suspensión de bordes libres, muestra que las primeras resonancias se pueden producir en torno a 2 KHz. A estas frecuencias y para niveles entre 60 y 70 dB, el oído humano medio es capaz de discriminar en torno a 5 Hz, aumentando a 14 Hz a frecuencias de 4 KHz, y disminuyendo a 3 Hz a la frecuencia de 1 KHz. ( En estos juicios interviene la persistencia del sonido además del timbre según información personal del luthier J. M. Lozano, Madrid).

El método experimental que pretendemos desarrollar debe al menos igualar estas capacidades de discriminación subjetiva, lo que se favorece usando probetas de tamaños mayores. Bajar a la mitad la frecuencia de la primera resonancia significa, grosso modo, duplicar la dimensión mayor. Enriquecer el espectro con mas frecuencias de resonancia debe resultar favorable para juicios de timbre, a lo que contribuye el aumento de la anchura de la probeta. Con ello nos acercamos bastante a los órdenes de magnitud dimensional de los violines aun manteniendo tamaños manejables de probetas.

Pero la *discriminación en frecuencia* citada impone también exigencias al método de análisis espectral, que debe ser mejor que 3 Hz. Si como veremos mas adelante pretendemos usar excitaciones de banda ancha y técnicas de FFT, satisfacer esta condición impone longitudes de señal considerables. Cubrir todo el rango de frecuencias audible obliga a usar frecuencias de muestreo elevadas conforme al teorema de Shanon. En tecnología digital estas condiciones obligan a usar instrumentación de altas prestaciones.

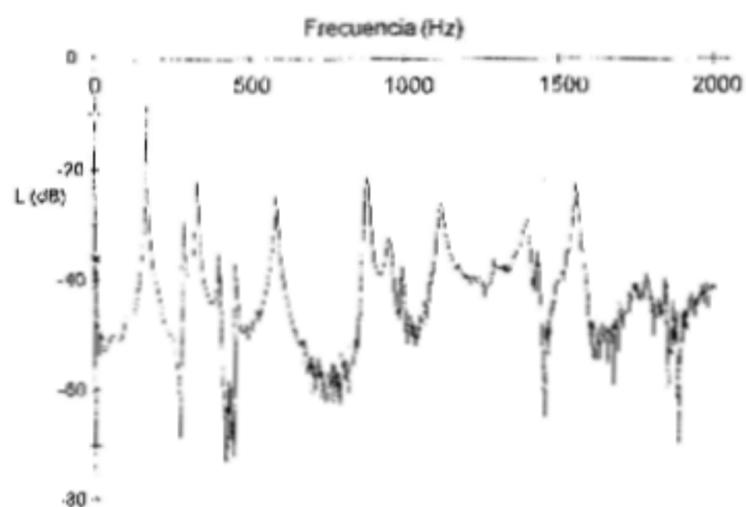


Figura 3. Respuesta espectral de una probeta a una señal impulsiva. (niveles relativos)

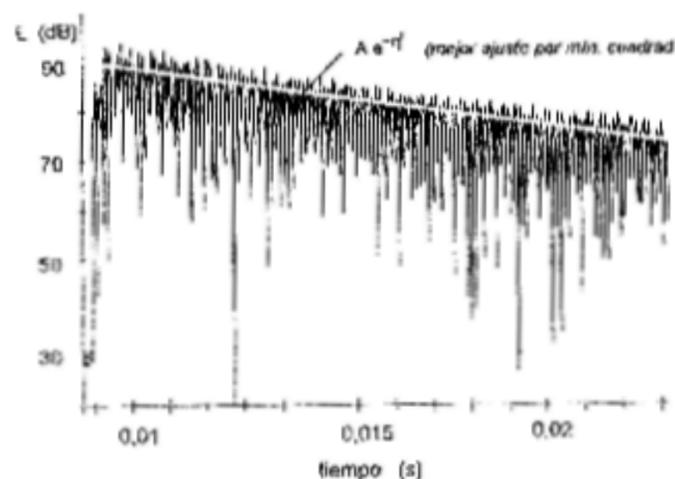


Figura 4. Reverberación

Para cubrir el rango de frecuencias citado, reduciendo el tiempo de experimentación al máximo, usaremos *impulsos de excitación* de corta duración, cuya situación ideal sería un impulso de Dirac. En estas condiciones la respuesta del sistema sería directamente la denominada respuesta impulsional,  $h(t,r)$ , que caracteriza completamente el comportamiento de la probeta: la respuesta a una señal de excitación arbitraria  $s_e(t,r)$ , es la convolución con la respuesta impulsional. Si el impulso de excitación, aun no siendo una delta de Dirac, tiene un espectro que cubre todo el rango de frecuencias de interés, la respuesta a este impulso es ya, en si misma, una buena aproximación que, bajo ciertas precauciones, debe bastarnos en los objetivos de discriminación planteados.

Para el caso de vibraciones a flexión los impactos perpendiculares a la superficie mayor ofrecen posibilidades de obtener impulsos espectralmente adecuados. La naturaleza, masa y forma del objeto-martillo, junto con la cuantía del impulso físico condiciona, para una clase de madera y probeta dadas, el espectro de la energía inyectada por el impacto. Para los tamaños de las probetas citados hemos analizado los rangos espectrales producidos por impactos de esferas de acero de 0.44, 1.05 y 2.09 gramos, en caídas libres, pendulares, desde alturas de 10 a 35 cm, respecto al punto de impacto con resultados bastante satisfactorios en maderas tales como arce y abeto. Un factor dominante resulta ser la dureza de la madera para conseguir las condiciones suficientes de repetibilidad del impacto entre pruebas sucesivas, necesarias para dar peso estadístico a los resultados.

La comparación rigurosa de la respuesta vibratoria de dos probetas requiere una igualdad geométrica entre ellas y excitaciones exactamente iguales. Solo bajo estas condiciones cabe esperar condiciones suficientes de fiabilidad entre ensayos comparativos. Esta condición es de máxima importancia en el estudio comparativo de dos probetas, tanto del mismo material con tratamientos (químicos) diferentes o diferentes condiciones de humedad, etc. , como de materiales distintos.

Es quizá poco problemático encontrar condiciones satisfactorias de *suspensión "libre"*, por los altos valores de las primeras frecuencias de resonancia de las probetas. Después de probar suspensiones con distintos hilos de caucho hemos encontrado satisfactorio suspender verticalmente las muestras mediante hilos de algodón de 0.2 mm. Los impactos se realizan entonces horizontalmente, siguiendo las bolas metálicas trayectorias circulares.

La valoración rigurosa de la *energía radiada* requiere una exploración espacial, envolvente, de la probeta. No obstante posicionando el micrófono muy cerca del lugar del impacto podemos obtener una información suficiente en probetas en placa ya que existe proporcionalidad entre la aceleración de la placa y la presión circundante [9]. En los rangos que hemos explorado se obtienen resultados muy próximos hasta distancias de 2 cm. La *Figura 3* muestra las distintas resonancias y su situación en la escala de frecuencia. Manteniendo las condiciones experimentales se puede considerar como figura de mérito: cuantas mas frecuencias de resonancia y de mayor nivel aparezcan, mas sonora es la madera. Igualmente permite discriminar corrimientos espectrales en probetas iguales, que podrán atribuirse a la diferente naturaleza de la madera o al diferente tratamiento de "mejora" aplicado, o las condiciones de humedad de las maderas, etc. .Se puede obtener información de los corrimientos espectrales en el transitorio de extinción, y paralelamente analizar el amortiguamiento individualizado para las distintas frecuencias dominantes, a través del *espectro temporal evolutivo*, aspectos que solamente hemos comenzado a estudiar.

El estudio de la *reverberación* permite medir el amortiguamiento. Hay que distinguir entre el amortiguamiento global de la señal y el de las frecuencias de resonancia. En la *Figura 4* se muestra un caso de amortiguamiento y el ajuste de medición. (Puede obtenerse información de la reverberación a partir de los valores  $\Delta f/f$  de las curvas espectrales en torno a las resonancias, por su proporcionalidad con el amortiguamiento).

El cálculo de la *energía total radiada* debe hacerse integrando la emisión en todas las direcciones o lo que es equivalente captando en una red densa de puntos equidistribuidos en una superficie que envuelva la probeta. Hasta el presente venimos integrando simplemente la señal temporal captada en la posición del micrófono ya indicada, como punto representativo.

## CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un método diferencial de exploración de las propiedades acústicas objetivas de la madera de utilidad en la discriminación comparada de calidades de distintas maderas para instrumentos musicales, centrada en valoraciones espectrales, de sonoridad y amortiguamiento. El uso de señales impulsivas y técnicas de tratamiento de señal permiten simplificar y acortar el proceso de medición. Por otra parte las características del método hacen previsible que pueda extenderse al estudio de otros materiales y situaciones con cambios mínimos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] W. Caldersmith, T. D. Rossing , 1983, Catgut Acoust. oc. Newslett. No. 39, 12-14
- [2] M. E. McIntyre, J. Woodhouse, 1988, Acta Metall. 36(6), 1397-1416
- [3] D. Holz, 1996, Acustica/Acta Acustica, 82,6, 878-884
- [4] V. Bucur, Acoustic of Wood, CRC Press,
- [5] E. Rajcan, 1998, Acustica/Acta Acustica, 84,1, 122-128
- [6] N. Sobue, N. Kitazumi, 1991, Mokuzai Gakkaishi 37(1), 9-15
- [7] V. Bucur, I. Böhnke, Ultrasonics 1994,32,5, 385-390
- [8] E. Jansson, Kungl Tekniska Hogskolan, 1994, Chap.5
- [9] ISO 140/3