

ANÁLISIS NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UN VIOLÍN

Claudia P. Staforelli C., Mario I. Razeto M., Rodrigo Pascual
Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería
Universidad de Concepción, Casilla 160 C – Concepción, Chile.
E-mail mrazeto@udec.cl.

ABSTRACT

A numerical and experimental study of the plates of a violin was made, taking into account the effect that different physical and mechanical factors produce on their dynamic response. Experimental tests were conducted to determine the vibrational modes, along with the resonant frequencies, of the cover of a violin. A numerical model of the board by means of the finite element method was made, to determine the influence of the different mechanical and geometric properties on its vibrational modes and frequencies; finding methods that allow to make changes in their structure with the purpose of obtaining the expected acoustic response. Modifying the distribution of thicknesses or varying the arching, different effects were obtained on the frequencies and the vibrational modes.

RESUMEN

Se realizó un estudio numérico y experimental de las tapas de un violín, considerando el efecto que distintos factores físicos y mecánicos producen sobre su respuesta dinámica. A partir de ensayos experimentales para determinar los modos de vibrar principales, junto con sus frecuencias resonantes, de la tapa de un violín; se realiza un modelo numérico de la placa mediante el método de elementos finitos, para determinar la influencia de las distintas propiedades mecánicas y geométricas sobre sus modos de vibrar y frecuencias naturales principales; encontrando métodos que permitan realizar cambios en su estructura con el fin de obtener las respuestas acústicas esperadas. Modificando la distribución de espesores o variando la altura en el arqueamiento, distintos efectos se obtienen sobre las frecuencias y los modos de vibrar.

INTRODUCCIÓN.

Famosos luthiers han estudiado la importancia de la geometría y propiedades de la madera en las calidades acústicas de los violines. Posteriores trabajos desarrollados por científicos han entregado variada información bibliográfica sobre las características acústicas de los grandes violines, centrandó atención en las propiedades mecánicas y acústicas de sus principales componentes (tapa y fondo). Con el objetivo de estudiar la influencia de estos distintos parámetros físicos y geométricos, en el presente trabajo se realizó una modelación y análisis numérico mediante elementos finitos del comportamiento dinámico de sus partes principales.

ASPECTOS GEOMÉTRICOS.

Un violín está constituido por 35 piezas armadas de tal manera que al pasar adecuadamente el arco por sus cuerdas, sus vibraciones se transmitan a la estructura y al aire encerrado en ella (Fig. 1). La caja de resonancia consiste principalmente en una tapa (normalmente de abeto) con sus agujeros acústicos formados simétricamente a ambos lados, un fondo (normalmente de arce), los aros laterales, la barra de resonancia y el alma. Estas dos últimas ayudan a distribuir el peso y transmitir las vibraciones producidas por las cuerdas dentro de la caja. [1], [2], [3]. El puente transforma el movimiento de las cuerdas en fuerzas periódicas aplicadas a la tapa del instrumento y transmitidas a la caja acústica; entonces, es el movimiento de una gran superficie: tapa y fondo, los responsables del sonido intenso que puede emitir el instrumento. [2], [3].

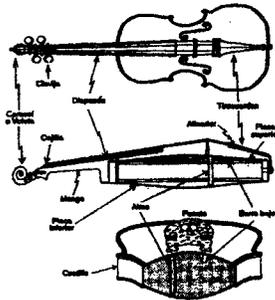


Fig. 1: Partes de un violín

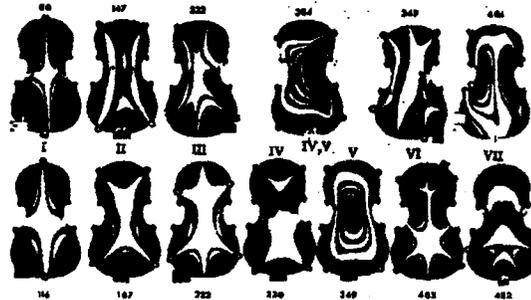


Fig. 2: Modos de vibrar tapa y fondo de violín

Se han desarmado un gran número de violines para estudiar su sonido antes de que constituyan la caja acústica. Con espectrometría láser se han obtenido los modos vibratorios de una tapa y fondo, como muestra la figura 2. Este comportamiento dinámico es similar para los distintos violines de buena calidad. [2].

MEDICIÓN DE LAS FRECUENCIAS RESONANTES EN UNA TAPA MEDIANTE MÉTODO CHLADNI.

Para obtener un buen violín es fundamental considerar el comportamiento vibratorio de sus tapas. Los luthiers generan pequeños golpecitos sobre la tapa para ir sintiendo su tono a medida que la fabrican, teniendo extremo cuidado en el punto de apoyo y la zona donde generan los golpes. [2], [3].

En la calidad acústica final del violín se debe considerar la relación en frecuencia entre la tapa y el fondo manteniendo una diferencia de medio a un tono para el modo 5; si son iguales debe existir una diferencia de 5 Hz en el modo 2. para mejorar el tono principal. Es importante la armonicidad entre los modos 1, 2 y 5 manteniendo una razón 1:2:4 entre frecuencias.[2].

Se ha implementado el método Chladni con el fin de determinar las frecuencias vibratorias y los modos de vibrar de las tapas y fondos de violín. [2], [3], [4], [5].

Mediante un barrido de frecuencia se excita la placa de violín ubicada horizontalmente, sobre un parlante, espolvoreando semillas de amapola sobre ella, con el fin de buscar sus frecuencias naturales y encontrar los modos de vibrar, correspondientes a las distintas configuraciones que las semillas van formando cuando la tapa entra en resonancia. Un amplificador amplifica la señal entregada por el generador de frecuencia, que finalmente es emitida por el parlante.

Realizando ensayos para la tapa y fondo de violín se obtuvieron los siguientes modos, mostrados en la figura 3. Se debe considerar que a mayor frecuencia los modos se tornan más difusos siendo muy difícil encontrarlos.

				
Modo 2 $f = 162.5 \text{ Hz}$	Modo 5 $f = 317.5 \text{ Hz}$	Modo 7 $f = 432.5 \text{ Hz}$	Modo 2 $f = 152.5 \text{ Hz}$	Modo 7 $f = 616 \text{ Hz}$
Fondo			Tapa	

Fig. 3: Modos de vibrar con el método Chladni para las placas de violín

Para el fondo de violín, el modo 2 presenta una buena forma y simetría, en cambio la línea nodal inferior del modo 5 no se encuentra unida en el centro formando discontinuidad. En la tapa el modo 5 presenta buena configuración, con las líneas nodales relativamente rectas.

MODELO NUMÉRICO DE UNA TAPA DE ABETO.

Modelando la tapa y fondo, usando el diseño de un violín Stradivarius a escala, con elementos finitos se intenta encontrar la influencia de los distintos parámetros geométricos y físicos en el comportamiento dinámico-acústico de ellas, de tal manera conocer las correctas variaciones a realizar para obtener las frecuencias y modos de vibrar apropiados.

Cálculo constantes elásticas de una placa de abeto.

Como los parámetros físicos varían para cada trozo de madera, [7], las constantes de elasticidad de la tapa se determinaron experimentalmente mediante el análisis vibratorio de una tabla de abeto rectangular delgada "cuarto corte" (uno de los planos de corte coincide con un plano de simetría), corte usado en las fabricación de las tapas de un violín, [2], [3], usando la teoría que define el potencial de la energía elástica a partir de tres constantes independientes que determinan las vibraciones de flexión [6. Para este tipo de placa se relacionan las tres constantes D_1 a D_3 con el módulo de Young E_x y E_y , la razón de Poisson ν y el módulo de rigidez G_{xy} , como presenta la ecuación (1), y con las frecuencias naturales de la placa, como muestra la ecuación (2).

$$\begin{aligned}
 D_1 &= \frac{E_x}{12\nu} \\
 D_2 &= \frac{E_y}{12\nu} \\
 D_3 &= \frac{G_{xy}}{3}
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 D_1 &= 0.0789 a f_5^2 \rho a^4 / h^2 \\
 D_2 &= 0.0789 f_2^2 \rho b^4 / h^2 \\
 D_3 &= 0.274 f_1^2 \rho a^2 b^2 h^2
 \end{aligned} \tag{2}$$

Las dimensiones de la placa son: 0.197 m, 0.507 m y 0.015 m respectivamente.

Las frecuencias se obtuvieron por el método de tap - tone.

$$f_1 = 139 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 267 \text{ Hz}$$

$$f_3 = 513 \text{ Hz}$$

Aplicando este método se obtiene las siguientes constantes de elasticidad:

$$E_x = 829608425 \text{ Kg} / \text{m}^2$$

$$E_y = 1177502130 \text{ Kg} / \text{m}^2$$

$$G_{xy} = 451300275 \text{ Kg} / \text{m}^2$$

Los resultados se comprobaron realizando una modelación de la placa con el programa de elementos finitos (Samcef) usando los valores determinados, observando una buena relación entre las frecuencias determinadas numéricamente con las experimentalmente.

Desarrollo modelo numérico.

A partir de las propiedades mecánicas calculadas se realizaron distintas modelaciones con elementos finitos de placa para una tapa de abeto, variando el espesor, la curvatura, introduciendo el tallado de los agujeros acústicos, e instalando y tallando la barra de resonancia.

Las primeras 6 frecuencias y modos de vibrar del modelo se presentan en la figura 4.

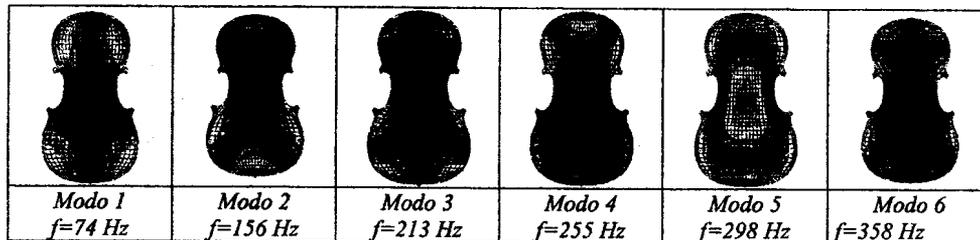


Fig. 4 Primero seis modos de vibrar de una tapa modelada mediante elementos finitos

La forma de los modos 1, 2 y 5 se acercan a la configuración ideal indicada en la bibliografía. Las frecuencias se encuentran más bajas pero mantienen la armonicidad teniendo una relación 1:2:4 entre ellas. [2], [3], [4], [5].

Variación de espesor.

Al reducir el espesor en la zona de los pulmones en 0.4 mm, la frecuencia del modo 1 no varía, el aumento en frecuencia por la reducción de masa se ve afectada por al disminución de la rigidez en aquellas zonas donde coinciden las líneas nodales de este modo con las zonas en que se reduce el espesor; en cambio, para los modos 2 y 5 las frecuencias se reducen en 3 y 10 Hz respectivamente, la disminución en la rigidez tiene mayor influencia sobre la frecuencia que la disminución de masa; principalmente para el modo 5.

Reduciendo el espesor en el centro de la tapa, en 0.5 mm, influye en la frecuencia del modo 1.

Reduciendo el espesor de la tapa en los bordes, la frecuencia del modo 1 no cambia. Mientras que las frecuencias de los modos 2 y 5 aumentan en 3 Hz y 2 Hz respectivamente.

Variación en la curvatura.

A medida que la altura de la curvatura en el centro aumenta, la frecuencia de los distintos modos aumentan, principalmente para el modo 5, como se puede apreciar en la tabla I.1.

Tabla I. Frecuencias naturales de los modos 1, 2 y 5 para una tapa modelada en elementos finitos en los distintos casos estudiados

Modos	Frecuencias (Hz)			Frecuencias (Hz)			Frecuencias (Hz)		
	Caso a)	Caso b)	Caso c)	Caso a)	Caso b)	Caso c)	Caso a)	Caso b)	Caso c)
Modo1	75.08	76.5	81.2	74.4	75.3	77.6	75 Hz	76.8	78.1
Modo2	157.3	159	164	154	154.4	152.1	154.7	150	148.5
Modo5	305.4	311	322	298.5	196.9	288.3	291.6	284.2	275.9
	1. Aumento altura de arqueamiento en a) 0.5 mm; b) 1mm; c) 2mm.			2. Zona línea nodal superior del modo 5 más plana desde a) a c)			3. Zona línea nodal inferior del modo 5 más plana desde a) a c).		

Cuando la tapa va tomando una forma más plana en la zona antinodal de la línea nodal superior del modo 5, la frecuencia de los modos 2 y 5 tienden a disminuir; no así para el primer modo, donde su frecuencia resonante aumenta (tabla I.2). La forma del modo 5 cambia, tanto en su configuración (la línea nodal superior se va haciendo más curva y delgada) como en la amplitud de las zonas antinodales del modo (fig. 5).

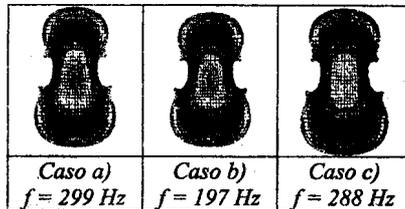


Fig. 5 Modo de vibrar 5, a medida que la zona de línea nodal superior del modo 5 se va haciendo más plana

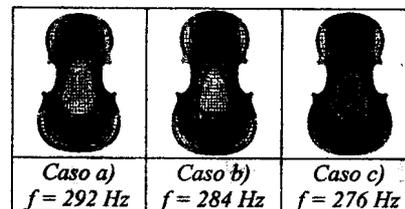


Fig. 6: Modo de vibrar 5, a medida que la zona de línea nodal inferior del modo 5 se va haciendo más plana.

Si la zona de la línea nodal del modo 5 se va haciendo más plana, las frecuencias resonantes de los modos 2 y 5 disminuyen, como indica la tabla I.3; en cambio la frecuencia del modo 1 aumenta. Se puede destacar la deformación que sufre la forma del modo 5 a medida que ocurre la variación de la curvatura (fig 6).

Formación agujeros acústicos e instalación barra armónica.

Formando los agujeros acústicos sobre la tapa, se pierde la armonicidad existente entre las frecuencias, el modo 5 se torna más débil perdiendo su forma, y se produce una disminución en las frecuencias principalmente para los modos 2 y 5; como indica la figura 7. [1], [2], [3], [4], [5].

Al instalar la barra armónica los modos se restauran, entregando rigidez a la tapa y recuperando la pérdida de masa. [2], [3], [5]. A medida que toma forma se aprecia la conformación del

modo 5 hasta alcanzar la forma esperada (Fig. 8). El modo 2 no sufre variación por su forma de flexión a lo largo de la fibra, en cambio el modo 5 es una combinación de flexión a lo largo y transversal de la fibra.

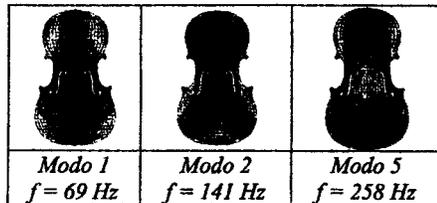


Fig. 7: Modos de vibrar 1, 2 y 5 de una tapa modelada, con sus agujeros acústicos.

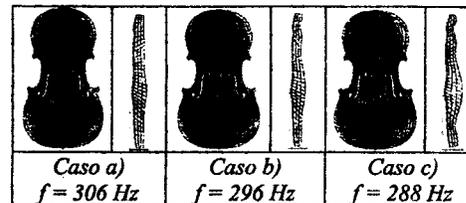


Fig. 8: Variación en configuración modal del modo 5 mientras la barra toma forma, de a) a c)

CONCLUSIONES.

- Se realizó un estudio teórico sobre el comportamiento acústico de un violín, considerando el efecto de las diferentes partes que la componen, principalmente el comportamiento vibratorio de las tapas por su importancia en la transmisión de las vibraciones influyendo en el timbre característico del violín.
- Se estableció el Método Chladni para determinar las frecuencias y modos de vibrar localizando con facilidad los modos 1, 2 y 5, demostrando ser los más preponderantes en la tonalidad final de la tapa. Las ventajas de este método es la seguridad de que los modos corresponden a las frecuencias medidas y no requiere sensores que puedan perturbar los resultados debido a la masa adicional.
- Con el modelo numérico se determinó la influencia de las distintas propiedades mecánicas y geométricas sobre los modos de vibrar y frecuencias resonantes principales, encontrando métodos que permiten realizar cambios en su estructura para obtener las respuestas acústicas esperadas. Modificando los espesores o la curvatura distintos efectos se obtienen sobre las frecuencias y modos de vibrar.
- Con los métodos experimentales y numéricos, se observó que la forma de las líneas nodales tienden a curvarse hasta separarse, a medida que aquellas zonas se van haciendo más planas. Las líneas nodales del fondo modelado numéricamente presentaron aquellas formas; similar a lo obtenido experimentalmente, para un fondo realizado en base al mismo modelo.

REFERENCIAS.

1. Curtin Joseph, *Some Principles of Violin Setup*. *Journal of the Violin Society of America*. Nov. 1995. Vol 15, N° 1.
2. Thomas D. Rossing *The science of sound*. 2ª edición.
3. Massmann Herbert *Instrumentos musicales, Artesanía y ciencia Dolmen Ediciones*, 1ª edición, Santiago Chile, 1993.
4. Joe Wolfe *Chladni patterns for violins plates* www.phys.unsw.edu.au/jw/chladni.html
5. Carleen Maley Hutchins *Acústica de las tablas del violín*. *Revista Investigación y Ciencia*. Edición en español de *Scientific American* N° 63. Diciembre 1981, pag. 54-64.
6. M. E. McIntyre, J. Woodhouse. *On Measuring the Elastic and Damping Constants of Orthotropic Sheet Materials*. *Acta Metall.* Vol. 36, N° 6. 1988.
7. Prof. Luis Valenzuela. *Apuntes: Madera. Estructura y Propiedades*. Fac. Ingeniería Forestal, Universidad de Concepción
8. Dr George Bissinger(1986). *Experimental Violin Acoustics*. *Journal American Lutherie*. N° 7.
9. Carleen M. Hutchins, Duane Voskuil. *Mode Tuning for the Violin Maker*. *CAS Journal* vol. 2, N°4, Nov. 1993.
10. M. E. McIntyre, J. Woodhouse, J. *The Acoustics of Stringed Musical Instruments.. Interdisciplinary Science Reviews*, vol 3, N°2, 1978.