

Acústica computacional del violín en polímero reforzado con fibra de carbono

Autores:

Mary Vergara (vmarijose@gmail.com)

Marcos Zambrano (z.s.marcos.j@gmail.com)

Rodolfo Gallo

Institución: Universidad de Los Andes, La Hechicera Mérida Venezuela

Pontificia Universidad Católica de Ecuador. Sede Ibarra. Ibarra, Ecuador

Universidad de Los Andes, La Hechicera Mérida Venezuela

Área de Conocimiento: Diseño - Tendencia y metodologías del diseño

Resumen

En los últimos años, ha habido una floreciente manufactura de instrumentos musicales de arco en polímero reforzado con fibra de carbono (PRFC), en especial violines. Esto tiene dos razones: i) Son escasas, sino inexistentes, las especies madereras para lutería en muchas partes del mundo, especialmente en Centroamérica y Suramérica. ii) El PRFC ha mostrado un comportamiento acústico interesante en instrumentos de arco.

No se consiguen en la literatura científica, estudios acerca del rendimiento acústico de violines en PRFC. A través del método de los elementos finitos, se realiza un análisis modal tanto del PRFC como de la *Picea Abies* (PA), ambos en tapas frontales de violines. Se valida, tanto la geometría, como el mallado y las condiciones de contorno del modelo. Las prestaciones acústicas de los violines en PRFC, se cotejan con los resultados computacionales para la PA, y con lo medido experimentalmente para esta madera por otros autores. Se encuentra que en violines, el PRFC es menos resonante que la PA, ya que presenta menos modos naturales de vibración, aunque en general realiza más trabajo acústico, por lo cual, es recomendada la implementación de este sintético, en violines de media a alta calidad, tipo “estudio”. Esta investigación promueve, la implementación acústica de este sintético, especialmente en los países donde no crece madera sonora de lutería, como la PA por ejemplo, respaldado con resultados de simulación numérica que muestran la eficiencia de dicho material.

Palabras Claves: Acústica, violín, polímero, simulación numérica, lutería

Abstract

In recent years, there has been a flourishing manufacture of carbon fiber reinforced polymer (PRFC) musical bow instruments, especially violins. There are two reasons for this: i) There are few, if any, timber species for luteria in many parts of the world, especially in Central and South America. ii) The PRFC has shown an interesting acoustic behavior in arcing instruments.

Studies on acoustic performance of violins in PRFC are not available in the scientific literature. Through the finite element method, a modal analysis of both the PRFC and the Abies Spruce (PA) is performed, both in front fender covers. It validates both the geometry, the meshing and the contour conditions of the model. The acoustic

performances of the violins in PRFC are compared with the computational results for PA, and with the experimentally measured for this wood by other authors. It is found that in violins, the PRFC is less resonant than the AP, since it presents less natural modes of vibration, although in general it performs more acoustic work, for which, the implementation of this synthetic is recommended, in medium to high violins quality, "study" type. This research promotes the acoustic implementation of this synthetic, especially in countries where wood does not grow luteria, such as PA for example, backed by numerical simulation results that show the efficiency of such material.

Keywords: acoustic, violin, polymer, numerical simulation, luteria

Introducción

La *Picea Abies* o Falso Abeto Rojo, es uno de los materiales naturales (madera) más usados en la lutería, y ampliamente estudiado en la academia. La creciente escasez y el alto costo de la madera sonora para lutería, han generado interés en usar materiales sintéticos para instrumentos musicales, especialmente violines. El PRFC, es un compuesto prometedor en esta industria, una de las casas más conocidas y con mayor producción de instrumentos de arco en PRFC, es *Luis and Clark*, ubicada en Massachusetts, Estados Unidos de Norteamérica.

La investigación científica sobre violines existe desde hace 300 años, aproximadamente. En el Renacimiento, la investigación acústica se fortalece por el desarrollo científico, en paralelo con la investigación empírica de los lutieres. En el siglo XIX, Hermann von Helmholtz identifica experimentalmente por vez primera, la forma de onda "diente de sierra" que se establece en las cuerdas cuando estas son frotadas con las cerdas del arco [1].

Cremer en su Física del Violín [2], realiza una extensa y elegante descripción teórica sobre lo más elemental de este instrumento. Herramientas numéricas como el método de elementos finitos (MEF), y experimentales como el análisis espectral y los estudios holográficos, se han utilizado para obtener gran cantidad de resultados sobre el violín en el siglo XX y XXI. Otras investigaciones, como las numéricas de Woodhouse [3], se valen de métodos de cuerpo rígido para modelar y filtrar propiedades, cuyos resultados sobre el llamado *Bridge Hill*, son importantes para esta investigación.

En la actualidad, no se conocen publicaciones sobre estudios experimentales o numéricos acerca de la acústica de violines en PRFC. En este trabajo, se realiza un análisis modal, con el método de elementos finitos, para dos prototipos de tapa frontal de violín con barra de bajos, en materiales con propiedades semejantes al PRFC y a la PA, respectivamente, para determinar mediante simulaciones numéricas, el comportamiento acústico de los violines en PRFC. Estas propiedades se obtienen a partir del número y la forma de los modos naturales de vibrar, como también de la masa efectiva asociada a estos modos, obtenidos en este estudio.

Respecto de la PA, se toman los resultados experimentales publicados en [4], y respecto de los violines en esta madera, se toman los resultados de [6,7], como marco referencial para el estudio del violín en PRFC acá propuesto.

Metodología

Data técnica

En esta sección, se presenta la *data* técnica de los materiales, y las condiciones físicas estáticas y dinámicas, impuestas sobre los modelos.

Se adosan al modelo, dos sistemas coordenados de referencia, uno local y uno global, ver figuras 1 y 2. En el sistema coordenado local (SCL), se hace $(L, R, T) = (X, Y, Z)$ para introducir la ortotropía o la cuasi-isotropía de los materiales, según la *data* técnica, como lo sugiere las Figuras 1, 3 y 4. La figura 5 muestra una micrografía de PA, donde es evidente su ortotropía, allí se destacan los planos tensoriales RT , LR y LT .

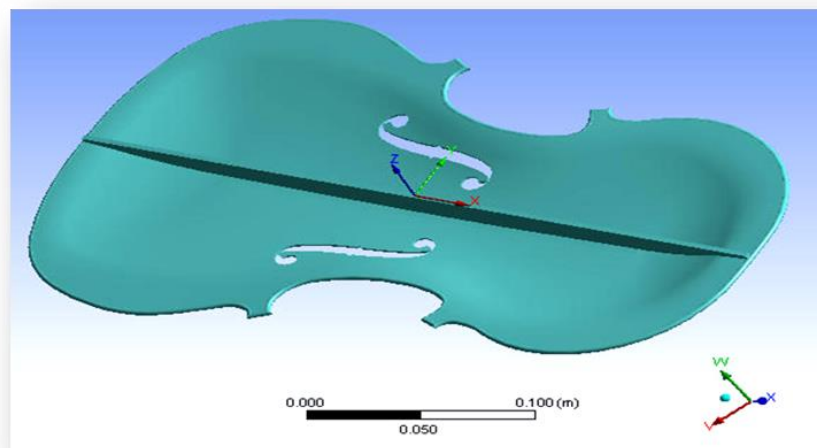


Figura 1. Reverso del Modelo. Se observa al SCL sobre la barra de bajos situada a lo largo de la tapa.

Abajo a la derecha, el sistema coordenado global (SCG). La flecha bidireccional se usa en este trabajo para visualizar mejor la orientación de labrado en rola, según la usanza en lutería.

El parámetro invariante ante traslaciones y rotaciones del SCL, es la densidad D . Los parámetros constantes, sólo ante traslaciones del SCL, son:

- Módulos de Young: E_x, E_y, E_z .
- Coeficientes de Poisson: $\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}, \nu_{yx}, \nu_{zy}, \nu_{zx}$.
- Módulos de cizallamiento: $G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}, G_{yx}, G_{zy}, G_{zx}$.

La fuente de donde se extrae la *data* técnica de PA es el libro *Acoustic of Wood*, [4]. Atendiendo a la transformación $L = X, R = Y, T = Z$, se calculan los promedios de los tres parámetros D, E y G (densidad, módulo de Young y módulo de cizallamiento, respectivamente):

$$\bar{D} = \frac{440+480+440+445+440+420}{6} \text{ kg/m}^3 \cong 444 \text{ kg/m}^3$$

$$\bar{E}_l = \frac{159+138+137+137.7+150+160+142}{7} 10^8 \text{ N/m}^2 \cong 146.2 \text{ exp } 8 \text{ N/m}^2$$

$$\bar{E}_R = \frac{6.9+3.0+2.4+9.2+7.4+5.0}{6} 10^8 \text{ N/m}^2 \cong 5.7 \text{ exp } 8 \text{ N/m}^2$$

$$\bar{E}_t = \frac{3.9+1.6+1.3+4.9}{4} 10^8 \text{ N/m}^2 \cong 3.0 \text{ exp } 8 \text{ N/m}^2$$

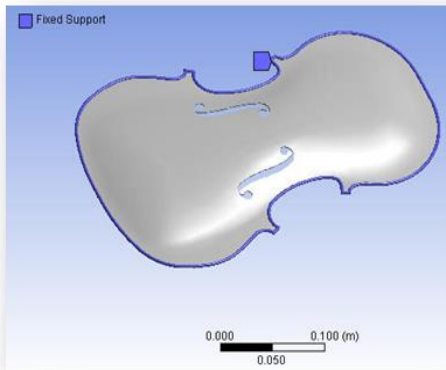


Figura 2. Anverso del modelo simulado. El perímetro destacado en azul, hace de soporte fijo (nodo) en la simulación.

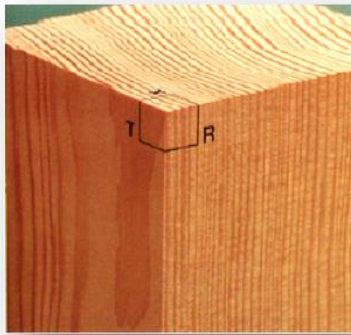


Figura 4. Fotografía de trozo de Picea Abies (Spruce o Falso Pino Abeto). Con las letras T, X y R se identifica al plano tangencial, al plano longitudinal y al plano radial, respectivamente. Imagen tomada del texto Understanding Wood. Edit. The Taunton Press. 2000.

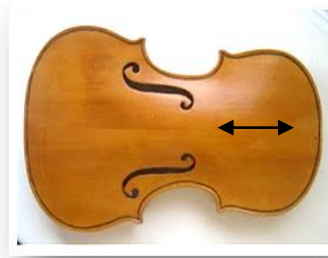


Figura 3. Tapa frontal de un violín real. La flecha bidireccional indica la disposición de labrado sobre el plano radial. Imagen tomada del sitio WEB: http://apprenticeviolinmaker.blogspot.com/2010_03_01_archive.html

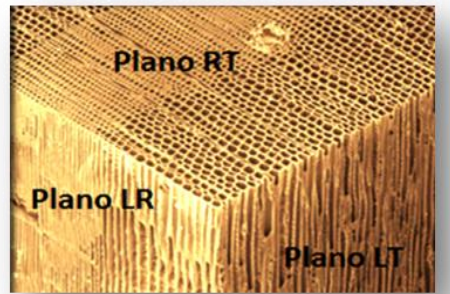


Figura 5. Planos tensoriales definidos sobre un trozo microscópico de Picea Abies. Se observa la fuerte ortotropía de este material. Imagen tomada del sitio WEB: State University of New York College of Environmental Science and Forestry

No se cumple que $G_{ij} = G_{ji}$. ANSYS sólo admite tres módulos de cizallamiento por cada corte o plano tensorial, de manera que para absorber la acción de los parámetros de índices conjugados no admitidos, se les promedia:

$$\bar{G}_{RT} = \frac{G_{RT,1} + G_{TR,1} + G_{TR,2} + G_{RT,2} + G_{TR,3} + G_{TR,4}}{6} = \frac{0.36 + 0.62 + 0.44 + 0.31 + 0.60}{6} 10^8 N/m^2 \cong 0.35 \exp 8 N/m^2$$

$$\bar{G}_{LT} = \frac{G_{LT,1} + G_{TL,1} + G_{LT,2} + G_{LT,2} + G_{TL,3}}{5} = \frac{7.7 + 8.2 + 6.5 + 6.21 + 5.64}{5} 10^8 N/m^2 \cong 6.85 \exp 8 N/m^2$$

$$G_{LR} = \frac{G_{LR,1} + G_{RL} + G_{LR,2}}{3} = \frac{7.5 + 2.50 + 5.73}{3} 10^8 N/m^2 \cong 5.24 \exp 8 N/m^2$$

Respecto a los seis coeficientes de Poisson ϑ_{ij} , aunque existe unicidad entre estos parámetros, no es posible importarlos todos a la simulación, ya que de manera análoga a los G_{ji} , ANSYS ® solo admite tres de los seis coeficientes de Poisson, exigiendo que la matriz *strain-stress* generada, sea positiva. Se determina que los tres valores que satisfacen esta condición de positividad, son los siguientes:

$$\vartheta_{TR} = 0.25, \quad \vartheta_{TL} = 0.013 \quad y \quad \vartheta_{RL} = 0.028$$

El PRFC apto para la caja acústica de los violines, es un compuesto formado por 50% de resina (polímero o epoxi), y por 50% de FC (fibra de carbono) en folios, se obtiene superponiendo de tres a seis capas planas de FC, rotadas a 45° una respecto de la otra y separadas entre sí por una interfaz de la resina, que induce propiedades homogéneas e isotrópas. Simultáneamente, mediante un proceso de autoclave, se obtiene la caja acústica del violín, ver figura 6.

La data técnica del PRFC usado en este trabajo, fue tomada de [5] y se muestra en la tabla 1. Esta data fue obtenida mediante un procedimiento no destructivo sin amortiguamiento, sobre una muestra del compuesto en forma de lámina, con espesor a lo largo de la dirección z. En la figura 7, se muestra la cuasi-isotropía del compuesto en el plano xy.



Figura 6. Perspectiva de un violín con caja acústica de PRFC al 50/50 de resina/carbón. Imagen tomada

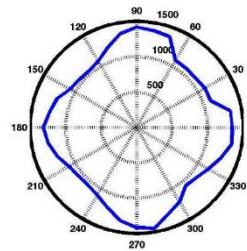


Figura 7. Distribución angular de la velocidad de grupo, en m/s, del modo A0 sobre una sección xy de la muestra de PRFC. Se observa que la curva es casi simétrica respecto al origen (cuasi-isotropía). Imagen tomada de [4].

Tabla 1. Data técnica del PRFC adaptada de [5]. Los módulos están en GPa. La densidad en Kg/m3

E_x	E_y	E_z	ν_{xy}	ν_{yx}	ν_{xz}	G_{xy}	G_{yx}	G_{xz}	D
45	44	11.36	0.32	0.32	0.03	8.4	8.4	5.5	1460

Validación del modelo numérico

Dado que en la literatura solo se cuenta con resultados de estudios experimentales en violines con PA, en este trabajo se valida el modelo numérico en este material. Esto da garantía de que el análisis en PRFC está bien formulado, y por lo tanto, se puede tener confianza en los resultados obtenidos para este compuesto.

En este estudio, el análisis modal en PA, arroja para el intervalo de frecuencias, $\sim 150\text{Hz}$ - 5850Hz , de un violín moderno, ciento cincuenta patrones modales. Para validar, se cotejan algunos de estos patrones con lo encontrado experimentalmente por McLennan [6], y por Nagai y Fushimi [7] a través de interferometría.

En las figuras 8, 9 y 10, se observa la similitud entre varios patrones modales simulados en este trabajo, y los patrones experimentales modales 2-D y 3-D encontrados en [6,7]. La similitud consiste en que los valles y las crestas de las deformaciones, de los tres modelos aquí comparados (los dos reales en [6,7] y el simulado), coinciden aproximadamente, tanto en su forma como en su región de aparición (en torno a las “efes” o a las aberturas del violín). Los modelos reales son mostrados en escala de grises, y tienen valles y crestas separadas por curvas nodales contiguas. El modelo simulado muestra sus valles y crestas, a través de sectores con gradación de color, que va desde el rojo claro al rojo intenso (cuando se trata de crestas), y del azul claro al azul oscuro (cuando se trata de valles), figuras 8, 9 y 10.

La discrepancia entre las dos frecuencias asociadas a cada par de modos similares (modo b vs. modo 1, modo d vs. modo 5, modo d vs. modo 13 y modo a vs. modo 5), es debido en gran parte, a que ANSYS® no admite amortiguamiento en simulaciones modales. Experimentalmente, tal amortiguamiento existe cuando se hacen estudios modales, como en [6,7]. Sin embargo, esta diferencia no quita fuerza a la validación, ya que son los parámetros elásticos y las geometrías de los modelos los que en primer orden, determinan la forma de los patrones naturales de vibrar.

La figura 11 muestra, una acumulación en “picos pequeños” de valores de admitancias sobre la zona de frecuencias *Bridge Hill* [3] (destacada por línea discontinua). En esta región, la mayoría de los violines, y en especial los de excelente rendimiento acústico, presentan una admitancia mejor comportada que la encontrada en el resto del intervalo total de frecuencias.

La figura 12 muestra que la simulación modal en PA arroja para la región de frecuencias *Bridge Hill*, tanto un comportamiento menos abrupto de masas efectivas en la dirección transversal al modelo, como un leve aumento de la densidad modal. Sólo se considera el total de las masas participativas en la dirección transversal a la tapa (eje Z del SCL), ya que son estas masas las que más realizan trabajo acústico [8].

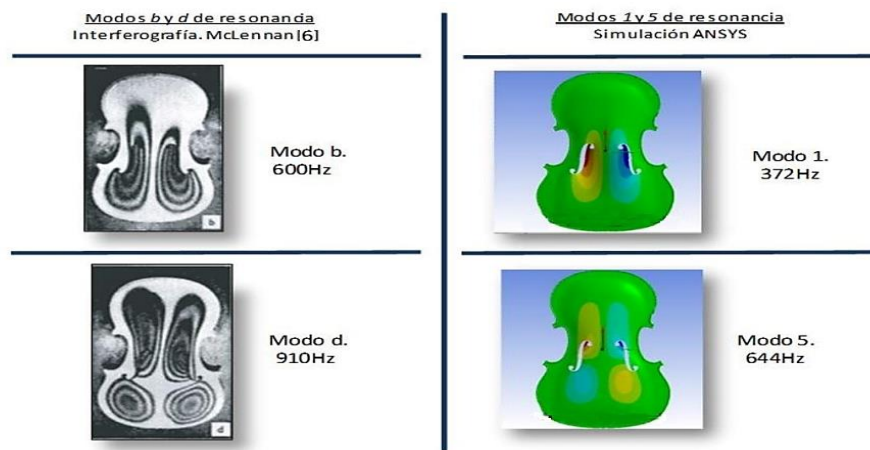


Figura 8. A la izquierda, patrones modales b y d, según [6]. A la derecha, patrones modales 1 y 5, según este estudio.

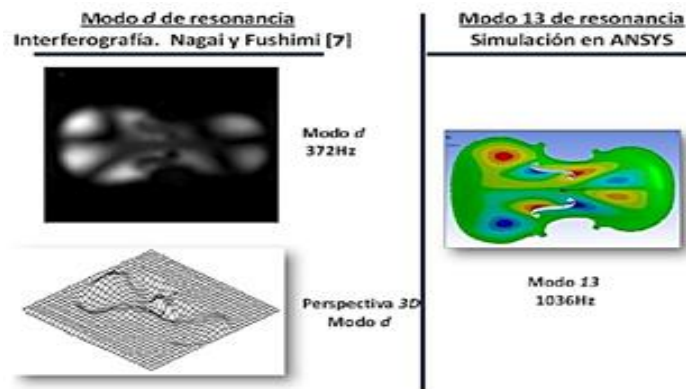


Figura 9. Patrón modal d, según [7], vs patrón modal 13 de este estudio.

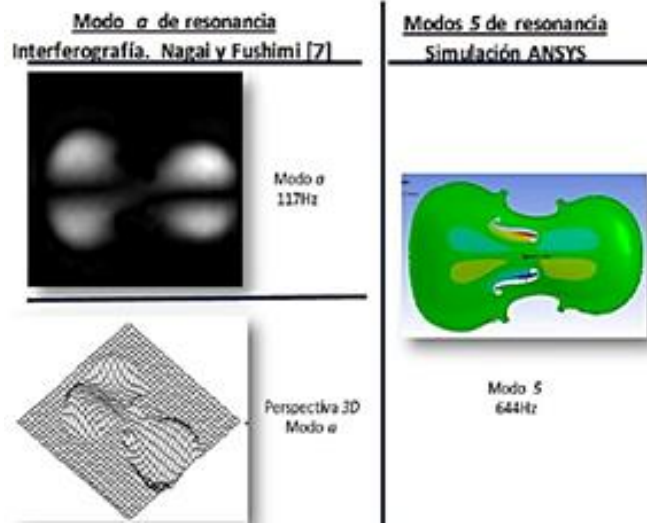


Figura 10. Patrón modal a, según [7], vs patrón modal 5 de este estudio.

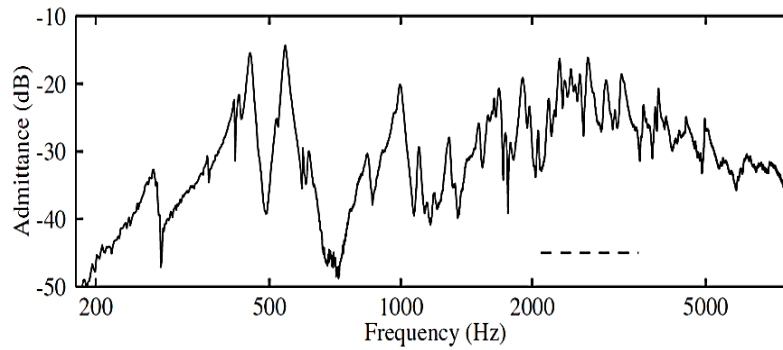


Figura 11. Admitancia de un violín de alta calidad, extraída de [3]. La línea punteada comienza cerca de los 2kHz, indicando el locus aproximado del Bridge Hill.

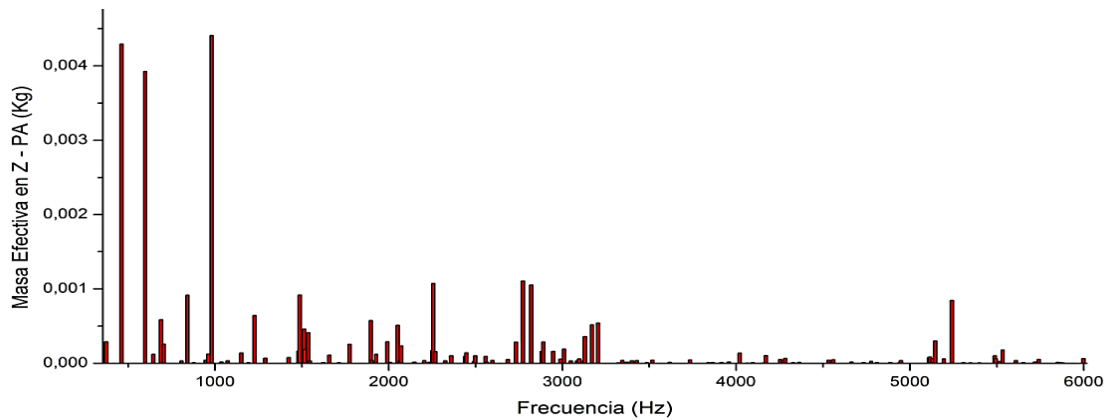


Figura 12. Masa efectiva en dirección Z vs. Frecuencia.

El valor promedio de masas efectivas, en todo el rango de frecuencias mostrado es de $2,95 \times 10^{-4} \text{Kg}$, y en el rango de frecuencias *Bridge Hill* es de $1,78 \times 10^{-4} \text{Kg}$ (aprox. el 60% del promedio). Este mismo comportamiento se da para los picos de admitancia en la Gráfica 2.

Recapitulando la validación, los patrones modales acá simulados para frecuencias bajas en *Picea Abies*, muestran fuerte similitud con los patrones encontrados experimentalmente por McLennan, Nagai y Fushimi. Woodhouse en [9], destaca que son estos modos de baja frecuencia los que en primer orden definen la calidad sonora de un violín. Respecto a las masas efectivas, se consigue buena correlación con lo que se observa para el *Bridge Hill* en [3]: Se aprecia un leve aumento en número de modos y un comportamiento más suave de masas efectivas en esta región.

Resultados

A partir de la geometría y de las masas efectivas de los modos naturales de vibrar, como de la cantidad de estos modos por unidad de frecuencia, es posible esbozar razonablemente, el rendimiento acústico de una estructura vibrante. De esta manera, se consigue que ninguno de los cincuenta patrones modales en PRFC es idéntico a alguno de los ciento cincuenta en madera, aunque en general, son tan simétricos como los de esta. La *data* numérica obtenida, tabla 2, es suficiente para caracterizar gran parte del comportamiento acústico del PRFC en violines.

Tabla 2. Participaciones absolutas y relativas de masas efectivas, en Kg.

Modelo en <i>Picea Abies</i>	Modelo en PRFC
(A) Masa efectiva - dirección z - 150 modos (todos) 3,05E-02	(A') Masa efectiva - dirección z - 50 modos (todos) 7,34E-02
(B) Masa efectiva - dirección y 1,65E-02	(B') Masa efectiva - dirección y 3,78E-02
(C) Masa efectiva - dirección x 1,93E-02	(C') Masa efectiva - dirección x 2,17E-02
(A+B+C) Masa efectiva - direcciones x,y,z 0,0663	(A'+B'+C') Masa efectiva - direcciones x,y,z 0,1383
(D) Masa efectiva - rot x,y,z 0,00209	(D') Masa efectiva - rot x,y,z 5,30E-03
(E=A+B+C+D) Masa efectiva total 0,06839	(E'=A'+B'+C'+D') Masa efectiva total 0,1436
(A) / masa del modelo en PA 0,725357	(A') / masa del modelo en PRFC 0,531469
(E) / masa del modelo en PA x 100% (0,06839/4,26E-02) x 100% = 147,7%	(E') / masa del modelo en PRFC x 100% (0,01436/0,14) x 100% = 102,6%

Las masas efectivas totales o parciales son todas considerablemente mayores en el modelo de PRFC. La masa efectiva total de este compuesto es dos veces la del modelo en madera. Con una excepción, sucede al contrario respecto de las masas efectivas relativas; todas son mayores para la PA, excepto la relación *masa efectiva total vs. número de modos*, que es 6,5 veces mayor en el PRFC. El cociente *masa efectiva total vs. masa del modelo* es aproximadamente 50% mayor en la madera que en el sintético.

Conclusiones

Ningún patrón geométrico modal en PRFC, resulta idéntico a alguno de los patrones en PA. Aun teniendo entre sí cajas acústicas (CAs) de igual geometría e idénticos sub-sistemas restantes, dos violines, uno con caja acústica (CA) en PRFC y otro con CA en PA, en las mismas frecuencias, presentan uno respecto del otro, diferentes formas de ondas sonoras: Las geometrías de los patrones modales influyen marcadamente en las formas de las ondas que emiten los instrumentos musicales [10].

El aire que desplaza una estructura vibrante es proporcional a su masa efectiva. Se tiene que en promedio, a lo largo del intervalo de frecuencias estudiado, el modelo en PRFC realiza más trabajo acústico (suena más “fuerte”) que el modelo en PA.

Las resonancias de un instrumento son proporcionales al número de sus modos naturales de vibrar. Las reverberaciones de las diferentes partes de un instrumento serán mayores cuanto más resonancias este tenga: el modelo en PA, aunque menos potente que el modelo en PRFC, emite ondas sonoras más complejas debido a su mayor capacidad de resonar y reverberar: sus componentes delatan la vibración (vía reverberación) de sus sub-sistemas. Al ser las CAs en PRFC menos resonantes que las de PA, las ondas que emiten tienen formas más sinusoidales, con menos “ruido” respecto de las CAs modeladas en madera.

Un violín en PA, respecto de un violín en PRFC, presenta una más completa batería de timbres debido a sus mayores momentos resonantes-reverberantes. Mientras más cargada esté la batería y más frecuentes sean los momentos, mayores son las posibilidades expresivas para el músico. Es posible aprovechar estas características para generar efectos estéticamente agradables.

Psico-acústicamente, un instrumento musical es considerado de sonido “cálido” y

“lleno”, cuando sus componentes delatan tenuemente, la reverberación (preferiblemente armónica) forzada o natural, de sus sub-sistemas. Al ser las ondas asociadas al PRFC más “limpias” y sinusoidales que las asociadas a la PA, las CAs en este sintético tienen menos posibilidades de excitar o enlazar, vía resonancias, a los sub-sistemas de los violines, resultando algo “frío” su sonido, según la jerga de los músicos. Sin embargo, con el PRFC es posible manufacturar violines duraderos, de relativo bajo costo, de gama media-alta, con razonable potencia sonora, comúnmente denominados “buenos violines de estudio”.

Referencias Bibliográficas

- [1] Helmholtz, H. F. (1877). The Sensations of Tone, translated by Ellis, A. J., reprint of second edition (1954). New York: Dover.
- [2] Cremer, L. (1984). The physics of the violin, Cambridge, MA: MIT Press.
- [3] Woodhouse, J. (2005). On the “bridge hill” of the violin, *Acta Acustica/Acustica* 91, pp.155–165.
- [4] Voichita Bucur (2006). Acoustic of wood. Second edition. Springer.
- [5] Raimond Grimberg, Adriana Savin, Rozina Steigmann, Alina Bruma, Paul Doru Barsanescu, Daniel Petrica Salavastru. Determination of CFRP’s mechanical properties using ultrasound methods. Nondestructive testing department, national institute of research and development for technical physics. Romania.
- [6] McLennan J. E. “The soundpost in the violin” *Jnl AAMIM*. Volume XIX (3), pp. 17-37. (2000).
- [7] K. Nagai, A. Fushimi. Application of BEM-based acoustical holography to measurement of violin plate vibration. Institute of engineering mechanics and systems. University of Tsukuba.
- [8] G. Bissinger, D. Oliver, 3-D Laser vibrometry on legendary old italian violins. Polytec, Inc., Hopkinton, Massachusetts.
- [9] Woodhouse, J. (2002). Body vibration of the violin –what can a maker expect to control, *J. Catgut Acoust. Soc.* 4 (5), pp. 43–49.
- [10] Kenneth D. Marshall. Modal analysis of a violin. *J. Acoust. Soc. Am.* Volume 77, Issue 2, pp. 695-709 (1985).