



## NUESTROS INSTRUMENTOS

### APLICACIONES DE LA MECÁNICA COMPUTACIONAL AL DISEÑO DE...

#### ***Aplicaciones de la mecánica computacional al diseño de instrumentos de plectro: experiencias para el caso de la guitarra***

##### ***Introducción***

El diseño de instrumentos (los de plectro en particular) ha sido una labor desarrollada y mejorada por generaciones de constructores de instrumentos, en una especialidad que podría denominarse *ingeniería de instrumentos*. Como todo trabajo ingenieril, el correcto conocimiento de los fundamentos en los que se basa el diseño de un elemento permite definir su razón de ser, su estudio, y su perfeccionamiento. Modernamente, las técnicas de simulación por ordenador se han incorporado de forma habitual en los diseños ingenieriles. Y el musical no es una excepción. En este artículo se presenta una metodología que ha demostrado ser exitosa para la simulación por ordenador de un instrumento particular como es la guitarra. Fácilmente se vislumbra que esta técnica puede aportar una ayuda valiosísima al luthier para optimizar determinados elementos de guitarras y, por extensión, ilustra el camino a seguir con otros instrumentos de plectro, como son la bandurria, guitarra y su familia.

En Física y en Ingeniería aparecen con frecuencia problemas que no permiten un planteamiento analítico, bien por no ser posible o bien por ser excesivamente complejo. Para algunos de estos problemas se desarrolló hace años (no está claro cuántos, pero los orígenes parecen remontarse unos 150 años) el Método de los Elementos Finitos, un procedimiento numérico consistente en la generación de un modelo que trata de reproducir lo más fielmente posible el sistema real, y en el planteamiento y resolución de ecuaciones que rigen su comportamiento. Como puede comprenderse, el auge de los ordenadores ha supuesto un gran impulso para este Método, puesto que permite realizar rápidamente una enorme cantidad de cálculos, permitiendo el planteamiento de modelos complejos (y por tanto más fieles a la realidad).

El Método es aplicado desde hace años al diseño de elementos mecánicos de formas geométricas irregulares, compuestos de diferentes materiales, y con condiciones de contorno mixtas. En particular, a aquellos en contacto con fluidos en movimiento, como pueden ser las piezas de aviones o de coches, obteniéndose mediante esta técnica un gran número de resultados predictivos que evitan la construcción de series de piezas reales y su prueba en diferentes condiciones externas.

El comportamiento vibracional de los instrumentos musicales, y la consiguiente emisión de sonido, es uno de estos problemas complejos. Los instrumentos musicales, en particular los de cuerda, son estructuras mecánicas compuestas con piezas de geometría no simple, y fabricadas con un material natural; además, los mejores instrumentos son fabricados artesanalmente. A esto debemos añadir que es conocido que pequeñas modificaciones pueden determinar la calidad final del instrumento.

El Método de los Elementos Finitos aplicado a los instrumentos permite, solo o reforzado con otros métodos experimentales, dos objetivos. Por una parte, acercarnos al conocimiento del comportamiento vibracional de cada pieza del instrumento y su papel en el conjunto final. Por otra, permite la simulación de modificaciones con el fin de alterar el resultado final. Es decir, es una herramienta útil para profundizar en el conocimiento y también es una ayuda para el diseño de modificaciones tendentes a mejorar los resultados.

En este trabajo pretendemos acercar este Método a los constructores de instrumentos, de forma que puedan valorar su aplicación a algunos problemas concretos de diseño e incluso su implementa-



ción con carácter general en el proceso constructivo. Cabe mencionar al respecto que en otros países ya se están aplicando técnicas similares para la mejora de instrumentos como el violín.

### **Conceptos previos**

Con el fin de uniformizar el nivel de partida de los lectores, se presentan una serie de términos que serán utilizados durante el artículo.

**Modelización:** Proceso mediante el cual se reproduce en un ordenador un objeto, con sus propiedades geométricas y mecánicas, y se puede analizar cómo se comporta ante determinadas acciones. Se estudia por tanto un objeto (una guitarra en nuestro caso) que sólo existe en un ordenador, pero que funciona igual que una guitarra real.

**Sonido:** El sonido es una oscilación de presión que se genera en un emisor, se propaga por el medio (atmósfera o agua en general), y llega hasta el receptor (tímpano del oído humano, por ejemplo). El oído humano es capaz de captar frecuencias comprendidas entre 16 y 20000 Hz.

**Placa:** En el contexto utilizado en este artículo, se denomina placa a un elemento superficial con pequeño espesor. La tapa armónica se modeliza como una placa. También el fondo, y

los aros. Cuando no se puede asimilar a este modelo, se recurre a elementos sólidos, o a elementos lineales.

**Modos de vibración:** Figuras geométricas (asociadas a sus frecuencias de vibración) que representan superficies de vibración. El problema del movimiento vibratorio general de un sólido puede analizarse descomponiéndolo en el análisis de sus modos de vibración.

**Modelo numérico:** Se llama así al modelo virtual que sólo existe en el ordenador y que, con una adecuada elección de parámetros y de leyes de comportamiento de los materiales, permite estudiar suficientemente bien (desde un punto de vista práctico) el comportamiento de un sólido real sometido a una serie de acciones.

**Factor de calidad:** Es un parámetro que está relacionado con el decaimiento que experimenta una señal cuando deja de estar presente la acción que genera la vibración. Por ejemplo, para una cuerda, este parámetro está relacionado con el tiempo que tarda el sonido que se obtiene al pulsar una cuerda en decaer hasta hacerse inaudible.

**Ortotropía:** Se dice que un modelo es ortótropo cuando el comportamiento del material, en un punto, depende

de la dirección en la que se produzcan las excitaciones (direcciones perpendiculares entre sí). Así, el acero no es ortótropo (en ese caso se dirá que es isótropo), y la madera sí, pues las vetas introducen unas propiedades típicas de un material compuesto. Cuando no hay sólo dependencia de 3 direcciones perpendiculares entre sí, sino que hay variaciones más complejas, se dice que en general, el comportamiento es anisótropo.

### **Modelización de una guitarra.**

La guitarra es un sistema mecánico complejo, con un comportamiento dinámico determinado por la interacción de muchas componentes. La cuerda pulsada radia sólo una parte pequeña de sonido directamente, pero excita el puente y la tapa, que a su vez transfiere energía al aire del interior, a los aros y al fondo, y también al mástil. Todos los elementos puestos así en vibración radian sonido en mayor o menor medida, pero la radiación eficiente se produce fundamentalmente por las placas vibrantes y la boca del instrumento. Así, la caja es el principal elemento de la guitarra. Las vibraciones producidas en la tapa al pulsar las cuerdas se transmiten a la caja, la cual las filtra y/o amplifica mediante sus modos propios generando así el sonido del instrumento. El



## NUESTROS INSTRUMENTOS

conocimiento de los modos propios de la caja nos da en definitiva una aproximación al sonido final de la guitarra.

En este apartado vamos a describir el estudio de una caja de guitarra realizado mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF). Por una parte, se simuló la construcción de una caja de guitarra, y por otra, se construyó dicha caja de forma real y se comparó su comportamiento con el simulado en diversas fases de construcción. El buen acuerdo entre las predicciones del modelo numérico y el comportamiento real observado indica que el MEF es un buen método para predecir comportamientos dinámicos de cajas de guitarra.

El punto de partida fue el diseño, realizado por un luthier experto, de una caja armónica concreta (tapa, fondo, aros, tacos, barras y varillas), desde la elección de los materiales a emplear, pasando por los diseños geométricos y las fases de construcción, todo ello orientado a la obtención de un instrumento de alta calidad. Se aplicó el MEF, generando un modelo numérico de la caja, y por su parte, el luthier construyó la caja real en paralelo. El modelo numérico permitió no sólo la reproducción del comportamiento observado sino también su análisis y la predicción de propiedades.

Así, se obtuvieron los modos de baja frecuencia, las frecuencias propias de la caja de resonancia y los factores de calidad, incluyendo el acoplamiento entre la estructura y el aire contenido en ella.

Una primera fase del trabajo partió del estudio de la tapa armónica y el fondo por separado, pasando luego a acoplarlos para formar la caja, en ausencia de aire. Este modelo numérico permite evaluar la influencia del proceso constructivo de la tapa y el fondo en el instrumento final. Por ejemplo, permite evaluar cuantitativamente la influencia de la posición, tamaño, material, perfil... de las varillas en las frecuencias propias de la caja. Permite también observar la influencia de cambios mayores, como el tamaño de la boca, o cambios de material, alterando las constantes elásticas. Es posible también observar los efectos de cambios en el grosor de tapa y fondo en los modos y frecuencias propias.

Posteriormente se tomó en cuenta el aire contenido en el interior de la caja, obteniendo los modos acoplados. Este cálculo permite por una parte un estudio cuantitativo de la interacción entre el fluido y la estructura, y por otra valorar la influencia del proceso constructivo de la tapa armónica y el fondo en la dinámica del instrumento.

### **a) El Método de los Elementos Finitos**

El MEF es una de las técnicas numéricas más usadas actualmente. Este método ofrece la posibilidad de obtener el comportamiento vibracional de estructuras mecánicas complejas por medio de simulaciones numéricas. De forma breve, consiste en la división de la estructura en pequeños elementos donde puede ser más fácil la resolución de la ecuación de onda. Estos elementos están definidos a partir de unos puntos (nodos) donde se resuelven las incógnitas del problema. Los datos necesarios son la geometría de la pieza (forma y tamaño), las condiciones de contorno y los parámetros mecánicos de los materiales (densidad, tensor elástico y amortiguamiento). La calidad de la aproximación está determinada por muchos factores: la malla debe ser suficientemente regular, el número de elementos debe poder describir los modos de vibración (al menos cinco elementos por longitud de onda) y los parámetros del material deben reflejar los valores reales del material utilizado. Precisamente uno de sus éxitos es la posibilidad de incluir descripciones ajustadas de las propiedades mecánicas. En nuestro caso se hicieron dos aproximaciones. Se asumió que la madera era homogénea, despreciándose la existencia de vetas, y orto-



trópica, con nueve constantes elásticas independientes. Una vez diseñado el modelo numérico y resuelta la ecuación de onda, se obtienen los modos de vibración y sus frecuencias, así como la respuesta del sistema a diversas excitaciones.

El primer paso del método es la discretización de la estructura. Esta fase consiste en dividir el continuo en partes o elementos, de forma que se reemplaza un sistema con infinitos grados de libertad por un sistema con un número finito de grados de libertad. La forma, el tamaño y los grados de libertad permitidos al elemento determinarán en gran medida la validez de la solución obtenida. Se supone que los elementos están conectados entre sí mediante un número discreto de puntos, llamados nodos, situados en sus contornos. Asimismo, también se introducen en el modelo las características mecánicas del material que compone la pieza. En el caso de la guitarra (y de otros instrumentos musicales) el material es algún tipo de madera (nótese que es un material anisótropo), cuyas características (densidad, constantes de elasticidad y de rigidez) son los datos a introducir. Los desplazamientos de los nodos y las fuerzas entre los elementos son las incógnitas del problema, que se obtienen mediante el planteamiento y

la resolución del sistema de ecuaciones dinámicas acopladas. Así, obtendremos (en nuestro caso) la forma geométrica de los modos propios y sus frecuencias.

Los métodos informáticos han supuesto un gran avance a la hora de aplicar el método. Por una parte, actualmente se dispone de “programas de mallado”, que lo realizan automáticamente una vez introducida la geometría de la pieza y decididos los elementos (forma geométrica, grados de libertad y tamaño). Cada pieza es unida a las demás mediante condiciones que tratan de simular las reales (las “condiciones de contorno”). Más importante aún, hay programas que plantean y resuelven el sistema de ecuaciones, partiendo de la malla de la pieza y de sus constantes materiales. Hay disponibles diferentes programas (ANSYS, ABAQUS, SYSNOISE...) que aplican el MEF. Sin embargo, hay que advertir en este punto que se requiere un cierto grado de conocimiento de las interioridades matemáticas del MEF si se pretenden obtener resultados fiables (recordemos que es un método numérico, aproximado por tanto) y un cierto conocimiento de las propiedades vibracionales de las guitarras si, además, se pretenden interpretar.

Como problema relevante y característico en el caso de las cajas de instrumentos, tenemos el acoplamiento entre la estructura de madera y el aire contenido en su interior. Es un problema complejo, ya estudiado parcialmente en su momento por Helmholtz, que aún se complica más si se pretende simular numéricamente: tengamos en cuenta que tratamos con un material altamente anisótropo (que no es habitual en las estructuras mecánicas modernas) acoplado con un fluido.

### ***b) El modelo de la caja de guitarra***

El material de la tapa fue cedro del Canadá (*Tsuga heterophylla* Sarg.) y se simuló con espesor variable, siguiendo las indicaciones del constructor y teniendo en cuenta la dirección de la veta. Las barras y las varillas del abanico fueron de madera de la especie de las piceas (*Spruce*) y se simuló su perfil geométrico, así como la dirección de la veta.

El comportamiento de la tapa fue simulado en los diferentes estadios de construcción: espesor constante, espesor variable, ambas sin estructuras añadidas, para después añadir las barras y finalmente, y varilla a varilla, el abanico. El número y posición de las varillas de éste es una de las principales distinciones entre