

# Acústica de las tablas del violín

*Pruebas recientes de las propiedades vibratorias de la tapa y el fondo de un violín sin ensamblar nos descubren parte del secreto de los luthiers y de su habilidad en la construcción de buenos ejemplares*

Carleen Maley Hutchins

Uno de los grandes misterios de la historia de la música es el de la habilidad de los maestros luthiers de antaño. Sin más bagaje científico que un conocimiento empírico de la física y la acústica de su instrumento, los artesanos construían violines que todavía hoy apreciamos por la nitidez y belleza de su sonido. A lo largo de 30 años, un sucinto grupo internacional, encuadrado en una organización denominada Catgut Acoustical Society (Sociedad Acústica de Cuerdas de Tripa) hemos venido utilizando los métodos más avanzados para el estudio de la física y la acústica de los violines y otros instrumentos de cuerda. De la primera parte de la investigación me ocupé hace 20 años en *Scientific American* [véase "The Physics of Violins", noviembre de 1962]. Pero el trabajo ha adelantado tanto que podemos ya afrontar con seguridad el tema de las propiedades de las tablas (la tapa armónica y el fondo), antes de su montaje para convertirse en un instrumento. En función de esos mismos descubrimientos, que iré desglosando a lo largo de la exposición, se pueden fabricar violines, y otros instrumentos de su propia familia, dotados de una buena sonoridad y excelente calidad de ejecución.

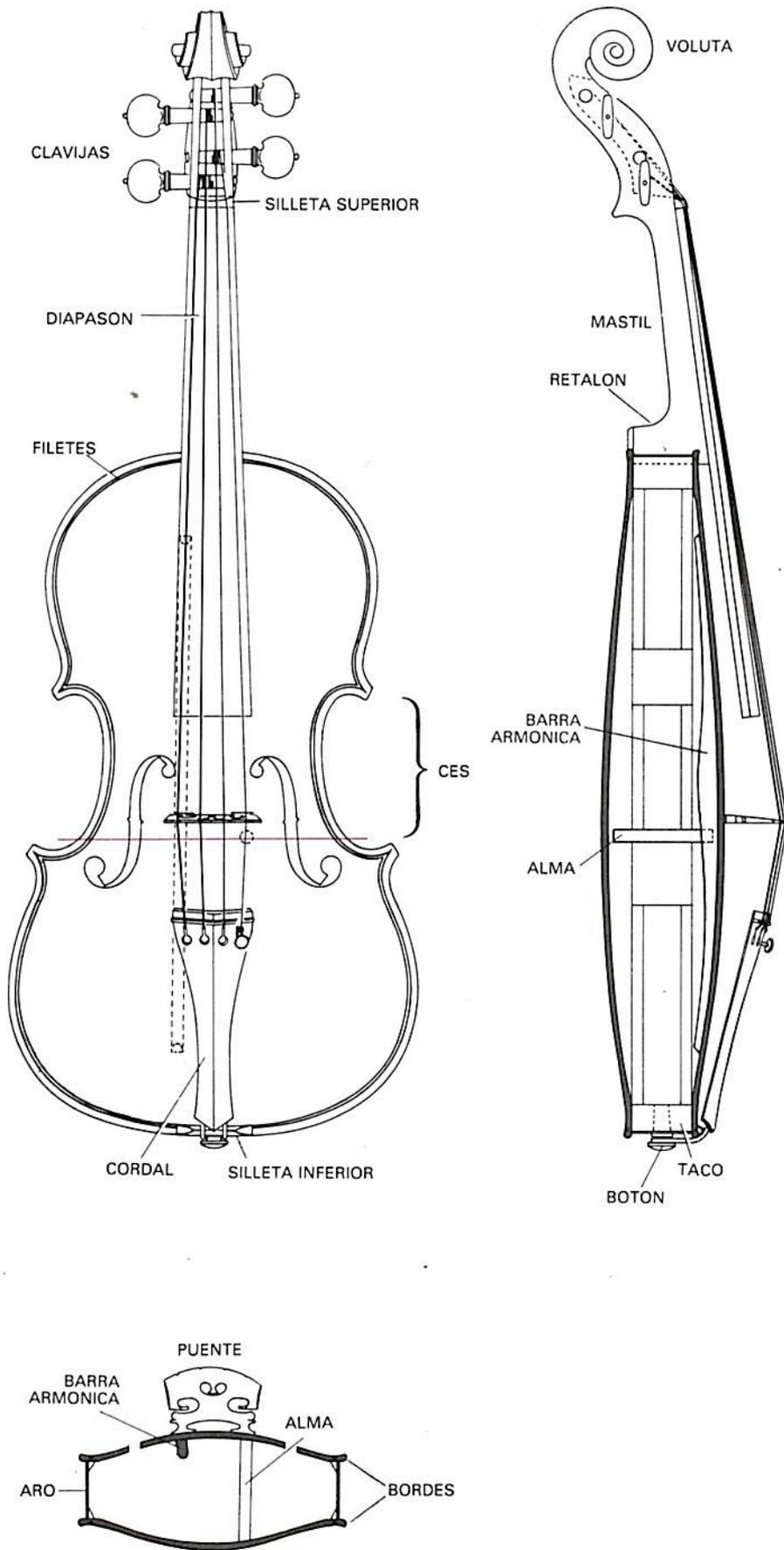
De acuerdo con el canon de la tradición, las piezas se tallan a partir de bloques macizos de madera: la tapa a partir de dos bloques adyacentes de abeto (*Picea abies*), de veta longitudinal, unidos por la mitad, y el fondo a partir de una sola o varias piezas ensambladas de arce (*Acer platanoides*), cuyas vetas transversales forman una "llama" o rizo. Varía tanto la madera de árbol a árbol, e incluso entre dos secciones contiguas del mismo tronco, que resulta imposible reproducir punto por punto las piezas de un violín óptimo y conseguir así otro con el sonido y la calidad de ejecución del patrón original. Para obtener una réplica de un buen violín no basta con reproducir milimétricamente

sus medidas geométricas; hay que prestar atención, además, a las mediciones relativas a las propiedades vibratorias de la madera.

La larga investigación, cuyas conclusiones expondremos, descansa, en buena parte, en la experiencia de los maestros luthiers y aporta nuevas soluciones a la cuestión formulada en 1830 por Félix Savart, que fuera médico y físico a la vez. "¿Qué sonidos, preguntó, deberían producir la tapa y el fondo de un violín antes de su ensamblaje?" Gracias a la generosa cortesía del famoso luthier francés Jean Baptiste Vuillaume, Savart tuvo la oportunidad de ensayar con tapas y fondos de una docena de violines que habían construido Antonio Stradivari y Giuseppe Guarneri (¡nada menos!). Aplicó un aparato de medida que él mismo se había diseñado basándose en una técnica desarrollada por su amigo Ernst F. F. Chladni. Por el método de Chladni pueden observarse los modos propios, o modos normales de vibración, de una tabla plana en posición horizontal, espolvoreándola con limaduras y haciéndola vibrar. A ciertas frecuencias, las así llamadas frecuencias propias, las limaduras se desplazan, por efecto de la vibración, hasta zonas nodales, no sometidas a vibración, creándose en la tabla unas configuraciones en nodos y antinodos a unas frecuencias de resonancia muy definidas. Esas resonancias, o modos normales, son resultado de las características físicas de rigidez y masa, que originan unos patrones de ondas estacionarias en respuesta a la vibración a determinadas frecuencias, específicas de cada tabla. La respuesta que Chladni dio a la pregunta de Savart fue: "Hemos observado que en los buenos violines el tono varía entre el  $do_3$  # (el 3 indica la octava) y el  $re_3$ , para la tapa, y en el caso del fondo se halla entre el  $re_3$  y el  $re_3$  #, de forma que entre ambos siempre existe un intervalo comprendido entre un semitono y un tono."

Posteriormente, otros investigadores realizaron mediciones vibratorias sobre tablas de violín, tanto libres como ya ensambladas, y analizaron las características sonoras resultantes. Especial interés revistió el trabajo realizado por el acústico y luthier Hermann F. Meinel, en Berlín, en la década de 1930, quien estableció la correlación entre el grueso de las tablas y los modos de vibración, la intensidad del sonido y el timbre. Meinel también estableció las limitaciones de la construcción de violines de forma empírica y observó los efectos de las características de la madera, la curvatura de las tablas y el barniz. Estudió la posibilidad de mejorar un violín en una determinada región de frecuencias raspando la madera en una zona bien definida, de acuerdo con los trabajos de Hermann Backhaus, pero llegó a la conclusión de que no siempre los resultados eran satisfactorios, pues dependían del estado físico del violín. Este trabajo expone un problema básico de la construcción de violines: una pequeña modificación, que puede mejorar espectacularmente un instrumento, puede influir negativamente en otro; tal es la variabilidad de la configuración de los modos de vibración y de la rigidez de las tablas.

En 1950, conjuntamente con el físico Frederick A. Saunders, de la Universidad de Harvard, inicié un estudio con el propósito siguiente: verificar los descubrimientos de Savart y desarrollar nuevos sistemas de medición vibratoria que correlacionaran las características propias de flexión de cada par libre de tapa y fondo con la sonoridad y calidad de ejecución del instrumento montado. Ya en 1960 los resultados de unos 200 ensayos realizados con violines y violas en fase de construcción confirmaron el principal descubrimiento de Savart: se dice que un instrumento es óptimo desde el punto de vista musical cuando el tono principal de la tapa y el del fondo

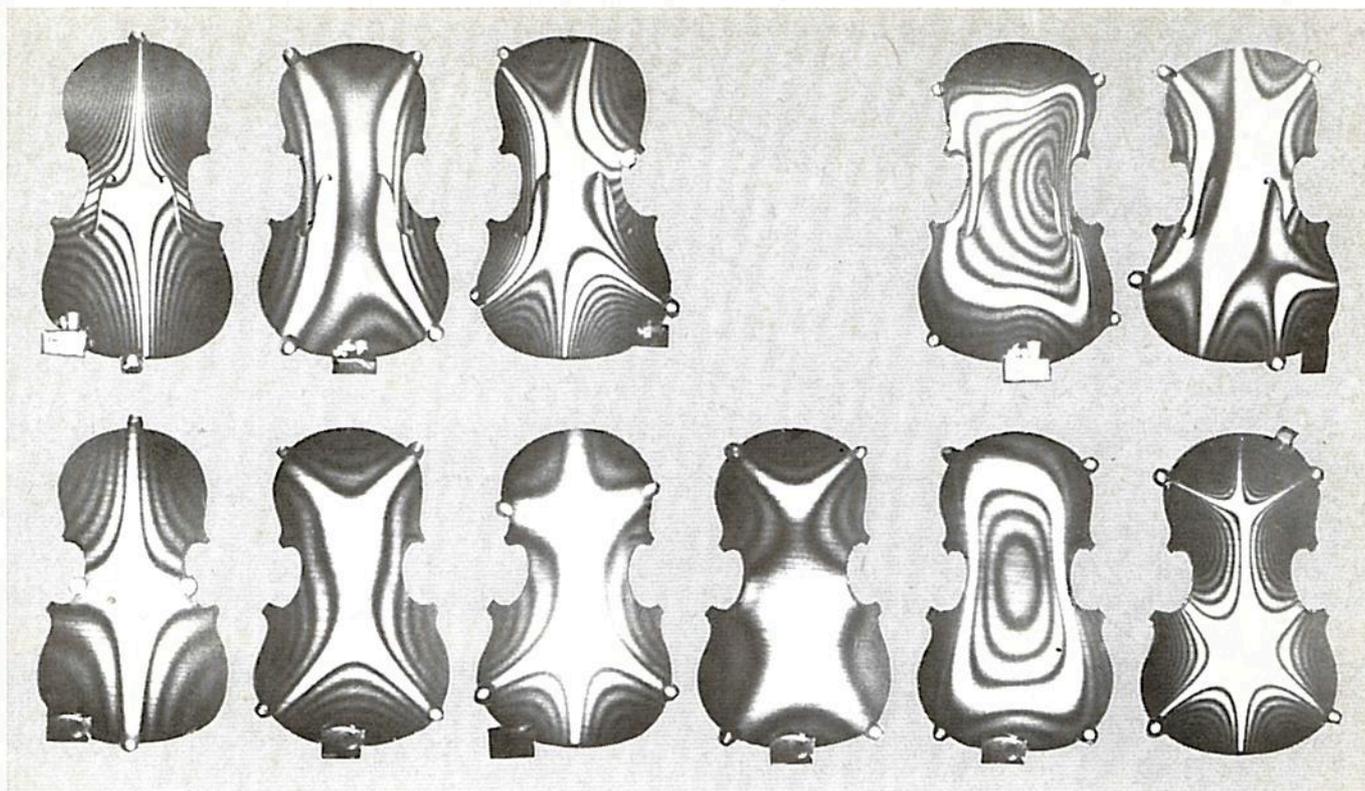


**PARTES COMPONENTES DE UN VIOLIN**, representadas en una vista superior, en sección y en vista lateral. La línea de color señala por dónde se corta. Tamaño y proporciones aparte, los elementos componentes de un violín, una viola y un celo, o los de la nueva familia "violinística", son muy parecidos.

difieren en un intervalo de un tono o un semitono. En el lenguaje de los luthiers, se llama tono principal de una tabla al que se percibe cuando la percutimos. Nuestras observaciones pusieron de manifiesto que las frecuencias reales podían variar mucho, que el tono producido por percusión de la tapa podía ser más alto que el del fondo, o a la inversa, y, no obstante lo anterior, conseguirse un instrumento con buena sonoridad.

**P**ero esas observaciones no eran suficientes a la hora de explicar el descubrimiento aludido: cuando se ensamblan los pares de tablas libres, no siempre resultan instrumentos dotados de las cualidades esperadas en lo concerniente a sonido y ejecución. Sin motivo que lo justificara, a veces salía un ejemplar mucho mejor que el resto. Y otras, mucho peor. Saunders falleció en 1963. Proseguí, ya sin él, buscándoles solución a esos hechos incongruentes. De mis manos salieron 160 instrumentos más de la familia del violín, a los que sometí a su correspondiente ensayo. (La familia del violín comprende, además del violín propiamente dicho, la viola, el violoncelo y el contrabajo tradicionales. Algunos instrumentos nuevos y revisados, que se desarrollaron con los métodos de prueba descritos aquí, forman el "octeto violinístico", englobados en la designación general de violín: tiple, soprano, mezzo, contralto, tenor, barítono, bajo y contrabajo.) He examinado los instrumentos con el método de Chladni, por supuesto; pero también por otros modernos: interferometría holográfica y análisis en tiempo real. Antes de aplicar cualquier método, sin embargo, conviene dominar el oficio de luthier, de suerte que el instrumento se construya de acuerdo con los principios más exigentes de pura escuela artesanal. Yo aprendí el oficio por los años 50; pasé primero por el taller de Karl A. Berger y seguí en el de Simone F. Sacconi, con el apoyo alentador de Rembert Wurlitzer. Fueron ocho años de trabajo lento y paciente.

Las propiedades vibratorias de la tapa y el fondo resumen la historia que haya atravesado la madera de origen. (El tiento y el conocimiento que el luthier aporta a la hora de escoger un tronco constituyen ya, de suyo, todo un saber arcano.) La tradición impone también, entre sus reglas, que las "hojas" —piezas alargadas de madera de longitud precisa, cortadas y serradas a rebanadas en secciones "cuarteadas" del tronco— hayan pasado por una larga



CONFIGURACIONES VIBRATORIAS de una tapa y un fondo sueltos de un violín (la tapa, entera, con los oídos en forma de  $f$  y la barra armónica), que la interferometría holográfica ha permitido visualizar. A partir del modo de frecuencia más baja, reciben la denominación de modo 1, modo 2, etcétera. La serie superior de interferogramas muestra las configuraciones de los modos a las frecuencias que se forman en esta tapa: 80, 147, 222, 304 y 309

hertz. (Falta el modo 4.) La serie inferior presenta los primeros seis modos del fondo, a 116, 167, 222, 230, 349 y 403 hertz. Hay muchos modos más de resonancia a frecuencias superiores. En todos los instrumentos de la familia del violín la configuración de los modos inferiores de resonancia es muy regular, si bien las frecuencias varían con las dimensiones, el grosor y la rigidez de la tabla. Lo ideal es que los modos 1, 2 y 5 formen una serie armónica.

maduración y que se guarden almacenadas, apiladas, en cobertizos al aire libre, durante un período de cinco a diez años, en el caso del abeto, y un tiempo un tanto más dilatado para el caso del arce. Hay maestros exigentes que sostienen que la madera debiera madurar, por lo menos, durante 50 años. Opinión que comparten agrónomos expertos en maderas; en efecto, a medida que madura la madera aumenta, al parecer, la proporción de zonas cristalinas con respecto a las zonas amorfas en su estructura celular. Lo que encaja perfectamente en la tradición de este arte, pues el material amorfo absorbe y pierde agua con facilidad, cosa que no ocurre con material cristalino. Quizás esa propiedad explique la razón de que muchos instrumentos antiguos sean menos susceptibles a las variaciones de humedad que los modernos.

¿Qué propiedades de la madera de la tapa y el fondo, tan esmeradamente seleccionados por el maestro artesano, son las más importantes para la sonoridad de un buen instrumento? Los técnicos en la materia suelen mostrar acuerdo en cinco puntos básicos: elasticidad en sentido longitudinal y

transversal de las vetas, cizallamiento, rozamiento interno (amortiguación) que se refleja en la disipación de energía, densidad y velocidad del sonido en la madera.

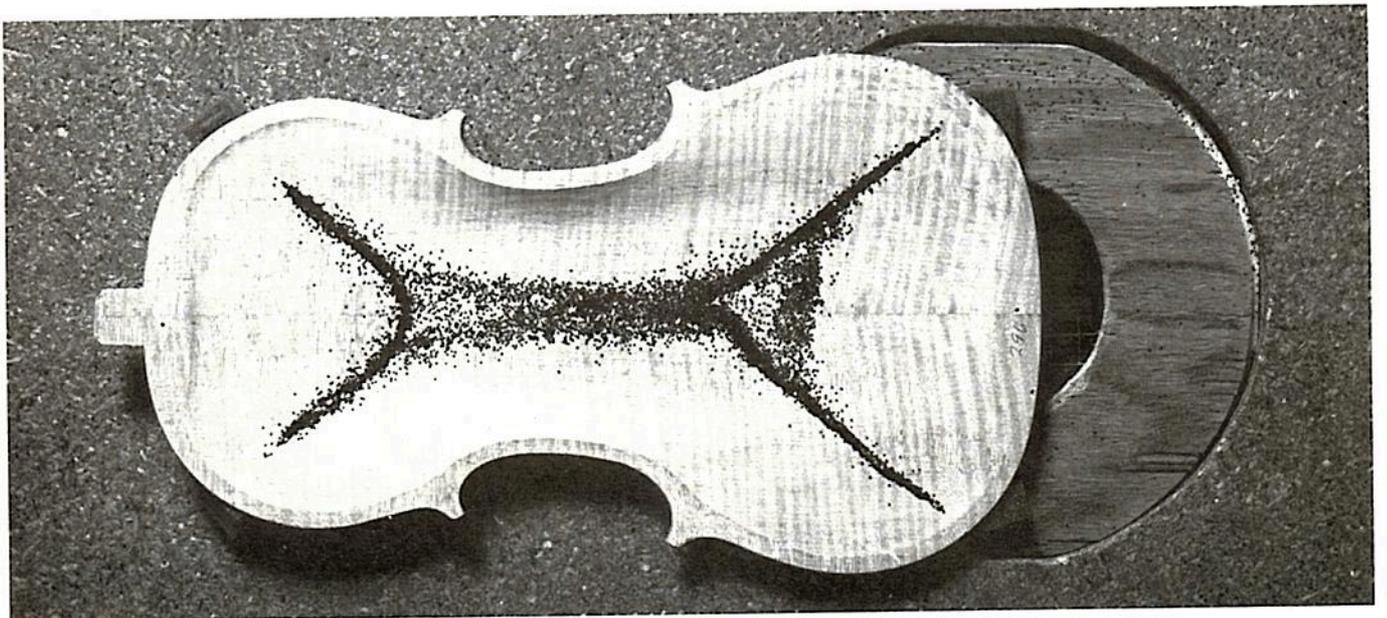
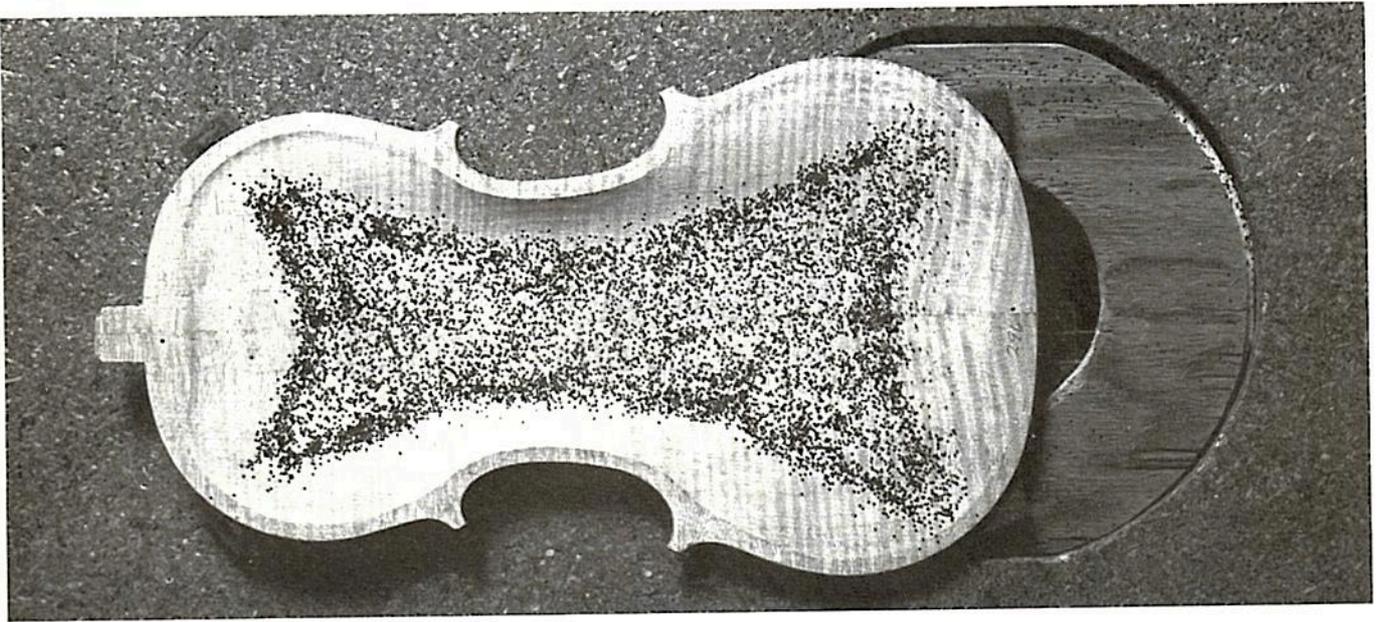
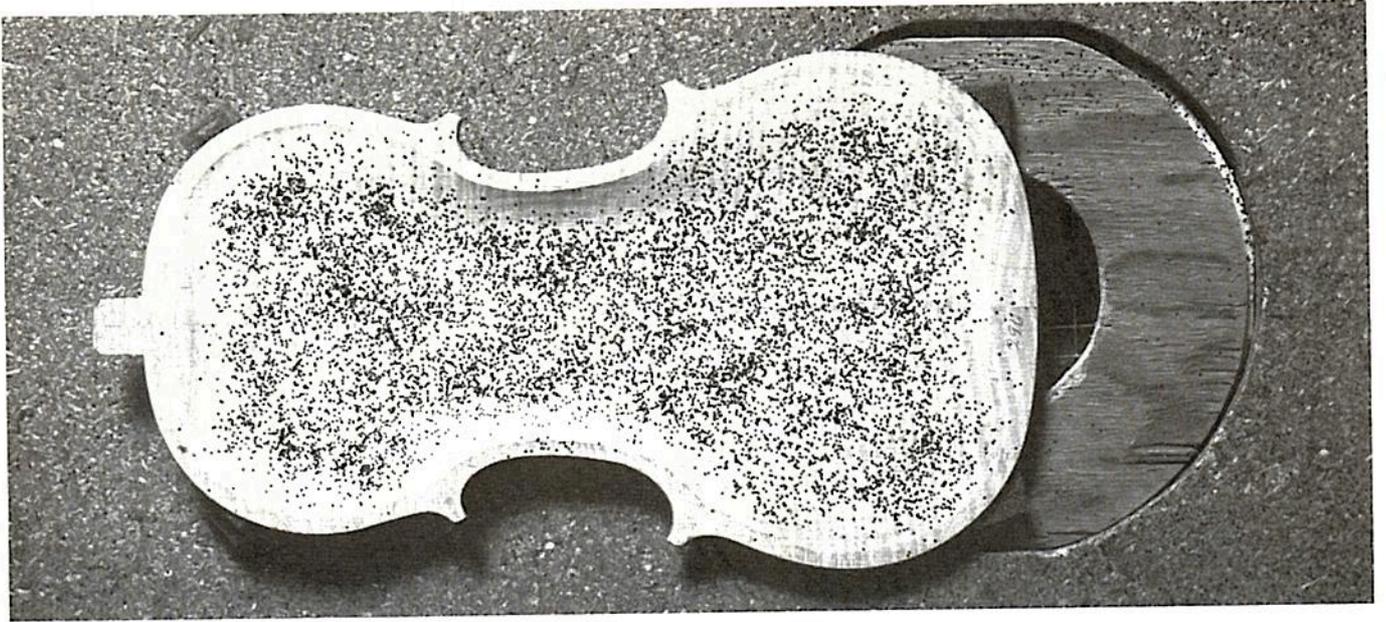
Los aspectos más importantes de la elasticidad hallan su expresión en los valores del módulo de Young en sentido longitudinal y transversal a las vetas. El módulo de Young mide la resistencia a la flexión y a la tracción local del material. Es el cociente entre la fuerza local aplicada por unidad de superficie y la correspondiente variación resultante en longitud. El cizallamiento, por su parte, es una medida de la resistencia a la torsión. (Lo que se observa cuando empujamos lateralmente la parte alta de un libro macizo que descansa horizontalmente sobre una superficie plana: se desplaza la tapa superior con respecto a la que roza la superficie.)

El rozamiento interno o amortiguación mide la cantidad de energía disipada con respecto a la energía almacenada elásticamente. Esa razón puede expresarse de múltiples formas. Así, mediante el tiempo de amortiguación: a lo largo del cual subsiste la vibración tras suspender la excitación. El buen luthier busca un tiempo de amortiguación lar-

go, cuando afina una tabla de violín. Otra manera de expresar el rozamiento interno es a través de la amplitud del intervalo de frecuencias: gama en cuyo ámbito hay respuesta a la excitación continua a medida que la frecuencia varía en torno a una resonancia. La amortiguación recibe generalmente el nombre de "factor de calidad", simbolizado por  $Q$ . Cuanto mayor sea el valor de  $Q$ , tanto menor será la amortiguación.

La densidad representa la masa de un cuerpo por unidad de volumen. Se obtiene dividiendo la masa de una pieza paralelepíptica de madera por el producto de su longitud, su anchura y su altura. Para hallar la velocidad se divide el módulo de Young por la densidad y se extrae luego la raíz cuadrada del resultado. A este respecto, una de las características buscadas en el abeto del que se tallará la tapa armónica de un instrumento musical es un alto cociente entre rigidez y densidad, índice de una rauda velocidad del sonido.

En la investigación científica de las tablas del violín surgen dos problemas fundamentales. Primero, ¿qué mecanismos físicos intervienen en la tapa y el fondo, sueltos, cuando se someten a flexión, se sujetan y se percuten ligera-



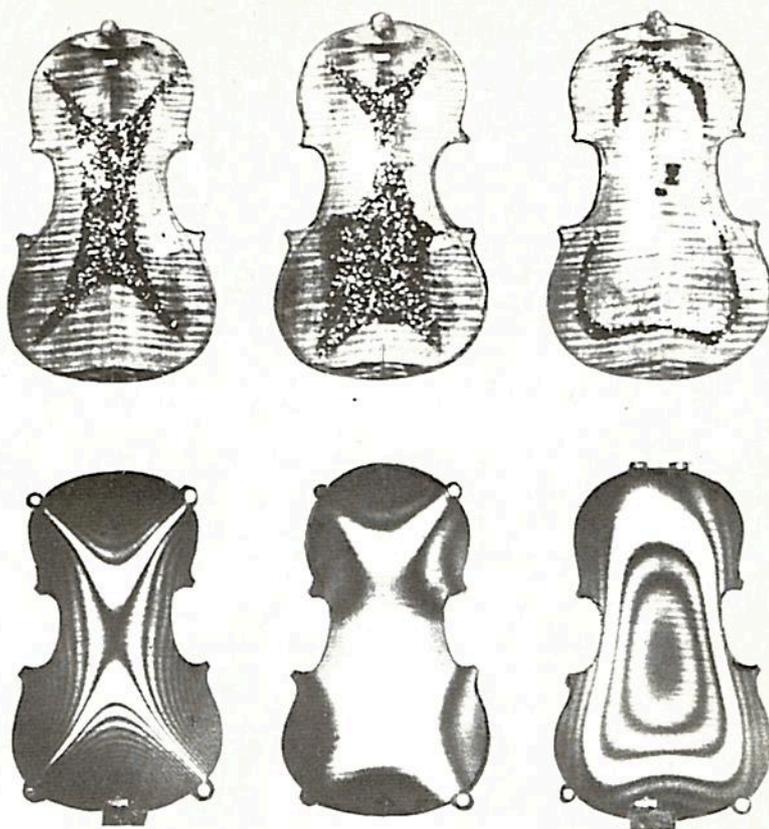
mente? Y segundo, ¿puede la medición de estos mecanismos y sus componentes dar una información práctica sobre el sonido y las propiedades de ejecución que tendrán las tablas, una vez ensambladas en el instrumento acabado?

Para abordar esas cuestiones examinamos cuantos mecanismos se daban cita en la tabla y realizamos miles de comparaciones entre los modos propios de tablas sueltas y el sonido y la calidad de ejecución de esas mismas tablas una vez montadas. Las principales características de los modos propios se aprecian fácilmente gracias a la modificación de la técnica de Chladni que utilizamos. Se coloca una tabla libre, en posición horizontal, sobre un altavoz, con el interior mirando hacia arriba, como si fuera un plato. Al emitir el altavoz una señal sinusoidal (una señal con una frecuencia única), barriendo a lo largo del campo de frecuencias que interese, las limaduras espolvoreadas sobre la tabla formarán configuraciones características a determinadas frecuencias, específicas de cada tabla.

Se consiguió una observación más nítida de las configuraciones de los modos con el láser; esa nueva técnica permitió aplicar la interferometría holográfica al caso de las tablas del violín. Pionero en ese tipo de análisis fue, por los años 60, Karl A. Stetson, quien obtuvo interferogramas que reflejaban los modos de flexión (algunos con amplitudes de tan sólo unos pocos micrometros) cuando las tablas vibraban a sus frecuencias de resonancia.

En ambos métodos se observa que las configuraciones de los modos de los instrumentos de la familia del violín siguen una secuencia similar en todos los tamaños de tablas sueltas. De ahí que se les haya denominado modo 1, modo 2, etcétera, empezando con el de menor frecuencia. Si bien las configuraciones de los modos son similares para todos los miembros de la familia del violín, las frecuencias en las que se producen son propias de cada tabla. Por lo general, cuanto mayor es la tabla, menor es la frecuencia del modo; pero incluso entre piezas del mismo tamaño

**METODO CHLADNI** para observar los modos propios de una tabla libre de un violín, aplicado en el taller de la autora. En las fotografías de la página contigua, la tabla, un fondo de violín, está montada sobre un altavoz, mirando hacia arriba y apoyada sobre cuatro elementos de goma espuma. Cada apoyo está situado de tal forma que sostiene la tabla en un punto nodal (no vibrante) y el altavoz está centrado con el antinodo del modo que se ensaya. Se espolvorean partículas finas de aluminio u otro tipo de polvo sobre la tabla (*arriba*). Cuando el modo de la tabla entra en resonancia en respuesta a un determinado sonido con una única frecuencia, emitido por el altavoz, las partículas empiezan a brincar (*centro*). El vigoroso movimiento de flexión de las regiones antinodales desplaza a las partículas hacia las zonas nodales de la tabla, que no vibran, formándose así las configuraciones nodales y antinodales típicas del correspondiente modo. En estas fotografías se observa la aparición de una configuración del modo 2 (*abajo*). La técnica, una versión modificada del método de ensayo inventado en el siglo XVIII por Ernst F. F. Chladni, se utilizó también para obtener las configuraciones de los modos 1, 2 y 5 representados en la cubierta.



**DOS TECNICAS** seguidas en la presentación de los modos propios de una tabla libre de violín. En las fotografías de la parte superior se recogen las configuraciones Chladni del fondo a frecuencias de 165, 225 y 357 hertz. Los interferogramas por láser de la misma tabla a una humedad relativa diferente se muestran en las fotografías de la parte inferior. Corresponden a 165, 222 y 348 hertz. Las configuraciones nodales que se presentan en los interferogramas como amplias zonas blancas, aparecen en las configuraciones de Chladni como formas oscuras. La técnica láser no sólo es más sensible que el método Chladni a las pequeñas vibraciones de una tapa o un fondo sueltos, sino que también revela, mediante las líneas estrechas y oscuras características de las interferencias, el movimiento de los antinodos de una tabla.

hay considerables variaciones en las frecuencias de los modos.

Los modos más importantes en la afinación del violín parecen ser el 1, el 2 y el 5. El 1 supone una torsión de la tabla; se dobla una esquina de un extremo hacia arriba y la esquina contraria del otro extremo hacia abajo. Cuando un luthier sujeta una tabla con una mano en cada extremo y la retuerce para valorar al tacto su "resistencia", está, de hecho, estableciendo las principales características de rigidez del modo 1.

Si sostiene un extremo de la tabla con ambas manos, con los pulgares en la parte superior y los dedos extendidos en la parte inferior de la madera, apretándola y doblándola ligeramente para estimar su rigidez transversal a la veta, primero en un extremo y después en el otro, compara la rigidez relativa del modo 2 en los dos extremos. Algunos luthiers obtienen prácticamente el mismo resultado apoyando, sobre una superficie plana, una tabla con su parte curvada hacia arriba (las tablas están curvadas hacia el exterior en el instrumento terminado) y colocando un plato llano con agua, primero sobre la región superior de la tabla y, después, sobre la región inferior; aprietan luego suavemente sobre la tabla para comparar cómo se mueve el agua en cada caso.

Si el luthier sostiene una tabla por sus dos extremos con las yemas de los dedos y aprieta hacia abajo, en el centro, con sus pulgares, lo que está ha-

ciendo es comprobar la rigidez del modo 5. Prueba que puede repetirse también sosteniendo la tabla por su canto y apretando ligeramente el punto de la curvatura contra una superficie plana para sentir la flexión.

¿Cómo activar la frecuencia del modo 1? Si se sujeta la tabla por el punto medio de uno de sus extremos y se la percute con suavidad con la yema de un dedo por los bordes superior e inferior, se activará apreciablemente la frecuencia del modo 1: el punto de apoyo es un nodo y las curvas del borde superior e inferior constituyen los antinodos de ese primer modo. ¿Y la frecuencia del modo 2? Sujétese la tabla por uno de los cuatro puntos donde las líneas nodales del modo 2 intersecan los bordes y percútase la zona antinodal, junto a la línea central de cualquiera de los dos extremos de la tabla; habremos activado así el segundo de los modos. Vayamos con el quinto. Sujeta-remos la tabla por un punto de una línea nodal, casi oval, propia de este mo-

do, y golpearemos en el centro de la tabla; será de esa manera como percibiremos predominantemente el tono del modo 5.

Todos los modos, sin embargo, contribuyen en mayor o menor grado al sonido que nos llega de la percusión de la tabla, proporción que tiene que ver con el lugar de excitación y la forma de sujetar la tabla. Cuando un maestro sostiene la tabla entre pulgar e índice, aferrados cerca de uno de los extremos, al lado de la línea central, y percute en el centro, al objeto de distinguir un sonido claro y rotundo, moverá un tanto su punto de apoyo para percibir con mayor nitidez el son. ¿Dónde se halla el punto de apoyo ideal? En el curso de las líneas nodales de los modos 2 y 5. Al golpear en el centro se activa, sobre todo, el modo 5 y percutiendo en el extremo superior o inferior de la tabla, el 2. Sabremos qué tabla está bien afinada cuando se perciban las aportaciones de uno y otro modo en cada punto de percusión, obteniéndose un sonido muy nítido si los modos 2 y 5 forman un inter-

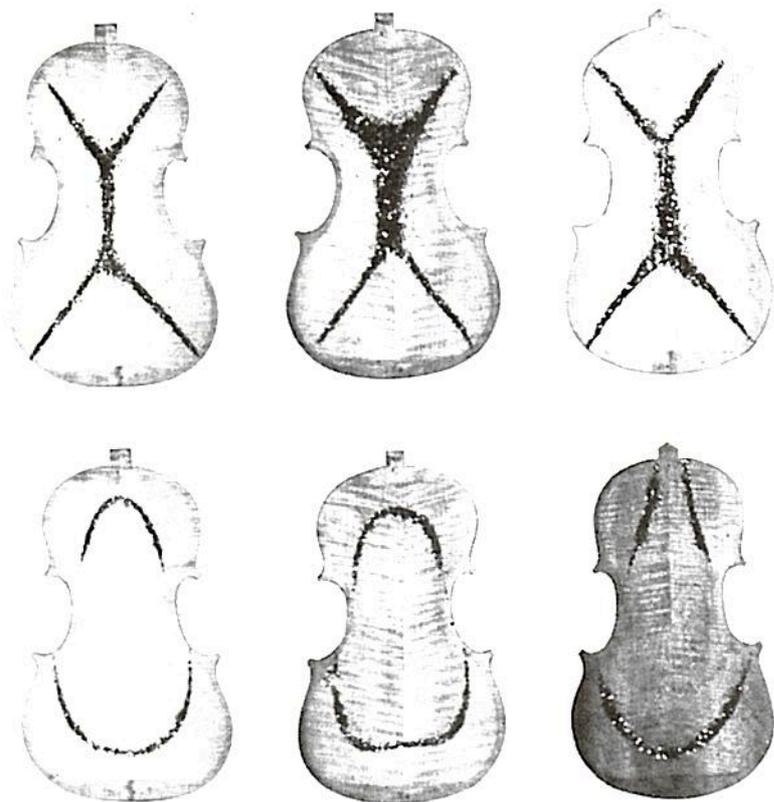
valo de octava. Pero si la tabla no está bien afinada, será difícil identificar, de oído, la frecuencia del sonido dominante. Esas oscilaciones pueden servirnos para explicar la diversidad de interpretaciones que dan los artesanos a los sonidos de una tabla y sus discrepantes puntos de vista sobre qué hacer con ellos.

La evolución que siguen las características de los modos propios de un par de tablas sueltas hasta que componen el violín acabado, listo para tocar, es muy complicada y no se conoce en todos sus pormenores. El análisis teórico de una sola tabla deberá tomar en consideración nueve parámetros como mínimo, cuyo cálculo requiere una gran habilidad técnica, amén de un tiempo y dinero que no están al alcance de cualquiera.

En el violín terminado, se hallan las tablas encoladas a las nervaduras o aros laterales del instrumento. Las ligaduras de los bordes resultantes inciden, de múltiples formas, en los modos de las tablas. Se crea, además, un nuevo juego de resonancia de acoplamiento en virtud de la interacción de las dos tablas a través de los aros y el alma (varilla de abeto del tamaño de un lápiz, sujeto por rozamiento entre la capa armónica y el fondo, y situada casi bajo el pie de la parte aguda del puente). Aparecen asimismo resonancias adicionales por mor del acoplamiento entre la madera de la caja y los modos de vibración de la masa de aire encerrada en su interior.

Había que acotar la incidencia de las distintas características de los modos de las tablas sueltas en esas exigencias y acoplamientos tan complejos. Para ello recurrimos al método, largo y laborioso, de construir instrumentos de la familia del violín, de todos los tamaños. Se seleccionaba con sumo cuidado la madera. Se tallaban las tablas. Se afinaban los modos propios. Montábamos el instrumento. Se sometía a prueba. Más de una vez tuvimos que desmontarlo, volver a afinar las tablas y ensamblarlas, repitiendo los análisis técnicos y musicales.

La posibilidad de estudiar las tablas sueltas de un buen ejemplar de concierto parece, siempre, un método ideal para recabar información relativa a los modos propios de las tablas que lo componen. Importa sobremanera examinar la tapa armónica y el fondo al mismo tiempo, debido a las variaciones que sufre la madera con los cambios de temperatura y humedad relativa, aun-



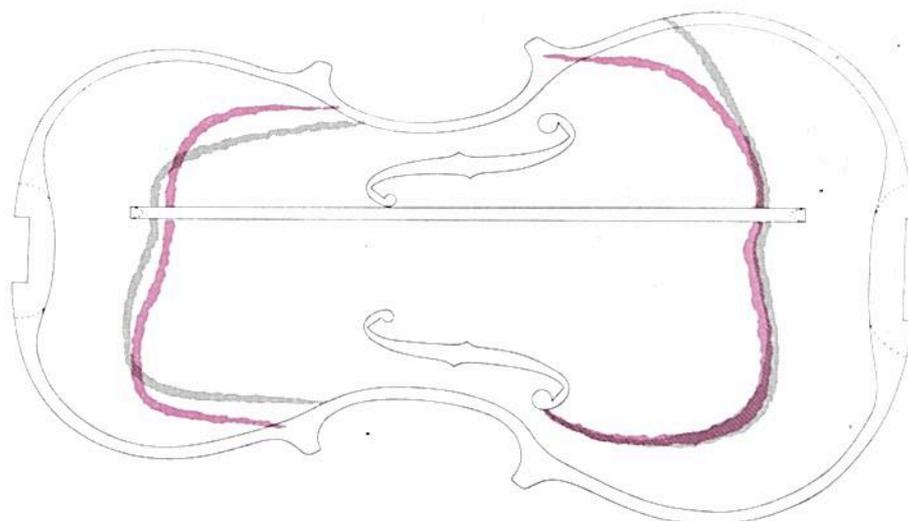
PARA SABER SI UNA TABLA ESTA O NO BIEN AFINADA se recurre al método de Chladni. Cada par de fotografías, arriba y abajo, representa los modos 2 y 5, respectivamente, de un fondo de violín. En la tabla izquierda, los modos están bien afinados. En la central, las zonas nodales del modo 2 son demasiado anchas en la parte superior, lo que indica que la parte superior de la tabla ofrece una excesiva rigidez. En la tabla derecha las zonas nodales del modo 5 se alargan hacia el borde superior, en vez de cerrarse y formar un arco. Esto sucede cuando la tabla es demasiado gruesa entre las ces y el borde superior.

que conseguir una tapa armónica y un fondo cabales de un buen violín sea sueño poco menos que imposible. Ni siquiera para una reparación a conciencia, el maestro luthier desmonta las dos tablas a la vez, a no ser que el instrumento se halle en un estado deplorable.

La gentileza de dos artesanos nos ha permitido comprobar los pares de tablas de dos ejemplares de concierto: un Stradivarius de 1713 y un Guarnerius del Gesù de 1737. Con ellos hemos realizado ensayos comparativos una vez ensamblados de nuevo. Aunque sacamos un sustancioso partido de su estudio, las reparaciones a que se les hubo de someter fueron muy importantes y resultó imposible hacerse una idea exacta de su condición original. Si a ello sumamos los cambios que han sufrido los violines construidos con anterioridad a 1800, a fin de ampliar su potencia sonora (mástil más largo, mayor ángulo de diapasón, puente más alto y una barra armónica más pesada por ende, lo que obligaba a raspar el interior de la tapa armónica), difícilmente podrá conjeturarse qué pretendieron sus primeros constructores.

A lo largo de nuestro trabajo investigador hemos examinado muchos y buenos ejemplares a punto para ser tocados, modernos y antiguos. El interés y la cooperación de sus propietarios facilitaron nuestra tarea. Sin vana modestia puedo ufanarme de haber adquirido así una experiencia basada en más de 800 ensayos sobre todo tipo de instrumentos de la familia del violín, con una gran variedad en sus cualidades musicales. Desde la curva de respuesta de un famoso violín Guarnerius del Gesù, construido en 1731, hasta la de un violín de construcción reciente basado en un modelo Stradivarius; uno y otro presentan características muy parecidas. Las curvas reflejan una reducción de la amplitud de las resonancias en la región de 1,5 kilohertz y un incremento en la región comprendida entre los 2 y los 3 kilohertz. Esta característica ha sido considerada por Meinel y otros típica de la curva de respuesta de los violines musicalmente más apreciados.

Nuestro proceso de afinación de tablas libres se inicia con un par, tapa armónica y fondo, casi terminado, de algún instrumento de la familia del violín. Se pulen y tallan las curvas externas hasta que alcanzan su forma final. Se recortan los oídos en forma de *f* de la tapa armónica y se coloca la barra armónica (pero no se le da forma), se encolan los filetes (las tres tiras de madera blanca y negra que se insertan alrede-



**EFECTO DEL BARNIZ** sobre la superficie exterior de una tapa libre de una viola. Queda patente al observar la variación de la configuración Chladni del modo 5 en su superficie interior. Las líneas grises muestran las configuración del modo 5 en la tabla afinada antes de su montaje, cuando ya se ha aplicado a la superficie exterior el tapaporos y dos capas de barniz. Las líneas de color muestran la configuración en la tabla libre, una vez terminada la viola (con un total de siete capas de barniz de aceite) y habiendo tocado con ella dos años. Barniz y tapaporos ayudan a proteger la madera y a atemperar los efectos de la variación de humedad, pero también alteran las características sonoras del instrumento. Estas características siguen variando durante un período aproximado de dos años, hasta que se endurece el barniz.

dor de los bordes de las dos tablas) y se terminan los bordes. Se ha observado también que antes, con varios meses de antelación, conviene aplicar al exterior de las tablas el tapaporos, o material de relleno, y, por lo menos, dos capas de barniz.

A medida que el artesano alisa y raspa la madera del interior del par de tablas del violín, de forma que la tapa quede con un grueso de entre tres y cuatro milímetros, y el fondo de entre tres y seis milímetros, flexiona las tablas con los dedos, sosteniéndolas y percutiéndolas de muchas maneras. Toma nota de la rigidez de la madera y busca ciertos sonidos a medida que va limando la madera, por distintos puntos y unas décimas de milímetro por vez. Aprender a palpar la madera y reconocer los sonidos adecuados de las dos tablas libres son habilidades fundamentales para la buena labor del maestro. Ello lleva años de trabajo y experiencia.

**P**ara descubrir qué siente y percibe el luthier en sus tablas, hermosamente talladas, nos valimos en nuestros ensayos de la exploración atenta de los modos 1, 2 y 5, a través sobre todo del método de las configuraciones de Chladni. Sea un par de tablas, tapa y fondo: se comprueba cada modo registrando su frecuencia, amplitud, *Q* y configuración nodal; se realizan ajustes de las frecuencias de los tres modos

hasta obtener ciertas relaciones, en la medida de los posibles, en cada tabla y entre una y otra. Evaluábamos el instrumento, ya acabado, por su curva de respuesta, curva de intensidad y comentarios de los intérpretes.

De nuestro trabajo resaltaría cinco puntos como hallazgos a destacar. En primer lugar, podremos asegurar que el instrumento es de buena calidad cuando el modo 5 tiene una amplitud relativamente grande y la frecuencia de la tapa forma un intervalo de un tono con la frecuencia correspondiente al fondo. En el caso de que la frecuencia del quinto modo de la tapa sea superior a la del fondo, la calidad sonora suele ser más "brillante". Y más "obscura" en el planteamiento contrario.

En segundo lugar, hablaremos de una ejecución suave y fácil cuando la frecuencia del modo 2 de la tabla se encuentra dentro de un margen del 1,4 por ciento (unos 5 hertz en las tablas del violín y la viola) de la frecuencia del modo 2 del fondo. En tercer lugar, si el modo 5 muestra la misma frecuencia en ambas tablas, tapa y fondo, la frecuencia del segundo modo de la tapa debería inscribirse en el margen del 1,4 por ciento de la frecuencia correspondiente al fondo; de otra suerte, nos hallaríamos ante un instrumento de difícil dominio, que emitiría una sonoridad áspera y cascada. En cuarto lugar, se obtienen violines de calidad excepcional cuando los modos 2 y 5 forman un in-

tervalo de aproximadamente una octava en cada tabla, y a frecuencias iguales corresponden amplitudes elevadas en una y otra tabla. Por último, una pos-  
ter señal de destreza es la de situar la frecuencia del primer modo de la tapa a un intervalo de octava por debajo de la

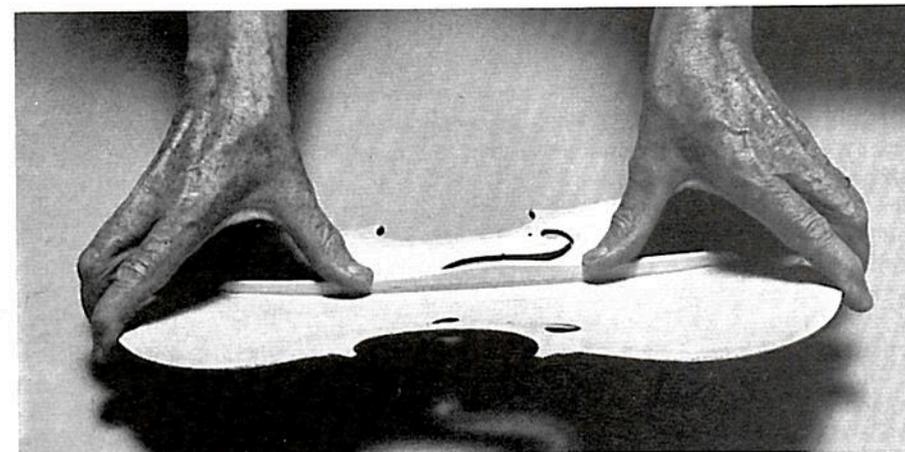
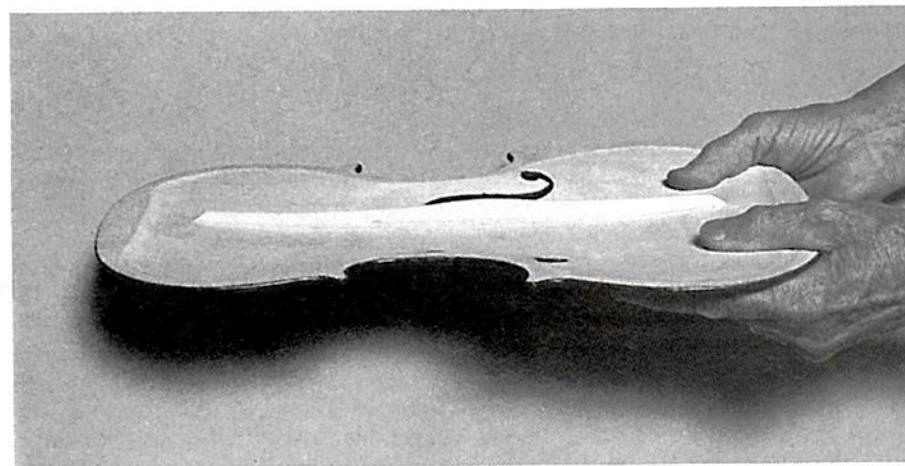
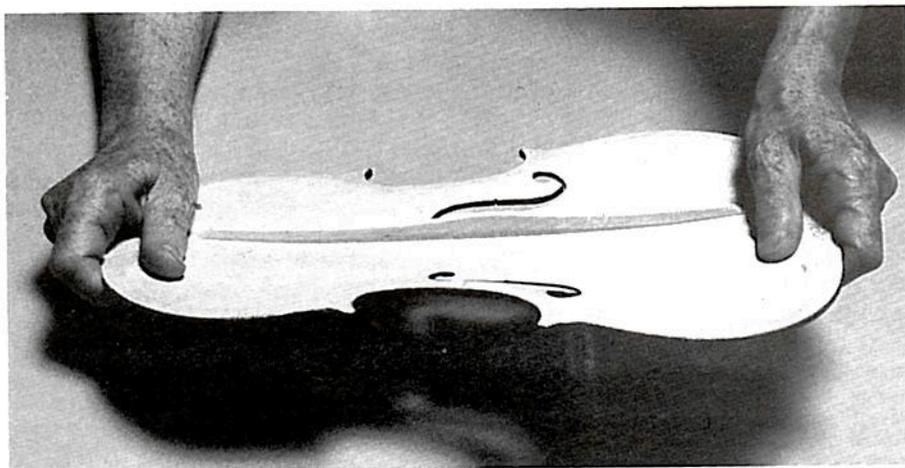
del modo 2, de suerte que los modos 1, 2 y 5 formen una serie armónica. No es tarea fácil, aunque sí posible, ajustar la frecuencia del modo 1 de la tapa a esa relación, ajuste que no cabe en el fondo debido a la diferencia estructural que media entre ambas tablas.

Cuesta muchísimo menos establecer estas conclusiones que llevarlas a la práctica real. Surgen un sinfín de problemas a la hora de concretar las relaciones óptimas de los modos y frecuencias propias. Dificultades que tienen que ver, fundamentalmente, con los cuatro factores siguientes: adelgazamiento selectivo de la tabla para ajustarla a las características deseadas del modo, efectos de los recubrimientos (tapaporos y barniz), variaciones en la humedad relativa y temperatura ambiente y ciertas propiedades físicas peculiares de la madera seleccionada para la tapa y el fondo.

El raspado de la superficie de la tabla de madera rebaja, evidentemente, el grosor y la rigidez, al tiempo que modifica su capacidad para absorber energía. Así pues, la frecuencia y la forma de un modo pueden ajustarse selectivamente sólo hasta cierto punto limando la tabla unas décimas de milímetro cada vez en la parte interior de la curvatura, cuando se halla a un milímetro aproximado de su grosor final. La regla general afirma que, si se quita madera de una región con una curvatura muy pronunciada de un modo particular, la tendencia será a reducir su frecuencia; y que si se elimina de una zona de escasa curvatura, aumentará la frecuencia. ¿En qué se funda esa norma? Al limar la madera de una zona de curvatura cerrada se rebaja más la rigidez que la masa propiamente dicha, y, por consiguiente, disminuye la frecuencia. Y al hacer lo mismo en una zona de escasa curvatura se reduce la masa más que la rigidez, razón por la cual aumenta la frecuencia.

Las zonas de flexión (que lo son de fuerte curvatura de movimiento) de una tabla de violín se registran en los interferogramas, donde se indentifican en virtud de la variación de la distancia entre las rayas. El proceso recuerda la lectura de un mapa topográfico, donde la pendiente de una colina se refleja en las curvas de nivel: se acercan a medida que aumenta la pendiente. Una pendiente constante se representa por líneas que guardan la misma distancia. En los interferogramas, las líneas situadas a la misma distancia señalan traslación o movimiento sin curvatura pronunciada, como los terminales de un columpio que suben y bajan sin flexión.

Por consiguiente, raspando cada vez unas décimas de milímetro de madera de una zona en forma de luna creciente, en torno a los dos extremos de la tabla y a partir de la cara interior de cada esquina, disminuirá la frecuencia del modo 5 menos que la del modo 2.



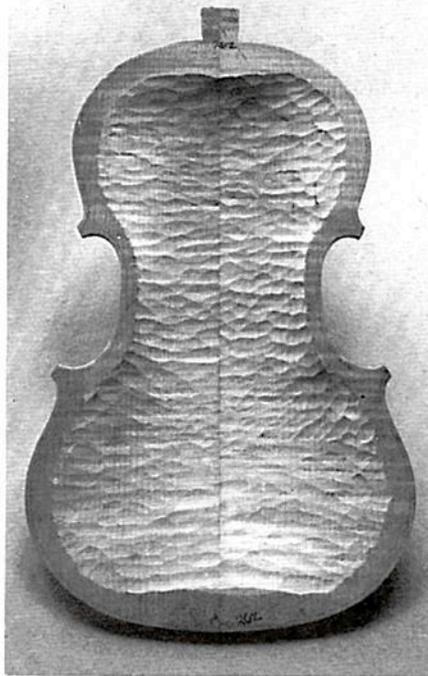
ENSAYO MANUAL para observar las propiedades de la madera, que genera los modos 1, 2 y 5, los más importantes en la afinación. El luthier lo realiza flexionando la tabla de diferentes maneras. Cuando el artesano sostiene la tabla por los dos extremos y torsiona una esquina hacia arriba y la otra hacia abajo, varias veces (*arriba*), prueba la rigidez que define el modo 1. Cuando sostiene un extremo de la tabla con ambas manos, con los pulgares encima y los dedos extendidos debajo (*centro*), apretando y doblando la madera ligeramente, primero en un extremo y después en el otro, comprueba y compara algunas de las características de rigidez correspondientes al modo 2, en la zona superior e inferior. Cuando sostiene la tabla con las yemas de los dedos y aprieta hacia abajo en el centro con sus pulgares (*abajo*) comprueba algunas de las características de flexión del modo 5. Las manos de la fotografía son las de la autora.

Pero si limamos el centro de la tabla, esto es, allí donde la amplitud del modo 5 es alta, se tenderá a elevar ligeramente la frecuencia del modo en cuestión. Por otro lado, si eliminamos masa en la región central de las zonas superior e inferior de una tabla, ocurrirá que la frecuencia del modo 2 tenderá a bajar, por la sencilla razón de que nos hallamos en las zonas habituales de flexión del segundo modo. Puesto que la rigidez real de un modo cualquiera no coincide necesariamente en todas las tablas, importa determinarla por los métodos que usa el buen luthier para sentir las zonas de flexión y por la observación de las características de las configuraciones nodales.

El tapaporos y el barniz influyen también en la afinación de la tabla: añaden masa, imprimen rigidez a las fibras superficiales de la madera e incrementan la amortiguación. Cuanto menor es el módulo de Young de la madera sin tratar, tanto más aumenta la rigidez y la amortiguación con la adición de los revestimientos. Efectos que no se dejan sentir por igual en el abeto que en el arce; la adición de tapaporos y barniz tiende a desafinar los modos de la tapa mucho más que los del fondo. Según Daniel W. Haines, el tapaporos y el barniz aumentan el módulo de Young y la amortiguación en el abeto de vetas transversales bastante más que lo hacen en el arce de vetas transversales, lo que comporta un aumento en las frecuencias. La rigidez de las vetas transversales del arce multiplica, por dos veces y media, la del abeto.

A través de nuestra propia labor hemos llegado a la conclusión de que el tapaporos y el barniz actúan realmente de forma negativa sobre el sonido de un instrumento. Cabe, no obstante, tomar medidas precautorias a la hora de afinar las tablas sueltas. Imaginemos que vamos a emparejar la frecuencia del modo 2 de la tapa y el fondo de un violín o una viola; en ese caso, antes de barnizar habrá que dejar el modo 2 de la tapa y el fondo a una frecuencia de 5 o 10 hertz menor que la del fondo. De esa forma, el barniz actuará en pro del sonido del instrumento. Pero si la frecuencia del modo 2 de la tapa coincide con, o es superior que, la del fondo cuando las tablas se hallan todavía sin barnizar, la discrepancia se abrirá más todavía después de aplicar los revestimientos; probablemente, se seguirá además que la emisión sonora del instrumento sea áspera y cascada.

Es opinión compartida por muchos luthiers que el violín suena mejor al na-



TALLA DEL INTERIOR DE UNA TABLA, una vez que se ha dado forma a las curvaturas exteriores. Así es como el maestro obtiene las características acústicas deseadas. A la izquierda se muestra un fondo de violín cuando empieza a tallarse; a la derecha aparece otra tabla, casi terminada. Las marcas se hacen con cepillos dentados. Ahora la placa está lista para un raspado final y el ensayo acústico por el método de Chladni. En una tapa de violín, el espesor varía entre 2 y 3,5 mm, y, el del fondo, entre 2 y 6 mm.

tural que una vez barnizado. Muchos dominan el arte de compensar ese efecto. Luis Condax, que durante años experimentó con tapaporos y barnices, llegó a afirmar que, cuando limpiaba el barniz de un violín que tenía un sonido "áspero, cascado y duro", el instrumento "revivía". Por su parte, John C. Schelleng demostró que las propiedades acústicas de los recubrimientos preparados con barnices continuaban cambiando a lo largo de un período superior a los dos años, lo que sin duda constituye una de las razones de que un violín recién barnizado necesite años para adquirir sus cualidades sonoras definitivas.

Desde tiempo inmemorial los maestros artesanos se han visto acosados por las quejas de los intérpretes cuyos instrumentos chirrían y no responden en los veranos cálidos y húmedos y por aquellos otros que se lamentan del sonido áspero y cascado en sus hogares donde reina un ambiente seco, atemperado por la calefacción, en el invierno de las regiones templadas. Ciertos ajustes en el puente y en el alma pueden mitigar esos problemas. Pero el instrumento sonará siempre mejor bajo las condiciones de temperatura y humedad relativa a las que se construyó.

La madera es un material higroscópico, que absorbe agua y la pierde con

facilidad en respuesta a las condiciones del medio ambiente. Las capas de tapaporos y barniz de las superficies exteriores del violín pueden contribuir a retrasar el proceso; que sepamos, no obstante, no existe ningún tratamiento satisfactorio de las superficies interiores sin barnizar que no sea en detrimento de la calidad sonora del instrumento.

Experimentos realizados recientemente por Robert E. Fryxell indican que la madera de diferentes edades (tanto en tablas de violín barnizadas como sin barnizar) absorbe humedad con bastante lentitud durante un período de varios meses, pero la pierde en pocas horas, siendo el arce ligeramente más absorbente que el abeto. También observó que las tablas recubiertas con tapaporos y barniz eran apreciablemente más estables que las conservadas al natural. Rex P. Thompson, en Australia, ha observado que las frecuencias del modo 5, en un par de tablas barnizadas (durante dos años) y afinadas, variaba hasta 18 hertz para el fondo y 23 hertz para la tapa, cuando la humedad relativa oscilaba entre el 15 y el 79 por ciento. A humedad relativa constante, la diferencia no excedió los 5 hertz. También observó que a una humedad relativa constante del 50 por ciento las variaciones de frecuencia era sólo del orden del 1 por ciento a temperaturas com-

prendidas entre los 15 y los 25 grados Celsius. Concluye que, para lograr una afinación precisa de una tabla, debe controlarse tanto la temperatura como la humedad, o la humedad debe ser del 50 por ciento si no se controla la temperatura.

Nuestro estudio ha incluido trabajos efectuados con muchos tipos de madera y muchos tamaños de tablas. Hemos observado que un abeto cuidadosamente seleccionado, tanto de especies europeas como americanas, puede utilizarse con éxito para la construcción de tapas armónicas. Sin embargo, importa que la rigidez de la veta transversal sea suficientemente elevada para mantener el intervalo de una octava entre los modos 2 y 5. Diversas especies de arce americano se han afinado bien por el método de Chladni para construir tablas de fondo para instrumentos, con un excelente sonido y calidad de

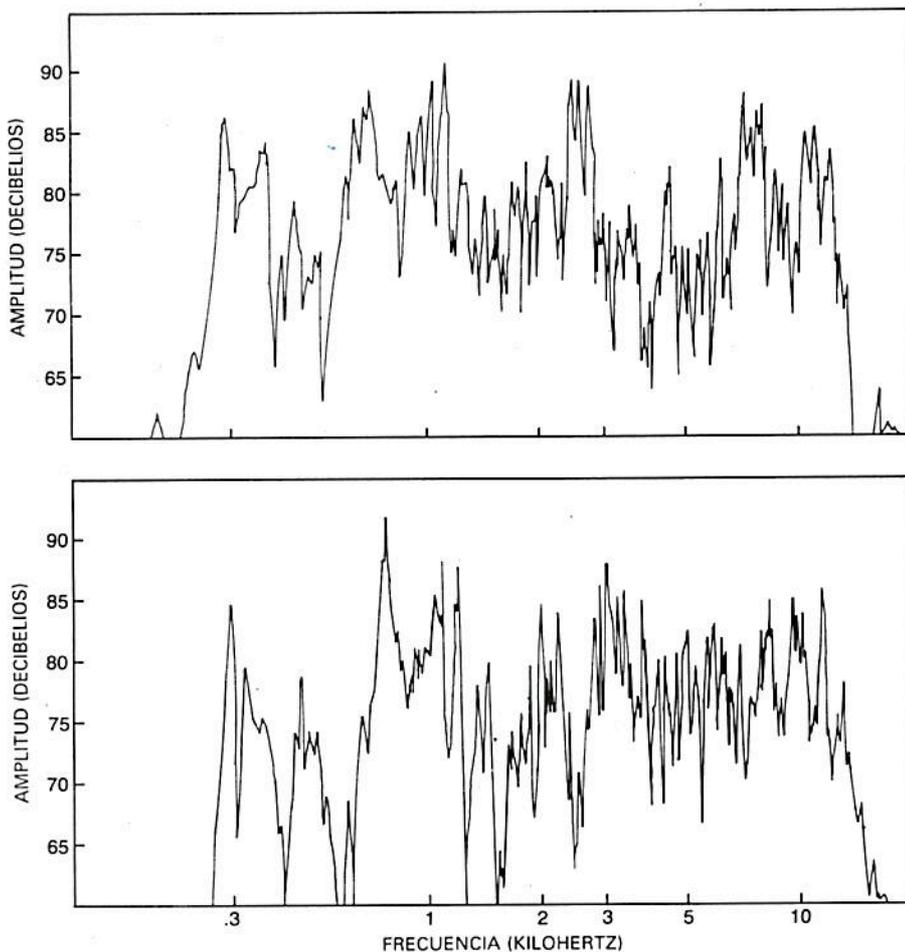
ejecución. Otras especies con características muy similares a las del arce (peral, manzano, cerezo, sicómoro y teca) pueden prestar su concurso para la construcción de fondos de violín y viola; las calidades sonoras resultantes difieren ligeramente de un instrumento a otro, ya que dependen en buena parte de las características de alta frecuencia de la madera.

Si atendemos al alud de conocimientos que nuestro grupo y otros han ido desvelando en torno a las múltiples variables involucradas en la construcción de un buen violín de concierto, valoraremos mejor la destreza y habilidad de los antiguos maestros, capaces de modelar unos perfectos ejemplares, cuya complejidad y belleza de líneas corrían parejas con su óptima sonoridad. Lo hasta aquí descrito nos indica que es muy deseable (aunque a veces bastante difícil) lograr que los modos 1, 2 y 5 de las tablas sueltas de una tapa terminada

de violín formen una serie armónica, poseyendo el quinto modo una gran amplitud y una frecuencia próxima a los 370 hertz y siendo las frecuencias de los modos 2 y 5 iguales a las del fondo. La forma, los contornos curvos y la distribución del grosor de la tapa y el fondo constituyen los principales factores, que deben conjugarse para conseguir esas relaciones. Las características físicas de la madera deben hallarse, además, dentro de un margen muy estrecho de variables; regla que vige también para el rango, estricto, de tolerancias de otros muchos elementos. Ateniéndonos a esas conclusiones, y aplicando el método de Chladni a la determinación de las relaciones entre los modos propios y las frecuencias asimismo propias de cada par de tablas, podríamos construir violines y demás miembros de su familia instrumental con buena sonoridad y calidad de ejecución.

Pero el panorama cambia cuando se pasa de la situación de tablas sueltas, a las que hacíamos referencia en el punto anterior, al violín terminado, dotado de un sistema vibratorio de extrema complejidad. En un sentido analítico, sin embargo, los modos propios y las frecuencias propias de los constituyentes definen en toda su extensión esos elementos. Por tanto, hay que esperar la verosímil existencia de un nexo que relacione las características vibratorias conocidas de las tablas libres con las características vibratorias del instrumento acabado.

Las estructuras asimiladas a la del violín pueden considerarse constituidas por un conjunto de elementos que se definen por sus propiedades geométricas, rigidez, masa y disipación de energía. El montaje de esos distintos elementos para formar un instrumento crea un nuevo juego de propiedades exclusivas: modos propios y frecuencias propias del instrumento en cuestión, y cada modo portador de su correspondiente amortiguación. Aun cuando se trate de un proceso muy complejo, los modos propios de los componentes pueden considerarse elementos que, en última instancia, determinarán los modos propios del conjunto. Y ahí halla un nuevo reto la investigación: ¿Puede estudiarse, con los aparatos y métodos de medición y análisis de vibraciones, de qué manera influyen las características de las tablas sueltas en las vibraciones de la tapa y el fondo ensamblados y en la masa de aire encerrada en la caja del violín, cuando responden a las fuerzas generadas al aplicar el arco sobre la cuerda?



CURVAS DE RESPUESTA de un violín del famoso Guarnerius del Gesù, construido en 1731, y un violín construido por la autora en 1979. Las curvas reflejan el mismo procedimiento de ensayo: una onda sinusoidal de tensión constante aplicada al puente, recogiendo la respuesta del violín (colgado de gomas) con un micrófono situado a 35,5 centímetros de distancia, en una sala prácticamente sin reverberación. La curva superior corresponde al Guarnerius, la inferior al instrumento moderno que se ha construido siguiendo los principios de afinación de tablas descritos en este artículo. Obsérvese la disminución en amplitud de las resonancias en la región de 1,5 kilohertz y el notable incremento en amplitud entre los 2 y los 3 kilohertz. Esta característica, señalada ya por H. F. Meinel y otros investigadores, resulta típica de las respuestas de algunos de los violines musicalmente más codiciados. Ilustración de Alan D. Iselin.