



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Licenciatura en Ingeniería Física

Simulación de la movilidad en la tapa de un violín por el método de elemento finito utilizando ANSYS.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Física

Presenta:

**Carlos Andrés Salinas Soto**

Dirigido por:

**Dr. Adolfo Huet Soto**

SINODALES

Dr. Adolfo Huet Soto

Presidente

Dr. Jesús Alejandro Torres Torres

Secretario

Dr. Aldrin Melitón Cervantes Contreras

Sinodal

Dra. María Lucero Gómez Herrera

Vocal

ADOLFO HUET SOTO

Firma

Firma

Firma

Firma

Dr. Manuel Toledano Ayala  
Director de la facultad

Centro Universitario  
Querétaro, QRO  
México.  
junio 2019

*Dedicado especialmente a  
mi familia, por haberme apoyado siempre  
en mi loca idea de tratar de entender el universo*

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

---

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

# Agradecimientos

Quiero agradecer de manera formal a todos y cada uno de los sinodales por su tiempo, paciencia y ayuda en este proyecto de tesis. Agradezco a la Universidad Autónoma de Querétaro por haberme permitido el honor de estudiar y ser mi alma mater. También quiero agradecer a la Escuela de Lauderia por todas las facilidades que me brindaron a lo largo de este proyecto. Por último, agradezco al equipo de ANSYS Inc. por haber desarrollado y facilitado de manera gratuita el software utilizado en esta tesis.

De manera personal, y con mucho sentimiento, quiero agradecer a mis padres y a mi hermano, quienes siempre me han apoyado desde que tengo uso de razón, por haberme acompañado en este viaje que se llama vida y por haberme soportado en estos 23 años de vida. Agradezco profunda e infinitamente a mis amigos y compañeros de carrera Andrés, Germán, Iván y Josué, con quienes viví muchas horas estresantes de estudio, tareas y exámenes, pero con quienes también pasé muchas horas de alegría y locuras, por todo su apoyo en las buenas y en las malas. De nuevo, agradezco a todos y cada uno de mis sinodales, por haberme apoyado no solo en esta tesis, sino a lo largo de mi carrera profesional, al Dr. Adolfo por haber sido nuestro profesor desde aquellos primeros días en la carrera, a la Dra. Lucero por ser la mejor coordinadora que la universidad pueda tener, al Dr. Aldrin por la paciencia que me tuvo a lo largo de las clases y al Dr. Alejandro, por haberme dado la oportunidad de ser su estudiante, por todo el conocimiento, la paciencia, los consejos y sobre todo, por todas las lecciones de vida y haberme impulsado a tener más confianza en mí mismo y por todas las oportunidades que me ha otorgado. También agradezco a todos los demás profesores a lo largo de mi vida por el conocimiento, paciencia y confianza que depositaron en mí, a mis viejas amistades, Mau, Lio, Edgar y Julián por su paciencia, apoyo y por aguantar mi ausencia, y por último, mando un saludo a toda la banda que la sigue cotorreando.

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

# Resumen

En los instrumentos de cuerda, las cuerdas son la fuente de energía, transfiriéndose a través del puente a todo el cuerpo del violín. La movilidad contiene la información de esta transferencia, además de ser un indicador de la calidad sonora del violín. La posición y las medidas de las partes que conforman el violín juegan un papel importante en el sonido que es producido en el instrumento. En esta tesis es construido un modelo tridimensional de un violín basado en el *Stradivarius Titian*, con la característica principal de que el usuario puede modificar las configuraciones de las partes que conforman la caja del violín (tapa, costillas, fondo, efes, barra armónica, puntal) a su conveniencia. Haciendo uso del método de elemento finito un análisis modal y transitorio es realizado en el modelo sin modificaciones para obtener la curva de movilidad de la caja y sus modos normales, comparando los resultados con los reportados de manera experimental. Adicionalmente utilizando la cualidad del modelo para modificarse, otros dos modelos extras con parámetros diferentes son simulados para comprobar que el modelo funciona con estas modificaciones.

**Palabras clave:** Violín, modelo, simulación, método computacional.

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

# Índice general

Resumen . . . . .	V
<b>Lista de figuras</b>	<b>IX</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos . . . . .	3
1.1.1. General . . . . .	3
1.1.2. Específicos . . . . .	3
1.2. Hipótesis . . . . .	4
1.3. Motivación . . . . .	4
1.4. Formulación del problema . . . . .	4
<b>2. Fundamentos teóricos</b>	<b>5</b>
2.1. Simulación y modelo . . . . .	5
2.1.1. Simulación . . . . .	5
2.1.2. El concepto de modelo . . . . .	5
2.2. Elemento Finito . . . . .	6
2.2.1. Análisis estructural . . . . .	6
2.3. Función de Respuesta en Frecuencia . . . . .	7
2.4. Funcionamiento del violín. . . . .	8
2.4.1. Partes de un violín. . . . .	8
2.4.2. Movilidad en el puente de un violín . . . . .	9
2.4.3. Modos normales de vibración . . . . .	10
2.4.4. Nomenclatura de los modos firma . . . . .	10
2.5. Scilab . . . . .	10
2.6. AnELyzer . . . . .	12
<b>3. Metodología</b>	<b>13</b>
3.1. Construcción del modelo . . . . .	13
3.1.1. Variables . . . . .	14
3.1.2. Dibujando el modelo . . . . .	16
3.1.3. Costillas . . . . .	17
3.1.4. Puntal . . . . .	17
3.1.5. Barra armónica . . . . .	18
3.1.6. Puente . . . . .	20
3.1.7. Eliminación de los defectos de la barra . . . . .	21
3.1.8. Efes . . . . .	21
3.2. Mallado . . . . .	22
3.3. Correr el batch en ANSYS . . . . .	24
3.4. Análisis realizados . . . . .	24
3.4.1. Modal . . . . .	24
3.4.2. Transitorio . . . . .	24
<b>4. Resultados</b>	<b>27</b>
<b>5. Discusiones</b>	<b>33</b>
<b>6. Conclusiones</b>	<b>35</b>

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

# Índice de figuras

1.1. Instrumentos ancestros del violín [Buen, 2006]	1
1.2. Modelo de un violín en elemento finito [Bretos et al., 1998b]	2
1.3. Arreglo experimental para la medición de la movilidad [Jansson, 1997]	2
1.4. FRF de la vibración de un violín [Bretos et al., 1998b]	2
1.5. Placa rectangular con efes [Jansson et al., 2016]	3
2.1. Nodos y elementos. Cortesía de ANSYS	6
2.2. Gráficas de la magnitud y de la fase. [Inman and Singh, 2001]	8
2.3. Partes del violín. Uso bajo la licencia <i>Attribution-Share Alike 3.0 Unported</i>	8
2.4. Secciones de la caja del violín	9
2.5. Modos firma en la tapa y el fondo [Marshall, 1985]. El signo de los números indica si es desplazamiento es hacia arriba (positivo) o hacia abajo (negativo, indicado con $-$ ).	11
2.6. Interfaz gráfica de AnELyzer	12
3.1. Diagrama del <i>Stradivarius Titian</i> , obtenido por <i>CT Scanning</i> . [Zygmuntowicz, 2010]	14
3.2. Tapa del violín en ANSYS. Cortesía de ANSYS, Inc	17
3.4. Barra del modelo. Cortesía de ANSYS, Inc	19
3.3. Barra del modelo. Los picos sobresalientes son eliminados en procesos posteriores Cortesía de ANSYS, Inc	19
3.5. Puente del violin	20
3.6. Mitad derecha del puente. Cortesía de ANSYS, Inc	21
3.7. Medidas de las efes [Zygmuntowicz, 2010]	22
3.8. Modelo finalizado. Cortesía de ANSYS, Inc	23
3.9. Modelo mallado. Cortesía de ANSYS, Inc	23
3.10. Ventana de análisis modal. Cortesía de ANSYS, Inc	24
4.1. $B_1^-$ . Cortesía de ANSYS	27
4.2. $CBR$ . Cortesía de ANSYS	28
4.3. $B_1^+$ . Cortesía de ANSYS	28
4.4. Movilidad del violín simulado	29
4.5. Movilidad obtenida de manera experimental. [Jansson, 1997]	29
4.6. Movilidad del violín simulado con distintas configuraciones	30

# Capítulo 1

## Introducción

El violín tal y como lo conocemos ha pasado por una gran cantidad de transformaciones que lo han hecho uno de los instrumentos más reconocidos en la historia de la música. A ciencia cierta, nadie sabe quién fue el creador del violín, sin embargo, es conocido que fue evolucionado a partir de instrumentos medievales de cuerda frotada.



Figura 1.1: Instrumentos ancestros del violín [Buen, 2006]

A pesar de no conocer al o los inventores del violín, se sabe que entre los primeros lauderos o lutieres en construirlo en su forma completamente desarrollada se encuentra el italiano Andrea Amati (1505-1577) quien iniciaría una tradición familiar de lauderos que pasarían su conocimiento de generación en generación, instruyendo a lauderos de gran reputación, como Antonio Stradivari (1644-1737) y Giuseppe Guarneri (1687-1744), los cuales construyeron instrumentos de cuerdas los cuales son considerados de calidad excepcional, siendo objeto de estudio hasta el día de hoy [Hsieh, 2004]. Sin embargo, muy pocos de sus instrumentos que han sobrevivido hasta nuestros días están en su estado original, i.e. sin haber sufrido ninguna modificación, ya que, los violines en general, han sufrido por transformaciones a lo largo del tiempo [Fletcher and Rossing, 2012], siendo una de las más importantes el cambio de frecuencia de la nota “La” (A) principios del siglo XIX, que paso de 425 Hz a 440 Hz. Esto planteó la problemática de que el violín necesitaba producir un sonido más potente para su uso en los cada vez más grandes salones de orquesta.

Este problema fue resuelto alargando el cuello e incrementando el ángulo que se produce entre este y la caja del violín. Pero estos cambios en la longitud y el ángulo del cuello también cambiaron el ángulo producido entre las cuerdas y el puente, siendo necesario que este último sea más alto, dando como resultado que las cuerdas aplicasen mayor presión hacia abajo en el puente y a su vez, en la tapa. Esto requirió que se cambiaran las barras armónicas de los violines, siendo más rígidas y fuertes para soportar esta presión y evitar que se deformará la delgada madera de la tapa. [Hutchins, 1983]. Para lograr realizar

estos cambios de manera efectiva fue necesario realizar un análisis más complejo para comprender como funciona el violín, lo que dio paso a la acústica del violín.

El estudio de la acústica del violín ha sido extensos y realizados desde el siglo XVIII por científicos de gran renombre en la acústica y en otras ramas de la física como la electrodinámica, la termodinámica y la espectroscopia, nombres como Félix Savart, Hermann von Helmholtz y Chandrasekhara Raman han estudiado el violín y los misterios que este guarda. Sin embargo, ha sido en tiempos más recientes que las investigaciones sobre la acústica del violín han crecido, debido a los avances tecnológicos y científicos, habiendo muchos trabajos como los de Heinrich Dünwald, quien ha medido la respuesta en frecuencia de más de 700 violines de diferente origen y calidad, pasando desde los hechos en producción en masa a los contruidos por maestros italianos hace siglos. Otro trabajo es el de Jeff Loen, quien ha hecho investigaciones sobre cómo afecta el grosor de la tapa de los antiguos violines italianos a su sonido. Otro trabajo importante fue el de [Jansson, 1997] quien desarrolló un método estándar para medir la movilidad con el cual se midieron las propiedades acústicas de 25 violines de alta calidad. Para realizar esto se diseñó un arreglo experimental, en el cual colocó un violín sobre dos soportes horizontales, amortiguando las cuerdas con un peso encima. Al lado del puente se colocó un sensor de movimiento, el cual medía la respuesta del violín al ser golpeado con un martillo pequeño al lado contrario del sensor 1.3.

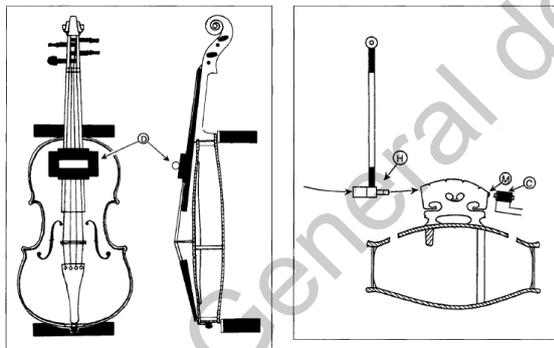


Figura 1.3: Arreglo experimental para la medición de la movilidad [Jansson, 1997].

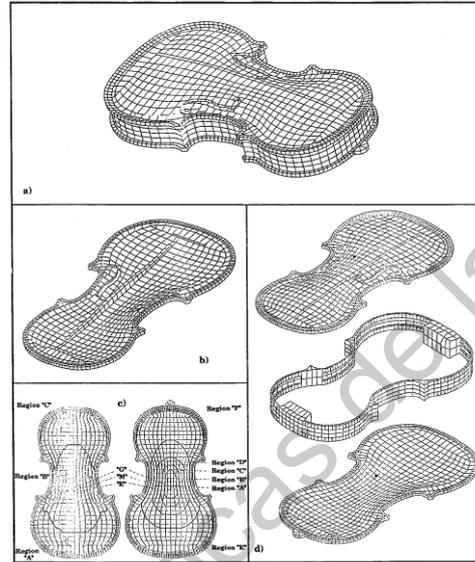


Figura 1.2: Modelo de un violín en elemento finito [Bretos et al., 1998b].

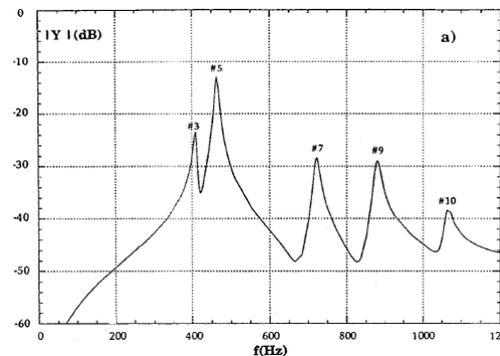


Figura 1.4: FRF de la vibración de un violín [Bretos et al., 1998b].

Con la llegada de las computadoras, es posible replicar los resultados obtenidos de manera experimental mediante simulaciones. Un método que ha sido útil en la acústica del violín es el método de elemento finito (MEF). Este método se utiliza para analizar estructuras complicadas [Rodgers and Masino, 1990], en el cual un modelo cuya geometría es complicada como para ser resuelto de manera analítica, es dividido en pequeñas partes discretas, en las cuales se resuelven las ecuaciones que describen al fenómeno de manera numérica, mostrando como resultado final el comportamiento del modelo bajo el fenómeno de interés. Con este método se han obtenido resultados interesantes, por ejemplo, [Bretos et al., 1998b] analizó con MEF los patrones vibratorios y respuesta de frecuencia de tapas de violín, y también aplicó el método en tapas en las cuales las costillas fueron definidas como condición de frontera, así como también observó los efectos que tiene la barra de vibración en el violín [Bretos et al., 1998a] (ver figura 1.2). Para poder utilizar el método del elemento finito, las propiedades de la madera fueron tomadas en cuenta para obtener la respuesta en frecuencia (FRF) de la vibración de las tapas de violín simuladas la cual es mostrada en la figura 1.4. Otro experimento interesante obtenido con MEF fue el de [Jansson et al., 2016] en el que

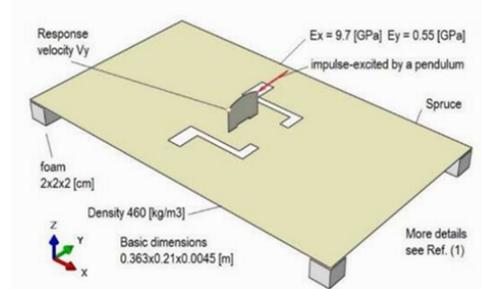


Figura 1.5: Placa rectangular con efes[Jansson et al., 2016].

se compararon de manera experimental la respuesta de la movilidad del puente entre violines italianos y franceses antiguos, Para hacer su comparación, Jansson utilizó el método del elemento finito en donde hizo la simulación de una placa rectangular de madera con efes, a la cual le coloco unos soportes en la parte inferior como se muestra en la figura 1.5. En la parte superior coloco un puente en medio de las efes, el cual fue excitado por impulsos digitales. La respuesta a los impulsos digitales fue capturada en espectros. Con los datos obtenidos de las simulaciones y de manera experimental pudo realizar su comparación, demostrando la utilidad que tiene el método de elemento finito en los trabajos de acústica.

En este trabajo de tesis, a partir de las medidas originales del *Stradivarius Titian*, se construye un modelo del violín en ANSYS, un software que realiza simulación de elemento finito. El modelo es construido por comandos en un archivo de texto sin formato llamado batch, el cual fue escrito de manera que el usuario tiene la capacidad de modificar los diferentes parámetros (posición, medidas, propiedades mecánicas) de las partes que componen al violín, o incluso, decidir si forman parte de la simulación o no.

Utilizando el método de elemento finito, se realizan dos análisis al modelo original: uno modal y otro transitorio, los cuales nos dan como resultado los modos normales de vibración y la movilidad del violín respectivamente. Estos datos son comparados con los reportados de manera experimental en diferentes fuentes.

Adicionalmente, utilizando la propiedad del batch para modificarse, dos modelos extras son creados eliminando partes del modelo original, realizando los análisis mencionados anteriormente con la finalidad de demostrar que el batch funciona sin errores en la compilación. Este trabajo, que comenzó como un proyecto de estancia en la Escuela de Laudería del Instituto Nacional de Bellas Artes, e inspirado en la tesis doctoral de [Torres, 2006] y otros trabajos como [Torres, 2010] y [Garay, 2015], tiene como propósito ofrecer a los lauderos una herramienta que les ayude a predecir el comportamiento de su instrumento incluso antes de que este sea construido, además de proporcionar un modelo cuyas configuraciones sean modificables para observar cómo es que cada parte del violín influye en su comportamiento.

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. General

Crear un modelo por computadora de un violín para análisis de elemento finito que sea capaz de modificar los parámetros de medidas y posición de las partes que la componen (tapa, costilla, fondo, puente, efes, puntal, barra armónica), cuyos resultados sean consistentes con lo reportado en la literatura.

### 1.1.2. Específicos

- Crear un batch para ANSYS que posea la facilidad de manipular las variables de posición y medidas de las partes de la tapa del violín.
- Simular por el método de elemento finito la movilidad y los modos normales de vibración de un violín basado en el *Titian* utilizando los software ANSYS y Scilab.
- Simular variantes del modelo original eliminando o cambiando ciertas partes del violín con la finalidad de demostrar la capacidad que tiene el modelo de modificar los elementos que lo conforman.

## 1.2. Hipótesis

Los cambios en la posición y medidas de las diferentes partes que componen la caja de un violín, influyen de manera importante a su comportamiento y calidad. Dichos comportamientos pueden ser simulados por computadora utilizando diferentes métodos numéricos, entre ellos el método de elemento finito. Existe la posibilidad de crear un modelo para análisis de elemento finito que sea capaz de recrear diferentes configuraciones de violines, modificando ciertas propiedades de sus partes o incluso eliminándolas, siendo los resultados del análisis comparable con los que se han obtenido de manera experimental.

## 1.3. Motivación

Predecir el comportamiento y la calidad final de un instrumento musical durante su etapa de construcción es complicado debido a la gran cantidad de factores involucrados en el resultado final. Además, es requerido definir la calidad mediante un criterio sistemático. Un posible criterio objetivo para determinar la calidad del instrumento se deriva del concepto de movilidad. La movilidad es la respuesta en frecuencia del comportamiento de un sistema al aplicarle una fuerza de excitación y medir la velocidad de respuesta ante esta excitación. El estudio de la movilidad en un violín de manera experimental puede ser en ocasiones costoso y complicado porque se requiere de un ambiente controlado. Los materiales necesarios y las técnicas experimentales con las que estas pruebas son conducidas también resultan costosas, por lo cual se busca una alternativa al proceso experimental que muestre resultados similares. Haciendo uso de simulaciones por computadora con el método de elemento finito es posible obtener un estudio de calidad significativo sin la necesidad de invertir en experimentación. En la simulación, se pueden controlar un gran número de variables que influyen en la calidad final del instrumento, como los grosores o la posición de ciertas partes del instrumento, y el tipo de madera utilizada, mostrando los resultados obtenidos de una manera rápida y económica. Entonces la simulación por elemento finito constituye una posible herramienta para que los lauderos puedan conocer la calidad del instrumento incluso antes de terminar su construcción.

## 1.4. Formulación del problema

Antonio Stradivari construyó en el año de 1715 un violín el cual es conocido como "*Stradivarius Titian*". Este violín fue analizado en 2006 junto con otros dos violines antiguos importantes en un trabajo conocido como Strad3D [Zygmuntowicz, 2010]. En este trabajo los tres violines fueron escaneados por Tomografía axial computarizada (CT Scanning), ofreciendo una fuente de información valiosa sobre la formas y dimensiones de los elementos que los componen. Con los datos proporcionados de este trabajo se crea un modelo tridimensional de un violín basado en el *Titian*, el cual es simulado por el método de elemento finito utilizando una versión estudiantil del software ANSYS para encontrar los modos normales y la movilidad y hacer el análisis de estos resultados. Este modelo debe tener la capacidad de modificar las propiedades de las partes del violín o incluso eliminarlas y arrojar resultados comparables con los obtenidos de manera experimental.

# Capítulo 2

## Fundamentos teóricos

### 2.1. Simulación y modelo

#### 2.1.1. Simulación

La simulación es la imitación de un proceso que se lleva a cabo en el mundo real. El acto de simular requiere de la implementación de un modelo, el cual representa las características claves, comportamientos y funciones del sistema físico o abstracto que se quiere simular [Banks et al., 2001].

La simulación computacional es el uso de computadoras para simular el comportamiento de sistemas complejos mediante las matemáticas, la física y la informática. La simulación se realiza ajustando cada una de las variables que caracterizan al modelo, solas o combinadas, observando cómo los cambios afectan los resultados. Las simulaciones por computadora ayudan a los investigadores a hacer predicciones acerca de qué pasará en el sistema real que se está estudiando en respuesta a condiciones variables. El modelado puede agilizar el proceso de investigación al permitir que los científicos realicen miles de experimentos simulados por computadora a fin de identificar los parámetros reales que más probablemente ayudarán al investigador a encontrar la solución al problema bajo estudio.

Sin embargo, existen desventajas. Cuando uno realiza una simulación se deben de tener en cuenta las limitaciones. La principal limitación es el hecho de que los sistemas reales son demasiado complejos y se deben de determinar los detalles que serán utilizados en el modelo. Estos deben de ser omitidos, con la consecuente pérdida de sus efectos, o incluirlos en otras variables existentes en el modelo [Smith, 2018]. Además, debido a lo anterior, siempre se tendrá la presencia del error, siendo otro parámetro que debe de tomarse en cuenta.

#### 2.1.2. El concepto de modelo

Los modelos intentan describir y explicar características de un fenómeno sin pretender ser una fotografía de la realidad. En la ciencia, el modelo se constituye de proposiciones coordinadas y subordinadas que, con frecuencia, se expresan mediante fórmulas que explican relaciones reales de los objetos. Los modelos son esquemas teóricos que no tienen existencia real y que se refieren a esquemas objetivos. Las teorías se prueban mediante modelos, los cuales son solo una parte de la teoría.

Un modelo comparado con el sistema verdadero que representa, proporciona información a un costo más bajo y permite un conocimiento más rápido de las condiciones que no se observan en la vida real. El valor de un modelo surge cuando éste mejora la comprensión de las características del comportamiento de forma más efectiva que si se observara el sistema real. La información que respalda un modelo debe ser confiable. Si se distorsionan las estimaciones, la solución obtenida será de calidad inferior a la del modelo real.

Los modelos proporcionan un marco de referencia para el pensamiento, una descripción esquemática de los sistemas, una base para el cálculo y una guía para el estudio futuro. El uso de los modelos es casi universal en nuestro pensamiento, sea científico o no.

Un modelo se construye con la intención de que correspondan lo más posible con el mundo real. Ningún

modelo puede ser jamás una réplica exacta de su contraparte real, si embargo, sus propiedades pueden ser semejantes a las del mundo real.

Para que las propiedades de un modelo y las de su contraparte en un experimento científico correspondan, es necesario realizar una comparación entre el modelo y el sistema real. Y solo será útil si se demuestra experimentalmente que las propiedades del modelo guardan una correspondencia con el sistema real. Para poder comparar los procedimientos reales con las propiedades de los modelos y los sistemas no basta con un concepto gráfico, se requiere llevar a cabo una observación cuantitativa del sistema y emplear procedimientos matemáticos para especificar el modelo [Figueroa et al., 2014].

Concretamente, los modelos no son iguales al sistema real, hay partes que no son necesarias de simular para una buena comparación entre modelo y sistema real. Al utilizar un modelo es más fácil la comprensión de las características y del comportamiento que si se observa el sistema real.

## 2.2. Elemento Finito

El método del elemento finito es una técnica numérica para resolver problemas que involucren la solución de sistemas de ecuaciones diferenciales, las cuales, debido a la geometría complicada, las cargas, condiciones de frontera u a las propiedades del o los materiales no pueden ser resueltas de manera analítica. [Logan, 2012]

El método trabaja dividiendo la región de solución en elementos y expresando las variables de en términos de funciones aproximadas dentro de cada elemento. En turno, las funciones aproximadas se expresan en términos de valores de la variable de campo para ciertos puntos llamados nodos o puntos nodales. Los nodos y los elementos se ejemplifican en la figura 2.1, siendo los nodos los puntos rojos y los elementos las áreas creadas entre los nodos, ejemplificadas con el elemento sombreado.

El conjunto de nodos configura una malla o rejilla de solución para el problema. Esta malla puede o no seguir la configuración física del campo [Zúñiga, 2018]. Por ejemplo, se puede trasladar el problema al campo de solución matemático, cuyas fronteras pueden no coincidir con las orillas del cuerpo físico. Este método se usa principalmente para aproximar soluciones de cuerpos muy complejos para los cuales no existen soluciones analíticas. Por otro lado, el método también permite variar las condiciones (parámetros elásticos, viscosidad, densidad, temperatura, etc.) de los elementos individualmente o en grupos de acuerdo a las ecuaciones constitutivas que se empleen en el problema. Las simulaciones en elemento finito pueden ayudar a localizar problemas vibratorios, de diseño y predecir la respuesta de estructuras antes de que sean construidas y probadas. El método de elemento finito está a menudo relacionado con el análisis modal. Un estudio de análisis modal en violín fue mostrado por [Garay, 2015].

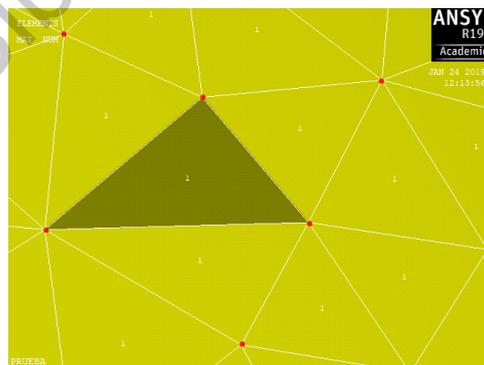


Figura 2.1: Nodos y elementos. Cortesía de ANSYS.

### 2.2.1. Análisis estructural

En un modelo creado en elemento finito se pueden hacer distintos tipos de análisis según el tipo de elemento. Existen distintos tipos de elemento, los cuales se pueden elegir dependiendo del modelo, según el análisis que se requiera, las propiedades del material y la cantidad de nodos. Para poder analizar el comportamiento de un modelo es necesario especificar el tipo de elemento y el análisis que requiere el elemento. Un tipo de análisis es el estructural, en el cual es posible realizar diferentes tipos de análisis. Tres de ellos son el armónico, el transitorio y el modal.

#### Análisis armónico

El análisis armónico se entiende como una carga cíclica que produce una respuesta armónica de un sistema estructural. El análisis armónico brinda la capacidad de predecir el comportamiento dinámico

de estructuras, lo que le permite verificar si el diseño supera o no la resonancia, la fatiga y otros efectos nocivos de las vibraciones forzadas. El análisis armónico sirve para calcular la respuesta de una estructura en varias frecuencias y obtener una gráfica donde se muestre el desplazamiento contra la frecuencia. La respuesta del análisis armónico puede usarse para determinar el estado de una estructura lineal a cargas que varían con el tiempo. En este tipo de análisis solo es posible calcular las vibraciones forzadas de estado estacionario de una estructura. Las vibraciones transitorias, que ocurren al comienzo de la excitación, no se tienen en cuenta en un análisis de respuesta armónica [ANSYS®, 2018].

### Análisis transitorio

Las vibraciones transitorias están definidas como una vibración sostenida en un sistema mecánico. Es común ignorar la parte transitoria de la solución de un sistema ligeramente amortiguado y enfocarse solamente en la respuesta del estado estacionario, debido a que la parte transitoria influye poco en el análisis si el amortiguamiento es lo suficientemente fuerte, sin embargo, si el amortiguamiento es lo bastante ligero, la parte transitoria no debe ignorarse y en algunas aplicaciones (como el análisis de un terremoto o en el análisis de un satélite), la parte transitoria se vuelve incluso mucho más importante que la parte estacionaria [Inman and Singh, 2001].

El análisis transitorio es usado para determinar la respuesta dinámica de una estructura sujeta a cargas dependientes del tiempo (como los desplazamientos, estrés y fuerzas), considerando los efectos de la inercia y del amortiguamiento. El análisis transitorio es mucho más complejo que un análisis estático, ocupando más tiempo y más recursos computacionales, por lo cual debe considerarse simplificar lo más posible el problema a analizar. [ANSYS®, 2018]

### Análisis modal

El análisis modal es utilizado para describir el movimiento de una estructura en términos de propiedades modales: frecuencia natural, factor de amortiguamiento, masa modal y forma modal. Este análisis puede ser realizado de manera experimental o de manera matemática, utilizando métodos como el MEF. El análisis modal también permite observar cómo es que una estructura vibra al ampliar y ralentizar las vibraciones de la estructura durante su funcionamiento. También puede ser un punto de inicio para análisis más complejos como lo es el análisis armónico y el análisis transitorio [ANSYS®, 2018].

La principal suposición del análisis modal es que el sistema que se analiza es lineal. Esto significa que la medición de una FRF entre un punto de excitación  $a$  y un punto de respuesta  $b$  debe ser la misma medida entre un punto de excitación  $b$  y uno de medida  $a$ , es decir, que la FRF medida en cualquiera dos puntos de la estructura es independiente de cual es usado para la excitación y cual es usado para la medición.

El violín parece cumplir con los criterios necesarios para ser considerado como un sistema lineal, sin embargo, no lo es, pero puede considerarse como tal dentro de un rango razonable. [Marshall, 1985]

Las frecuencias naturales de un sistema son de gran importancia en el entendimiento del comportamiento dinámico de una estructura. Si el sistema es excitado en una resonancia, se muestran dos comportamientos diferentes en la movilidad. El primero de ellos ocurre cuando la frecuencia de excitación se acerca a la frecuencia natural de la estructura, ocasionando que la magnitud de la movilidad incremente rápidamente llegando a un valor máximo, representándose en una gráfica magnitud/frecuencia como un pico en la frecuencia natural, esto se muestra en la figura 2.2a [Inman and Singh, 2001]

El otro comportamiento es que la fase cambia  $180^\circ$  ( $\pi$ ) conforme la frecuencia pasa a través de la resonancia, con el valor de la fase siendo  $0^\circ$  justo en la resonancia. Esto se muestra en la figura 2.2b [Inman and Singh, 2001]. Este fenómeno físico es usado para determinar la frecuencia de resonancia de una estructura, por lo cual es necesario tener ambas gráficas para su estudio.

## 2.3. Función de Respuesta en Frecuencia

Una función de respuesta en frecuencia (FRF por sus siglas en inglés) es una función de utilizada para cuantificar el espectro de salida de un sistema en respuesta al estímulo. Es la medición de la magnitud de interés y la fase con respecto a la frecuencia.

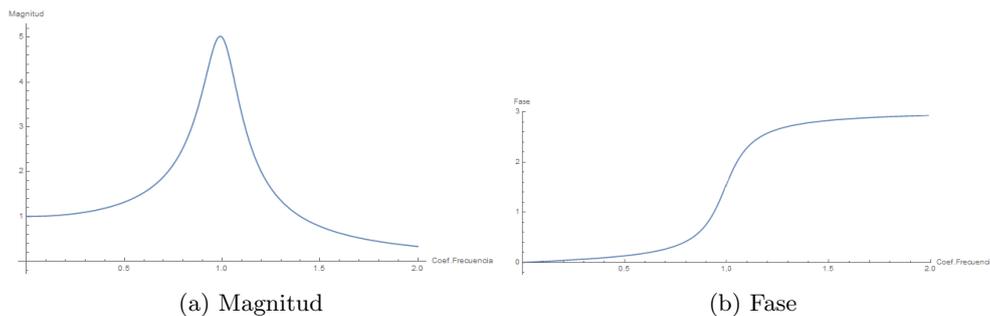


Figura 2.2: Gráficas de la magnitud y de la fase. [Inman and Singh, 2001]

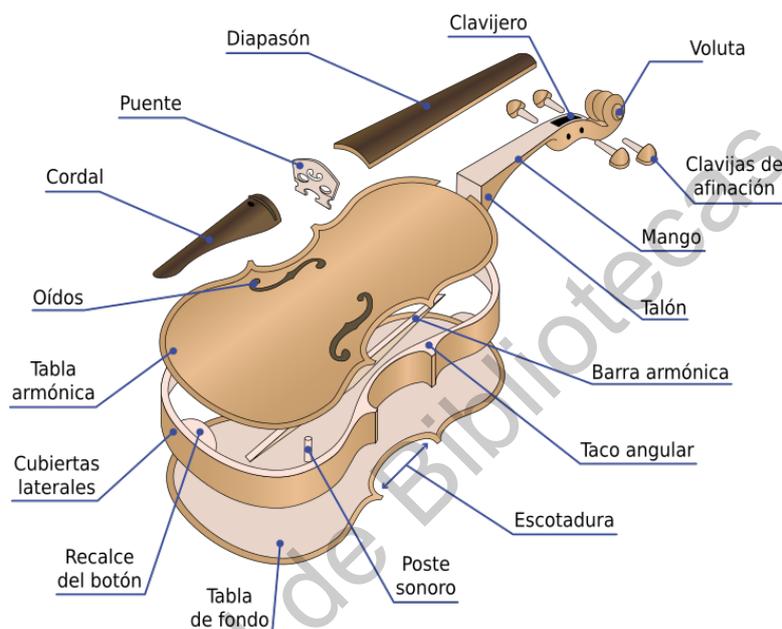


Figura 2.3: Partes del violín. Uso bajo la licencia *Attribution-Share Alike 3.0 Unported*

Para determinar el comportamiento dinámico de una estructura se le aplica una fuerza  $\tilde{\mathbf{F}}$  en un punto cualquiera y se determina la respuesta de la estructura en el mismo punto o en algún otro punto arbitrario. Para describir la respuesta, podemos medir el desplazamiento  $\tilde{\mathbf{r}}$ , velocidad  $\tilde{\mathbf{v}}$ , o aceleración  $\tilde{\mathbf{a}}$ .

De estas variables, podemos construir una función de respuesta en frecuencia [Fletcher and Rossing, 1991], las cuales incluyen lo que se conoce como movilidad o admitancia mecánica ( $v/F$ ), aceleración ( $a/F$ ), complacia ( $x/F$ ), impedancia ( $F/v$ ), masa dinámica ( $F/a$ ) y rigidez ( $F/x$ ). La función de respuesta en frecuencia de interés en este trabajo es la *movilidad* [Fletcher and Rossing, 1991].

La movilidad ( $v/F$ ) es la relación en función de la frecuencia que existe entre la fuerza aplicada a una estructura (señal de entrada) y su velocidad de respuesta a la excitación (señal de salida). Esta función de transferencia, es una relación proporcional entre la señal de entrada y la señal de salida [Ewins, 1984], y está representada por dos gráficos vinculados: magnitud y fase.

## 2.4. Funcionamiento del violín.

### 2.4.1. Partes de un violín.

El violín es ensamblado utilizando más de 70 piezas diferentes de madera. La mayoría de estas piezas, más allá de ser ornamentales, afectan en gran parte al sonido que un violín produce [Hsieh, 2004]. Debido al enfoque de este trabajo solo se describen las partes que conforman la caja de resonancia.

La caja de resonancia es el cuerpo del violín, la cual tiene una forma ovalada estrechándose alrededor de la parte media. Esta se construye a partir de dos tablas arqueadas: la tabla armónica o tapa y la tapa de fondo. (ver Figura 2.3). La caja del violín es seccionada en tres partes: el lóbulo superior, que es el semicírculo de menor radio, la "C" del violín, que son los contornos con forma de c que crean la angostura en la parte media y el lóbulo inferior, que es el semicírculo de mayor radio. Estas secciones se muestran en la figura 2.4.

La tapa se encuentra perforada de manera simétrica por dos aberturas llamadas ojos o efes, debido a la forma que poseen. Estas se localizan en la parte media del violín. La tapa de la caja comúnmente está hecha de madera de píceas mientras que el fondo está hecho de madera de maple. Ambas piezas están unidas entre sí por las costillas o cubiertas laterales, las cuales están hechas también de maple. La función de las costillas es formar la caja y transmitir las vibraciones a través de esta. En el interior, en los extremos superiores e inferiores del violín se encuentran los realces de botón, y en las puntas (las salientes creadas en los extremos de las "C") se encuentran los tacos angulares. La función de estas piezas es mantener unidas las costillas y darle refuerzo a la caja.

En la parte interior, del lado derecho del eje de simetría se encuentra la barra armónica. Esta corre a lo largo de la tapa del violín, yendo del lóbulo inferior al superior. La barra tiene forma de una campana gaussiana. Su propósito es añadir soporte estructural a la tapa y transmitir las vibraciones mecánicas en esta. La barra es fabricada con el mismo material con el que está construida la tapa (madera de píceas).

Sobre la tapa, del lado exterior o visible se puede encontrar el puente del violín, cuya función principal es sostener las cuerdas en una posición elevada y transmitir las vibraciones de estas a la caja del violín. Este se encuentra entre las efes, en la parte media del violín. El puente comúnmente está construido de madera de maple. En el interior de la caja de resonancia se encuentra el poste sonoro, puntal, o alma del violín, la cual es una barra cilíndrica de madera que conecta la tapa con el fondo. El puntal está hecho de píceas y se coloca en la parte interior de la caja, debajo de la pata derecha del puente, su función principal es controlar los modos de vibración en la caja del violín.

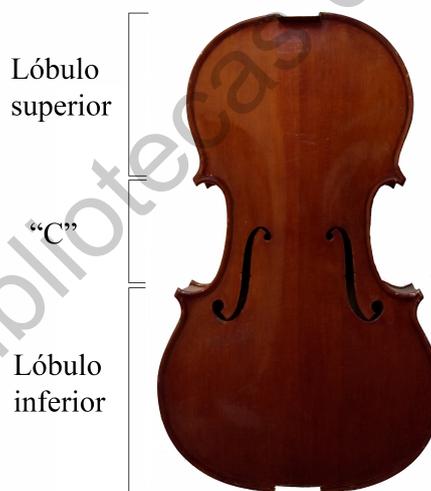


Figura 2.4: Secciones de la caja del violín

### 2.4.2. Movilidad en el puente de un violín

Para todos los instrumentos de cuerda, la cuerda es la fuente de energía y el puente es la principal conexión al cuerpo. La movilidad contiene la mejor información de la transferencia de energía de la cuerda al cuerpo. La medición de la movilidad en el puente es fácil de reproducir, y proporciona información de características del violín que se pueden analizar antes y después de hacer modificaciones directamente en el instrumento.

En el contexto de la acústica de instrumentos de arco, la curva de admitancia (o movilidad puntual) es definida como la relación de la velocidad obtenida mediante un sensor que es colocado sobre el puente, en la esquina superior al lado derecho de la barra armónica; y del lado contrario a la barra, a un costado del puente, se aplica un impulso con un martillo donde la fuerza aplicada es medida con un transductor. La respuesta de aceleración puede ser convertida en la movilidad por un software de análisis de datos. Dicho arreglo experimental es comúnmente usado para capturar las características esenciales de las vibraciones del cuerpo del instrumento. Este método fue propuesto por [Jansson, 1997].

La movilidad de un violín también puede ser recreada a través de simulaciones por computadora, haciendo uso de métodos como el método de elemento finito, siguiendo el mismo principio utilizado en el arreglo experimental: una fuerza es colocada en uno de los extremos del puente y es medida en la otra parte.

### 2.4.3. Modos normales de vibración

El comportamiento oscilatorio de cualquier estructura puede ser estudiado a través de los modos normales de vibración. Los modos normales son las maneras en las que un sistema vibra. Están conformados por líneas nodales, donde el movimiento es mínimo, por líneas antinodales, en donde el movimiento es máximo, por una frecuencia modal y el amortiguamiento. Al excitar un modo normal, el movimiento es detectable en las zonas antinodales, siendo más fuerte cuando se encuentra a una frecuencia de resonancia.

Existen dos tipos de formas: las formas modales y las formas de deflexión operativa u ODS por sus siglas en inglés (Operational Deflection Shapes). Las formas modales describen como cada punto de la estructura se mueve cuando el modo es excitado. Las ODS son de ayuda para visualizar de manera dinámica como la estructura se deforma o deflexiona durante su funcionamiento, siendo las deflexiones resultado de la excitación de uno o más modos de vibración a una cierta frecuencia.

Las FRFs contienen información útil sobre el violín, ya que es posible determinar la forma modal de un violín a partir de una serie de FRFs sobre un número de puntos sobre la superficie. Al analizar la movilidad o admitancia mecánica ( $v/F$ ) se puede apreciar una serie de picos a diferentes frecuencias, siendo unos más prominentes que otros. Estos picos están asociados con los modos normales y cada uno recibe una etiqueta diferente. Estos picos son conocidos como modos firma (*signature modes*).

### 2.4.4. Nomenclatura de los modos firma

Los modos han sido etiquetados de distintas maneras por distintos investigadores. [Bissinger, 2003] han etiquetado los modos firma con las diferentes partes del violín con los que estos están asociados, a los cuales han llamado  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $CBR$ ,  $B_1^-$  y  $B_1^+$ .

#### Modos de cavidad $A_0$ y $A_1$

El modo  $A_0$  es el primero modo que aparece en un rango de frecuencia de la cuerda sol (G), alrededor de los 280 Hz. [Cremer, 1984] describe a este modo como la resonancia de las efes. Este modo hace que la tapa y el fondo se muevan en desfase, resultando en una expansión-contracción del volumen del aire interno de la caja. El modo  $A_1$  se encuentra alrededor de los 470 Hz, en el cual el aire "chapotea" desde el lóbulo superior al lóbulo inferior como resultado del movimiento producido por el modo  $A_0$ . Ambos modos son mostrados en la parte superior de la figura ??.

#### Modos CBR

El modo  $CBR$ , llamado por algunos investigadores como  $C_1$  es un modo simétrico que se encuentra alrededor de los 400 Hz [Rossing, 2010]. Se caracteriza por una línea nodal parecida a una doble daga (ver figura 2.5) [Bissinger and Keiffer, 2003]. Este modo tiene un fuerte movimiento horizontal y vertical de las costillas.

#### Modos $B_1^-$ y $B_1^+$

El modo  $B_1^-$  llamado  $T_1$  o  $C_2$  por algunos investigadores es un modo fuerte que aparece alrededor de los 440 Hz, asociado con un pico que ha sido llamado "main wood". El modo  $B_1^+$  también llamado  $C_3$ , es otro modo fuerte, que se encuentra alrededor de los 520 Hz. Estos modos son conocidos como modos de "costura de béisbol" debido a que las líneas nodales son similares al patrón de costura de una pelota de béisbol [Bissinger, 2003]. El movimiento que producen en las costillas es perpendicular con respecto al plano del violín. Ambos modos son mostrados en la figura 2.5.

## 2.5. Scilab

Scilab es un software de análisis numérico multiplataforma con un lenguaje de programación de alto nivel para cálculos científicos. El programa está orientado a la programación numérica, siendo aplicado para análisis de señales, estadística, dinámica de fluidos, sistemas dinámicos entre otras. Tiene la característica de poder crear interfaces con Fortran, Java, C y C++. Scilab es un software gratuito y de código abierto, bajo la licencia *CeCILL*, compatible con la *GNU General Public License*.

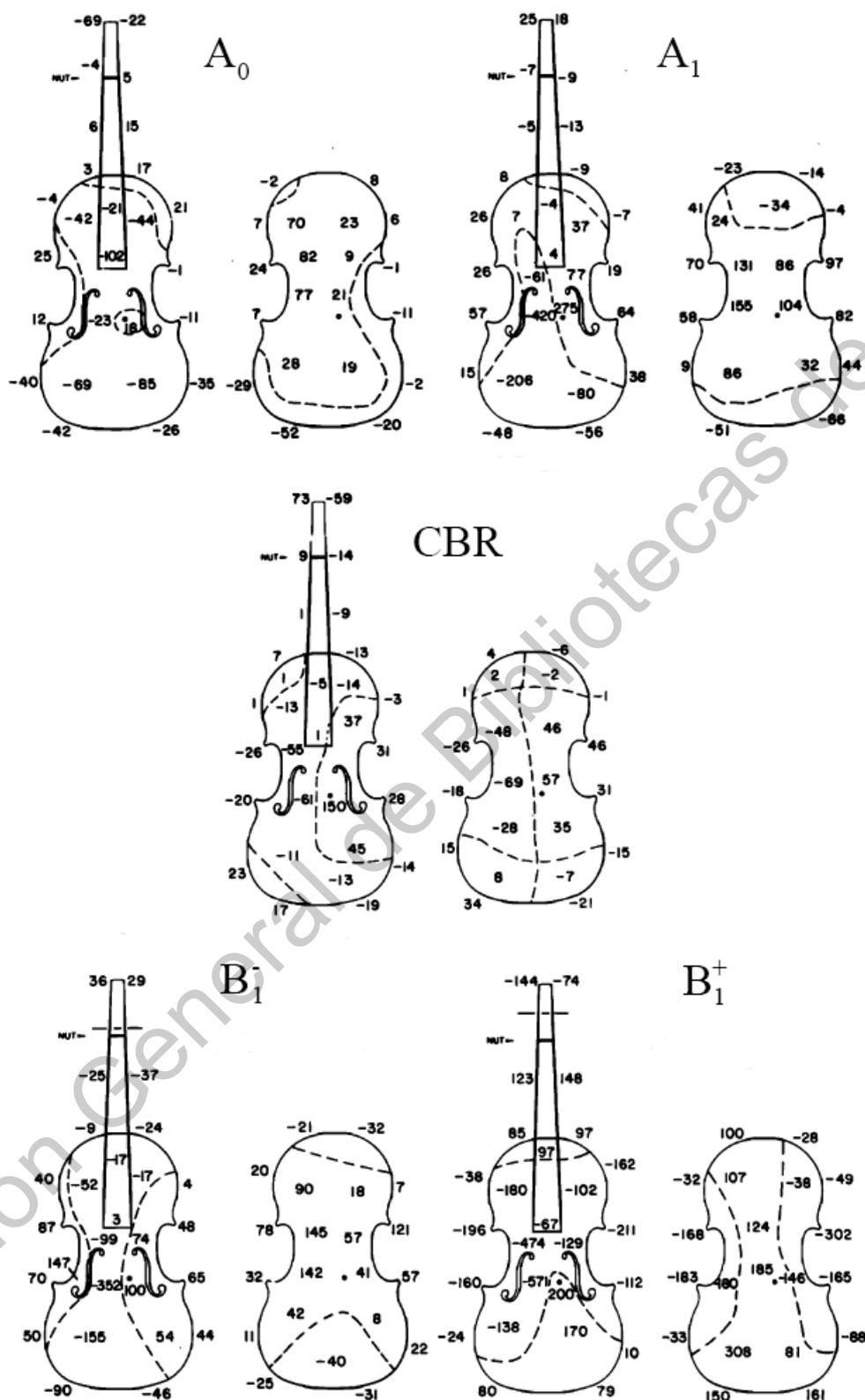


Figura 2.5: Modos firma en la tapa y el fondo [Marshall, 1985]. El signo de los números indica si es desplazamiento es hacia arriba (positivo) o hacia abajo (negativo, indicado con -).

Scilab tiene su propio lenguaje de programación, el cual está orientado al uso de matrices y vectores. La ventaja del uso de un lenguaje basado en matrices es que muchos problemas numéricos pueden resolverse en unas pocas líneas de código, siendo más sencilla la escritura a comparación de otros lenguajes de programación. Esto permite al usuario construir modelos rápidamente para un amplio rango de problemas matemáticos.

## 2.6. AnELyzer

AnELyzer es un analizador de espectros especializado en mediciones espectrales para violines. La principal tarea de AnELyzer es calcular la función de transferencia de un violín. El método estándar para obtener la movilidad del violín consiste en medir dos señales simultáneamente (velocidad y fuerza), por lo cual AnELyzer es capaz de realizar mediciones de doble canal, siendo una alternativa a los costosos sistemas de medición que pueden realizar esta tarea. AnELyzer fue desarrollado por [Torres, 2018] utilizando Scilab 6.0, siendo un programa multiplataforma de uso libre. AnELyzer además cuenta con una interfaz gráfica amigable con el usuario, la cual está dividida en cuatro secciones coloreadas como se muestra en la figura 2.6.

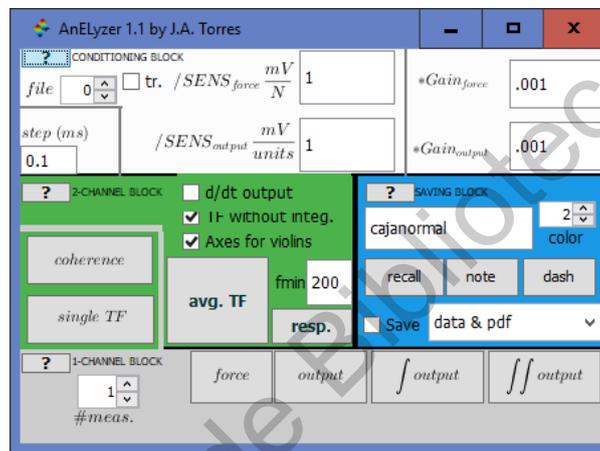


Figura 2.6: Interfaz gráfica de AnELyzer.

Para poder utilizar AnELyzer, los datos tienen que ser ingresados en un archivo con extensión `.csv`. Los datos deben ordenarse en una matriz donde las filas están separadas por un salto de línea (tecla de entrada) y las columnas por una coma.

La sección en blanco corresponde a las herramientas necesarias para el acondicionamiento de la señal.

La sección verde corresponde a las herramientas para el análisis para señales de doble canal. El botón `avg. TF` mostrará el promedio lineal de la magnitud y fase de la función de transferencia calculada desde el archivo `.csv`, mientras que la opción `single TF` mostrará funciones de transferencia individuales. Si la opción `Axes for violins` está marcada, la gráfica resultante estará entre  $-10$  y  $-50$   $db$  que es común para violines.

El bloque gris muestra los botones para el análisis de un solo canal. Cada señal de entrada y salida del archivo `.csv` se puede trazar individualmente en el dominio de la frecuencia en este bloque. Por último, la sección azul es utilizada para controlar el formato de salida de las gráficas. Si cualquier botón de la sección verde o gris es presionado, el programa mostrará la gráfica en una ventana nueva. Si la opción `Save` está marcada, antes de mostrar la gráfica aparece un cuadro en el que el usuario puede ingresar el nombre de la gráfica y notas adicionales. En este bloque es posible cambiar la extensión de la gráfica, pudiendo guardar como archivo `png`, `bmp`, `ps`, `eps`, `jpeg`, `gif`, `svg` o `emf` y la ubicación donde será guardado el archivo.

Aunque AnELyzer fue creado como una herramienta para obtener la movilidad de manera experimental, también puede leer los archivos de salida de ANSYS que se encuentran en formato `.csv`, siendo un programa que se puede utilizar tanto en la experimentación como en la simulación

## Capítulo 3

# Metodología

La simulación fue realizada utilizando software de [ANSYS®, 2018]. ANSYS es una empresa que se dedica al desarrollo y venta de software especializado a la simulación enfocado a diferentes problemas de ingeniería y ciencias, utilizando el método de elemento finito, resolviendo sistemas de ecuaciones diferenciales parciales de manera numérica. Para este trabajo fue utilizado ANSYS student 19.0 y posteriormente la versión 19.2, un producto gratuito que ofrece ANSYS para estudiantes puede ser descargado de manera sencilla. ANSYS para estudiantes se puede instalar en cualquier máquina compatible con Microsoft Windows de 64 bits con una licencia de 12 meses.

Para poder hacer la simulación se utilizó el programa Mechanical APDL, el cual es parte de ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 19.0 utilizando la licencia tipo estudiante, la cual limita al modelo a solo utilizar 32000 nodos. Debido a esta limitante, el modelo construido tuvo que ser simplificado, omitiendo muchas partes del violín, modelando solamente la tapa, el fondo, las costillas, la barra armónica, el puntal, y el puente. El modelo del violín fue construido en base a las medidas del *Stradivarius Titian*. Las dimensiones aproximadas del modelo fueron obtenidas de un plano del Titian a escala 1:1. En este plano se encuentran 5 cortes transversales en diferentes puntos, el contorno visto desde arriba y las dimensiones de las efes y su distancia de las orillas del violín. (ver fig. 3.1). Para extraer las medidas fue utilizado *ImageJ*, debido a que el diagrama carece de medidas específicas sobre el grosor y el arco de la tapa y el fondo, la longitud de la caja, el ancho y la altura de las costillas y las dimensiones de la barra armónica. Con este programa fue posible obtener dichas medidas utilizando como referencia las que han sido proporcionadas en el plano.

El puente es la única parte que no se encuentran en el esquema de la figura 3.1. Este fue construido utilizando las medidas del puente mostrado en la figura 3.5. Cabe destacar que este modelo es una aproximación y no una réplica exacta del Titian, debido a que, en el instrumento original, los grosores no son uniformes, la bóveda de la tapa y el fondo no son exactamente iguales, así como muchas otras medidas que fueron extrapoladas debido a que no existe referencia. Sin embargo, esto no resta la utilidad y precisión del modelo.

### 3.1. Construcción del modelo

El modelo simulado en este trabajo es construido en un archivo batch, el cual es un archivo de texto sin formato que contiene las ordenes que se ejecutan en ANSYS de forma secuencial. La ventaja de utilizar el archivo batch en vez de la interfaz gráfica de ANSYS es que el batch permite tener más control sobre la construcción y la simulación. Utilizando esta ventaja, el modelo fue construido mediante variables, las cuales el usuario puede modificar a su conveniencia. El código comienza con la variable `STROUT='nombre'` seguido de un `/TITLE,nombre`. Esto nos da el nombre que tendrá la simulación, el cual aparecerá en la vista principal y como nombre para los archivos de salida generados por la simulación. El usuario puede escoger el tipo de análisis a realizar con `AnalysisType=var` donde `var` es un número que puede tomar valores de 1,2 o 3, especificando el tipo de análisis a realizar. Se puede escoger entre los siguientes tres análisis:

- 1 para realizar un análisis armónico.

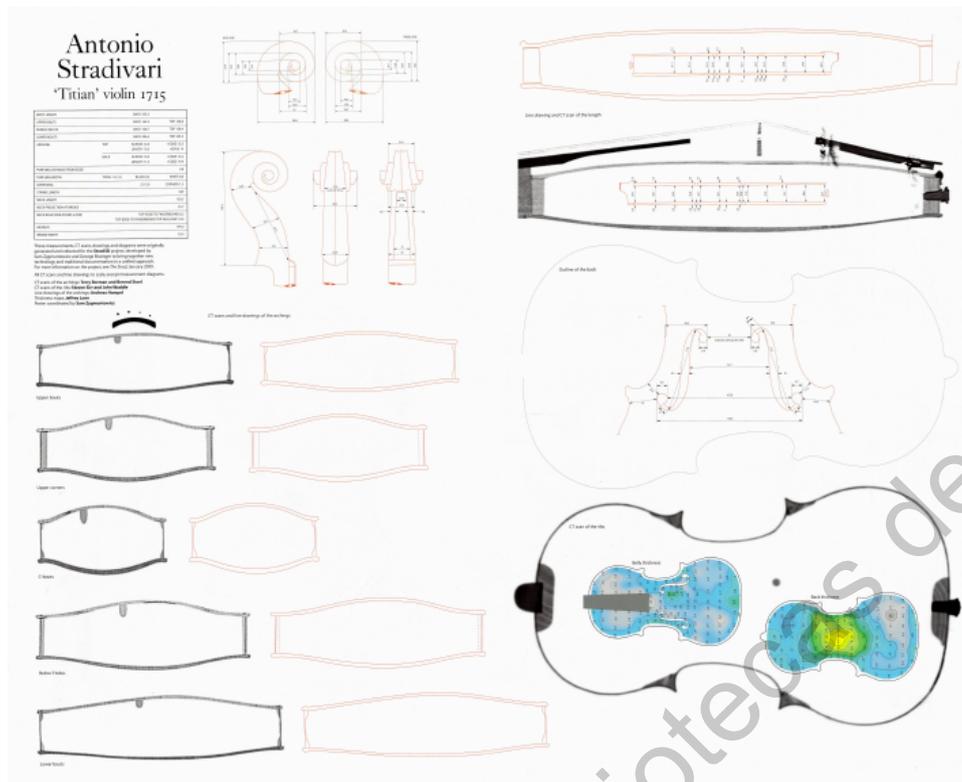


Figura 3.1: Diagrama del *Stradivarius Titian*, obtenido por *CT Scanning*. [Zygmuntowicz, 2010]

- 2 para un análisis transitorio.
- 3 para un análisis modal.

Cada una de estas opciones tiene parámetros que pueden ser modificados a conveniencia del usuario, como el tiempo, número de pasos, número de modos a analizar, etc. Posteriormente se observa una figura ASCII de un violín, con la finalidad de informar al usuario sobre la orientación del modelo, así como de los componentes que incluye (efes, puntal).

### 3.1.1. Variables

El código tiene la facilidad de que el usuario puede modificar el violín a su conveniencia, con esto el usuario puede escoger que partes se utilizarán en la simulación, las dimensiones de estas y su ubicación respecto al violín. Las variables se definen en las primeras líneas del código, para que tengan efecto en las secciones posteriores. Las variables son ordenadas de acuerdo a la parte del violín a la que pertenecen. Las primeras variables a modificar corresponden a la tapa:

```
TOPPLATE=1
thickTop=0.0025
archFactor=1
elemSizeTop=.01
```

donde `TOPPLATE` es la variable que indica si la tapa será utilizada en la simulación, es decir, con esta variable se decide si la tapa es mallada o no, con valores de 1 o 0 respectivamente. `thickTop` es la variable que define el grosor que tiene la tapa del violín, siendo en el Titian un promedio de 2.5 mm de grosor. `archFactor` define el factor de arco que tiene la bóveda. Incrementar o disminuir considerablemente esta variable puede tener efectos negativos en el programa, por lo cual tiene ciertos límites. `elemSizeTop` es el tamaño de elemento con el que la tapa será mallada.

Posteriormente a las variables de la tapa le siguen las corresponden al fondo del violín:

```
BACKPLATE=1
thickBack=0.0036
```

```
elemSizeMaple=.012
```

donde `BACKPLATE` es la variable que indica si se toma en cuenta en la simulación, `thickBack` es el grosor del fondo, que en el Titian es 3.6 mm, y `elemSizeMaple` es el tamaño de elemento del fondo y de algunas otras partes del modelo. Tanto `elemSizeTop` y `elemSizeMaple` son consideradas en la parte de mallado. A continuación, le siguen las variables de las costillas y del puntal:

```
RIBS=1
ribsHeight=0.032
ribsMatFactor=1
thickribsx=-0.0002
```

```
SOUNDPOST=1
xsp=0.0
ysp=0.0
spThick=0.003
```

Para las costillas, `RIBS` es la variable que condiciona el mallado de las costillas, `ribsHeight` es la altura de las costillas y `thickribsx` el grosor de estas. Para el puntal, `SOUNDPOST` es la variable condicionante para el mallado, `xsp`, `ysp` son las distancias que el puntal se mueve en  $x$  y  $y$  de su posición original y `spThick` es el diámetro que tiene el puntal.

Después de estas se encuentran las variables que controlan la barra y las efes:

```
BASSBAR=1
heightFactor=1
thicknessBar=.0057
xbar=0
yhump=0
```

```
FHOLES=1
xfhole=0
yfhole=0
Fangle=0
```

En la barra, `BASSBAR` es la variable condicionante para el mallado, `heightFactor` es el factor de altura donde se encuentra la barra, `thicknessBar` es el grosor de la barra, `xbar` la distancia en  $x$  del centro a la barra y `yhump` la distancia que se mueve en el eje  $y$ . Para las efes `FHOLES` es la condicionante para crear las efes, `xfhole`, `yfhole` son las distancias que las efes se moverán de su posición original y `Fangle` es el ángulo en el que se rotan las efes. Después se muestran las variables del puente

```
BRIDGE=1
ybridge=0
ANCHOPUENTE=.0015
pierna=0.0145
pata=0.012
rodilla=0.009
lonja=0.005
cintura=0.0105
dorso=0.0215
femur=0.004
ancho=0.002
cuello=0.005
arco=0.001
corazon=0.018
radio=0.006
abdomen=0.0215
hombro=0.0035
```

donde `BRIDGE` es la condicionante y `ybridge` la posición en el eje  $y$  del puente. EL resto de las variables corresponden a las dimensiones de las partes que componen al puente, las cuales son explicadas en la parte referente al Puente.

### 3.1.2. Dibujando el modelo

Una vez que se han definido las variables del modelo, ANSYS empieza a dibujar con los siguientes comandos:

```
/FILNAME,STROUT
/UNITS,SI
/PREP7
*DO,KARI,1,1
```

El comando `/FILNAME,STROUT` le indica a ANSYS el nombre de la simulación que se está ejecutando, el cual es definido anteriormente con la variable `STROUT`. `/UNITS,SI` sirve para especificar al programa que sistema de unidades es utilizado, en este caso es el sistema internacional de unidades (SI). `/PREP7` es el comando que comienza con la etapa de preproceso. En esta etapa el modelo tridimensional es creado y posteriormente mallado. Con el `*DO,KARI,1,1` se inicia un ciclo, el cual es posible moverlo a lo largo del código si se requiere modificar alguna parte y el ciclo es cerrado utilizando `*CYCLE` ignorando todas las instrucciones fuera de ambos.

Después de definir las variables y utilizar `/PREP7`, el programa comienza a dibujar el violín. Dibujar en ANSYS desde el código fuente requiere el uso de varios comandos para añadir, modificar o eliminar puntos, líneas, áreas y volúmenes. En la parte de construcción el código empieza con la tapa del violín.

#### Tapa y fondo

Para dibujar la tapa y el fondo fue necesario dividir la forma del violín en varias secciones, tomando como referencia los lóbulos del violín mostrados en la figura 2.4, dando como resultado la tapa de la figura 3.2. El violín fue seccionado de esta manera debido a las limitaciones impuestas por los comandos de ANSYS sobre la cantidad de puntos y líneas sobre los que puede operar. La construcción comienza colocando los puntos del contorno de la tapa. Para colocar los puntos en ANSYS, se utiliza el comando `K`, de *Keypoint* bajo la siguiente estructura:

```
K,#punto,Xpos,Ypos,Zpos
```

donde `#punto` indica el número de punto y `Xpos`, `Ypos`, `Zpos` son las posiciones  $x, y, z$  en el que se encuentra dicho punto en coordenadas cartesianas. Para construir el contorno de la tapa se necesitaron 32 puntos, los cuales posteriormente son unidos utilizando *splines*, que ajustan una línea entre un conjunto de puntos. Esto se hace con el comando

```
BSPLINE,K1,K2,...,K6
```

donde los números `$K1,K2,...,K6$` son los puntos a unir. Este comando solo acepta seis puntos, por lo que fue necesario utilizarlo seis veces para cerrar el contorno de la caja. Para construir la bóveda de la tapa son utilizadas curvas de nivel a diferentes alturas, dibújandolas de afuera hacia adentro desde el contorno externo. Para esto, son graficados catorce puntos que servirán de guía para construir las curvas de nivel, de los cuales siete se dibujan en la unión de la  $\zeta$  con el lóbulo superior y los otros siete en la unión de la  $\zeta$  con el lóbulo inferior ( ver figura 3.2). Estos puntos son conectados por splines, que van desde de la parte superior a la inferior, creando siete líneas que servirán de base para crear el resto de las curvas de nivel. Los puntos de las secciones superior e inferior son conectados por líneas rectas utilizando el comando.

```
L,K1,K2
```

Las demás curvas de nivel son dibujadas de una manera similar a la utilizada en el contorno, quedando como resultado tres curvas de nivel por cada sección. Las áreas son creadas utilizando por lo menos tres líneas que conecten entre sí mediante el comando:

```
AL,L1,L2,L3,L4,...
```

Donde `L1,...,L4,...` son las líneas en las que se dibuja el área. Posteriormente son convertidas en volúmenes, utilizando el comando:

```
VEXT,A1,,,,thickTop
```

Donde `A1` es el número de área y `thickTop` es el grosor de la tapa, definido en la sección de variables. El resultado final de la tapa se muestra en la figura 3.2. Estos comandos son utilizados en múltiples

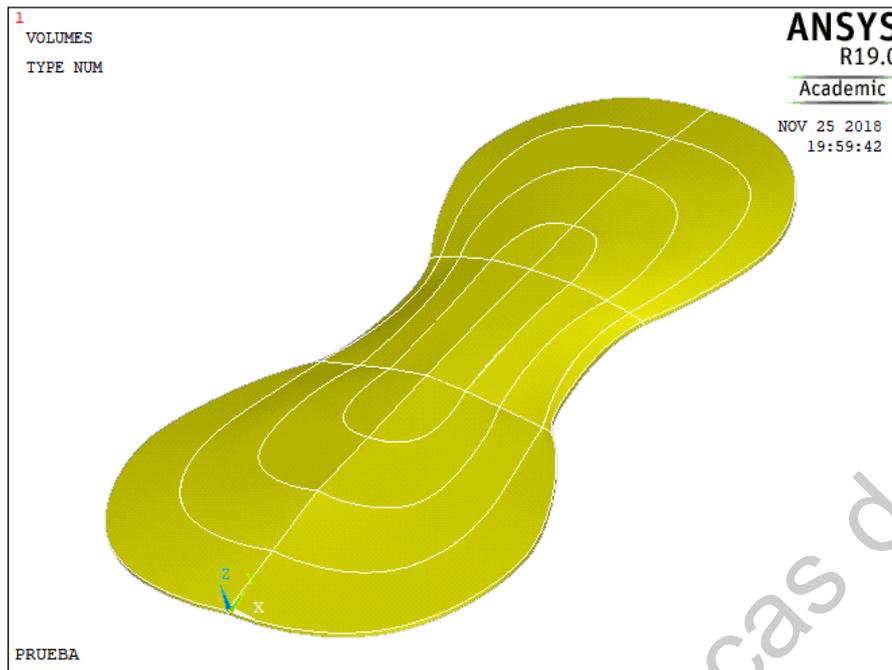


Figura 3.2: Tapa del violín en ANSYS. *Cortesía de ANSYS, Inc*

ocasiones para la construcción del resto del modelo.

El fondo fue creado de la misma manera que la tapa, usando las mismas coordenadas  $x, y$ , pero utilizando diferentes coordenadas  $z$  para crear la bóveda del fondo debido a que esta tiene una curvatura diferente a la bóveda de la tapa. El fondo es extruido hacia abajo en una distancia `thickBack`, que es el grosor del fondo.

### 3.1.3. Costillas

Las costillas son construidas utilizando el contorno de la tapa como guía para trazar otro igual a 1 mm de distancia, utilizando el mismo procedimiento para dibujar el contorno de la tapa. Una vez dibujado, se crean las áreas entre el contorno de la tapa y este nuevo contorno, las cuales son posteriormente extruidas hacia abajo una distancia `ribsHeight`, creando las costillas de la caja de resonancia.

### 3.1.4. Puntal

El puntal es construido de tal forma que es posible moverlo de su posición original en el violín. Para esto es usado `LOCAL`, que es un comando que define un sistema coordenado local, es decir, mueve el origen del sistema coordenado a un punto  $x, y, z$  del sistema original, lo que facilita la construcción de ciertas partes. Este comando sigue la siguiente estructura:

```
LOCAL, KCN, KCS, X, Y, Z, THXY, THYZ, THZX, PAR1, PAR2
```

Donde KCN es un número arbitrario mayor a 10 para identificar el cambio de coordenadas, KCS es el tipo de coordenadas (0 para cartesianas, 1 para cilíndricas, entre otras), X, Y, Z son las nuevas coordenadas en sus respectivos ejes, THXY, THYZ, THZX son los ángulos entre dichos ejes y las últimas dos variables son comandos para coordenadas cilíndricas que no son necesarias en este trabajo. Las configuraciones de este comando para el puntal son las siguientes:

```
LOCAL, 21, 0, 0.019+xsp, 0.143+ysp, 0.008*archFactor, 0, 0
```

Lo cual nos identifica el cambio de coordenadas del puntal como 21, en un sistema coordenado cartesiano. El puntal se encuentra a una distancia de 1.9 cm del origen en  $x$  y a 14.3 cm del origen en  $y$ , sin embargo, con las variables `xsp` y `ysp` uno puede mover el origen coordenado de esta posición. `0.008*archFactor` nos mueve en el eje  $z$  donde `archfactor` es el factor de arco o de curvatura de la bóveda del violín. Después

de definir los parámetros de LOCAL, este se activa con el comando WPCSYS, y el puntal se construye en forma de hexaedro utilizando el siguiente comando

```
BLOCK,-.5*spThick,.5*spThick,-.5*spThick,.5*spThick,-ribsHeight-thickBack-thickTop
-.020*archFactor,0
```

el cual crea un bloque con las dimensiones que tiene el puntal, con un diámetro de `spThick` y una altura definida en función de la altura de las costillas y los grosores de la tapa y el fondo. Se construye un puntal hexaédrico en vez de uno cilíndrico debido a que al momento de realizar el mallado con un puntal cilíndrico, este fue poco óptimo, utilizando demasiados elementos o en ocasiones el mallado fallaba y el programa terminaba. Para finalizar el creado del puntal, se utiliza el comando:

```
CSYS,0
```

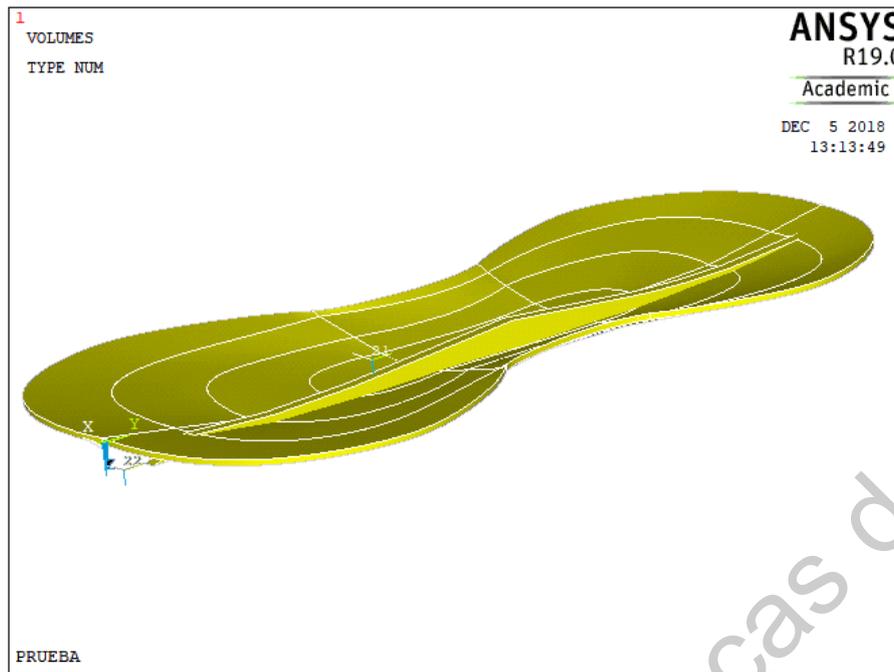
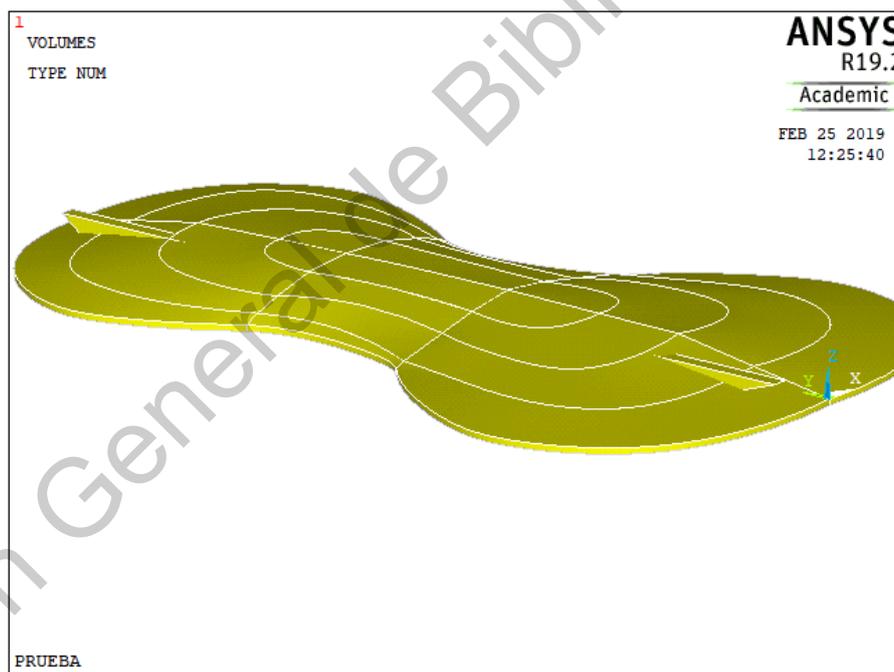
Este comando regresa el origen del sistema coordenado a su posición original antes de ser movido con el comando LOCAL, en este caso al punto 0, 0, 0.

### 3.1.5. Barra armónica

La barra fue la parte más complicada de crear, debido a que en la parte inferior se tiene que adaptar a la forma bóveda de la tapa y en la parte superior tiene una forma gaussiana suave similar a la de una colina. La barra se extiende a lo largo de toda la tapa, yendo de casi un extremo al otro. La construcción de la barra comienza utilizando el comando LOCAL. El origen está colocado en la posición  $x=xbar-.0123$ ,  $y=0$ ,  $z=0.0085$ , de tal manera que la posición  $z$  queda a la altura del punto más alto de la bóveda de la tapa. Posteriormente se traza una línea recta que recorre a lo largo del espesor de la tapa, cuyas puntas están casi en los extremos superior e inferior del violín. Luego, mediante splines, se crea la curva gaussiana de la parte superior. Para hacer la selección de las líneas que crean el área de la barra, en vez de seleccionarlas utilizando el número de línea correspondiente, se utiliza una selección por coordenadas, ahorrando tiempo en la creación de áreas y evitando problemas en la identificación de líneas que ocasiona la manera en la que ANSYS numera las entidades. La selección de líneas por coordenadas se hace con el comando LSEL, que funciona de la siguiente manera.

```
LSEL, Type, LOC, Comp, VMIN, VMAX
```

donde `Type` determina la acción a realizar por el comando. esto es que selecciona, deselecciona, añade o vuelve a seleccionar, utilizando S (select), U (unselect), A (add), R (reselect), respectivamente. `LOC` restringe la selección a solo uno de los tres ejes coordenados. El eje donde se trabaja es seleccionado con `Comp` cuyas entradas posibles son `x`, `y` o `z`. los parámetros `VMIN` y `VMAX` son los rangos mínimos y máximos de donde se hará la selección en el eje previamente seleccionado. En `Item` también se pueden utilizar `ALL`, que selecciona todas las entidades, `NONE` que deselecciona todo, o `INVE` que selecciona el inverso, sin embargo, para utilizar estos comandos se tiene que definir antes un LSEL que defina algún conjunto de líneas. La selección por coordenadas no solo está limitada a líneas, también se puede aplicar a puntos (KSEL), áreas (ASEL), o volúmenes (VSEL). Estos comandos funcionan de manera similar a LSEL.

Figura 3.4: Barra del modelo. *Cortesía de ANSYS, Inc*Figura 3.3: Barra del modelo. Los picos sobresalientes son eliminados en procesos posteriores *Cortesía de ANSYS, Inc*

Utilizando el comando LSEL, se seleccionan las líneas que se encuentren en el eje  $x$ , entre  $xbar+.0001$  y  $xbar-.0001$ . Una vez seleccionadas se crea el área entre estas líneas y con ASEL se selecciona esta área para ser extruida y crear un volumen, el cual atraviesa la tapa como se observa en la figura 3.3. Los picos que sobresalen por el lado superior de la tapa serán posteriormente eliminados con un comando que es explicado en un apartado posterior. La barra finalizada se muestra en la figura 3.4, ocultando el fondo y las costillas para que esta sea visible.

### 3.1.6. Puente

El puente, a diferencia del resto de las partes del modelo, no está basado en el *Titian*, sino que fue construido basándose en un puente genérico, el cual es mostrado en la figura 3.5. Las medidas de este fueron obtenidas dibujando el contorno de un puente en una hoja cuadrículada, midiendo sus dimensiones con una regla, sobre el trazo, se dibujaron puntos guía que sirven como base para la construcción del modelo. Durante este proceso se cambió la geometría del puente para optimizar su construcción, reemplazando muchas de las formas curvas que tiene por unas más rectas (como se muestra en la figura 3.6), con el propósito de utilizar menos puntos y líneas para su construcción, utilizar menos elementos en el mallado y evitar errores al momento de mallarlo. El puente es construido utilizando diferentes variables que tienen nombres de partes del cuerpo humano. Cada una de estas variables representa una medida para cada parte del puente. Las medidas para cada parte son:



Figura 3.5: Puente del violín

```

ANCHOPUENTE=.0015
pierna=0.0145
pata=0.012
rodilla=0.009
lonja=0.005
cintura=0.0105
dorso=0.0215
femur=0.004
ancho=0.002
cuello=0.005
arco=0.001
corazon=0.018
radio=0.006
abdomen=0.0215
hombro=0.0035

```

Para iniciar con la creación del puente, es necesario definir el origen de las coordenadas con `LOCAL`, colocándolo en la parte media de la tapa, a la altura correspondiente del puente en el violín. Después se dibujan los puntos necesarios para crear la mitad derecha del puente. A diferencia de otras partes del modelo, las áreas se crean utilizando puntos en vez de líneas. Esto ahorra tiempo y esfuerzo en la creación de las áreas utilizando el siguiente comando

```
A,K1,...,K18
```

donde `K1...K18` son los puntos entre los cuales se crearán las áreas. Estos puntos tienen que ser coplanarios y son definidos en el comando ya sea en sentido horario u anti horario, llevando un orden de tal manera que ANSYS pueda crear el área. Utilizando esta técnica, para construir la mitad derecha del puente fueron creadas cuatro áreas como se muestra en la figura 3.6:

Posteriormente estas áreas son seleccionadas con `ASEL` y con el comando

```
AADD,ALL
```

las áreas son pegadas, uniéndolas todas bajo una sola. El área resultante de la unión es reflejada en el eje `z` utilizando el siguiente comando:

```
ARSYM,X,ALL
```

Este comando realiza un efecto espejo en el eje `x` del área seleccionada, para crear el área del lado izquierdo. Una vez que se tienen el área derecha e izquierda del puente, estas son unidas utilizando otra vez `AADD`, para crear una única área. Posteriormente esta área es extruida utilizando `VEXT` con un ancho definido por `ANCHOPUENTE`, terminando con la construcción del puente. Este se muestra terminado en la figura 3.8 junto con el resto del violín.

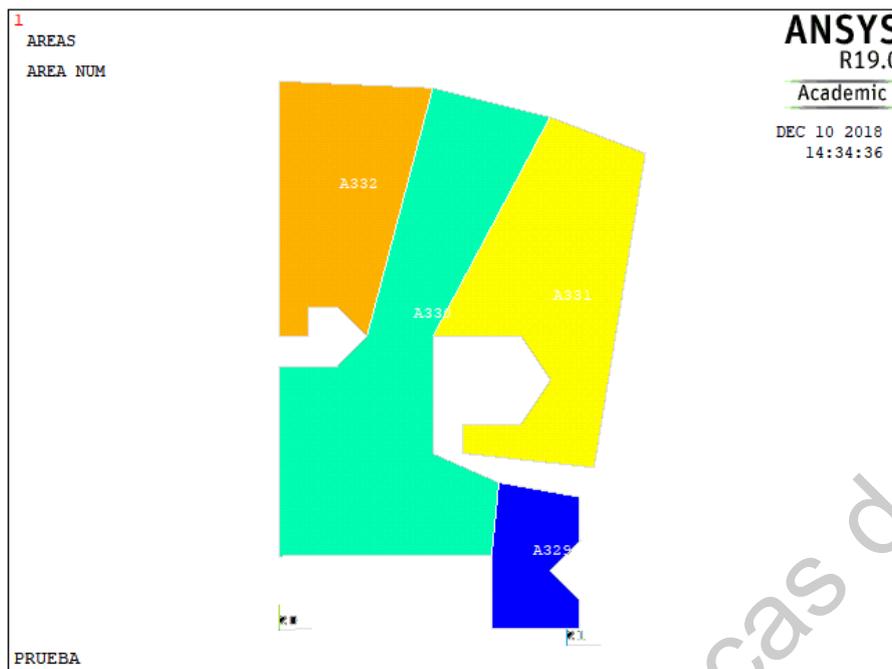


Figura 3.6: Mitad derecha del puente. *Cortesía de ANSYS, Inc*

### 3.1.7. Eliminación de los defectos de la barra

Una vez terminado el puente se procede a quitar los defectos producidos al construir la barra. Para eliminar los picos de la barra que sobresalen sobre la tapa primero se utiliza el comando `VOVLAP`. Este comando separa los volúmenes que se traslapan, haciéndolos nuevos volúmenes independientes. Una vez separados los volúmenes de los picos del volumen de la barra, utilizando `VSEL` los picos son seleccionados y posteriormente eliminados con el comando `VDELE`. Una vez finalizado este procedimiento queda una tapa libre de imperfecciones (mostrada en la figura 3.4), y se prosigue a perforar las efes del violín.

### 3.1.8. Efes

Las efes son la última parte que se construye en el modelo. Las efes fueron construidas basándose en las medidas originales de las efes del *Titian*, extraídas del diagrama de la figura 3.7

La construcción de las efes comienza con un condicional `IF`, controlado por la variable `FHOLES`. De esta manera el usuario puede decidir si las efes son creadas o no. Para facilitar la construcción de las efes primero se crea la efe del lado derecho. Una vez construida se refleja para crear la del lado izquierdo.

La construcción de la efe derecha comienza definiendo un `LOCAL`:

```
LOCAL,20,0.1611,0.0393+xfhole,0.1611+yfhole,0.07,-3.5-Fangle,0,0
```

El origen se encuentra en el centro de la efe en el eje  $x$ , a la altura del puente en el eje  $y$ , flotando a 7 cm sobre el modelo en el eje  $z$ . Con la variable `Fangle` se controla el ángulo de inclinación de la efe respecto al plano  $xy$ .

Después se dibujan un conjunto de puntos guía, los cuales son unidos con *splines* para dar forma a la efe. Utilizando `LSEL` estas líneas son seleccionadas y se crea un área entre ellas, la cual es extruida 8 cm hacia abajo de tal manera que la efe traspasa la tapa sin tocar el fondo. Ya construida la efe derecha, se utiliza el siguiente comando para reflejar la efe izquierda:

```
VSYMM,x,#VOL
```

donde `VSYMM` es el comando para crear simetrías de volúmenes,  $x$  es el eje donde es reflejado el volumen y `#NVOL` es el número de volumen a reflejar. Ya que están construidas ambas efes, se utiliza el siguiente comando para sustraerlas del modelo, perforándolas en la tapa:

```
VSBV,ALL,#NVOL
```

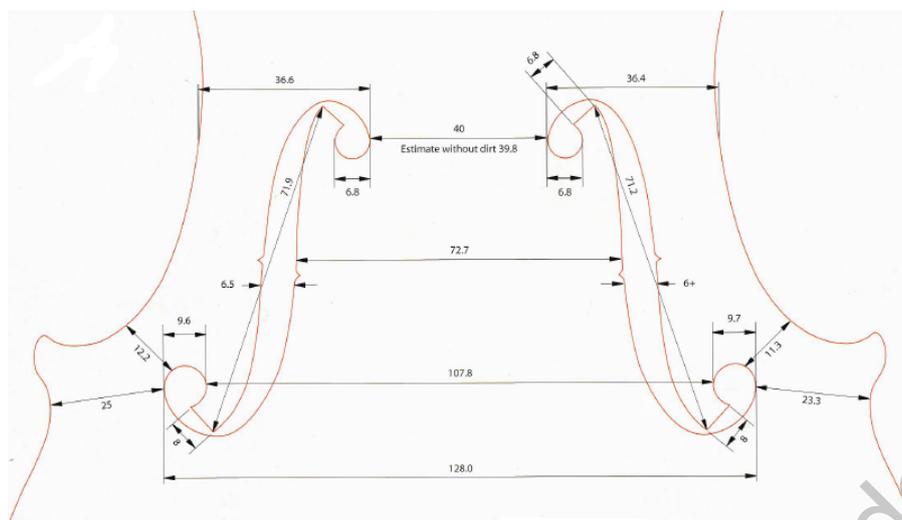


Figura 3.7: Medidas de las efes [Zygmuntowicz, 2010]

Con este comando, ANSYS resta el volumen de las efes a todos los volúmenes (especificado con ALL) perforando las efes. El modelo finalizado se muestra en la figura 3.8. El siguiente paso es el mallado del modelo.

## 3.2. Mallado

Una vez que el modelo está terminado, la siguiente etapa a realizar es el mallado del modelo. El mallado se realiza de manera independiente para cada parte del modelo con excepción de las efes. En la subsección de Variables se ha descrito que el mallado está estructurado con condicionantes IF, con el propósito de que el usuario aplique el mallado solamente las partes de interés (p.ej. solo la tapa con el puente), mientras que el resto de las partes son ignoradas para su mallado sin aparecer en el modelo. La primera parte del violín que se malla es la tapa. El mallado es realizado de la siguiente manera:

```
*IF, TOPPLATE, EQ, 1, THEN
MAT, 1
ET, 1, SOLID92
ESIZE, elemSizeTop
VSEL, S, LOC, Z, -thickTop, 0.01*archFactor
VMESH, ALL
*ENDIF
```

En la primera línea tenemos el condicional IF, controlado por la variable TOPPLATE. Posteriormente se indica que esta parte a malla utilizará las propiedades del material 1 con MAT, 1. El material 1 corresponde a las propiedades de la madera de picea. El comando ET selecciona un tipo de elemento por material. En este caso, ET, 1, SOLID92 especifica que para el material 1 se utilizará el tipo de elemento SOLID92, que define la forma de los elementos utilizados por el material 1. Posteriormente nos encontramos con ESIZE, que define el tamaño del elemento a utilizar, el cual es controlado por la variable elemSizeTop. Luego tenemos una selección de volúmenes por coordenadas utilizando VSEL, la cual selecciona solo los volúmenes de la parte de interés, en este caso la tapa. VMESH aplica el mallado a los volúmenes seleccionados y \*ENDIF cierra el condicional.

Este proceso es similar para las demás partes del violín. El mallado se aplica posteriormente al puntal, con el material 1 y al puente, costillas, y fondo con el material 2, que corresponde a las propiedades de la madera de maple. A las partes que tienen la madera de picea se les asignó el color amarillo y a las partes con madera de maple se les ha asignado el color naranja. El modelo mallado se muestra en la figura 3.9

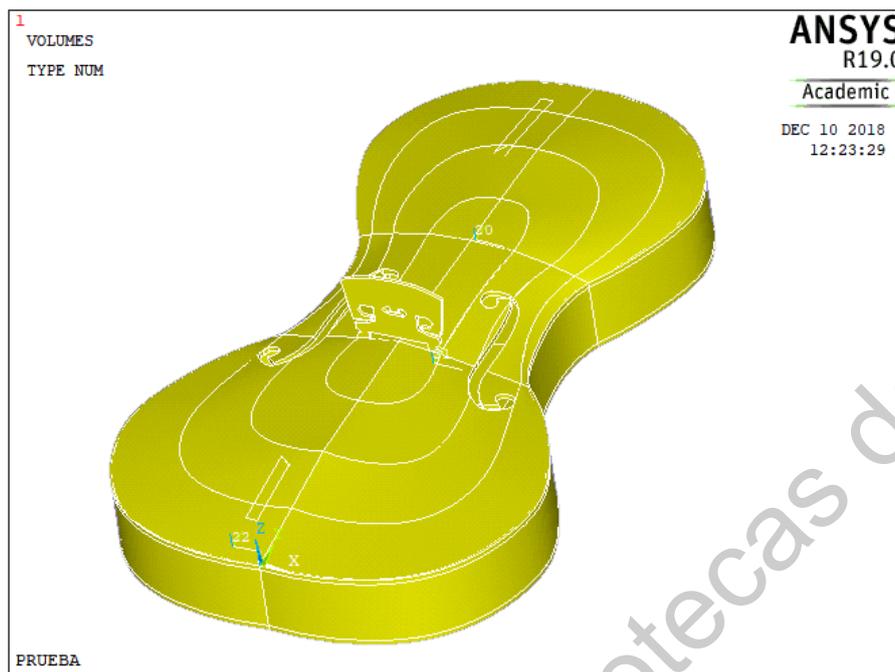


Figura 3.8: Modelo finalizado. *Cortesía de ANSYS, Inc*



Figura 3.9: Modelo mallado. *Cortesía de ANSYS, Inc*

### 3.3. Correr el batch en ANSYS

El batch fue diseñado para correr en el programa *Mechanical APDL* de ANSYS. Esto se hace de una manera sencilla, el usuario simplemente tiene que iniciar *Mechanical APDL*, abrir en la parte superior izquierda la pestaña de *File*, luego en *Read Input From* y ubicar el archivo en la pestaña que se abre. Una vez seleccionado el archivo, ANSYS comienza a dibujar el modelo, mallarlo y a realizar la solución del análisis solicitado al inicio del batch, mostrando los resultados ya sea en la interfaz gráfica de ANSYS o bien, guardando datos en un archivo de texto para realizar su análisis en otros programas.

### 3.4. Análisis realizados

En esta tesis fue necesario realizar dos tipos de análisis, uno modal y uno transitorio. Para poder realizar ambos análisis, solo fue necesario cambiar la variable **AnalysisType** con 0 para el análisis modal y 2 para el transitorio. Ambos análisis fueron hechos utilizando todas las partes de la caja del violín.

#### 3.4.1. Modal

En el análisis modal es posible ver las líneas nodales de los modos normales. En este trabajo se realizó un análisis modal para 20 modos. Los modos pueden ser visualizados desde la interfaz gráfica de ANSYS. Para visualizarlos, una vez que se termina de correr el batch, en la pestaña izquierda se expande la opción *General Postproc*. Después se busca la opción *Results Viewer*, la cual abrirá una ventana como se muestra en la figura 3.10:

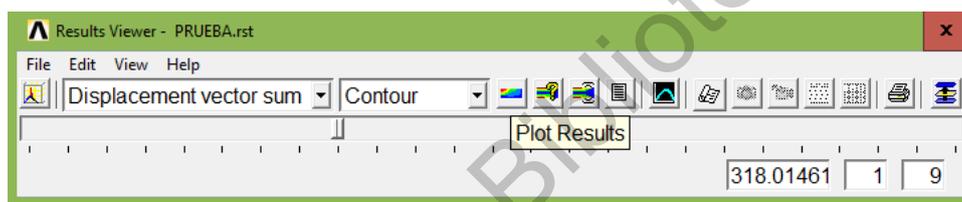


Figura 3.10: Ventana de análisis modal. *Cortesía de ANSYS, Inc*

En la ventana se muestra una pestaña en la parte superior izquierda con la etiqueta *Choose a result item*, se abre la pestaña y se selecciona la opción *DOF Solution*, posteriormente se selecciona *Displacement Vector Sum*. Para poder ver los modos normales de vibración se da clic en el recuadro *Plot Results*, el cual está al lado derecho de la pestaña *Contour*. El movimiento resultante de los modos es representado de menor o nulo a mayor con colores que van del azul al rojo respectivamente, como se muestra en las figuras 4.2 y 4.1. La barra que aparece en la ventana en la parte inferior al recorrerse controla el modo que se muestra en la interfaz. Para poder identificar los modos firma se compararon las líneas nodales del modelo con las mostradas en la figura 2.5, los cuales aparecen en la sección de Resultados.

#### 3.4.2. Transitorio

El análisis transitorio se realizó con 1000 pasos, siendo el más pesado de los análisis en cuanto a procesamiento. En este análisis la fuerza de impacto con la que es medida la movilidad del violín fue colocada en uno de los costados del puente. Para esto, es dibujado un punto en el costado izquierdo del puente, definido como K,2001, esto para fijar la fuerza en un punto. Después la fuerza es recreada con los comandos:

```
*GET,Nforcex,KP,2001,LOC,X
*GET,NforceY,KP,2001,LOC,Y
*GET,Nforcez,KP,2001,LOC,Z
KPexcitacion=NODE(Nforcex,nforceY,Nforcez)
F,KPexcitacion,FX,1
```

donde el comando *\*GET* recupera un valor y lo guarda como un escalar para *Nforcex*, *NforceY* y *Nforcez* para el punto donde se aplica la fuerza. Después es definida una variable llamada *KPexcitacion* la cual está definida con el comando *NODE*, seguida de las variables *Nforcexyz*. Por ultimo con el comando *F,KPexcitacion*, ANSYS define una fuerza de carga con el valor *KPexcitacion*.

Una vez que termina de correr el batch, ANSYS muestra tres gráficas y crea un archivo de datos que es guardado en la carpeta raíz del usuario, es decir en `C:\Users\usuario` llevando por nombre `datos.csv`. Estos datos son analizados utilizando *AnELyzer*. Para que AnELyzer pueda leer estos datos el archivo tiene que estar en la misma carpeta que el archivo ejecutable. Como AnELyzer está escrito en el lenguaje de *Scilab*, este tiene que cargarse desde la interfaz de *Scilab*, compilando AnELyzer con la tecla F5. Una vez que se compila, aparece el entorno gráfico de AnELyzer. Este contiene múltiples botones en los que el usuario puede insertar diversos archivos de datos para realizar los análisis como se explica en la sección AnELyzer, del capítulo de Fundamentos. Para obtener la movilidad del modelo, en AnELyzer se da clic en el botón *avg TF* del recuadro verde mostrado en la figura 2.6, el cual lee el archivo de datos `datos000.csv` y abre una ventana nueva en la cual aparecen las dos gráficas de magnitud y fase. Para guardar la gráfica como una imagen, se abre la pestaña *File* y luego en *Export to*, la cual abrirá una nueva ventana en la cual el usuario puede especificar el nombre del archivo, el directorio donde se guardará y el tipo de archivo. Al hacer clic en *Guardar* la gráfica quedará guardada en una imagen como la que se muestra en la figura 4.4 en la sección de Resultados.

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

## Capítulo 4

# Resultados

Para poder identificar los modos firma del violín simulado, un análisis modal ha sido realizado en ANSYS utilizando los métodos descritos en la sección de metodología. Una vez realizado el análisis modal las líneas nodales del modelo fueron comparadas con las mostradas en la figura 2.5, para poder identificar los modos firma. En el análisis modal realizado, solo fueron encontrados tres de los cinco modos firma, cuyas frecuencias son mostradas en la tabla 4.1.

Modo	Frecuencia (Hz)
$B_1^-$	309
$CBR$	318
$B_1^+$	418

Cuadro 4.1: modos normales de vibración

Las líneas nodales para cada uno de estos modos son mostradas en las figuras 4.2 para el modo  $CBR$ , 4.1 para el modo  $B_1^-$  y 4.3 para el modo  $B_1^+$ . Los colores mostrados en las figuras representan el movimiento del violín, donde las tonalidades azules marcan las zonas donde los desplazamientos son menores o nulos y las rojas donde hay mayor desplazamiento en el modelo.

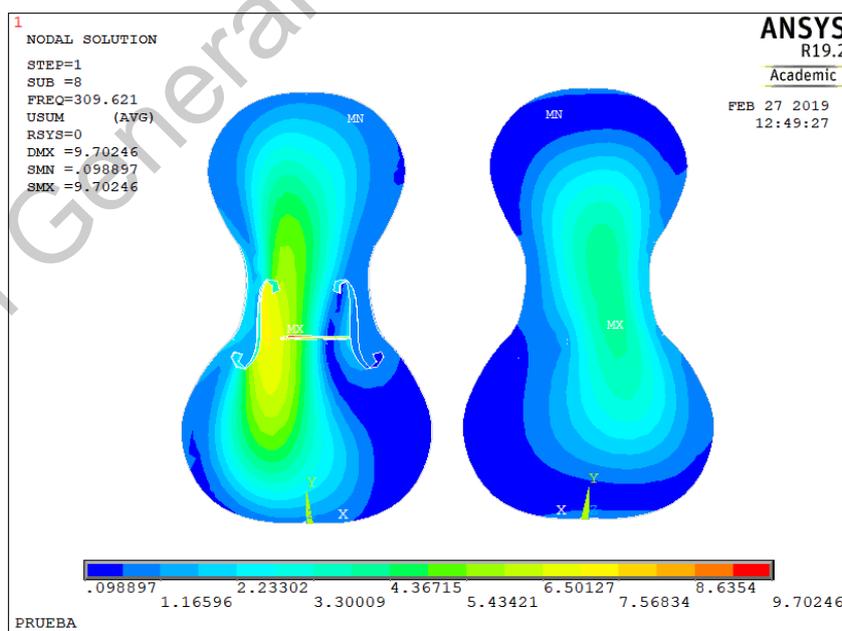


Figura 4.1:  $B_1^-$ . Cortesía de ANSYS.

La figura 4.1 muestra el modo  $B_1^-$ . En la tapa del violín es observado como el desplazamiento se encuentra

en la parte central del violín, mientras que en las orillas se encuentran las líneas nodales, mostrando el primero de los modos de “costuras de béisbol”.

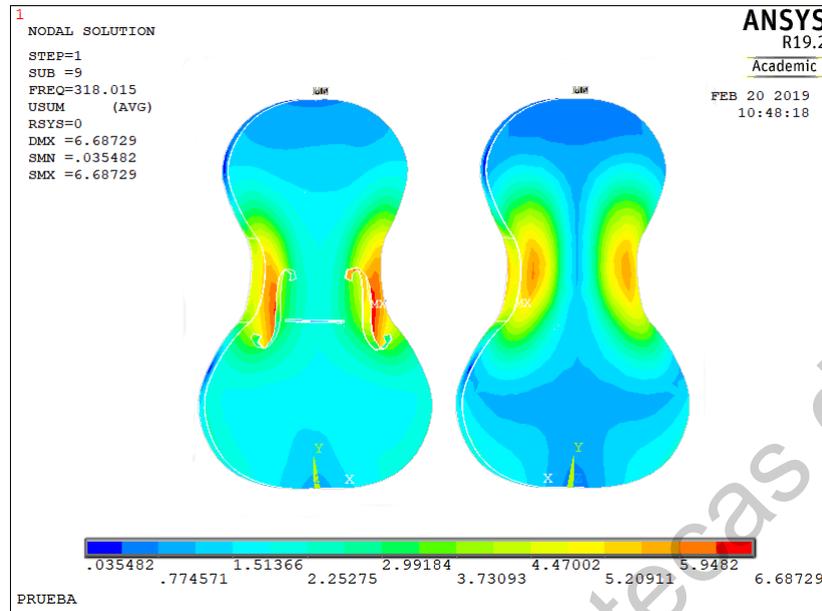


Figura 4.2:  $CBR$ . Cortesía de ANSYS.

El modo  $CBR$  corresponde a la figura 4.2, en la cual es apreciable como los desplazamientos máximos son concentrados en las “C” del violín. En el fondo, las líneas nodales muestran la “doble daga” característica de este modo.

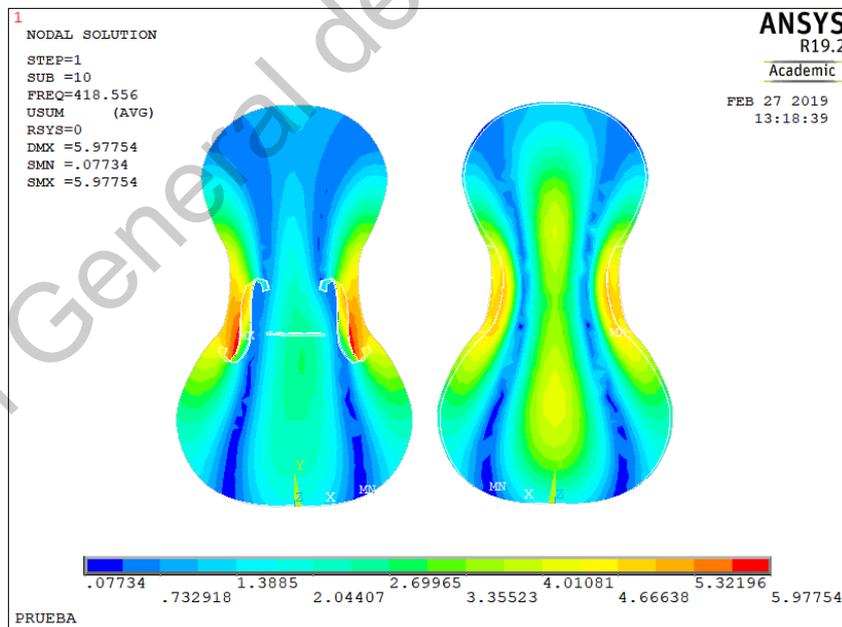


Figura 4.3:  $B_1^+$ . Cortesía de ANSYS.

En el modo  $B_1^+$ , mostrado en la figura 4.3, las líneas nodales son fuertemente apreciables tanto en la tapa como en el fondo, siendo el otro modo de “costura de béisbol” por la forma de las líneas. Los desplazamientos de la tapa son concentrados en las “C”, mientras que en el fondo se concentran en menor medida en las “C” y en el centro del fondo.

Para obtener la curva de movilidad del modelo simulado, los datos del análisis transitorio en ANSYS fueron introducidos en AnELyzer, obteniendo las gráficas de la figura 4.4. Esta figura está dividida en dos gráficas: en la gráfica superior es mostrada la magnitud en función de la frecuencia y en la inferior la fase en función de la frecuencia.

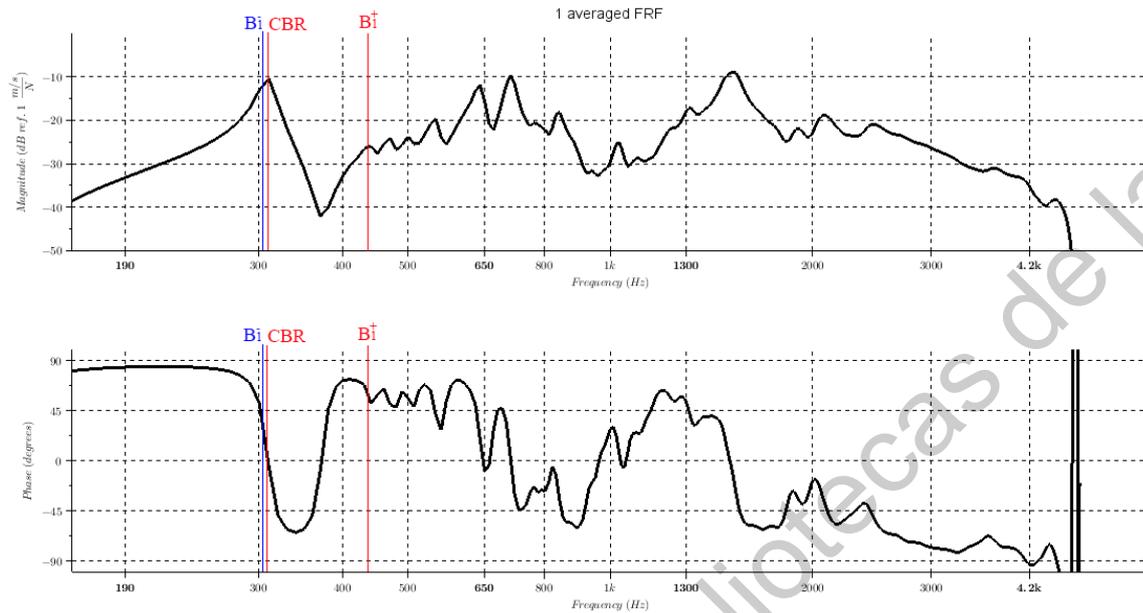


Figura 4.4: Movilidad del violín simulado.

La movilidad del modelo simulado en ANSYS (fig 4.4) fue comparada con resultados experimentales obtenidos y reportados por [Jansson, 1997] en un estudio donde obtiene la curva de movilidad de 25 violines de manera experimental. La figura 4.5 muestra la gráfica correspondiente a uno de los violines medidos en ese experimento.

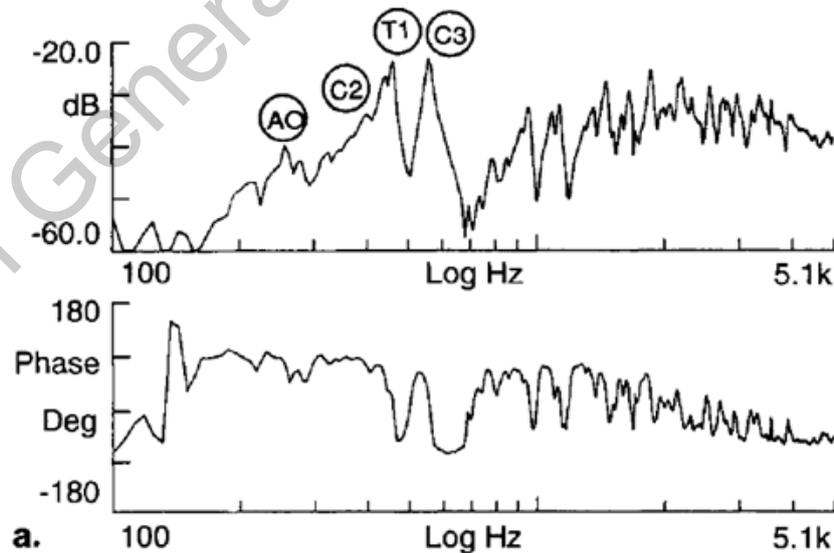


Figura 4.5: Movilidad obtenida de manera experimental. [Jansson, 1997]

En su trabajo, Jansson reporta cuatro modos firma para ese violín, respectivamente  $A_0$ ,  $B_1^-$  (mostrado en la gráfica como  $T1$ ),  $CBR$  (mostrado como  $C2$ ), y  $B_1^+$  ( $C3$ ) (figura 4.5). Jansson reportó las frecuencias

aproximadas de los picos mostrados en la gráfica, encontrando el pico  $A_0$  alrededor de los 250 Hz, el pico  $CBR$  a 400 Hz,  $B_1^-$  a 450 Hz, y  $B_1^+$  aproximadamente a 550 Hz. En los resultados obtenidos en la simulación, mostrados en la figura 4.4, solamente son encontrados los modos  $CBR$  y  $B_1^+$ , en las frecuencias reportadas en la tabla 4.1. Los picos fueron encontrados a diferentes frecuencias de las mencionadas en la sección de modos normales y de las reportadas por Jansson, estando bajos en frecuencia las cuales oscilan alrededor de los 80-130 Hz. La frecuencia en la que se encuentran los modos firma del modelo simulado se representa en la gráfica 4.4 con una línea roja con una etiqueta a cada modo correspondiente, con la excepción del modo  $B_1^-$  el cual es representado con una línea azul la frecuencia en la que debería estar el pico ya que por alguna razón, el modo  $B_1^-$  no aparece como pico en la gráfica de movilidad pero si se encuentra en el análisis modal como se muestra en la figura 4.1. También cabe destacar que no aparecen los modos  $A_0$  ni  $A_1$  en ninguno de los dos análisis ya que estos modos son producidos por el aire, el cual no es considerado en el modelo.

Además del modelo basado en el Titian fueron creados otros dos modelos con diferentes configuraciones, utilizando la versatilidad del batch para poder añadir o quitar elementos. Para el primer modelo, la barra y el puntal fueron removidos, mientras que para el segundo solamente fueron removidas los agujeros de las efes. Un análisis modal y uno transitorio fueron realizados para cada uno de estos modelos con el propósito de observar cómo cambian dichos análisis con los realizados en el modelo sin cambios. En el análisis modal, fueron encontrados los mismos tres modos firma  $B_1^+$ ,  $B_1^-$  y  $CBR$  con diferentes frecuencias, las cuales son mostradas en la tabla 4.2

Modelo	Modo $B_1^-$ (Hz)	Modo $CBR$ (Hz)	Modo $B_1^+$ (Hz)
Original (sin cambios)	309	318	418
Sin barra y puntal	315	319	418
Sin efes	330	344	436

Cuadro 4.2: modos firma para los diferentes modelos

La tabla 4.2 muestra que la frecuencia de los modos firma aumenta para los modelos modificados. Para el modelo sin barra ni puntal el aumento en frecuencia es ligero (diferencia de 1-6 Hz), mientras que para el modelo sin efes el aumento es bastante notorio (diferencia de 18-26 Hz), con respecto al modelo original. Este aumento en la frecuencia también es observado al graficar la movilidad después de realizar los análisis transitorios. En la figura 4.6 es mostrada la movilidad para los tres modelos, siendo en negro la movilidad para el modelo original, en azul la movilidad para el modelo sin barra ni puntal y en rojo la movilidad para el modelo sin efes.

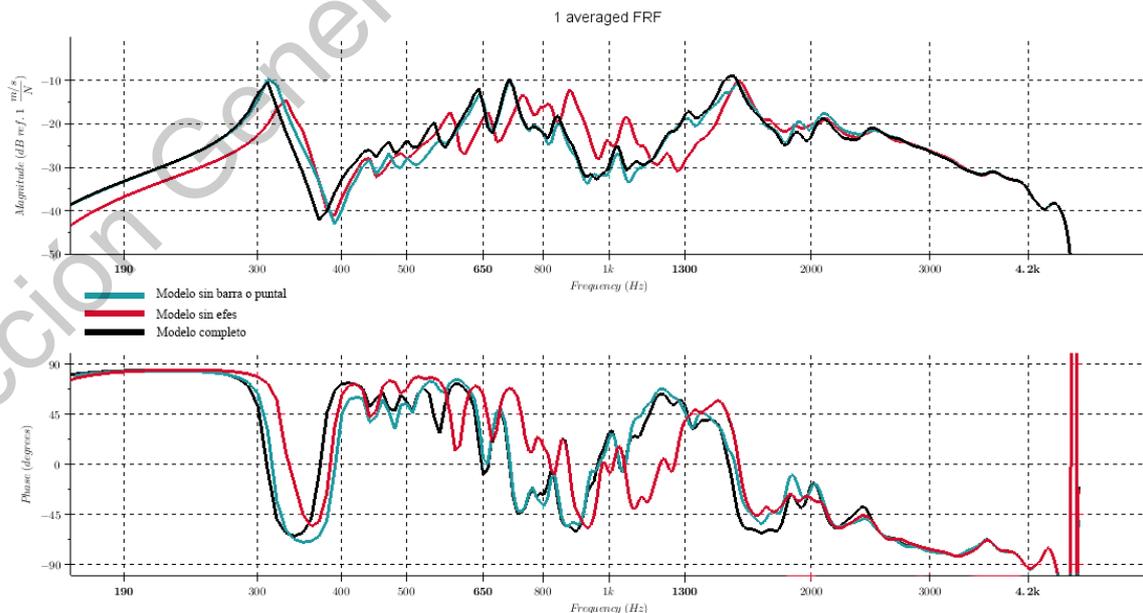


Figura 4.6: Movilidad del violín simulado con distintas configuraciones.

La gráfica de movilidad muestra el desplazamiento de frecuencias de ambos modelos con respecto al original, siendo más notorio este desplazamiento en el modelo sin efes (rojo). También se puede observar que para dicho modelo la magnitud es menor en comparación a los otros dos. El modelo sin barra ni puntal (azul) muestra bastantes similitudes con el modelo original (negro) tanto en magnitud como en frecuencia a excepción de la zona de los 400-600 Hz donde la magnitud es menor. Las curvas de los tres modelos son muy similares entre sí en la zona de alta frecuencia que va de los 2000 Hz en adelante.

En la gráfica de la fase las diferencias entre los tres modelos son más notorias, ejemplo de esto es en la zona de los 300-650 Hz mostrando cambios de fases distintas. Los modelos que muestran una mayor similitud en fase son el modelo original y el modelo sin barra ni puntal, mientras que el modelo con un mayor cambio es el rojo. Al igual que en la gráfica de movilidad, las curvas de los tres modelos son similares en el rango de alta frecuencia de los 2000 Hz en adelante.

A pesar de la diferencia de frecuencias y magnitudes, los tres modelos muestran un patrón similar en sus curvas, teniendo estas una forma muy parecida entre sí tanto en la movilidad como en la fase. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que el modelo original no reproduce al 100 % los resultados esperados para un violín, debido a que tienen que tomarse en cuenta más factores que pueden afectar la movilidad.

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

## Capítulo 5

# Discusiones

Los tres modos normales obtenidos por ANSYS corresponden a los modos firma  $CBR$ ,  $B_1^-$  y  $B_1^+$ . Los modos  $A_0$  y  $A_1$  no aparecen en el análisis modal debido a que estos modos son producidos por el aire, el cual no se toma en cuenta en la simulación. Las líneas nodales de los modos firma del modelo, mostradas en las figuras 4.2, 4.1 y 4.3 son similares a los de un violín real, mostradas en la figura 2.5, con ligeras variaciones, sobre todo en los modos de “costuras de béisbol”, cambiando las líneas nodales en la tapa para el modo  $B_1^+$  y en el fondo para el  $B_1^-$ . Aunque la forma nodal de los modos firma del violín simulado son similares con solo algunas pocas diferencias, las frecuencias en las que son encontrados estos modos son bajas comparadas con las frecuencias a las que se encuentran comúnmente estos modos en un violín real, con una diferencia de frecuencia que oscila entre los 80-130 Hz. En cuanto a la movilidad obtenida en la simulación (mostrada en la figura 4.4) son observados varios picos, dos de los cuales corresponden a los modos firma del violín:  $CBR$  y  $B_1^+$ . El modo  $B_1^-$  no aparece en el análisis transitorio, pero si aparece en el análisis modal, siendo mostrado con una línea azul el lugar donde debería de estar.

Al hacer simulaciones de dos diferentes modelos extra, es demostrado que el batch puede ser modificable sin ningún tipo de problemas en su ejecución, cumpliendo con el objetivo de crear un modelo para elemento finito con la capacidad de cambiar o eliminar las partes que lo conforman. Realizando la comparación de estos modelos con el original es observable que remover algunas partes del modelo cambia la frecuencia de los modos firma entre 6-26 Hz, observando que este incremento en frecuencia es alto para el modelo al cual le fue removido la efe que en el modelo al cual se le quito la barra y el puente. Al comparar la movilidad, el modelo sin efes muestra una magnitud menor que el resto de los modelos. A pesar de estas diferencias, las tres curvas muestran una forma similar. Estas comparaciones son un experimento interesante en el cual podemos observar la dependencia de los elementos del violín, encontrando como es que algunas partes del violín (como las efes) afectan de manera más directa que otras, demostrando la importancia que tienen las partes sobre la calidad del violín.

Las diferencias entre las líneas nodales, la baja frecuencia de los modos firma y la ausencia de uno de ellos en la gráfica de movilidad del modelo original están relacionadas con el hecho de que existe un margen de error en las medidas del modelo simulado y el violín real, así como la exclusión de otras partes como los bloques de construcción y las puntas. Otro factor que también afecta al comportamiento son las propiedades de la madera, siendo genéricas para la madera de píceas y maples utilizadas en el modelo, sin tomar en cuenta algún caso en particular. Esto es importante ya que la madera utilizada en la construcción de violines posee diferentes propiedades a las generales, debido a la calidad de la madera, los tratamientos utilizados para su secado y almacenamiento, la edad del instrumento, entre otras, lo que hace que cada violín tenga propiedades únicas y diferentes, siendo mejores en los violines antiguos. Debido a lo anterior, los resultados presentados en esta tesis son diferentes a los reportados de manera experimental y aunque no los reproducen de manera completa, presentan una buena aproximación a estos.

En trabajos futuros es posible mejorar este modelo de muchas maneras, agregando partes que no fueron tomadas en cuenta, así como optimizando el mallado para utilizar un número menor de elementos, los cuales pueden ser utilizados para modelar el aire y obtener los modos firma de aire  $A_0$  y  $A_1$  u otras partes del violín, También habría las propiedades mecánicas de la madera que se asemejen más a las del Titian o a las de cualquier otro instrumento en particular.

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

## Capítulo 6

# Conclusiones

La creación de modelos computacionales para entender un fenómeno que ocurren en la realidad es una técnica relativamente nueva que tiene un campo de aplicación bastante amplio en la investigación. En este trabajo se realizó un modelo tridimensional de un violín con la finalidad de ayudar a los luthiers a conocer el comportamiento de su instrumento incluso antes de que este sea construido. Los resultados del trabajo han sido satisfactorios, ya que ha sido posible crear el modelo de un violín para método de elemento finito cuyos resultados aceptables, además de cumplir con los otros objetivos de la tesis que consisten en realizar un modelo con la capacidad de modificar sus partes sin que el programa tenga errores en la compilación, además de que los resultados de estos modelos modificados también son aproximados a los resultados del modelo original y a los experimentales. Sin embargo, el modelo aún no logra aproximarse a los resultados de una manera muy precisa, por lo cual tiene que ser mejorado en muchos aspectos para que los resultados obtenidos sean mucho más aproximados a los reportados por otros autores, además, es posible optimizar en el aspecto de tiempo de ejecución o de elementos utilizados para la simulación.

Para realizar un trabajo como este en el cual una simulación por computadora funcione y arroje resultados comparables con los medidos de manera experimental es necesario mucho tiempo, paciencia y arduo trabajo tras la computadora. Es pesado en cuanto al nivel de conocimiento que se requiere para desarrollar un proyecto de simulación, es importante leer trabajos previos, aprender los lenguajes de programación necesarios, memorizar códigos, y en este caso, conocer como funcional el método del elemento finito. También es importante saber afrontar los obstáculos que surgen en este tipo de trabajos. Muchos problemas pueden aparecer, debido a la gran cantidad de factores involucrados en un fenómeno físico los cuales a menudo no pueden ser incluidos en una simulación de computadora, ya sea porque la cantidad de recursos computacionales que requieren es alta, su implementación es muy complicada o son factores que no se pueden controlar o simular.

Pero a pesar de las dificultades mencionadas anteriormente, las simulaciones por computadora y la física computacional son un recurso valioso en la investigación, siendo una alternativa para aquellos experimentos que son costosos, peligrosos, complicados de implementar o que son imposibles de medir de manera experimental. La física computacional además permite tener una aproximación al fenómeno físico, ofreciendo la oportunidad de observarlo desde diferentes ángulos, jugar con las variables, entender el fenómeno desde otra perspectiva, sin dejar de considerar que la física computacional es un puente entre la teoría y el experimento. Es por esto que realizar el análisis computacional va más allá de los colores del modelo, las gráficas y los infinitos archivos de datos, se requiere de mucha concentración y de mucho conocimiento previo para determinar qué es lo que se está viendo y sobre todo, la razón del por qué se comporta el fenómeno de esa manera.

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

# Anexos

En esta sección se muestra el batch completo del modelo del violín. Este batch se ejecuta desde la aplicación *Mechanical APDL* de *ANSYS Student* en la versión 19.0. El programa tarda alrededor de 1-2 minutos en correr un análisis modal y alrededor de 50 minutos en realizar un análisis transitorio en una computadora con las siguientes especificaciones:

- HP Pavillion Notebook (Modelo 2016)
- Windows 10 Home Single Language 64 bits
- Procesador AMD A9-9410 Radeon R5, 5 compute cores 2C+3G, 2.90 GHz
- Memoria RAM 12.0 GB
- AMD Radeon R5 Graphics, 500 MB VRAM

```
STROUT='PRUEBA'  
/TITLE,PRUEBA
```

```
AnalysisType=0
```

```
!2-->transient  
incTiempo=.1e-3  
tmax=100e-3
```

```
!1-->harmonic  
fi=200  
fo=4000  
divs=50  
damping=.002
```

```
!0--> modal  
NumberModes=25
```

```
!Diagrama ASCII de la tapa del violín con efes (f) y puntal (^) mostrando los ejes de orientacion
```

```
!  
! y  
! .  
! .  
!  
! |-----|  
! | 1 1 |  
! |   ^ |  
! |-----|... x  
!  
!  
!
```

```
TOPPLATE=1
thickTop=0.0025 !limite inferior: 2.3 mm, 2.6 afinado
archFactor=1 !0.3 Valor minimo
elemSizeTop=.01

BACKPLATE=1
thickBack=0.0025 !3.4mm afinado, 3.6mm Stradivarius Titian
elemSizeMaple=.012

RIBS=1
ribsHeight=0.032
ribsMatFactor=1
thickribsx=-0.0002

SOUNDPOST=1
xsp=0 !offset para el puntal
ysp=0.0
spThick=0.003

BASSBAR=1
heightFactor=1
thicknessBar=.0057
xbar=0 !distancia en x del centro a la barra
yhump=0 !distancia en y

FHOLES=0
xfhole=0 !offset para las efes en x/y
yfhole=0
Fangle=0 !angulo de la efe en grados

BRIDGE=1
ybridge=0 !offset para el puente
!
!medidas del puente
ANCHOPUENTE=.0015
pierna=0.0145
pata=0.012
rodilla=0.009
lonja=0.005
cintura=0.0105
dorso=0.0215
femur=0.004
ancho=0.002
cuello=0.005
arco=0.001
corazon=0.018
radio=0.006
abdomen=0.0215
hombro=0.0035

mat3=0.8 !material para el puente

fixedBoundaries=0
RotationsRestricted=0
/FILNAME,STROUT

/UNITS,SI
```

/PREP7

\*DO,KARI,1,1

!PROPIEDADES DEL MATERIAL

MP,DENS,1,430

MP,EY,1,15.13e9

MP,EX,1,.937E9

MP,EZ,1,.937E9

MP,GXZ,1,.059E9

MP,GXY,1,.930E9

MP,GYZ,1,.6E9

MP,NUXY,1,.03

MP,NUYZ,1,.019

MP,NUXZ,1,.33

ET,1,SOLID92

MP,DENS,2,760

MP,EY,2,11000e6

MP,EX,2,2600E6

MP,EZ,2,.937E9

MP,GXY,2,1300E6

MP,GYZ,2,490E6

MP,GXZ,2,.059E9

MP,NUXY,2,.003

MP,NUYZ,2,.0019

MP,NUXZ,2,.033

MP,NUXY,2,.2

ET,2,SOLID92

!Propiedades de las costillas

MP,DENS,3,760

MP,EY,3,11000e6\*ribsMatFactor

MP,EX,3,11000e6\*ribsMatFactor

MP,EZ,3,2600E6\*ribsMatFactor

MP,GYZ,3,1300E6\*ribsMatFactor

MP,GXY,3,490E6\*ribsMatFactor

MP,GXZ,3,.059E9\*ribsMatFactor

MP,NUYZ,3,.003\*ribsMatFactor

MP,NUXY,3,.0019\*ribsMatFactor

MP,NUXZ,3,.033\*ribsMatFactor

MP,NUYZ,3,.2\*ribsMatFactor

ET,3,SOLID92

MP,DENS,4,760

MP,EY,4,11000e6\*ribsMatFactor

MP,EX,4,11000e6\*ribsMatFactor

MP,EZ,4,2600E6\*ribsMatFactor

MP,GYZ,4,1300E6\*ribsMatFactor

MP,GXY,4,490E6\*ribsMatFactor

MP,GXZ,4,.059E9\*ribsMatFactor

MP,NUYZ,4,.003\*ribsMatFactor

MP,NUXY,4,.0019\*ribsMatFactor

MP,NUXZ,4,.033\*ribsMatFactor

MP,NUYZ,4,.2\*ribsMatFactor

ET,4,SOLID92

MP,DENS,5,760

MP,EY,5,11000e6\*ribsMatFactor  
MP,EX,5,11000e6\*ribsMatFactor  
MP,EZ,5,2600E6\*ribsMatFactor  
MP,GYZ,5,1300E6\*ribsMatFactor  
MP,GXY,5,490E6\*ribsMatFactor  
MP,GXZ,5,.059E9\*ribsMatFactor  
MP,NUYZ,5,.003\*ribsMatFactor  
MP,NUXY,5,.0019\*ribsMatFactor  
MP,NUXZ,5,.033\*ribsMatFactor  
MP,NUYZ,5,.2\*ribsMatFactor  
ET,5,SOLID92

MP,DENS,6,760  
MP,EY,6,11000e6\*ribsMatFactor  
MP,EX,6,11000e6\*ribsMatFactor  
MP,EZ,6,2600E6\*ribsMatFactor  
MP,GYZ,6,1300E6\*ribsMatFactor  
MP,GXY,6,490E6\*ribsMatFactor  
MP,GXZ,6,.059E9\*ribsMatFactor  
MP,NUYZ,6,.003\*ribsMatFactor  
MP,NUXY,6,.0019\*ribsMatFactor  
MP,NUXZ,6,.033\*ribsMatFactor  
MP,NUYZ,6,.2\*ribsMatFactor  
ET,6,SOLID92

MP,DENS,7,760  
MP,EY,7,11000e6\*ribsMatFactor  
MP,EX,7,11000e6\*ribsMatFactor  
MP,EZ,7,2600E6\*ribsMatFactor  
MP,GYZ,7,1300E6\*ribsMatFactor  
MP,GXY,7,490E6\*ribsMatFactor  
MP,GXZ,7,.059E9\*ribsMatFactor  
MP,NUYZ,7,.003\*ribsMatFactor  
MP,NUXY,7,.0019\*ribsMatFactor  
MP,NUXZ,7,.033\*ribsMatFactor  
MP,NUYZ,7,.2\*ribsMatFactor  
ET,3,SOLID92

MP,DENS,8,760  
MP,EY,8,11000e6\*ribsMatFactor  
MP,EX,8,11000e6\*ribsMatFactor  
MP,EZ,8,2600E6\*ribsMatFactor  
MP,GYZ,8,1300E6\*ribsMatFactor  
MP,GXY,8,490E6\*ribsMatFactor  
MP,GXZ,8,.059E9\*ribsMatFactor  
MP,NUYZ,8,.003\*ribsMatFactor  
MP,NUXY,8,.0019\*ribsMatFactor  
MP,NUXZ,8,.033\*ribsMatFactor  
MP,NUYZ,8,.2\*ribsMatFactor  
ET,8,SOLID92

/COLOR,NUM,YELL,1  
/COLOR,NUM,ORAN,2  
/COLOR,NUM,ORAN,3  
/COLOR,NUM,ORAN,4  
/COLOR,NUM,ORAN,5  
/COLOR,NUM,ORAN,6

/COLOR,NUM,ORAN,7  
/COLOR,NUM,ORAN,8

!CONSTRUCCION DEL MODELO  
!TAPA

K,1,0,0,0  
K,2,-0.0750,0.0172,0  
K,3,-0.1009,0.0695,0  
K,4,-0.0953,0.0997,0  
K,5,-0.0802,0.1281,0  
K,6,-0.0883,0.1427,0  
K,7,-0.0630,0.1484,0  
K,8,-0.0566,0.1600,0  
K,9,-0.0514,0.1907,0  
K,10,-0.0522,0.2100,0  
K,11,-0.0562,0.2232,0  
K,12,-0.0754,0.2276,0  
K,13,-0.0672,0.2424,0  
K,14,-0.0766,0.2660,0  
K,15,-0.0792,0.2920,0  
K,16,-0.0536,0.3331,0  
K,17,0,0.3480,0  
K,18,0.0536,0.3331,0  
K,19,0.0792,0.2920,0  
K,20,0.0766,0.2660,0  
K,21,0.0672,0.2424,0  
K,22,0.0754,0.2276,0  
K,23,0.0562,0.2232,0  
K,24,0.0522,0.2100,0  
K,25,0.0514,0.1907,0  
K,26,0.0566,0.1600,0  
K,27,0.0630,0.1484,0  
K,28,0.0883,0.1427,0  
K,29,0.0802,0.1281,0  
K,30,0.0953,0.0997,0  
K,31,0.1009,0.0695,0  
K,32,0.0750,0.0172,0

BSPLINE,1,2,3,4,5,7  
BSPLINE,7,8,9,10,11  
BSPLINE,11,13,14,15,16,17  
L,5,6  
L,6,7  
L,7,5  
L,11,12  
L,12,13  
L,13,11  
BSPLINE,17,18,19,20,21,23  
BSPLINE,23,24,25,26,27  
BSPLINE,27,29,30,31,32,1  
L,21,22  
L,22,23  
L,23,21  
L,27,28  
L,28,29  
L,29,27

K,33,-0.0460,0.1907,0.0023  
K,34,-0.0330,0.1907,0.0076  
K,35,-0.0190,0.1907,0.0106  
K,36,0,0.1907,0.0119  
K,37,0.0190,0.1907,0.0106  
K,38,0.0330,0.1907,0.0076  
K,39,0.0460,0.1907,0.0026  
K,40,-0.0586,0.1484,0.0016  
K,41,-0.0369,0.1484,0.0061  
K,42,-0.0200,0.1484,0.0096  
K,43,0,0.1484,0.0121  
K,44,0.0200,0.1484,0.0096  
K,45,0.0369,0.1484,0.0061  
K,46,0.0586,0.1484,0.0016  
K,47,-0.0500,0.2232,0.0026  
K,48,-0.0388,0.2232,0.0060  
K,49,-0.0210,0.2232,0.0101  
K,50,0,0.2232,0.0112  
K,51,0.0210,0.2232,0.0101  
K,52,0.0388,0.2232,0.0060  
K,53,0.0500,0.2232,0.0026

BSPLINE,40,33,47  
BSPLINE,41,34,48  
BSPLINE,42,35,49  
BSPLINE,43,36,50  
BSPLINE,44,37,51  
BSPLINE,45,38,52  
BSPLINE,46,39,53  
L,7,40  
L,40,41  
L,41,42  
L,42,43  
L,43,44  
L,44,45  
L,45,46  
L,46,27  
L,11,47  
L,47,48  
L,48,49  
L,49,50  
L,50,51  
L,51,52  
L,52,53  
L,53,23

K,54,-0.0620,0.2790,0.0034  
K,55,-0.0323,0.2830,0.0075  
K,56,0,0.2920,0.0093  
K,57,0.0620,0.2790,0.0034  
K,58,0.0323,0.2830,0.0070  
K,59,-0.0600,0.2533,0.0030  
K,60,-0.0430,0.2500,0.0067  
K,61,-0.0150,0.2483,0.0105  
K,62,0,0.2542,0.0105  
K,63,0.0150,0.2500,0.0105  
K,64,0.0430,0.2500,0.0067

K,65,0.0600,0.2533,0.0030

BSPLINE,48,60,55,56

BSPLINE,56,58,64,52

BSPLINE,49,61,62

BSPLINE,62,63,51

K,66,-0.0500,0.3100,0.0038

K,67,0,0.3226,0.0042

K,68,0.0500,0.3100,0.0038

BSPLINE,47,59,54,66,67

BSPLINE,67,68,57,65,53

BSPLINE,50,62

BSPLINE,62,56

BSPLINE,56,67

BSPLINE,67,17

K,69,-0.0670,0.1150,0.0030

K,70,-0.0460,0.1150,0.0070

K,71,-0.0200,0.1150,0.0100

K,72,0,0.1061,0.0115

K,73,0.0200,0.1150,0.0100

K,74,0.0460,0.1150,0.0070

K,75,0.0670,0.1150,0.0030

K,76,-0.0720,0.0800,0.0037

K,77,-0.0400,0.0800,0.0071

K,78,0,0.0695,0.0111

K,79,0.0400,0.0800,0.0071

K,80,0.0720,0.0800,0.0037

K,81,-0.0550,0.0450,0.0035

K,82,0,0.0350,0.0055

K,83,0.0550,0.0450,0.0035

BSPLINE,42,71,72

BSPLINE,72,73,44

BSPLINE,41,70,77,78

BSPLINE,78,79,74,45

BSPLINE,40,69,76,81,82

BSPLINE,82,83,80,75,46

BSPLINE,43,72

BSPLINE,72,78

BSPLINE,78,82

BSPLINE,82,1

AL,1,61,56,26

AL,12,61,57,33

AL,2,26,19,34

AL,25,33,11,41

AL,10,41,47,51

AL,3,34,46,51

AL,56,60,54,27

AL,54,59,52,28

AL,52,58,29

AL,57,60,55,32

AL,55,59,53,31

AL,53,58,30

AL,19,27,20,35

AL,20,28,21,36

AL,21,29,22,37  
 AL,22,30,23,38  
 AL,23,31,24,39  
 AL,24,32,25,40  
 AL,46,35,42,50  
 AL,42,36,44,49  
 AL,44,37,48  
 AL,47,40,43,50  
 AL,43,39,45,49  
 AL,45,38,48

VEXT,1,,,,-thickTop  
 VEXT,2,,,,-thickTop  
 VEXT,3,,,,-thickTop  
 VEXT,4,,,,-thickTop  
 VEXT,5,,,,-thickTop  
 VEXT,6,,,,-thickTop  
 VEXT,7,,,,-thickTop  
 VEXT,8,,,,-thickTop  
 VEXT,9,,,,-thickTop  
 VEXT,10,,,,-thickTop  
 VEXT,11,,,,-thickTop  
 VEXT,12,,,,-thickTop  
 VEXT,13,,,,-thickTop  
 VEXT,14,,,,-thickTop  
 VEXT,15,,,,-thickTop  
 VEXT,16,,,,-thickTop  
 VEXT,17,,,,-thickTop  
 VEXT,18,,,,-thickTop  
 VEXT,19,,,,-thickTop  
 VEXT,20,,,,-thickTop  
 VEXT,21,,,,-thickTop  
 VEXT,22,,,,-thickTop  
 VEXT,23,,,,-thickTop  
 VEXT,24,,,,-thickTop

!COSTILLAS

K,201,0,0.0011,0  
 K,202,-0.0739,0.0172,0  
 K,203,-0.0998,0.0695,0  
 K,204,-0.0942,0.0997,0  
 K,205,-0.0791,0.1270,0  
 K,206,-0.0883,0.1427,0  
 K,207,-0.0619+(thickribsx),0.1484,0!  
 K,208,-0.0555+(thickribsx),0.1600,0!  
 K,209,-0.0503+(thickribsx),0.1907,0!  
 K,210,-0.0512+(thickribsx),0.2100,0!  
 K,211,-0.0551+(thickribsx),0.2232,0!  
 K,212,-0.0754,0.2276,0  
 K,213,-0.0661,0.2424,0  
 K,214,-0.0755,0.2672,0  
 K,215,-0.0781,0.2920,0  
 K,216,-0.0525,0.3320,0  
 K,217,0,0.3469,0

K,218,0.0525,0.3320,0  
 K,219,0.0781,0.2920,0  
 K,220,0.0755,0.2672,0  
 K,221,0.0661,0.2424,0  
 K,222,0.0754,0.2276,0  
 K,223,0.0551-(thickribsx),0.2232,0!  
 K,224,0.0512-(thickribsx),0.2100,0!  
 K,225,0.0503-(thickribsx),0.1907,0!  
 K,226,0.0555-(thickribsx),0.1600,0!  
 K,227,0.0619-(thickribsx),0.1484,0!  
 K,228,0.0883,0.1427,0  
 K,229,0.0791,0.1270,0  
 K,230,0.0942,0.0997,0  
 K,231,0.0998,0.0695,0  
 K,232,0.0739,0.0172,0

BSPLINE,201,202,203,204,205,207  
 BSPLINE,207,208,209,210,211  
 BSPLINE,211,213,214,215,216,217  
 BSPLINE,217,218,219,220,221,223  
 BSPLINE,223,224,225,226,227  
 BSPLINE,227,229,230,231,232,201  
 L,1,201  
 L,7,207  
 L,11,211  
 L,17,217  
 L,23,223  
 L,27,227

AL,1,252,246,253  
 AL,2,253,247,254  
 AL,3,254,248,255  
 AL,10,255,249,256  
 AL,11,256,250,257  
 AL,12,257,251,252

VEXT,146,,,,-ribsHeight-thickTop-thickBack  
 VEXT,145,,,,-ribsHeight-thickTop-thickBack  
 VEXT,144,,,,-ribsHeight-thickTop-thickBack  
 VEXT,143,,,,-ribsHeight-thickTop-thickBack  
 VEXT,142,,,,-ribsHeight-thickTop-thickBack  
 VEXT,141,,,,-ribsHeight-thickTop-thickBack

!FONDO

K,301,0,0,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,302,-0.0750,0.0172,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,303,-0.1009,0.0695,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,304,-0.0953,0.0997,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,305,-0.0802,0.1281,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,306,-0.0883,0.1427,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,307,-0.0630,0.1484,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,308,-0.0566,0.1600,0-thickTop-ribsHeight-thickBack

K,309,-0.0514,0.1907,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,310,-0.0522,0.2100,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,311,-0.0562,0.2232,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,312,-0.0754,0.2276,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,313,-0.0672,0.2424,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,314,-0.0766,0.2660,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,315,-0.0792,0.2920,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,316,-0.0536,0.3331,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,317,0,0.3480,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,318,0.0536,0.3331,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,319,0.0792,0.2920,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,320,0.0766,0.2660,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,321,0.0672,0.2424,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,322,0.0754,0.2276,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,323,0.0562,0.2232,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,324,0.0522,0.2100,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,325,0.0514,0.1907,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,326,0.0566,0.1600,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,327,0.0630,0.1484,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,328,0.0883,0.1427,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,329,0.0802,0.1281,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,330,0.0953,0.0997,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,331,0.1009,0.0695,0-thickTop-ribsHeight-thickBack  
 K,332,0.0750,0.0172,0-thickTop-ribsHeight-thickBack

BSPLINE,301,302,303,304,305,307

BSPLINE,307,308,309,310,311

BSPLINE,311,313,314,315,316,317

L,305,306

L,306,307

L,307,305

L,311,312

L,312,313

L,313,311

BSPLINE,317,318,319,320,321,323

BSPLINE,323,324,325,326,327

BSPLINE,327,329,330,331,332,301

L,321,322

L,322,323

L,323,321

L,327,328

L,328,329

L,329,327

K,333,-0.0417,0.1907,-0.0058-thickTop-ribsHeight-thickBack

K,334,-0.0283,0.1907,-0.0105-thickTop-ribsHeight-thickBack

K,335,-0.0150,0.1907,-0.0134-thickTop-ribsHeight-thickBack

K,336,0,0.1907,-0.0144-thickTop-ribsHeight-thickBack

K,337,0.0150,0.1907,-0.0134-thickTop-ribsHeight-thickBack

K,338,0.0283,0.1907,-0.0105-thickTop-ribsHeight-thickBack

K,339,0.0417,0.1907,-0.0058-thickTop-ribsHeight-thickBack

K,340,-0.0500,0.1484,-0.0076-thickTop-ribsHeight-thickBack

K,341,-0.0369,0.1484,-0.0120-thickTop-ribsHeight-thickBack

K,342,-0.0183,0.1484,-0.0137-thickTop-ribsHeight-thickBack

K,343,0,0.1484,-0.0144-thickTop-ribsHeight-thickBack

K,344,0.0183,0.1484,-0.0137-thickTop-ribsHeight-thickBack

K,345,0.0360,0.1484,-0.0120-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K,346,0.0500,0.1484,-0.0076-thickTop-ribsHeight-thickBack

K,347,-0.0444,0.2232,-0.0062-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K,348,-0.0388,0.2232,-0.0087-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K,349,-0.0210,0.2232,-0.0112-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K,350,0,0.2232,-0.0133-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K,351,0.0210,0.2232,-0.0111-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K,352,0.0388,0.2232,-0.0087-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K,353,0.0444,0.2232,-0.0062-thickTop-ribsHeight-thickBack

BSPLINE,340,333,347  
BSPLINE,341,334,348  
BSPLINE,342,335,349  
BSPLINE,343,336,350  
BSPLINE,344,337,351  
BSPLINE,345,338,352  
BSPLINE,346,339,353

L,307,340  
L,340,341  
L,341,342  
L,342,343  
L,343,344  
L,344,345  
L,345,346  
L,346,327  
L,311,347  
L,347,348  
L,348,349  
L,349,350  
L,350,351  
L,351,352  
L,352,353  
L,353,323

K,354,-0.0620,0.2790,-0.0048-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K,355,-0.0323,0.2830,-0.0084-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K,356,0,0.2920,-0.0107-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K,357,0.0620,0.2790,-0.0048-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K,358,0.0323,0.2830,-0.0084-thickTop-ribsHeight-thickBack

K,359,-0.0600,0.2533,-0.0054-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K,360,-0.0430,0.2500,-0.0072-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K,361,-0.0150,0.2483,-0.0110-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K,362,0,0.2542,-0.0120-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K,363,0.0150,0.2500,-0.0110-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K,364,0.0430,0.2500,-0.0072-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K,365,0.0600,0.2533,-0.0054-thickTop-ribsHeight-thickBack

BSPLINE,348,360,355,356  
BSPLINE,356,358,364,352  
BSPLINE,349,361,362  
BSPLINE,362,363,351

K,366,-0.0500,0.3100,-0.0060-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K,367,0,0.3226,-0.0071-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K,368,0.0500,0.3100,-0.0060-thickTop-ribsHeight-thickBack

BSPLINE, 347, 359, 354, 366, 367  
BSPLINE, 367, 368, 357, 365, 353  
BSPLINE, 350, 362  
BSPLINE, 362, 356  
BSPLINE, 356, 367  
BSPLINE, 367, 317

K, 369, -0.0670, 0.1150, -0.0067-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K, 370, -0.0460, 0.1150, -0.0098-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K, 371, -0.0200, 0.1150, -0.0129-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K, 372, 0, 0.1000, -0.0125-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K, 373, 0.0200, 0.1150, -0.0129-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K, 374, 0.0460, 0.1150, -0.0098-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K, 375, 0.0670, 0.1150, -0.0067-thickTop-ribsHeight-thickBack

K, 376, -0.0720, 0.0800, -0.0058-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K, 377, -0.0400, 0.0800, -0.0094-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K, 378, 0, 0.065, -0.0107-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K, 379, 0.0400, 0.0800, -0.0094-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K, 380, 0.0720, 0.0800, -0.0058-thickTop-ribsHeight-thickBack

K, 381, -0.0550, 0.0450, -0.0063-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K, 382, 0, 0.0350, -0.0071-thickTop-ribsHeight-thickBack  
K, 383, 0.0550, 0.0450, -0.0065-thickTop-ribsHeight-thickBack

BSPLINE, 342, 371, 372  
BSPLINE, 372, 373, 344  
BSPLINE, 341, 370, 377, 378  
BSPLINE, 378, 379, 374, 345  
BSPLINE, 340, 369, 376, 381, 382  
BSPLINE, 382, 383, 380, 375, 346  
BSPLINE, 343, 372  
BSPLINE, 372, 378  
BSPLINE, 378, 382  
BSPLINE, 382, 301

AL, 306, 366, 361, 331  
AL, 331, 324, 307, 339  
AL, 339, 351, 308, 356  
AL, 315, 346, 352, 356  
AL, 330, 338, 316, 346  
AL, 317, 366, 362, 338

AL, 361, 365, 359, 332  
AL, 324, 332, 325, 340  
AL, 340, 351, 355, 347  
AL, 352, 345, 348, 355  
AL, 329, 337, 330, 345  
AL, 362, 365, 360, 337

AL, 359, 364, 357, 333  
AL, 325, 333, 326, 341  
AL, 341, 347, 354, 349  
AL, 348, 344, 350, 354  
AL, 328, 336, 329, 344  
AL, 360, 364, 358, 336

AL,357,363,334  
 AL,326,334,327,342  
 AL,349,342,353  
 AL,350,343,353  
 AL,327,335,328,343  
 AL,358,363,335

VEXT,177,,,,thickBack  
 VEXT,178,,,,thickBack  
 VEXT,179,,,,thickBack  
 VEXT,180,,,,thickBack  
 VEXT,181,,,,thickBack  
 VEXT,182,,,,thickBack  
 VEXT,183,,,,thickBack  
 VEXT,184,,,,thickBack  
 VEXT,185,,,,thickBack  
 VEXT,186,,,,thickBack  
 VEXT,187,,,,thickBack  
 VEXT,188,,,,thickBack  
 VEXT,189,,,,thickBack  
 VEXT,190,,,,thickBack  
 VEXT,191,,,,thickBack  
 VEXT,192,,,,thickBack  
 VEXT,193,,,,thickBack  
 VEXT,194,,,,thickBack  
 VEXT,195,,,,thickBack  
 VEXT,196,,,,thickBack  
 VEXT,197,,,,thickBack  
 VEXT,198,,,,thickBack  
 VEXT,199,,,,thickBack  
 VEXT,200,,,,thickBack

!PUNTAL

!\*IF,SOUNDPOST,EQ,1,THEN

LOCAL,21,0,0.019+xsp,0.143+ysp,0.008\*archFactor,0,0

WPCSYS,1,21

BLOCK,-.5\*spThick,.5\*spThick,-.5\*spThick,.5\*spThick,-ribsHeight-thickBack-thickTop-.020\*archFactor,0

CSYS,0

!\*ENDIF

!BARRA ARMONICA

!\*IF,BASSBAR,EQ,1,THEN

!CREACION DE LA BARRA

!spos para la barra

!lado superior de la barra (pegado a la tapa)

LOCAL,22,0,xbar-.0123,0,.0085\*archFactor,0,0,0,1.5

WPCSYS,1,21

K,901,0,0.01,0\*archFactor

```

k,903,0,.34,0*archFactor

L,903,901 !linea entre los spos anteriores

!spos de la parte inferior de la barra (curva)
k,905,0,.031,-0.0045-thickTop
K,906,0,.11+yhump,-0.0035-thickTop
k,907,0,0.19+yhump,-0.009-thickTop
k,908,0,.245+yhump,-0.003-thickTop
k,909,0,.33,-0.0051-thickTop

!lineas desde los spos de referencia al contacto con el violin
L,903,909
L,901,905

!contorno de la parte inferior del violin.
BSPLINE,905,906,907,908,909
LSEL,S,LOC,x,xbar+.0001,xbar-.0001
!creacion del area

AL,ALL
ASEL,S,LOC,x,0.0001+xbar-.0001,-0.0001+xbar
APLOT

!extruido de la barra
VEXT,ALL,,,-1*thicknessBar

VSEL,ALL
CSYS,0

!*ENDIF

!PUENTE
!*IF,BRIDGE,EQ,1,THEN

LOCAL,20,0,0,0.15+ybridge,.009*archFactor,0,90

!spos del puente del violin
K,1001,cintura+(2*ancho),0
K,1002,pierna+(.5*pata),0
K,1003,pierna+(.5*pata),ancho
K,1004,pierna+(.5*pata)-ancho,2*ancho
K,1005,pierna+(.5*pata),3*ancho
K,1006,pierna+(.5*pata),rodilla
K,1007,pierna+(.25*ancho),rodilla+(.5*ancho)
K,1008,cintura,rodilla+lonja-ancho
K,1009,cintura,rodilla+lonja+radio
K,1010,cintura+radio,rodilla+lonja+radio
K,1011,cintura+radio+ancho,rodilla+lonja+(.5*radio)
K,1012,cintura+radio,rodilla+lonja
K,1013,cintura+ancho,rodilla+lonja
K,1014,cintura+ancho,rodilla+lonja-ancho
K,1015,abdomen,rodilla+ancho

```

```

K,1016,abdomen+hombro,rodilla+ancho+dorso
K,1017,cintura+radio+ancho,rodilla+ancho+dorso(.5*cuello)
K,1018,cintura,rodilla+2*ancho+dorso(.5*cuello)
K,1019,0,rodilla+ancho+dorso+cuello
K,1020,0,corazon+ancho
K,1021,ancho,corazon+ancho
K,1022,ancho,corazon+2*ancho
K,1023,2*ancho,corazon+2*ancho
K,1024,3*ancho,corazon+ancho
K,1025,2*ancho,corazon
K,1026,0,corazon
K,1027,0,rodilla-femur
K,1028,cintura+(2*ancho),rodilla-femur

```

```

!PARA UBICAR FUERZA EN EL PUENTE
K,2001,-(abdomen+hombro),rodilla+ancho+dorso

```

```

!creado de areas (ver diagrama)
A,1028,1001,1002,1003,1004,1005,1006,1007
A,1024,1025,1026,1027,1028,1007,1008,1009,1017,1018
A,1009,1010,1011,1012,1013,1014,1015,1016,1017
A,1018,1019,1020,1021,1022,1023,1024

```

```

ASEL,S,LOC,Y,2*ancho,rodilla+ancho+dorso+cuello
ASEL,A,LOC,Y,2*ancho,corazon
aplot
AADD,ALL

```

```

!simetria del puente
ARSYM,X,ALL

```

```

!pegado de la simetria
ASEL,S,LOC,Y,2*ancho,rodilla+ancho+dorso+cuello
APLOT
AADD,ALL

```

```

!extruido del puente

VEXT,ALL,,,,ANCHOPUENTE
VSEL,ALL
CSYS,0
WPCSYS
!*ENDIF

```

```

!VOLUME OVERLAP

VOVLAP,ALL

```

```

!ELIMINACION DE IMPERFECCIONES

```

```

*IF,BASSBAR,EQ,1,THEN
VSEL,S,LOC,Y,0.31,.4
VSEL,A,LOC,Y,-.02,.05
!VSEL,A,LOC,Z,0.003,.009

```

```
VSEL,U,LOC,Z,-0.05,0.004
vplot
```

```
VDELE,ALL
VSEL,ALL
*ENDIF
```

```
!AGUJEROS DE LAS EFES
```

```
*IF,FHOLES,EQ,1,THEN
```

```
LOCAL,20,0.1611,0.0393+xfhole,0.1611+yfhole,0.07,-3.5-Fangle,0,0 !?,?,?,y,x,z,thetax,thetay,thetaz
```

```
K,787,0.0181,-0.0220,0
K,788,0.0157,-0.0262,0
K,789,0.0167,-0.0365,0
K,790,0.0192,-0.0299,0
K,791,0.0225,-0.0219,0
K,792,0.0247,-0.0269,0
K,793,0.0227,-0.0316,0
K,794,0.0118,-0.0364,0
K,795,0.0142,-0.0351,0
K,796,0.0057,-0.0221,0
K,797,0.0000,-0.0221,0
!K,798,0.0040,-0.007,0
!K,799,-0.0005,-0.007,0
```

```
K,800,0.0030,0,0
K,801,-0.0030,0,0
```

```
!K,802,0.0015,0.007,0
!K,803,-0.0035,0.007,0
K,804,-0.000,0.0211,0
K,805,-0.0052,0.0211,0
K,806,-0.0042,0.031,0
K,807,-0.0076,0.031,0
K,808,-0.0138,0.0297,0
K,809,-0.0190,0.0320,0
K,810,-0.0100,0.035,0
K,811,-0.0095,0.0335,0
K,812,-0.0121,0.0257,0
K,813,-0.0152,0.0226,0
K,814,-0.0194,0.0253,0
```

```
!lineas de contorno de la efe derecha
```

```
BSPLINE,791,792,793,789,794 !original 587,591,592,593,589,594
BSPLINE,794,797,801,805,807,811
!BSPLINE,805,807,811
BSPLINE,808,812,813,814
L,811,808
BSPLINE,814,809,810
BSPLINE,810,806,804,800,796,795
!BSPLINE,798,796,795
BSPLINE,791,787,788,790 !original 587,588,590
```

```

L,795,790

!area
LSEL,S,LOC,Z,-.001,.001
AL,ALL

!volumen efe derecha (mayor al resto del violin)
ASEL,S,LOC,Z,-.001,.001
VEXT,ALL,,,,-.08
CSYS,0
WPCSYS

LSEL,ALL
/REPLOT

!creacion de la efe izquierda
VSYMM,x,1

!extraer el volumen de las efes
VSBV,ALL,1
VSBV,ALL,2

VSEL,ALL
VPLOT
*ENDIF

VSEL,ALL
VGLUE,ALL

!TERMINA LA CONSTRUCCION DEL MODELO DE VIOLIN

!*cycle
b =.014

/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/REP,FAST
/PNUM,MAT,1
/REPLOT

!CONDICIONALES PARA MALLADO

!tapa y puntal

*IF, TOPPLATE, EQ, 1, THEN
MAT, 1
ET, 1, SOLID92
ESIZE, elemSizeTop
VSEL, S, LOC, Z, -thickTop, 0.01*archFactor
!VSEL, INVE
VMESH, ALL
*ENDIF

```

```
*IF,SOUNDPOST,EQ,1,THEN
MAT,1
CSYS,0
WPCSYS
VSEL,S,LOC,Y,.141+xsp,.148+xsp
!LOCAL,31,0,0,.17+ybridge,.0132,0,90,0
ESYS,31
ET,1,SOLID92
VMESH,ALL
*ENDIF
```

!fondo y costillas

```
esize,elemSizeMaple
*IF,BRIDGE,EQ,1,THEN
MAT,2
CSYS,0
WPCSYS
VSEL,S,LOC,Z,0.01,.12
LOCAL,30,0,0,.15+ybridge,.0132,90,0,90
ESYS,30
VMESH,ALL
*ENDIF
```

```
*IF,RIBS,EQ,1,THEN
MAT,3
CSYS,0
WPCSYS
ESYS,0
VSEL,S,LOC,Z,-thickTop,-ribsHeight
VSEL,U,LOC,X,-0.001,0.1
VSEL,U,LOC,Y,0.13,0.5
VSEL,U,LOC,Y,.148+xsp,.15+xsp
VMESH,ALL
*ENDIF
```

```
*IF,RIBS,EQ,1,THEN
MAT,4
CSYS,0
WPCSYS
ESYS,0
VSEL,S,LOC,Z,-thickTop,-ribsHeight
VSEL,U,LOC,X,0.001,-0.1
VSEL,U,LOC,Y,0.13,0.5
VSEL,U,LOC,Y,.148+xsp,.15+xsp
VMESH,ALL
*ENDIF
```

```
*IF,RIBS,EQ,1,THEN
MAT,5
CSYS,0
WPCSYS
ESYS,0
VSEL,S,LOC,Z,-thickTop,-ribsHeight
VSEL,U,LOC,X,-0.001,0.1
VSEL,U,LOC,Y,0,0.13
```

```

VSEL,U,LOC,Y,0.19,0.5
VSEL,U,LOC,Y,.148+xsp,.15+xsp
VMESH,ALL
*ENDIF

*IF,RIBS,EQ,1,THEN
MAT,6
CSYS,0
WPCSYS
ESYS,0
VSEL,S,LOC,Z,-thickTop,-ribsHeight
VSEL,U,LOC,X,0.001,-0.1
VSEL,U,LOC,Y,0,0.13
VSEL,U,LOC,Y,0.19,0.5
VSEL,U,LOC,Y,.148+xsp,.15+xsp
VMESH,ALL
*ENDIF

*IF,RIBS,EQ,1,THEN
MAT,7
CSYS,0
WPCSYS
ESYS,0
VSEL,S,LOC,Z,-thickTop,-ribsHeight
VSEL,U,LOC,X,-0.001,0.1
VSEL,U,LOC,Y,0,0.19
VSEL,U,LOC,Y,.148+xsp,.15+xsp
VMESH,ALL
*ENDIF

*IF,RIBS,EQ,1,THEN
MAT,8
CSYS,0
WPCSYS
ESYS,0
VSEL,S,LOC,Z,-thickTop,-ribsHeight
VSEL,U,LOC,X,0.001,-0.1
VSEL,U,LOC,Y,0,0.19
VSEL,U,LOC,Y,.148+xsp,.15+xsp
VMESH,ALL
*ENDIF

*IF,BACKPLATE,EQ,1,THEN
MAT,2
CSYS,0
WPCSYS
ESYS,0
VSEL,S,LOC,Z,-ribsHeight,-ribsHeight-0.02
VMESH,ALL
*ENDIF

!*cycle

/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/REP,FAST

```

```

/REPLOT
EPLOT

BETAD,2*damping/1000
!DMPRAT,damping

/SOLU
*IF,AnalysisType,EQ,1,THEN

ALLSEL,ALL
*GET,Nforcex,KP,2001,LOC,X
*GET,NforceY,KP,2001,LOC,Y
*GET,Nforcez,KP,2001,LOC,Z
KPexcitacion=NODE(Nforcex,nforceY,Nforcez)
F,KPexcitacion,FX,1

!TIPO DE ANALISIS

ANTYPE,HARMIC
HROPT,FULL
KBC,1
HARFRQ,fi,fo
NSUBST,divs

SOLVE
FINISH
/POST1

ALLSEL,ALL
*GET,NVELX,KP,1016,LOC,X
*GET,NVELY,KP,1016,LOC,Y
*GET,NVELZ,KP,1016,LOC,Z
KPVEL=NODE(NVELX,NVELY,NVELZ)

FINISH

/POST26

NSOL,3,KPVEL,U,X,DESPUENTE
/GROPT,LOGX,ON
/GROPT,LOGY,ON
SAVE,STROUT,db,,all
*DEL,_P26_EXPORT
*DIM,_P26_EXPORT,TABLE,divs,2
VGET,_P26_EXPORT(1,0),1
VGET,_P26_EXPORT(1,1),3,,0
VGET,_P26_EXPORT(1,2),3,,1
/OUTPUT,STRCAT('FreqReIm',STROUT),'txt','.'
!*VWRITE,'FREQ','DESPUENTE',' '
!%14C %14C %14C
!*VWRITE,' ','REAL','IMAGINARY'
!%14C %14C %14C
*VWRITE,_P26_EXPORT(1,0),_P26_EXPORT(1,1),_P26_EXPORT(1,2)
%14.5G %14.5G %14.5G
/OUTPUT,TERM

```

```

*ENDIF

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
*IF,AnalysisType,EQ,0,THEN

ANTYPE,MODAL
MODOPT,SUBSP,NumberModes
SOLVE
/POST1
/SHOW,WIN32C
SET,FIRST
/PLOPTS,INFO,3
/CONTOUR,ALL,18
/PNUM,MAT,1
/NUMBER,1
/REPLOT,RESIZE
PLNSOL,U,SUM
SET,,,,,8
PLNSOL,U,SUM

/SHOW,WIN32
/REPLOT,RESIZE
SET,LIST

*ENDIF

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
*IF,AnalysisType,EQ,2,THEN
fmax=1/(2*incTiempo)
tiempos=tmax/incTiempo

/SOLU
ANTYPE,TRANSIENT
TRNOPT,FULL          ! Full method

OUTRES,ALL,ALL
OUTPR,ALL,ALL

*GET,Nforcex,KP,2001,LOC,X
*GET,NforceY,KP,2001,LOC,Y
*GET,Nforcez,KP,2001,LOC,Z
KPexcitacion=NODE(Nforcex,NforceY,Nforcez)

KBC,0

DELTIM,incTiempo
Time,incTiempo
F,KPexcitacion,FX,0
SOLVE

Time,2*incTiempo
F,KPexcitacion,FX,1
SOLVE

Time,3*incTiempo
F,KPexcitacion,FX,0

```

SOLVE

Time,tmax  
F,KPexcitacion,FX,0  
SOLVE

FINISH

/POST26

/PLOPTS,INFO,3  
/PLOPTS,LEG1,1  
/PLOPTS,LEG2,1  
/PLOPTS,LEG3,1  
/PLOPTS,FRAME,1  
/PLOPTS,TITLE,1  
/PLOPTS,MINM,1  
/PLOPTS,FILE,0  
/PLOPTS,WINS,1  
/PLOPTS,WP,0  
/PLOPTS,DATE,0  
/TRIAD,ORIG  
/REPLOT  
/WIND,ALL,OFF  
/WIND,1,LTOP  
/WIND,2,RTOP  
/WIND,3,BOT  
GPLOT

ALLSEL,ALL  
\*GET,NVELX,KP,1016,LOC,X  
\*GET,NVELY,KP,1016,LOC,Y  
\*GET,NVELZ,KP,1016,LOC,Z  
KPVEL=NODE(NVELX,NVELY,NVELZ)

/GTYP,1,GRPH,1  
/GCMD,1,PLVAR,2,,,,,  
/UDOC,1,TYPE,OFF  
/UDOC,1,DATE,OFF  
XVAR,1

ElementoPiloto=ENEARN(KPexcitacion)  
ESOL,3,ElementoPiloto,KPexcitacion,F,X,Force  
\*DIM,fuerza,ARRAY,tiempos,1  
\*SET,FUERZA(2,1),-1  
VPUT,FUERZA,3

STORE,MERGE  
XVAR,1  
/GTYP,2,GRPH,1  
/GCMD,2,PLVAR,3,,,,,  
/UDOC,2,TYPE,OFF  
/UDOC,2,DATE,OFF

```

*SET,KPVEL,NODE(NVELX,NVELY,NVELZ)
NSOL,2,KPVEL,VEL,X,Velocity
/GTYP,1,GRPH,1
/GCMD,1,PLVAR,2, , , , , , , , ,
/UDOC,1,TYPE,OFF
/UDOC,1,DATE,OFF
XVAR,1
/REPLOT

!Generacion de espectro

NSOL,4,KPVEL,U,X,Vamp
FILLDATA,5,1,tiempos,1,1,fmax/(tmax/incTiempo)
!RESP, IR, LFTAB, LDTAB, specType, dampRatio, DTIME, TMIN, TMAX, inputType
RESP,6, 5,4, 2,damping,incTiempo,,

/GTYP,3,GRPH,1
/GCMD,3,PLVAR,6, , , , , , , , ,
/USER, 3
!/GROPT,VIEW,1
XVAR,5

!/AXLAB,X,Frequency(Hz)

/UDOC,3,TYPE,OFF
/UDOC,3,DATE,OFF
/REPLOT

! Save time history variables to file datos000.csv
*DEL,_P26_EXPORT
*DIM,_P26_EXPORT,TABLE,tiempos,1
VGET,_P26_EXPORT(1,0),3
VGET,_P26_EXPORT(1,1),2
/OUTPUT,'datos000','csv','.'
*VWRITE,_P26_EXPORT(1,0),_P26_EXPORT(1,1)
%14.5G,%14.5G
/OUTPUT,TERM

! Save time history variables to file spectrum.txt
*DEL,_P26_EXPORT
*DIM,_P26_EXPORT,TABLE,tiempos,1
VGET,_P26_EXPORT(1,0),5
VGET,_P26_EXPORT(1,1),6
/OUTPUT,STRCAT('spectrum',STROUT),'csv','.'
*VWRITE,_P26_EXPORT(1,0),_P26_EXPORT(1,1)
%14.5G,%14.5G
/OUTPUT,TERM

! End of time history save

FINISH

*ENDIF

```

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

# Bibliografía

- [ANSYS®, 2018] ANSYS® (2018). Academic research mechanical, release 19.0.
- [Banks et al., 2001] Banks, J., Carson II, J., Nelson, B., and Nicol, D. (2001). *Discrete-event system simulation*, volume 1. Prentice Hall.
- [Bissinger, 2003] Bissinger, G. (2003). Modal analysis of a violin octet. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 113(4):2105–2113.
- [Bissinger and Keiffer, 2003] Bissinger, G. and Keiffer, J. (2003). Radiation damping, efficiency, and directivity for violin normal modes below 4 khz. *Acoustics Research Letters Online*, 4(1):7–12.
- [Bretos et al., 1998a] Bretos, J., Santamaria, C., and Alonso-Moral, J. (1998a). Effect of the bass bar on the free violin top plate studied by finite element analysis. *Catgut Acoustical Society Journal*, 3:16–20.
- [Bretos et al., 1998b] Bretos, J., Santamaria, C., and Alonso-Moral, J. (1998b). Vibrational patterns and frequency responses of the free plates and box of a violin obtained by finite element analysis. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 105(3):1942–1950.
- [Buen, 2006] Buen, A. (2006). A brief introduction into the violin acoustics history. In *Proceedings of the Baltic-Nordic Acoustics Meeting, Gothenburg, Sweden*, pages 8–10.
- [Cremer, 1984] Cremer, L. (1984). *The Physics of the Violin*. The MIT Press, London, 2nd edition.
- [Ewins, 1984] Ewins, D. J. (1984). Hammer or impact excitation. In *Modal testing: theory and practice*, pages 102–104. Research Studies Press, Inglaterra, 1st edition.
- [Figuroa et al., 2014] Figuroa, M., Ramirez, S., and Alcala, J. (2014). *Introducción a la metodología experimental*. PEARSON, México, 1a edition.
- [Fletcher and Rossing, 1991] Fletcher, N. H. and Rossing, D. T. (1991). *The physics of musical instruments*. Springer-Verlag, New York, 1a edition.
- [Fletcher and Rossing, 2012] Fletcher, N. H. and Rossing, T. D. (2012). *The physics of musical instruments*. Springer Science & Business Media.
- [Garay, 2015] Garay, P. I. (2015). *Comportamiento de un violín de la Escuela de Laudería*. PhD thesis, Escuela de Laudería.
- [Hsieh, 2004] Hsieh, A. (2004). Cremona revisited: The science of violin making. *Engineering and Science*, 67(4):28–35.
- [Hutchins, 1983] Hutchins, C. M. (1983). A history of violin research. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 73(5):1421–1440.
- [Inman and Singh, 2001] Inman, D. J. and Singh, R. C. (2001). *Engineering vibration*, volume 3. Prentice Hall Upper Saddle River.
- [Jansson, 1997] Jansson, E. V. (1997). Admittance measurements of 25 high quality violins. *Acta Acustica united with Acustica*, 83(2):337–341.
- [Jansson et al., 2016] Jansson, E. V., Barczewski, R., and Kabała, A. (2016). On the violin bridge hill—comparison of experimental testing and fem. *Vibrations in Physical Systems*, 27.
- [Logan, 2012] Logan, D. L. (2012). *A first course in the finite element method.*, volume 2. Cengage Learning.

- [Marshall, 1985] Marshall, K. D. (1985). Modal analysis of a violin. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 77(2):695–709.
- [Rodgers and Masino, 1990] Rodgers, O. and Masino, T. (1990). The effect of wood removal on bridge frequencies. *Catgut. Acoust. Soc. J*, 1:6–10.
- [Rossing, 2010] Rossing, D. T. (2010). *The Science of String Instruments*. Springer, New York, 1a edition.
- [Smith, 2018] Smith, R. D. (2018). Simulation article.
- [Torres, 2010] Torres, J. A. (2010). *The bridge, mode shapes and sound radiation in middle frequencies of the classical guitar*. PhD thesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [Torres, 2018] Torres, J. A. (2018). Open source application for mobility measurements on violins. *Computer Applications in Engineering Education*, 26(5):1111–1119.
- [Torres, 2006] Torres, T. A. (2006). *Modos de vibración simulados por computadora y experimentales de una tapa de guitarra en sus etapas de construcción*. PhD thesis, Universidad Autónoma de México.
- [Zúñiga, 2018] Zúñiga, R. (2018). Introducción al método del elemento finito.
- [Zygmuntowicz, 2010] Zygmuntowicz, S. (2010). The strad 3d project: Scientists, musicians, and violin-makers study three classic violins. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127(3):1791–1791.