



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



DCA DHA
DPTO. DE COMUNICACIÓN AUDIOVISUAL
DOCUMENTACIÓN E HISTORIA DEL ARTE

Departamento de Comunicación Audiovisual,
Documentación e Historia del Arte

Universitat Politècnica de València

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO

Trabajo Fin de Máster

Máster en Música

Autor: Robert Mengual Diana

Director: Germán Ramos Peinado

Codirector: Joaquín Cerdá Boluda

Valencia, Julio de 2016

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE
CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO



Agradecimientos

Este trabajo no podría haber sido realizado sin la ayuda y consejo del lutier Llorenç Fenollosa, quien despertó mi interés por esta investigación. También quiero agradecer a Juan Manuel Sanchis su ayuda prestada en las grabaciones, a Jorge Gosalbez por su colaboración en la toma de datos con el acelerómetro y a Rubén Picó por su ayuda brindada en cuestiones de esta investigación.



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE
CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO



Resumen

La producción de sonido en los instrumentos de cuerda frotada sigue siendo un acertijo debido a la gran cantidad de factores no lineales que influyen en el espectro sonoro, como el uso del arco. Entre las características que definen la calidad de un arco, se encuentran dos fundamentales: la manejabilidad y la calidad de tonos que produce. Mientras que la manejabilidad está relacionada con elementos estáticos del arco, la calidad de tonos está relacionada con los modos propios de la vara del arco así como de las cerdas que contiene.

En este trabajo se propone el cambio del material con el que se realizan los arcos por excelencia, el pernambuco, por un material más común y con una alta velocidad del sonido, el aluminio, para así analizar las diferencias que se producen a nivel espectral y auditivo en el sonido.

Palabras clave: aluminio, pernambuco, arco, contrabajo, armónicos.

Abstract

The sound production of the bowed-strings instruments is still a puzzle due to the large quantity of non-linear factors that influence the sound spectrum, like the usage of the bow. Between all the characteristics that define the quality of the bow, two fundamental characteristics are found: manageability and the quality of the tones emitted. While manageability is related with static elements of the bow, the quality of the tones is related with the natural modes of vibration of the beam and the hair of the bow.

With this research, the change of the main material for bows, the pernambuco, for a more common and with a high velocity of sound material, the aluminium, is proposed in order to analyse the differences occurred in the sound.

Keywords: aluminium, pernambuco, bow, double bass, harmonics.



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE
CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO



Tabla de contenidos

1. Introducción	9
2. Motivación	11
3. Objetivos específicos	13
4. Metodología	15
5. Estado del arte	17
6. Desarrollo teórico	19
6.1 El contrabajo	19
6.1.1 Funcionamiento físico	21
6.1.2 El arco	27
6.2 El aluminio como material para la vara de los arcos	34
6.2.1 Características y propiedades del aluminio	35
6.2.2 Nuevas posibilidades técnicas y sonoras	36
6.3 Toma de datos	37
6.3.1 Los micrófonos	38
6.3.2 Los acelerómetros	39
6.3.3 La cámara anecoica	40
6.4 Análisis del sonido	42
6.4.1 Audacity	42
6.4.2 SMS Tools	44
7. Desarrollo práctico	47
7.1 El arco de aluminio fabricado para contrabajo	47
7.1.1 Arco de aluminio prototipo	47
7.1.2 Arco de aluminio perfeccionado	50



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE
CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO

7.2	Captación de datos.....	52
7.2.1	Cámara anecoica de Gandía.....	52
7.2.2	Micrófonos y tarjeta de sonido	54
7.2.3	Grabación sonora	58
7.2.4	Grabación de las vibraciones en la vara.....	60
7.3	Análisis y comparaciones	61
7.3.1	El sonido en el arco de pernambuco	63
7.3.2	El sonido en el arco de aluminio.....	74
7.3.3	Las vibraciones producidas en ambos arcos	82
7.4	Resultados obtenidos	85
8.	Conclusiones.....	87
9.	Referencias.....	89
10.	Índice de tablas	91
11.	Índice de figuras.....	93



1. Introducción

La herramienta fundamental con la que se consigue el sonido de los instrumentos de cuerda frotada es el arco. Este arco a lo largo de la historia ha sufrido grandes modificaciones y evoluciones con la finalidad de mejorar su comportamiento y de cumplir con las expectativas del instrumento para el que se daba uso.

Por esta razón, el arco ha sido un elemento a tener en cuenta en todas las investigaciones y se sigue investigando con la intención de hacerlo mejor y de conseguir resultados más satisfactorios y de mayor calidad para una mejor experiencia del músico.

Aun así, el arco ha mantenido la estructura que se estableció en el siglo XX y solo se han realizado pequeños cambios a partir de entonces, intentando siempre copiar modelos que se han considerado buenos para tener resultados satisfactorios. Entre los principales cambios que se han intentado realizar se encuentra el cambio de material de la vara.

Debido a la intención de parecerse al máximo a arcos anteriores que han funcionado, todos los materiales investigados tratan de parecerse a la madera rey en la arquería, el pernambuco. Sin embargo, nuestra investigación propone un salto en el concepto de arco con un material cuyas propiedades lo hacen atractivo en los temas acústicos, el aluminio.

Para ello, se ha fabricado un arco alemán de contrabajo con una vara de aluminio y se ha utilizado para tocar el contrabajo y observar diferencias en la sensación sonora y en la sensación interpretativa. Seguidamente, se han realizado muestras de grabaciones con unas condiciones de sala y de dispositivos específicas para poder obtener unos resultados óptimos. A continuación, se ha procedido con el análisis de las muestras tomadas y se ha realizado una comparación del arco creado con un arco de alta calidad de pernambuco.



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO

Finalmente, con los datos que han sido extraídos de la investigación se ha corroborado la validez del arco hecho de aluminio para la interpretación y se han abierto nuevos caminos para los instrumentos de cuerda frotada. Estos caminos van desde la apertura de nuevas posibilidades sonoras para la interpretación hasta la exploración de nuevas posibilidades técnicas para la pedagogía.

En el presente trabajo, realizado en estilo APA6, se ha seguido un orden que empieza indicando la motivación que ha despertado esta investigación en cuestión. A continuación se han indicado los objetivos específicos que deben ser cumplidos a lo largo de la investigación. Seguidamente, se ha explicado la metodología utilizada para llevar poder cumplir con los objetivos indicados. Posteriormente, se ha hecho un breve estado del arte con el que poder observar cómo está la investigación que concierne al área en la que se embarca esta investigación.

Para empezar con el desarrollo del trabajo que ha sido realizado, se ha propuesto un desarrollo teórico con conceptos fundamentales y esenciales que sirven para tener un mejor entendimiento del posterior desarrollo práctico, que va a centrarse en definir aspectos específicos del trabajo, como las herramientas, así como las tareas y los análisis realizados. Este desarrollo práctico dará lugar finalmente a una conclusión que englobará los resultados que se han obtenido a lo largo del presente trabajo.



2. Motivación

La exploración de nuevos recursos sonoros es una de las motivaciones que llevan a los compositores contemporáneos a escribir sus obras. Esta búsqueda lleva a los intérpretes no solo a buscar nuevas técnicas en el instrumento, sino a modificar el propio instrumento en sí.

Un claro ejemplo de esto es el piano preparado del compositor estadounidense John Cage. Este piano preparado consistía en insertar en un piano normal una serie de elementos como tornillos y pinzas entre las cuerdas con la finalidad de cambiar totalmente el sonido que producía este instrumento.

Con la intención de llevar a la cuerda frotada una herramienta nueva con la que abrir nuevos caminos sonoros sin tener que destruir el instrumento, se ha procedido con un cambio drástico en una de las piezas fundamentales de esta familia de instrumentos, el arco.

Debido a las características físicas y acústicas del aluminio, este material es muy interesante para todos los temas de sonido. Con la intención de estudiarlo, un nuevo arco con la vara hecha de este material ha sido fabricado. Este arco tiene ciertas características, como el peso, que influirán de gran modo en la técnica del intérprete.

Por último, además de abrir nuevas posibilidades sonoras a esta familia de instrumentos para las creaciones contemporáneas, se propone también la apertura de un nuevo camino de técnica con este arco que puede significar un avance en la pedagogía de la cuerda frotada.



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE
CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO



3. Objetivos específicos

- Construir un arco alemán de contrabajo con vara de aluminio que presente unas características adecuadas para utilizarse. Con este objeto se conseguirá obtener información de cómo afecta el aluminio como material en la vara de un arco para cuerda frotada.
- Adquirir muestras del sonido generado en un contrabajo por el arco creado bajo unas condiciones de grabación determinadas para poder analizarlo y representarlo debidamente.
- Adquirir muestras de los movimientos que suceden en el arco mientras se está utilizando mediante un acelerómetro con la intención de comprobar los efectos que se producen en el arco en el momento de su uso.
- Analizar las muestras tomadas y obtener las propiedades acústicas del arco construido.
- Comparar las propiedades del arco de aluminio con un arco alemán de contrabajo hecho de la madera pernambuco de alta calidad.
- Abrir nuevos horizontes para la música contemporánea y sus compositores.
- Proporcionar una nueva herramienta con fines pedagógicos y performativos a la comunidad de los músicos de cuerda frotada.



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE
CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO



4. Metodología

En primer lugar, realizaremos un desarrollo teórico sobre conceptos fundamentales para entender el contenido de este trabajo. Durante este apartado daremos una descripción general de la evolución del contrabajo y de su funcionamiento físico. A continuación hablaremos del arco, que es la herramienta que se utiliza para frotar las cuerdas, y explicaremos brevemente su evolución, su estructura, las características que definen un buen arco, los parámetros más básicos de las técnicas para utilizarlo y los materiales que se utilizan en su fabricación. Posteriormente, se justificará el porqué de la elección del aluminio como material para la vara del arco enunciando sus características generales. Seguidamente explicaremos conceptos fundamentales que tienen que ver con la captación de los datos como la grabación y finalmente enunciaremos las herramientas software utilizadas para analizar estos datos captados.

En segundo lugar, haremos un desarrollo práctico centrándonos específicamente en las tareas que se han realizado para conseguir cumplir los objetivos elaborados. Por lo tanto, se hablará del objeto construido y de las actividades realizadas para obtener todas sus propiedades.

El primer paso a realizar es la construcción de un arco alemán para contrabajo cuya vara sea de aluminio. A continuación, se grabarán los sonidos que produce un contrabajo al utilizar esta herramienta así como los que produce utilizando un arco de pernambuco de alta calidad. Además, se utilizará un acelerómetro con el que obtener los movimientos que suceden en ambos arcos al ser utilizados.

Una vez obtenidas las muestras de los datos, se procederá a analizarlas con un software especializado con la finalidad de obtener toda la información sobre las propiedades acústicas del aluminio en la vara del arco de contrabajo y los movimientos que están teniendo lugar en este arco.



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO

Finalmente, se compararán los resultados obtenidos con ambos arcos y se resaltarán las principales diferencias que existen estructurales, funcionales, sonoras y físicas entre ellos.



5. Estado del arte

La investigación sobre los instrumentos de cuerda frotada ha sido siempre llevada a cabo por los mismos luthiers y músicos a lo largo de la historia. Sin embargo, a partir del siglo XX y en el actual siglo XXI las investigaciones sobre esta familia se están llevando a cabo por más universidades y equipos de investigación especializados. Durante este apartado se van a indicar las principales ramas de investigación y en el siguiente apartado, correspondiente al desarrollo teórico, serán explicados y desarrollados correctamente.

Por una parte, la llegada de nuevas posibilidades tecnológicas ha abierto nuevas posibilidades de estudio sonoro al utilizar sintetizadores y amplificadores en los instrumentos clásicos. De este modo, poniendo una simple pastilla de sonido o un micrófono en una pinza se consigue recoger el sonido, que puede ser tratado posteriormente, y amplificarlo con altavoces. En este aspecto, una gran cantidad de algoritmos y herramientas han sido desarrolladas y se sigue investigando para obtener nuevos efectos que den lugar a nuevas posibilidades sonoras.

Por otra parte, el principal tema de investigación en la cuerda frotada es su funcionamiento físico, ya que todavía hay elementos no lineales que siguen siendo demasiado complejos, con la intención de conseguir un modelo matemático perfecto con el que poder llegar a simular con un computador un instrumento de cuerda frotada.

Aun así, también siguen habiendo grupos de investigación que se centran en aspectos técnicos y en las propias herramientas de interpretación, como el arco. El arco ha sido ya exhaustivamente estudiado y, aunque hay demasiados factores no lineales, se tiene una idea básica de cómo hacer las cosas. Esta idea consiste en copiar arcos que ya funcionan bien.

El principal problema que surge de esta copia es que el material con el que se hace la vara de los arcos, la madera pernambuco, procede de la *caesalpinia*



echinata y está en peligro de extinción. De modo que los costes son muy altos y las dificultades cada vez son mayores.

Con el fin de solucionar este problema, otros materiales han sido investigados. Estas investigaciones incluyen maderas, de las cuales no se ha encontrado ninguna tan buena como el pernambuco, la fibra de carbono y la fibra de vidrio. Estos dos últimos materiales tratan de imitar al máximo las propiedades del pernambuco para intentar ser un sustituto con costes y dificultades menores.

Sin embargo, en nuestra investigación se propone otro material para las varas de los arcos, el aluminio. Este material es muy diferente al pernambuco y no se han encontrado indicios de que haya sido utilizado anteriormente en la arquetería. Tampoco ha sido investigado ya que todas las investigaciones de materiales tratan de imitar o parecerse en la medida de lo posible al pernambuco. Por lo tanto, se puede apreciar un vacío en los temas de investigación referidos a los materiales de los arcos que no sean parecidos al pernambuco.



6. Desarrollo teórico

A lo largo de la historia, la generación del sonido en los instrumentos de cuerda frotada ha sido fuertemente estudiada y observada con la finalidad de obtener algunos recursos como los siguientes:

- Obtener una explicación física fiable con la que ayudar a los intérpretes a mejorar su técnica para optimizar el rendimiento del instrumento.
- Conseguir optimizar los recursos materiales para ofrecer las mayores facilidades a la hora de tocar el instrumento.
- Ofrecer unos modelos físicos con los que ayudar a los luthiers a obtener instrumentos con las características sonoras adecuadas.
- Elaborar un modelo matemático fiable con el que poder elaborar un algoritmo para computadores con el que sintetizar un sonido que consiga ser indistinguible del sonido obtenido con un instrumento real.

A lo largo de nuestro trabajo, se van a investigar los fenómenos acústicos que produce el cambio del material en la vara del arco de un instrumento de cuerda frotada. Para ello, es necesario en primer lugar explicar las ideas fundamentales más modernas en cuanto a la producción del sonido en uno de los instrumentos principales de las cuerdas frotadas, el contrabajo.

6.1 El contrabajo

El contrabajo es el instrumento de cuerda frotada más grave presente en la orquesta sinfónica tal y como la conocemos hoy en día. Los orígenes de este instrumento continúan sin estar explicados a la perfección debido a las diferentes evoluciones que ha sufrido el instrumento en diferentes zonas geográficas y a la escasez de documentos de la época.

Será partir del Clasicismo Musical cuando se empiece a tener registros fiables de este instrumento y donde se podrá observar en el contrabajo dos vertientes



claramente diferenciadas, dos formas diferentes de entender el instrumento y dos desarrollos diferentes, la italiana y la vienesa. La principal diferencia entre los dos instrumentos según Almenara (2007) es que en la escuela italiana el contrabajo vendrá como una evolución del violín y en la escuela vienesa vendrá de la viola de gamba.

“Por un lado y partiendo de Italia, nos encontramos con un instrumento diferente, más grande y con un sonido más potente que los violones vieneses. Este instrumento pasará a tener tres cuerdas y convertirse en un instrumento tricorde.” (Almenara, 2007). Los compositores que compondrían para esta escuela serán Domenico Dragonetti (1763 – 1846), Franz Keyper (1756 – 1815), Giuseppe Antonio Capuzzi (1755 – 1818) y Giovanni Battista Cimador (1761 – 1805).

“Por otro lado Austria y su zona de influencia, en la cual floreció una escuela del contrabajo a partir del violón en Sol y que se materializó en el violón vienes, de cinco cuerdas y con trastes.” (Almenara, 2007). Karl Ditters von Dittersdorf (1739 – 1799), Johann Baptist Vanhal (1739 – 1813), Johann Mathias Sperger (1750 – 1812), Antón Zimmermann (1741 – 1781), Franz Antón Hoffmeister (1754 – 1812) e incluso Mozart y Haydn compusieron para este instrumento.

Como se ha indicado, en la escuela vienesa el contrabajo, o violón vienes, tenía 5 cuerdas, que estaban afinadas, de más agudo a más grave y con notación franco-belga, como LA2, FA#2, RE2, LA1 y FA1, es decir, con terceras mayores y menores y una cuarta justa. Esto va a aportar unas ventajas técnicas y unas desventajas de cara a la evolución técnica para la escuela vienesa.

A lo largo del siglo XIX, sigue tan solo una línea evolutiva del contrabajo, la



Figura 1: Contrabajo italiano de 3 cuerdas



Figura 2: Violón vienes de 5 cuerdas

de la escuela italiana. Entre las causas de que el violón vienés desapareciera encontramos la influencia de Dragonetti, que apareció en Viena tocando de una forma virtuosa un instrumento tricorde que impactó de gran manera en el público y en los compositores. Sin embargo, lo que parece ser que verdaderamente motivó esta desaparición fue la incapacidad del violón vienés de adaptarse a las exigencias de la música del siglo XIX.

Por último, el contrabajo que conocemos en la actualidad ha experimentado una gran cantidad de cambios respecto a sus antecesores. Bertram Turetzky (1989) habla de dos modelos de contrabajo, un modelo de uso solista con afinación, de más agudo a más grave y con notación franco-belga, como LA2, MI2, SI1 y FA#1, y otro modelo de uso orquestal con afinación, de más agudo a más grave y con notación franco-belga, como SOL2, RE2, LA1 y MI1. Estos dos modelos son los más utilizados en la actualidad.



Figura 3: Contrabajo actual

Como se puede ver, a lo largo de la historia el contrabajo ha ido modificándose y adaptándose a las nuevas exigencias técnicas y musicales hasta tal punto de no quedar prácticamente nada de sus instrumentos antecesores. Además, en la actualidad se siguen realizando cambios en el instrumento para intentar adaptarse a la música en su contexto histórico cambiando el material de las cuerdas e incluso la afinación.

De este modo, si el contrabajo se puede modificar para intentar llegar al sonido y técnica de hace 300 años, ¿por qué no se puede hacer como en el piano y adaptarlo para nuevas sonoridades y técnicas que abran un amplio abanico a la música contemporánea?

6.1.1 Funcionamiento físico

Si bien es verdad que se conocía más o menos el funcionamiento de los instrumentos de cuerda frotada prácticamente desde sus inicios, no se hizo un



estudio exhaustivo de esto hasta llegado el siglo XIX, cuando el físico Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821 - 1894) elaboró la teoría de cómo se establecía la vibración en una cuerda frotada.

En un principio, sin las suficientes herramientas ni el desarrollo tecnológico que tenemos ahora, la teoría sobre el funcionamiento del contrabajo y de los instrumentos de cuerda en general era simple: se produce una vibración en una cuerda al ser pulsada y esta vibración pasa a una caja de resonancia que es la que amplía el sonido hasta ser audible. Además, se descubrió que si se utiliza un arco cuyas cerdas estén impregnadas con un elemento pegajoso, se conseguía mantener una vibración estable en la cuerda durante más tiempo.

Sin embargo, con las mejoras tecnológicas se llegó a un nivel más sofisticado en la investigación del fenómeno vibratorio de estos instrumentos. Según Helmholtz (1954), una cuerda vibra con forma de V cuando es tocada con un arco de forma natural. El vértice de la V, o esquina de Helmholtz, viaja arriba y abajo por toda la cuerda como se indica en la Figura 4. Cada vez que esta esquina de Helmholtz pasa por el arco se realiza un cambio entre adhesión y deslizamiento sobre la cuerda: la cuerda se adhiere al arco siempre que la esquina de Helmholtz viaja desde el arco hasta el dedo y desde el dedo hasta el arco, sin embargo, se desliza sobre las cerdas del arco siempre que la esquina de Helmholtz viaja desde el arco hasta el puente y desde el puente hasta el arco.

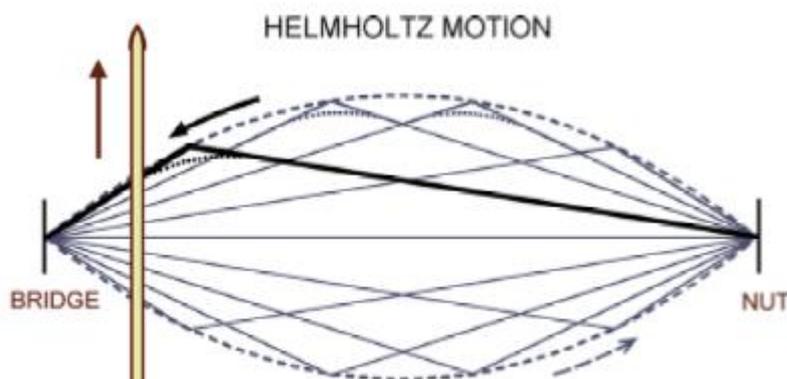


Figura 4: Representación esquemática del movimiento de Helmholtz. Si el arco va hacia arriba el sentido de rotación será anti horario y si el arco va hacia abajo el sentido de rotación será como el de las horas del reloj

“Este movimiento de Helmholtz es lo que se trata de obtener con cada uno de los golpes de arco que ejecutan los intérpretes.” (Pantelic & Prezelj, 2013).

Los mencionados cambios de adhesión y deslizamiento, *slip and stick*, son producidos precisamente gracias a la resina utilizada en el arco. Esta sustancia pegajosa untada en las cerdas del arco contiene un índice de fricción con el cual provoca que sean capaces de adherirse a la cuerda cuando la el índice de fricción es inferior a un umbral y también que sean capaces de deslizarse sobre la cuerda cuando el umbral ha sido pasado.

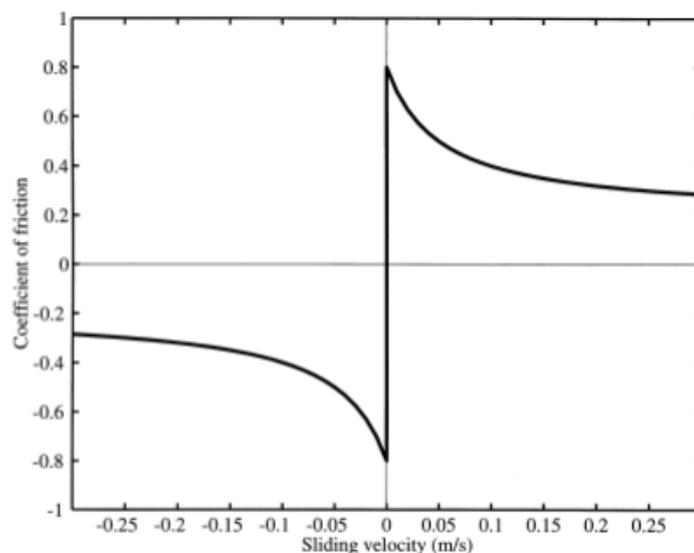


Figura 5: Esquema de una relación típica entre el coeficiente de fricción de la resina y la velocidad instantánea de deslizamiento

Como se puede apreciar en la Figura 5, la velocidad de deslizamiento depende del coeficiente de fricción, pero con una especie de histéresis. Así, cuando el coeficiente de fricción permanece, en este caso, entre -0,8 y 0,8 la velocidad de deslizamiento será nula, es decir, estamos en la fase de adhesión o *stick*. En cambio, cuando se ha sobrepasado o bien el umbral de 0,8 o -0,8 vemos que aparece una velocidad de deslizamiento hasta que se vuelva a estabilizar, por lo tanto estamos en la fase de deslizamiento o *slip*.



La combinación de estas dos fases, *slip and stick*, junto con el movimiento de Helmholtz es la base de la generación del sonido en un instrumento de cuerda frotada, sin embargo, como se va a ver a continuación, esto pertenece al modelo ideal que no es el que sucede en la realidad, donde aparecen ciertas distorsiones como se pueden apreciar en la Figura 6 y la Figura 7.

“Durante las oscilaciones en un paso de arco firme, la fricción causa que la cuerda sea tirada por el arco en el punto de contacto con las cerdas. Esto conlleva una distorsión en el limpio y simétrico patrón del movimiento de la cuerda”.

(Guettler, 2002)

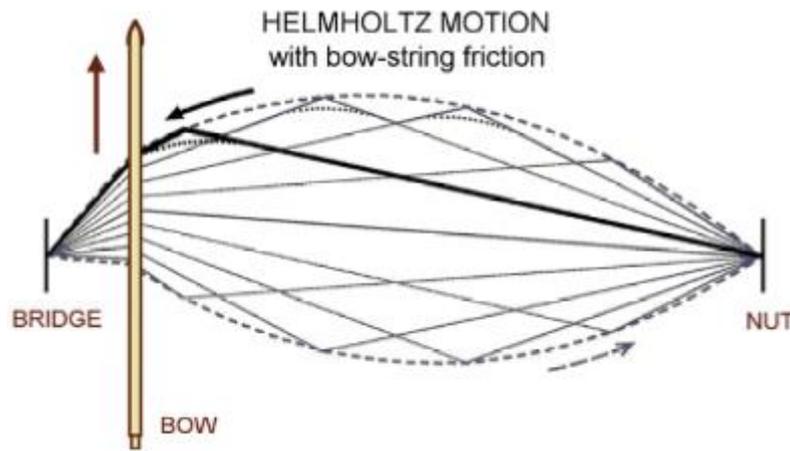


Figura 6: Distorsión de la fricción en la trayectoria parabólica simétrica.
En la práctica, la fricción causa un tiramiento constante en la dirección
del arco cuando éste pasa de forma consistente

Según Guettler (2002), adicionalmente a este efecto, cualquier onda generada, conocida como onda secundaria, que se sitúe entre el arco y el puente durante la fase de adhesión se quedará bloqueada y será reflejada entre estas dos barreras. Aunque su destino y funcionamiento todavía es un misterio, parece que este efecto no tiene un gran impacto en el sonido final. No obstante, si estas ondas son generadas durante la fase de deslizamiento, éstas serán amplificadas al pasar por el arco.

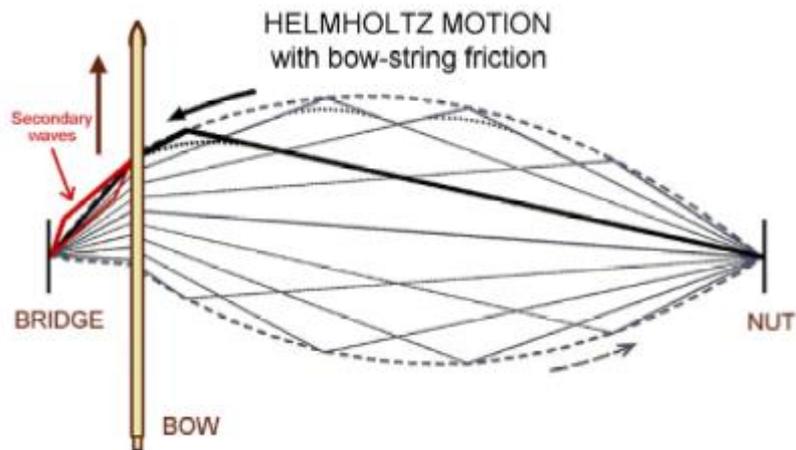


Figura 7: Las ondas secundarias se quedan atrapadas entre el arco y el puente durante la fase de adhesión

A continuación se va a mostrar un ejemplo de cómo quedarían los desplazamientos de una cuerda durante los primeros ciclos de un golpe de arco estándar, realizado por Woodhouse y Galluzzo (2004).

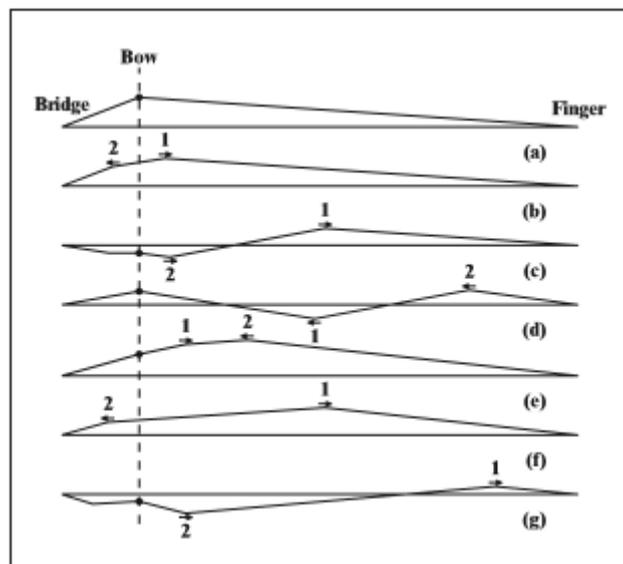


Figura 8: Representación esquemática de los desplazamientos de una cuerda durante el paso de arco. El punto negro indica si estamos en la fase de adhesión



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO

- a) Antes del primer deslizamiento, el arco tira de la cuerda hacia afuera casi estáticamente.
- b) En cuanto se produce el primer deslizamiento, dos ondas son enviadas hacia el exterior del punto de contacto del arco con la cuerda.
- c) La primera fase de deslizamiento finaliza cuando la onda 2 pasa por el punto de contacto del arco con la cuerda desde el puente.
- d) Tras chocarse con el dedo, las ondas 1 y 2 son reflejadas y vuelven hacia el arco.
- e) La onda 1 tiene signo negativo para producir deslizamiento, de modo que se refleja desde el arco adherido a la cuerda.
- f) La onda 2 sin embargo tiene el mismo signo, por lo que cambia el estado de adhesión a deslizamiento. Aquí se puede apreciar que mientras la onda 1 ha sido reflejada, la onda 2 ha pasado por el punto de contacto.
- g) El segundo deslizamiento finaliza cuando la onda 2 vuelve a pasar por el punto de contacto del arco con la cuerda.
- h) La secuencia continúa en una forma parecida, con las dos ondas yendo cada vez más separadas.

Por último, además de los movimientos de Helmholtz mencionados en la sección anterior, al frotar el arco con la cuerda aparece un movimiento de torsión que sí puede tener un gran impacto en el sonido final y sobretodo en la sensación del intérprete al tocar el instrumento.

El hecho de que aparezcan ondas de torsión hace que aparezca una alteración en la onda transversal produciendo una sensación de nerviosismo, o *jitter*. Este *jitter* es ocasionado por la falta de sincronización de fases entre las ondas transversales y rotacionales y si aparece en gran cantidad, según Bavu, Smith y Wolfe (2005), provoca un ruido molesto en el sonido. Sin embargo, según Bavu, Yew, Plaçais, Smith y Wolfe (2004) un músico profesional es capaz de sincronizar las fases de estas ondas rotacionales con las transversales para hacerlas imperceptibles.

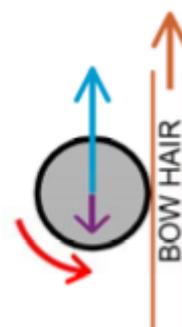


Figura 9:
Movimiento de torsión en una cuerda al ser frotada por un arco

Una vez realizada una visión general sobre el contrabajo y visto un modelo general del funcionamiento del sonido en él y las cuerdas frotadas, se va a ver qué es exactamente el arco, nuestro objeto de investigación, qué parámetros definen su calidad y en qué influye a la hora de la producción de sonido.

6.1.2 El arco

El arco es la herramienta utilizada por los instrumentistas de cuerda frotada para realizar la gran mayoría de los sonidos del instrumento. El desarrollo de esta pieza ha ido siempre paralelo al de los instrumentos a los que servía.

Aparición y evolución. En sus inicios, según dice Francés (2010), el arco tuvo una forma arcaica similar a la de los rabeles de hoy en día. El hecho de poseer la curva de la vara convexa hizo que de ahí se tomara el nombre de arco.

La idea fundamental de esta herramienta era impregnar una sustancia pegajosa sobre las cerdas de un animal con la intención de frotarlas posteriormente sobre una cuerda tensada para generar un sonido.



Figura 10: Arco convexo arcaico

A lo largo del Renacimiento, el arco sufre una transformación importante. “La vara se hace más larga, la curva se suaviza, haciéndose más plana, con esto se logra más control en la articulación y facilita la ejecución de determinados golpes de arco”. (Francés, 2010). “Aparece la nuez, que facilitará el tensar y destensar el arco así como evitar que las cerdas rocen la vara, al hacerse la curva más plana”. (Francés, 2010). Las cerdas se tensaban al colocar la nuez en su sitio y se destensaban al quitarla.



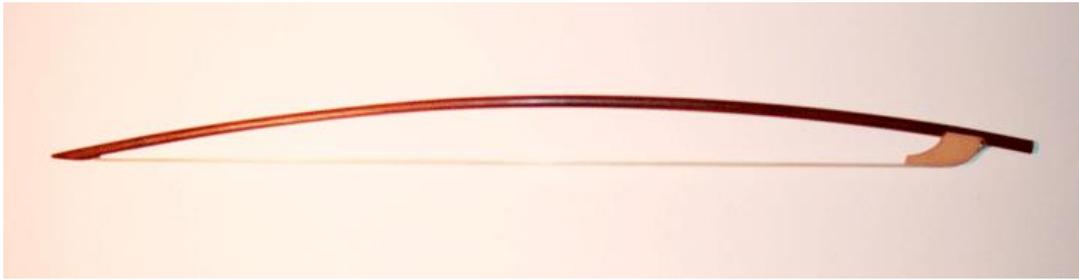


Figura 11: Arco convexo del Renacimiento

A finales del siglo XVII la curva del arco se reduce drásticamente y se empiezan a utilizar mecanismos para tensar y destensar las cerdas sin necesidad de quitar la nuez.



Figura 12: Arco convexo del siglo XVIII

Finalmente, a lo largo del siglo XVIII el arco empieza a convertirse en lo que hoy conocemos. La curva se hace cóncava, la vara es más larga y aumenta el peso. Pero será Françoise X. Tourte quien, a finales del siglo XVIII, sentará, a partir del arco clásico, las bases del arco moderno.



Figura 13: Arco cóncavo actual

Sin embargo, en lo que se refiere al contrabajo, una nueva familia de arcos aparece desde Alemania. Estos arcos son más grandes y se cogen con una técnica totalmente diferente a la de violín, viola y violonchelo, situando la mano en la nuez en vez de en la vara. Desde entonces perviven dos técnicas de arco en el contrabajo y por tanto dos construcciones diferentes: la anteriormente mencionada

alemana y la francesa, que es la que utilizan los demás instrumentos de cuerda frotada.



Figura 14: Ejemplos de arco alemán en la parte superior y arco francés en la parte inferior

Componentes y partes. En la actualidad, los elementos que componen el arco son:

- La vara. Es la parte más importante del arco ya que es lo que le da la identidad y la calidad. Cada arco de cada familia posee unas dimensiones diferentes, contra más agudo es el instrumento los arcos se vuelven más finos y largos que los de los instrumentos graves.
- La punta. Es la parte final de la vara y es el sello del constructor. La forma final sirve como protección a posibles golpes y sirve también para diferenciar a los fabricantes artesanos.
- La nuez. Situada en la parte inferior de la vara y al otro extremo de la punta, da sujeción a la encerdadura y permite que se pueda coger con la mano. Tiene un tornillo con el que se puede cambiar la tensión del arco.
- La guarnición. Formada por un trozo de piel y un hilillo de metal enrollado, la guarnición protege la vara del roce y el sudor de los dedos. En los arcos de contrabajo alemán, esta pieza puede ser eliminada por cogerse de forma diferente al resto.
- La encerdadura. Junto con la vara, las crines de caballo son las que definen la calidad de un arco. Para el contrabajo existen encerdaduras de diferentes colores con características diferentes. Las más utilizadas son las negras y las blancas, aunque también se utilizan las pardas, que son una mezcla de blancas y negras.



- Los taquillos. Situadas a modo de cuña en cada extremo del encerado, sujetan las crines a la punta del arco y al interior de la nuez.

Características de calidad. Las dos características que van a definir la calidad de un arco según un estudio realizado por Askenfelt (1992) son la manejabilidad y la calidad de los tonos que produce. La manejabilidad será relativa a la comodidad del intérprete para realizar la técnica y la calidad de los tonos consistirá en la relación de los armónicos que se producen en el arco.

La manejabilidad. Consiste en la facilidad que proporciona al intérprete el arco en sí, con la vara y su construcción. Relacionado con la manejabilidad se encuentra la longitud de la vara, el centro de gravedad del arco, la curvatura, el peso y la forma de la nuez. Un simple cambio en uno de estos parámetros puede significar el paso de un arco con una manejabilidad excepcional a un arco con una manejabilidad nefasta, y pasar por consiguiente a ser un arco de baja calidad.

Los parámetros como la longitud de la vara y el peso tienen una gran repercusión en el esfuerzo que debe realizar el intérprete a la hora de utilizar el arco. Evidentemente, a mayor esfuerzo mayor energía utilizada y por lo tanto mayor cansancio a largo plazo. Por otra parte, los parámetros como la curvatura, el centro de gravedad y la forma de la nuez inciden en la facilidad de utilizar técnicas como por ejemplo el *spiccato*, técnica en la cual el arco salta sobre la cuerda.

Una buena manejabilidad de un arco depende por lo tanto en casi toda su totalidad de la artesanía del arquetero que lo ha construido. La labor de seleccionar el material adecuado, la curva exacta para el material, la nuez utilizada así como las dimensiones de la vara van a incidir directamente en la calidad del arco.

La calidad de los tonos. Se trata de la percepción sonora que transmite un arco al ser utilizado. Detrás de la calidad de los tonos están los armónicos naturales que se producen en el arco por los modos propios de la vara y las ondas longitudinales que ocurren en el encrinado del mismo arco.



De este modo, en cuanto a la calidad de los tonos van a importar principalmente las características del material que vaya a ser utilizado para la vara. En general, una madera con una alta velocidad de propagación de sonido ha sido siempre lo ideal a lo largo de los años. Pero además de la velocidad de propagación, juegan un papel esencial la elasticidad del material y la densidad.

La elasticidad de la vara, atendiéndonos al módulo de Young, es directamente proporcional a la velocidad del sonido en el material, mientras que la densidad es inversamente proporcional. Los estándares marcados hasta el momento indican que la velocidad del sonido en el material de la vara ha de ser de unos 5.000 m/s para tener una calidad de los tonos buena. Para ello, la vara ha de ser elástica, poco densa y por supuesto tenaz para no romperse.

Técnicas. Las técnicas con las que interpretar el contrabajo han ido evolucionando y cambiando a lo largo de la historia junto al instrumento. Además de las técnicas de arco, existen las del pizzicato y diferentes efectos que se producen en músicas contemporáneas. Sin embargo, nos vamos a centrar en las del arco ya que son las que se adecúan a nuestra investigación.

Evidentemente, la presión y velocidad de arco necesaria para realizar un sonido con las cuerdas actuales no son iguales a las que harían falta para las cuerdas de tripa presentes en los instrumentos antiguos. Del mismo modo, el cambio en la forma del arco que se hizo desde el Barroco también permite unas posibilidades diferentes a las de aquella época. Por estas razones entre muchas otras, hay cambios drásticos en las técnicas de interpretación desde los inicios hasta la actualidad.

Sin embargo, se pueden sacar denominadores comunes a todas las técnicas de pasar el arco. Así pues, Askenfelt (1988) sitúa que los datos importantes a la hora de obtener un sonido sea la técnica que sea son la distancia del puente al arco, la velocidad del arco, la presión del arco y la posición del arco respecto a la nuez o a la punta.

Estos datos definen la llamada fuerza de control necesaria para el arco, y ésta sirve para medir una de las dos características de calidad del arco, la



manejabilidad. Si la fuerza es demasiado baja, el arco tendrá respuesta para movimientos muy pequeños de la mano y si es demasiado alta, el arco no tendrá la respuesta esperada.

Los factores como la presión del arco van a estar afectados por valores estructurales del mismo. Según donde se sitúe el centro de gravedad del arco o el peso que este tenga, la presión ejercida va a cambiar y afectará por lo tanto a la manejabilidad y por consiguiente a la calidad del arco. Por este motivo, además de la calidad del material de la vara, el montaje y su forma dados por el lutier juegan un papel fundamental en la manejabilidad y en la calidad del arco.

En conclusión, a la hora de obtener un buen *spiccato* o un buen *legato* con el arco, el instrumentista va a tener que jugar con los cuatro datos anteriormente señalados para obtener un sonido adecuado, y estos datos van a estar influenciados por las propiedades físicas de la vara así como por la construcción que se le haya dado al arco. Dos arcos artesanales o dos arcos de diferentes materiales nunca podrán ser totalmente iguales y, por consiguiente, será el instrumentista el que interactúe con las características de los arcos para conseguir una técnica con la que realizar los sonidos deseados con un arco de una calidad determinada.

Materiales. A lo largo de la historia, los materiales con los que se han ido fabricando los arcos de los instrumentos han ido variando. Si bien es verdad que desde los inicios de la arquetería se han utilizado maderas para elaborar los arcos, hoy en día hay diversos materiales con los que se pueden hacer arcos, entre ellos la fibra de vidrio y la fibra de carbono.

En cuanto a las maderas como material para los arcos de cuerda frotada, no hay duda, el pernambuco (*caesalpinia echinata*) es el material por excelencia y se ha establecido a lo largo de la historia de la arquetería. La razón por la que el pernambuco ha sido considerado siempre el rey del material en arquetería no se sabe con total certeza ya que “no hay informes que prueben científicamente que el pernambuco es adecuado para los arcos de violín. Esta especie de madera fue seleccionada probablemente basada en la experiencia de fabricantes de arcos y



violinistas a lo largo de muchos años”. (Matsunaga, Sugiyama, Minato & Norimoto, 1996). Aun así, lutieres profesionales resaltan que las propiedades elásticas y su densidad así como su dureza y tenacidad son las características que hacen que el pernambuco destaque tanto sobre otras maderas.

A lo largo de los últimos años y especialmente a partir de que se declarara esta especie en peligro de extinción, se han realizado diferentes investigaciones para intentar un sustituto adecuado a esta madera. Entre los experimentos que se han realizado, Matsunaga y Minato (1998) hicieron una comparación entre diferentes maderas y el pernambuco para los arcos. Las pocas conclusiones que sacaron fueron que la tangente δ del pernambuco, donde δ representa el desfase existente entre el esfuerzo y la deformación del material, era muy baja y que la fuerza de cizallamiento era altísima en relación a las otras maderas. Lamentablemente, aunque las dos sean propiedades necesarias para un arco, no son las características más importantes de este material.

Entre las propiedades físicas que se pueden encontrar que sí tienen un papel fundamental en la calidad del arco de pernambuco son la velocidad del sonido (entre 4.000 y 6.000 m/s) y su alta flexibilidad así como su dureza y resistencia en relación a la densidad. Todas ellas combinadas permiten al arco una gran manejabilidad junto con una alta calidad en los tonos, dando así alta calidad a la vara del arco.

Por ello, otros materiales con características parecidas a las nombradas han sido explorados sin la restricción de que sean de madera. Entre estos material se encuentran la fibra de vidrio y la fibra de carbono.

La fibra de vidrio es utilizada principalmente por su precio bajo y su facilidad de moldeo, pero no se han producido todavía arcos de este material de gran calidad. Pese a poseer unas características parecidas al pernambuco, las diferencias en cuanto a manejabilidad y sonido son perceptibles, lo que hace al músico acudir al pernambuco de nuevo para conseguir mayor calidad. Se pueden encontrar en sets de gente que va a iniciar donde se vende instrumento, funda y arco por un precio muy barato.



En cambio, la fibra de carbono sí que ha conseguido tener un impacto en el mercado de los arcos por su gran parecido al pernambuco. Su velocidad de propagación, su densidad, su flexibilidad y su fuerza de cizallamiento así como su bajo coste lo convierten en un material atractivo para la elaboración de los arcos. A diferencia de la fibra de vidrio, en las orquestas empiezan a aparecer profesionales utilizando este tipo de arcos que pueden llegar a tener una calidad mejor que la de la madera.

6.2 El aluminio como material para la vara de los arcos

Como se ha visto en el apartado anterior, el material con el que se fabrica un arco juega un rol importantísimo en su calidad y en la técnica que el instrumentista adquiere. Por lo tanto, el cambio del material con el que está hecha la vara del arco influirá de un gran modo en el artista y en el sonido.

Pese a que hoy en día el pernambuco sigue siendo el rey de los materiales con los que se fabrican los arcos, la aparición de la fibra de vidrio y en especial de la fibra de carbono ha abierto una nueva gama de posibilidades para la construcción de las varas. Estos materiales tratan de imitar al máximo las propiedades acústicas del pernambuco, así como sus cualidades físicas, al mismo tiempo que son mucho más baratos y fáciles de trabajar.

No obstante, a lo largo de nuestra investigación se va a probar el aluminio como material para la vara del contrabajo no por ser parecido al pernambuco, sino por sus características físicas propias. Por lo tanto, el arco construido con este material ya no va a tener tantas similitudes con el pernambuco ni con la madera en general, sino que va a buscar nuevas sensaciones sonoras que se puedan realizar con el contrabajo.

La razón por la que se ha optado por el aluminio entre otros materiales es por su alta velocidad del sonido y su baja densidad. De este modo, siendo un material que no va a pesar demasiado como para ser un metal, proporcionará un parámetro muy adecuado para la arquería, la velocidad del sonido. Del mismo modo, al



poseer una densidad relativamente baja, será un material no demasiado pesado con el que se podrá trabajar.

6.2.1 Características y propiedades del aluminio

A continuación se van a indicar las características del aluminio así como las propiedades físicas y mecánicas de este metal.

En general, el aluminio posee una combinación de propiedades, como su baja densidad y su alta resistencia a la corrosión, que lo hacen muy útil en los campos de la ingeniería. Su buena conductividad de la electricidad y el calor, su bajo coste y su facilidad de mecanizado han convertido este material en el metal que más se utiliza después del acero.

En cuanto a la acústica, el aluminio presenta una velocidad del sonido elevada en comparación a los demás materiales (unos 5100 m/s). Como se ilustra en la siguiente fórmula, la velocidad del sonido en el material (V_s) va a depender del módulo de Young del material (E) y de su densidad (ρ).

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Aunque el módulo de Young del aluminio es bajo respecto a los otros metales (66,6 GPa), su densidad tan baja ($2.700 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$) hace que el valor de la velocidad del sonido sea elevado y comparable a, por ejemplo, la del pernambuco. Además, este valor de la densidad permite realizar objetos resistentes a golpes, como los utilizados en percusión, que no resulten demasiado pesados a la hora de ser utilizados.

A continuación se muestra una tabla con las principales propiedades del aluminio como material.



Tabla 1

Propiedades y características del aluminio en general

ESTRUCTURA	Símbolo químico	Al
	Número atómico	13
	Peso atómico	26,98154 u.m.a
	Volumen atómico	$9,996 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$
	Distancia interatómica mínima	0,28635 nm
PROPIEDADES	Color	Blanco brillante
	Densidad	$2,6989 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
	Módulo de Young	66,6 GPa
	Dureza	baja
	Ductilidad	alta
	Maleabilidad	alta
	Tenacidad	alta
	Resistencia mecánica	baja
	Límite elástico	215-505 MPa
	% Elongación	10-25 %
	Temperatura de fusión	660,2 °C
	Temperatura de ebullición	2057-2480 °C
	Conductividad eléctrica	$37,67 \text{ m} \cdot \Omega^{-1} \cdot \text{mm}^{-2}$
	Conductividad térmica	$235 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

6.2.2 Nuevas posibilidades técnicas y sonoras

A lo largo de la historia, los instrumentos han sido modificados para que cumplan con las necesidades sonoras y con las exigencias del momento, como se comentó anteriormente. Sin embargo, en otras ocasiones los instrumentos han sido modificados con la intención de conseguir nuevos sonidos o cambiar las posibilidades sonoras del instrumento. Un claro ejemplo de esto sería el *prepared piano* del compositor americano John Cage (1912 – 1992), en el que insertó una



serie de objetos en las cuerdas, martillos y amortiguadores de un piano con la intención de cambiar el timbre que producía este instrumento.

Siguiendo un poco por este camino, sin cambiar de gran forma el timbre pero sí el sonido producido por el contrabajo, el uso del aluminio como material en la vara del arco de contrabajo abre nuevos caminos sonoros y aporta modificaciones significantes al sonido de este instrumento, especialmente a la potencia.

Sin embargo, el objetivo de utilizar el arco de aluminio no es solo uno. Al utilizar una vara relativamente pesada en comparación a la madera, las sensaciones de la técnica van a ser muy diferentes a las de un arco de madera estándar y aparecerán nuevas sensaciones técnicas al utilizar un arco con estas características. Además, puede llegar a ser muy interesante en la pedagogía que estas sensaciones técnicas puedan ser de ayuda al volver a coger el arco de madera.

Por último, y siguiendo con las dos líneas evolutivas mencionadas, los compositores de la actualidad están realizando una búsqueda de nuevos planos sonoros y de nuevos conceptos musicales para sus obras. Con las nuevas puertas tanto sonoras como técnicas que puede abrir el uso del aluminio en el arco del contrabajo, es posible que también se descubran nuevas posibilidades en la composición al obtener un concepto nuevo sobre un instrumento tan clásico. Este nuevo concepto podría quitar los límites a los caminos compositivos a los que estaba sujeto el contrabajo al tener un abanico de recursos mayor.

6.3 Toma de datos

Una de las partes fundamentales de nuestra investigación consiste en la toma de datos, que deberá hacerse de forma adecuada y consistente para obtener al máximo las propiedades acústicas del arco que estamos analizando.

Para realizar la toma de datos es necesario tener conciencia de las herramientas que se están utilizando y del espacio donde se está captando el sonido, ya que no es lo mismo grabar en una iglesia que grabar en la calle. Por esto, es necesario



conocer las herramientas con las que captaremos el sonido, que serán los micrófonos y los acelerómetros, y el espacio donde se captará el sonido, que será la cámara anecoica.

6.3.1 Los micrófonos

Los micrófonos son unos sistemas electrónicos que permiten la captación del sonido para su posterior almacenamiento o reproducción. Su funcionamiento consiste en convertir la energía acústica en energía eléctrica a través de una membrana que es excitada por las ondas sonoras.

A lo largo del siglo XIX, el micrófono ha sufrido muchas evoluciones y se han establecido diferentes tipos según las necesidades de la grabación y las condiciones en las que se realiza.

Características de los micrófonos. En la actualidad, se pueden encontrar micrófonos de diferentes tipos y con diferentes principios de funcionamiento. Las principales diferencias entre los distintos tipos de micrófonos aparte de las estructurales son el rango de frecuencia, el filtrado de graves y la direccionalidad.

El rango de frecuencias consiste en el nivel de salida o la sensibilidad que tiene un micrófono dentro de su rango de operación de frecuencia para la dirección y el ángulo de máxima captación.

El filtrado de graves es la eliminación de los posibles ruidos que puede haber en la baja frecuencia, como por ejemplo vibraciones, soplos y el efecto proximidad.

Por último, la direccionalidad consiste en la sensibilidad que tiene el micrófono en función de la dirección y del ángulo de llegada del sonido. Los tipos de direccionalidad son el omnidireccional, si tiene igual sensibilidad en todas las direcciones, bidireccional, si tiene la misma sensibilidad para ángulos opuestos, y unidireccional, cuando el micrófono tiene más sensibilidad en una determinada dirección y sentido.



Técnicas de captación sonora. En la actualidad, hay diversas formas de captar el sonido con los micrófonos según su disposición y cantidad. Pese a que para realizar una grabación hay que tener en cuenta la posición de las fuentes, la acústica de la sala y muchos más factores, las cuatro formas más utilizadas actualmente son las siguientes:

- **Multimicrofónica.** Como su nombre indica, esta técnica consiste en poner un micrófono en cada una de las fuentes o en grupos de fuentes con características sonoras iguales. La gran ventaja de esta técnica es el poder procesar después cada fuente por separado y el gran inconveniente es el elevado coste.
- **Multicanal.** Esta técnica de grabación consiste en tener múltiples pistas grabando simultáneamente alrededor de las fuentes sonoras. Las más conocidas son las grabaciones 7 a 1 o las grabaciones 5 a 1, en las que se ponen un número de micrófonos alrededor de las fuentes en una distribución estándar y un micrófono para grabar el plano ambiente.
- **Estereofónica.** Con un solo micrófono o con un par enlazado de micrófonos, esta grabación trata de tomar un plano del ambiente y obtener un efecto estéreo de la grabación. Suele ser utilizada para espacios demasiado grandes en los que se quiere captar el ambiente con fidelidad y para agrupaciones de fuentes numerosas.
- **Biaural.** Se basa en la escucha biaural propia del ser humano y pretende captar el sonido de forma que la imagen sonora quede intacta al reproducir posteriormente la grabación. Para ello, se utiliza un maniquí, que simula el efecto que tiene en el sonido la cabeza y el torso humano, y se le añaden unos micrófonos al final del canal auditivo.

6.3.2 Los acelerómetros

También conocidos como sensores de aceleración, este transductor permite conocer las aceleraciones que se están produciendo en sus ejes siempre en el marco de referencia del dispositivo. Gracias a la aceleración registrada, con este



sensor es también posible medir la fuerza que se está realizando sobre el dispositivo, haciéndolo todavía más útil.

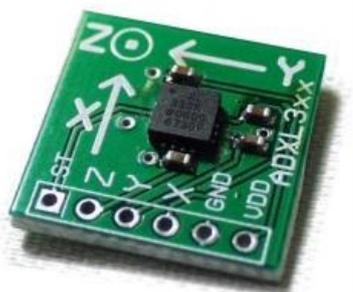


Figura 15: Sensor de aceleración

Utilizados principalmente integrados en las Unidades de Medición Inercial de los dispositivos GPS, los acelerómetros son principalmente utilizados en sistemas de navegación. Otras de los usos más comunes a los que se someten este tipo de transductores son a medir fuerzas y pesos y a medir las vibraciones que se producen en objetos.

6.3.3 La cámara anecoica

Con los grandes avances de la tecnología, las investigaciones en torno a la acústica requerían cada vez un mayor número de herramientas para ser utilizadas en las salas e incluso para los temas que concernían a la grabación. Una de las herramientas que se desarrolló fue la sala llamada cámara anecoica.

Esta cámara anecoica consiste en un espacio cerrado en el que se trata de absorber al máximo posible las reflexiones producidas por ondas acústicas y electromagnéticas en cualquiera de sus superficies laterales, techo y suelo. Además, la sala está aislada totalmente del exterior, no permitiendo así que entre ruido procedente de fuentes externas. La combinación de estos dos factores

permite que la sala tenga unas condiciones sin reverberación, consiguiendo así que solo se escuche el sonido que va directo de la fuente al receptor.



Figura 16: Interior de una cámara anecoica

La base a la que está sujeta la física de la cámara anecoica consiste en que el sonido es una onda que transmite energía mecánica a través de un medio, de modo que al chocar con una superficie la onda es en parte reflejada y en parte absorbida. La idea es que con un material poroso que absorba mucha energía y dispuesto de una forma concreta, el sonido se refleje en direcciones que nunca vuelvan hacia la fuente o que, cuando lo hagan, tengan un nivel de energía tan pequeño que no sean significantes.

El rango de frecuencias de esta cámara suele depender del tamaño de los elementos absorbentes así como de las dimensiones de la sala. Así pues, normalmente las cámaras anecoicas funcionan para rangos de frecuencias que van desde los 200 Hz hasta los 20 kHz.

En este tipo de salas, investigadores de acústica y musicales de alto prestigio han desarrollado muchos proyectos e incluso obras musicales. La más conocida es 4'33'' del compositor estadounidense John Cage, en la que intenta transmitir con la música lo que se siente en esta cámara anecoica. La partitura consiste en silencio para todos los intérpretes y su duración y nombre vienen dados a



consecuencia del tiempo que duró dentro de la cámara el compositor antes de empezar a percibir cosas extrañas.

6.4 Análisis del sonido

Una vez se hayan capturado las muestras del sonido, para poder analizarlas como es debido es necesario el uso de algunos programas software que proporcionen facilidades y un entorno de trabajo adecuado para el problema a solucionar.

Los dos programas que se va a utilizar son de software libre y proporcionan unas herramientas simples pero a la vez muy eficaces. En el caso de Audacity se tendrá una interfaz de usuario muy sencilla y en el caso de SMS Tools se tendrá unas herramientas específicas para un uso determinado.

6.4.1 Audacity

Creado en otoño de 1999 por Dominic Mazzoni y Roger Dannenberg en la universidad de Carnegie Mellon, Audacity es uno de los programas de edición y grabación de audio más utilizados. En mayo del año 2000 fue publicado en SourceNet, convirtiéndose así en un programa de software libre.

La versión que se utilizará a lo largo de nuestro trabajo será la última disponible en la página web y consiste en la 2.1.0.

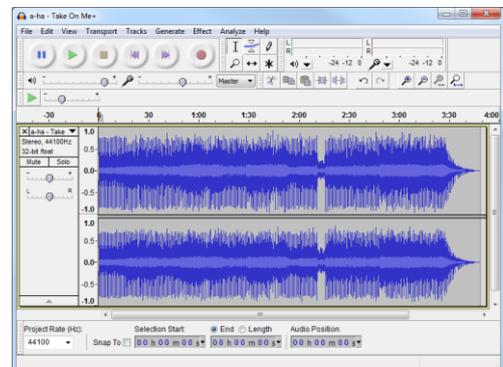


Figura 17: Logo e interfaz de usuario de Audacity

Como aplicación multiplataforma, Audacity 2.1.0 tiene una gran variedad de funcionalidades en diversos campos, entre los cuales figuran las siguientes:

- Registro. Audacity puede grabar audio en directo a través de un micrófono o un mezclador. Además, permite digitalizar casetes, discos de vinilo y minidiscos.
- Importar y exportar. Además de importar archivos de sonido para editar y combinarlos con otros archivos, Audacity permite exportar las grabaciones a otros formatos.
- Edición. Junto con las funcionalidades más básicas que todo programa debe ofrecer, Audacity permite editar, mezclar y alterar las pistas de grabación además de las muestras con archivos de gran tamaño.
- Efectos. Cambiar el tono sin alterar el tempo, eliminar ruidos, añadir filtrados o diferentes efectos como el *wah-wah* o el *echo* son otras de las posibilidades que Audacity ofrece.
- Calidad de sonido. La configuración de Audacity permite no perder calidad de audio incluso al combinar diferentes pistas con distintas frecuencias de muestreo o formatos diferentes.
- Módulos. Audacity permite ser complementado con otros módulos o plugins que hayan sido desarrollados y que funcionen adecuadamente con el sistema operativo que utilicemos.
- Análisis. Con las herramientas de Audacity, el análisis de las pistas tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia puede ser realizado de una forma cómoda y sencilla.
- Multi-plataforma gratuito. Bajo la Licencia Pública General GNU (GPL), Audacity puede ser ejecutado en diferentes sistemas operativos entre los que se encuentran Mac OS X, Windows y Linux.

Como se puede apreciar, las posibilidades que ofrece Audacity son muy amplias y es un entorno de trabajo rápido y sencillo de utilizar, siendo perfecto para los análisis que se van a realizar a lo largo del desarrollo práctico.



6.4.2 SMS Tools

La herramienta de análisis y síntesis SMS Tools fue desarrollada por Xavier Serra con la ayuda de Fabià Serra Arrizabalaga y Sankalp Gulati entre otros desarrolladores. A diferencia de Audacity, esta herramienta no tiene una interfaz de usuario sólida ni es multiplataforma.

Con una licencia de software libre Affero GPL, este software está pensado para trabajar en Ubuntu utilizando lenguajes de programación como Python y C. Para utilizar este software, es necesario disponer de la versión 2.7.* de Python con los módulos python-numpy, python-matplotlib, python-scipy y cython.

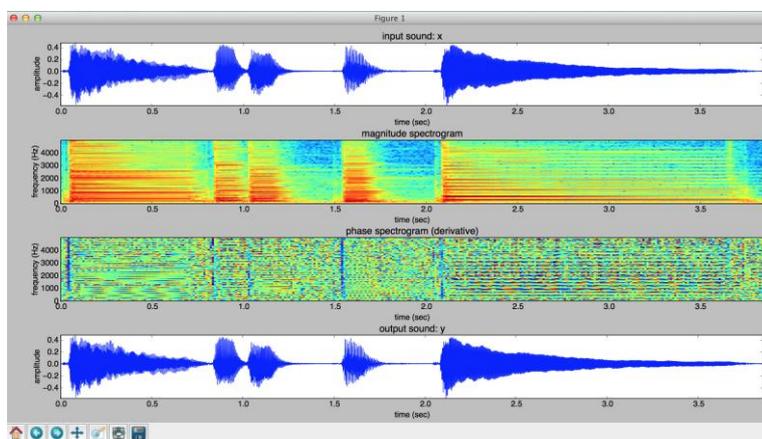


Figura 18: Captura de pantalla de la herramienta SMS Tools

Entre las funcionalidades que este programa nos ofrece se encuentran las siguientes:

- Transformada de Fourier
- Hallar la descomposición sinusoidal de un sonido
- Hallar la descomposición armónica de un sonido y el modelo residual del ruido.
- Hallar la descomposición armónica de un sonido y el modelo estocástico del ruido.

Como se puede apreciar, la funcionalidad de esta herramienta es muy escasa, sin embargo, permite al usuario crear nuevos módulos y nuevas funcionalidades programando en el lenguaje Python o incluso en C++.

Esta herramienta está siendo utilizada por Xavier Serra, profesor de la Universitat Pompeu Fabra de Barcelona, y por Julius O. Smith III, Universidad de Stanford, en cursos digitales como el de *Audio Signal Processing for Music Applications*, disponible en la plataforma digital de Coursera.



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE
CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO



7. Desarrollo práctico

A continuación, en contraste con el desarrollo teórico anterior, se van a explicar cada una de las tareas realizadas y el material utilizado para conseguir los resultados y por lo tanto los objetivos de este trabajo cumpliendo con la metodología.

7.1 El arco de aluminio fabricado para contrabajo

La idea de crear un arco de aluminio para contrabajo surgió hace 5 años al observar las propiedades acústicas que tenía el aluminio en general. Aun así, la idea tuvo que ser pospuesta debido a la falta de material y de tiempo para realizar esta tarea. Se creó entonces un simple arco de aluminio prototipo muy básico.

A partir del año pasado, las posibilidades de material así como de tiempo y presupuesto permitieron el inicio de esta labor. De este modo, surgió el arco de aluminio perfeccionado.

7.1.1 Arco de aluminio prototipo

El primer intento de arco que se hizo fue estructuralmente caótico. Debido a la falta de herramientas para trabajar el aluminio y presupuesto, el arco salió con muchos fallos. Básicamente, consiste en un tubo de aluminio hueco con un par de agujeros en los que meter la nuez y con las cerdas enganchadas a un extremo con una brida, como se puede apreciar en la Figura 19 y la Figura 20. El arco tendría la estructura del arco alemán de contrabajo.



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO



Figura 19: Arco de aluminio prototipo



Figura 20: Punta del arco de aluminio prototipo

Puesto que la curva estaba hecha a base de doblarlo con fuerza, estaba mal hecha y al tocar se chocaba con las cuerdas si se hacía demasiada presión. Además, el tornillo de la nuez que tensaba estaba roto y no se podía ni tensar ni destensar el arco y encima las cerdas estaban mal peinadas al estar enganchadas simplemente con una brida.



Aun así, con todos estos problemas, el arco daba un resultado sonoro peculiar. Se notaba que era diferente del resto de los arcos aunque no se pudiera tocar cómodamente con él. Junto con esto, al ser hueco tenía un peso muy parecido al del pernambuco, pero se tenían unas sensaciones de ligereza al tocarlo. Las características de este arco están reflejadas en la Tabla 2.

Tabla 2

Características del arco de aluminio prototipo

Longitud de la vara	66,5 cm
Longitud del arco	72,8 cm
Longitud del encerado tensado	57,2 cm
Diámetro de la vara en la punta	1 cm
Diámetro de la vara en la nuez	1 cm
Altura de la punta	5 cm
Altura de la nuez	4,8 cm
Peso de la vara	62 g
Peso de la nuez	45 g
Peso del botón	14 g
Peso del arco	121 g
Punto de gravedad del arco (medido desde la punta)	46,5 cm

Este arco fue tocado por algunos solistas internacionales y nacionales de contrabajo y, pese a estar mal hecho estructuralmente, llegó a gustar por ser diferente pero no sonar mal en ningún caso. Esta fue la razón que impulsó a realizar este año un arco en buen estado.



7.1.2 Arco de aluminio perfeccionado

Dejando de lado la brida y el tubo hueco doblado, la disposición de presupuesto y sobretodo de tiempo y materiales dieron lugar a un intento de mejora del arco o de hacerlo estructuralmente bien. Básicamente, tenía que ser estructuralmente idéntico a otros arcos para que se pudieran hacer bien las labores de encrinado y mantenimiento del arco por el lutier. Además, esta vez la idea sería hacerlo macizo para poder observar bien la repercusión al cambiar todo el material. De nuevo, el arco tendría la forma del arco alemán de contrabajo.

El resultado es un arco muy similar a los arcos actuales, como se puede ver en la Figura 21 y la Figura 22. Gracias a esta estructura, no solo se va a conseguir que las labores de mantenimiento sean más fáciles, sino que la técnica para utilizar el arco sea, en la medida de lo posible, lo más parecida a la utilizada para tocar un arco estándar.



Figura 21: Arco de aluminio perfeccionado



Figura 22: Punta del arco de aluminio perfeccionado

Con más idea en mente del papel que juegan en el arco los diferentes parámetros como el peso, la curva, la longitud y demás, el arco presenta una estructura funcional similar a la de otros arcos. Sin embargo, el hecho de que la vara maciza de aluminio pese más del doble que la vara de pernambuco, va a hacer que algunos parámetros como el centro de gravedad del arco sean ligeramente modificados. Aun así, este parámetro podría ser corregido siempre que sea necesario haciendo contrapeso o quitando peso en la parte que sea necesaria. Las características de este arco se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3

Características del arco de aluminio perfeccionado

Longitud de la vara	66 cm
Longitud del arco	72,5 cm
Longitud del encerdado tensado	58 cm
Diámetro de la vara en la punta	0,7 cm



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO

Diámetro de la vara en la nuez	1,2 cm
Altura de la punta	3,3 cm
Altura de la nuez	4,6 cm
Peso de la vara	178 g
Peso de la nuez	34 g
Peso del botón	12 g
Peso del arco	224 g
Punto de gravedad del arco (medido desde la punta)	39 cm

7.2 Captación de datos

Una vez visto el objeto que ha sido elaborado, es necesario proceder con grabaciones para poder realizar un análisis en el que queden reflejadas las propiedades acústicas o sonoras que pueda tener este material en el arco.

Evidentemente, las condiciones en las que se ha grabado y los instrumentos que han sido utilizados son factores fundamentales a tener en cuenta a la hora de la toma de datos. Por ello, el entorno de grabación se ha tenido que hacer en la cámara anecoica de Gandía y los micrófonos y la tarjeta de sonido que se han utilizado debían tener unos requisitos específicos para el instrumento tan grave que iba a ser grabado.

7.2.1 Cámara anecoica de Gandía

La cámara anecoica utilizada se encuentra en el campus de Gandía de la Universitat Politècnica de València. Esta cámara es utilizada por los diferentes departamentos presentes, especialmente los de acústica y los de física aplicada.

Junto a la cámara anecoica se encuentra una cámara reverberante. Esta cámara se caracteriza por tener un tiempo de reverberación alto debido a la gran cantidad de reflexiones que se producen a lo largo de ella. Aunque también es un espacio acústico interesante, en nuestra investigación no tenía nada que aportar.



La cámara anecoica de Gandía es un espacio cerrado completamente aislado del exterior de todo tipo de ondas. Básicamente está compuesta de unos elementos puntiagudos hechos de un material poroso en todas sus paredes, techo y suelo. Este material poroso tiene un coeficiente de absorción de energía muy elevado y está dispuesto de forma que las reflexiones que se produzcan se queden por la zona del material y no vuelvan a la sala, creando así un espacio con cero reverberaciones.

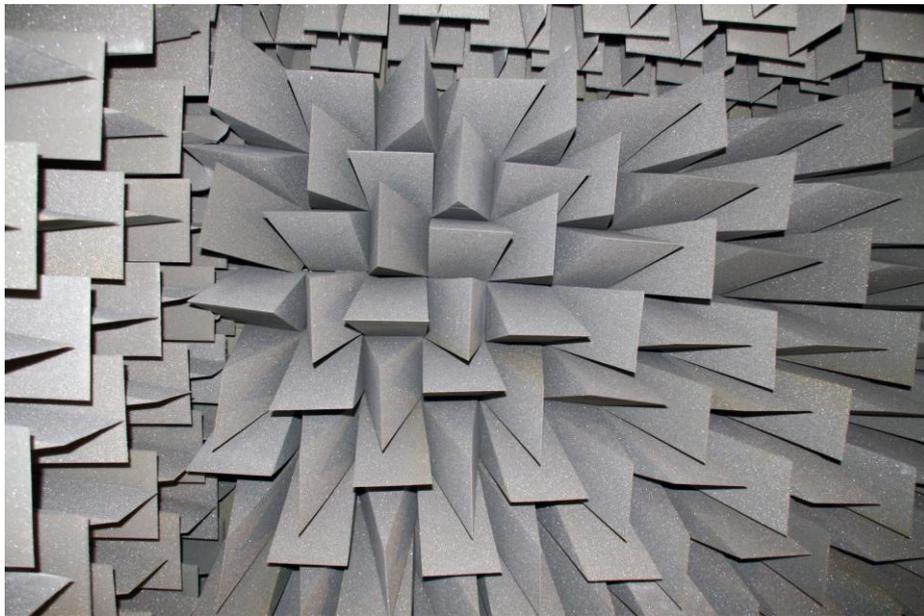


Figura 23: Estructura del material poroso presente en la cámara anecoica de Gandía

Aun con la presencia de este material, para poder caminar por esta cámara se han dispuesto unos andamios metálicos huecos con el fin de no proporcionar superficies demasiado reflejantes. Además, se ha incorporado un foco con el que proveer luz a esta cámara. Estos elementos hacen que aparezca un poco de reverberación, aun así, es prácticamente despreciable.

El hecho de que las dimensiones de esta cámara y del material interior sean bastante grandes favorece que no aparezcan modos en la sala para notas que no sean demasiado graves, haciendo que esta sala sea adecuada para notas de unos 50 Hz o superiores. Por esta razón, esta sala es buena para grabar las notas generadas por el contrabajo, el único problema se generará en la nota más grave, el M11 de 41 Hz.



7.2.2 Micrófonos y tarjeta de sonido

Como se ha comentado anteriormente, los micrófonos debían tener unos requisitos de calidad para la grabación realizada. Especialmente, lo más importante es que tenga una buena captación de los graves y una respuesta en frecuencias adecuada para grabar el contrabajo. A su vez, para poder utilizar estos micrófonos era necesario el uso de una tarjeta de sonido con la que poder procesar los datos con la calidad adecuada.

Micrófonos utilizados. Para la grabación sonora, los micrófonos utilizados han sido los M30 de la marca Earthworks. Estos micrófonos son de los más respetados, precisos y seguros en el mercado.

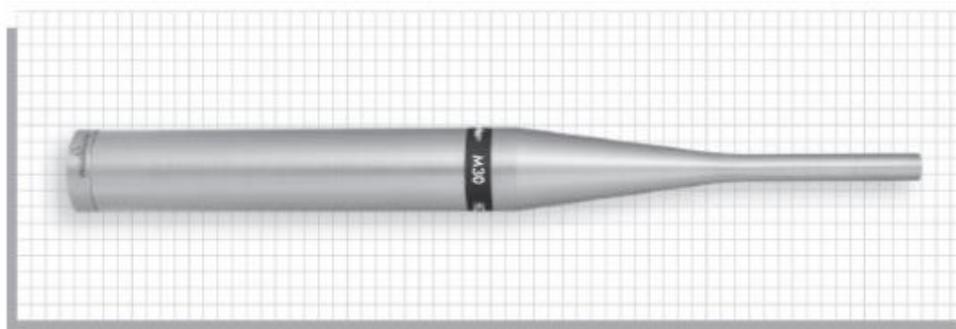


Figura 24: Micrófono M30 de Earthworks

La principal característica que hace a estos micrófonos tan acertados para las grabaciones en el contrabajo es su respuesta a bajas frecuencias, ya que tiene una muy buena respuesta para frecuencias que van desde los 5 Hz hasta los 30 kHz, como se puede ver en la Figura 25.

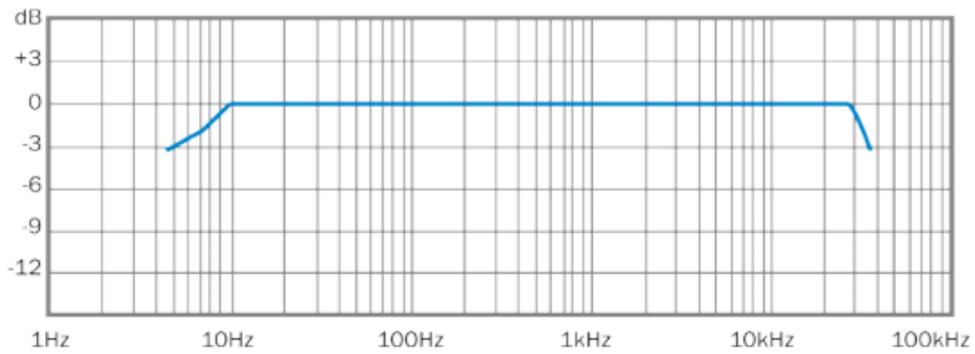


Figura 25: Respuesta en frecuencias del micrófono M30 de Earthworks

Por último, este micrófono tiene las características de soportar una gran cantidad de presión sonora, hasta 140 dB SPL, y tener una respuesta polar omnidireccional casi perfecta, como se puede ver en la Figura 26. El peso de este dispositivo es de 227 gramos y hace falta una alimentación de 48 V Phantom con una intensidad de 10 mA para poder utilizarlo.

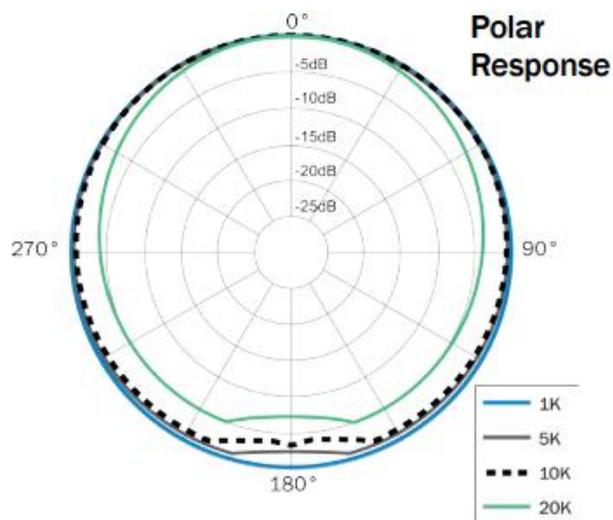


Figura 26: Respuesta polar del micrófono M30 de Earthworks



Tarjeta de sonido utilizada. La tarjeta de sonido utilizada ha sido la AudioBox 44VSL de PreSonus. Esta tarjeta, en relación calidad precio es de las mejores que se pueden encontrar en el mercado.



Figura 27: Tarjeta de sonido AudioBox 44VSL de PreSonus

Con 4 entradas Neutrik combo con control de ganancia en cada una, la tarjeta de PreSonus permite grabar 4 pistas simultáneas con una calidad de 96 kHz de frecuencia de muestreo y con un calibre de 24 bits. Además, contiene preamplificadores de clase A XMAX en cada una de sus entradas así como alimentación Phantom de hasta 48 V.

Además de las entradas estándar, esta tarjeta dispone de una salida por cada entrada, un par de salidas estéreo y una salida general de audio para auriculares como se puede ver en la Figura 28. Junto a todo esto, también contiene una entrada y salida MIDI con la que poder utilizar diferentes instrumentos electrónicos.



Figura 28: Parte trasera del AudioBox 44VSL de PreSonus

Por último, la comunicación al computador se realiza mediante USB 2.0 y contiene unos drivers que se pueden descargar desde la web para iniciar la instalación y proceder entonces con la utilización de esta herramienta.

Acelerómetro utilizado. Con la intención de pegar el acelerómetro a la vara del arco y que no resultada molesto, el acelerómetro elegido debía poseer unas dimensiones y peso reducido y una sensibilidad suficiente como para detectar vibraciones con buena calidad. El acelerómetro elegido ha sido el 352A73 de la casa PCB PIEZOTRONICS.

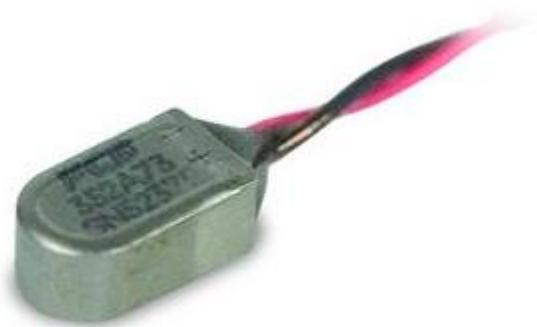


Figura 29: Acelerómetro 352A73 de la casa PCB PIEZOTRONICS

Este acelerómetro mostrado en la Figura 29 de tan solo 0,3 gramos y 2,8 milímetros de altitud, 8,6 milímetros de longitud y 4,1 milímetros de grosor posee



una sensibilidad para frecuencias de un 5% de error para frecuencias que van desde 2 Hz a 10.000 Hz y de un 10% para frecuencias que van de 1,5 Hz a 25.000 Hz. Por lo tanto es perfecto para nuestro caso de uso.

7.2.3 Grabación sonora

Para llevar a cabo la grabación, se situaron dos micrófonos M30 de Earthworks en multicanal delante del contrabajo, cada uno a una distancia para obtener diferentes muestras. Estos dos micrófonos iban conectados a la tarjeta de sonido AudioBox 44VSL, que a su vez iba conectada a un portátil con los drivers de la tarjeta instalado y con Audacity listo para grabar.

La tarea de grabación de los sonidos fue dividida debido a su extensión temporal en varias secciones. Estas secciones iban separada por tesituras y por dinámicas. En todos los casos, la grabación se limitó a pasar el arco una vez empezando por la nuez y dejando la nota sonar hasta que se apague la resonancia del propio instrumento.

Las condiciones del paso de arco fueron las mismas en ambos casos, el arco siempre pasaba por el mismo punto de la cuerda y con la misma inclinación y presión para que las medidas fueran lo más fiables posibles. El arco fue pasado por mí mismo, incluyendo un pequeño factor de error humano en las muestras, pero no se disponía en la cámara de ningún robot que hiciera la tarea con repetitividad exacta.





Figura 30: Posición de los micrófonos y del contrabajo durante la grabación de la cámara anecoica de Gandía

De este modo, en primer lugar se grabó con el arco de aluminio algunos sonidos de tesitura grave. Los sonidos seleccionados fueron en primer lugar las cuerdas al aire del contrabajo y después una nota pisada en cada una de las cuerdas variando el dedo con el que se pisaba. Las notas grabadas fueron, de más grave a más agudo y con notación franco-belga, MI1, SOL 1, LA1, SI1, RE2, FA#2, SOL2 y LA2.

En segundo lugar, se pasó a grabar con el mismo arco la tesitura media del contrabajo, con algún armónico que suelen ser tocados por su posición tan natural. Las notas que se grabaron fueron, de nuevo de más grave a más agudo y con notación franco-belga, RE3, MI3, SOL3, LA3, SI3 y RE4.

Para terminar con el arco de aluminio, se prosiguió con la grabación de la tesitura más alta del contrabajo. Para ello, se interpretaron los armónicos naturales que ofrece la primera cuerda. Las notas grabadas fueron, de más grave a más agudo y con notación franco-belga, SOL4, SI4, RE5 y SOL5.



La siguiente parte de la grabación fue ya con el arco de pernambuco, con el que se hizo exactamente lo mismo que con el arco de aluminio. Se volvieron a grabar las mismas notas que se grabaron con el arco de aluminio imitando exactamente la técnica que se usó para obtener el sonido.

Por último, se realizó una grabación de la tesitura grave del contrabajo con ambos arcos y también cambiando las dinámicas. Para ello, primero se grabó con el arco de aluminio las notas de la tesitura grave previamente indicadas con una dinámica de piano y otra de forte. A continuación se grabaron las mismas con el arco de pernambuco y de nuevo con dinámica de piano y forte. La elección de esta dinámica es por el hecho de que perceptiblemente, era la que más cambiaba al cambiar el arco.

7.2.4 Grabación de las vibraciones en la vara

Una de las características más interesantes a analizar en el arco consiste en su vibración a la hora de tocar el instrumento, es decir, obtener las vibraciones que están sucediendo en la vara del arco mientras el intérprete toca el instrumento.

Para obtener muestras de esta moción, se instaló un pequeño sensor acelerómetro en el arco de aluminio como se puede observar en la Figura 31. Junto a este acelerómetro, se puso en otro canal un micrófono en el puente del contrabajo para tener grabados a la vez el movimiento que sucedía en el arco y la nota que se estaba produciendo en el contrabajo. Este acelerómetro y micrófono se conectaron a la tarjeta de sonido AudioBox 44VSL y con ella se llevaron los datos a un ordenador portátil.





Figura 31: Acelerómetro instalado en el arco de aluminio

Para esta grabación se interpretaron notas en las que no influyera la mano izquierda del intérprete, es decir, cuerdas al aire y armónicos naturales del instrumento. Las notas grabadas fueron, de más grave a más agudo y con notación franco-belga, MI1, LA1, RE2, SOL2, RE3, SOL3, RE4, SOL4 y RE5.

Una vez terminada la grabación con el arco de aluminio se procedió del mismo modo con el arco de pernambuco, empleando la misma técnica de arco y situando los elementos de forma idéntica a la anterior.

7.3 Análisis y comparaciones

A continuación se va a proceder con el análisis de los datos que se han tomado, para ello se utilizará el software previamente mencionado y se indicarán las características de cada grabación y las diferencias que se encuentran en los distintos arcos.

El análisis va a consistir fundamentalmente en la relación entre los armónicos generados en cada uno de los arcos a lo largo de la fase de *sustain* así como en la evolución temporal de estos armónicos de la nota interpretada. Posteriormente, se observarán las diferencias en el movimiento de la vara grabado con el acelerómetro.



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO

Debido a la gran extensión que abarcan todas las muestras grabadas y todas las repeticiones que se hicieron, los análisis que van a ser mostrados van a ser de unas pocas notas, en concreto se va a mostrar un ejemplo de cada una de las octavas del contrabajo con la nota re y la nota más grave, el mi. De este modo, las notas en cuestión van a ser, de más grave a más agudo y con notación franco-belga, MI1, RE2, RE3, RE4 y RE5.

El resto de cuerdas al aire y armónicos se comportan de una forma prácticamente idéntica a cómo lo hacen las notas más próximas a su octava. Además, en el caso de las cuerdas pisadas, se han decidido omitir ya que en estas notas entraba el factor humano de la mano izquierda, y este factor influía enormemente dejando las comparaciones demasiado influenciadas.

A continuación se muestran 75 milisegundos de las ondas producidas por las notas MI1 y RE2 tocadas por el arco de aluminio y el arco de pernambuco. Cada uno de los periodos de la onda está separado por una línea vertical.

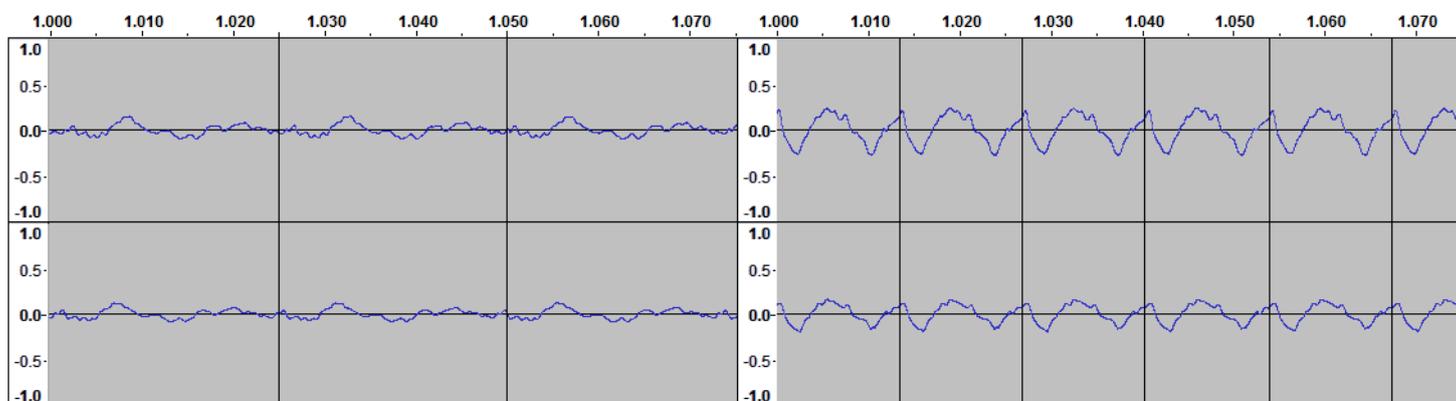


Figura 32: 75 milisegundos de grabación de la fase sustain de la nota MI1, izquierda, y RE2, derecha, por el arco de aluminio, arriba, y el arco de pernambuco, abajo

Pese a que las ondas situadas arriba y abajo en la Figura 32 parecen iguales, se puede apreciar un cambio en la amplitud. Pero para ver con mayor detalle la diferencia en esta característica, se muestra a continuación la amplitud de la onda de la nota RE2 en decibelios, ya que para todas las notas es prácticamente igual.



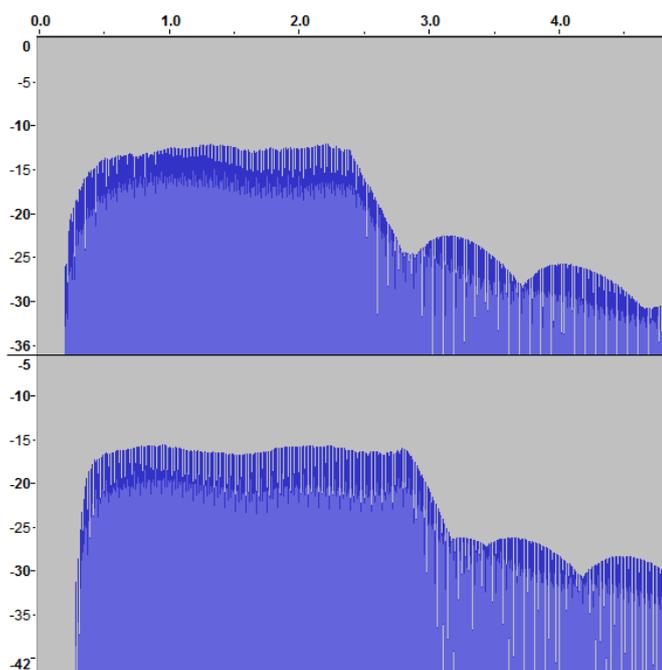


Figura 33: Forma de onda de la nota RE2 en decibelios tocada por el arco de aluminio, superior, y el arco de pernambuco, inferior

Como se puede apreciar en la Figura 33, la amplitud cambia bastante de un arco a otro. Mientras que en el arco de aluminio la amplitud está en torno a los 12 dB negativos, en el arco de pernambuco está en torno a los 15 dB negativos. Estos decibelios están referidos siempre a dBFS, decibelios a escala completa, que es la unidad con la que trabajan los sistemas digitales al tener un nivel máximo disponible. Este cambio de 3 dB resulta en un sonido el doble de fuerte, debido en gran parte a la diferencia de peso entre los arcos, y es una característica importante.

7.3.1 El sonido en el arco de pernambuco

En primer lugar, se va a iniciar el análisis espectral con el arco estándar para contrabajo. Con este análisis podremos definir unas propiedades y características de este arco para luego compararlas con las del arco de aluminio.



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO

El arco de pernambuco utilizado. El arco utilizado para realizar las comparaciones sonoras ha sido un Dölling de buena calidad, mostrado en la Figura 34 y la Figura 35. La casa Dölling es una de las más prestigiosas en cuanto a la arquería para contrabajos.



Figura 34: Arco de pernambuco



Figura 35: Punta del arco de pernambuco

Este arco es perfectamente utilizable tanto por los contrabajos de orquesta como por los solistas, de modo que es un buen ejemplo de un arco del cual se puedan obtener muestras significativas. Las características de este arco se muestran a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4

Características del arco de pernambuco

Longitud de la vara	67 cm
Longitud del arco	74 cm
Longitud del encerdado tensado	57,5 cm
Diámetro de la vara en la punta	0,7 cm
Diámetro de la vara en la nuez	1,15 cm
Altura de la punta	3,5 cm
Altura de la nuez	4 cm
Peso de la vara	70 g
Peso de la nuez	40 g
Peso del botón	20 g
Peso del arco	130 g
Punto de gravedad del arco (medido desde la punta)	47 cm

Al ver las características vistas en la Tabla 4, se puede comprobar que las dimensiones entre este arco y el arco de aluminio perfeccionado son muy parecidas. Sin embargo, la diferencia fundamental y que más va a notar el intérprete es el peso de la vara. El hecho de tener más peso no solo influye en la técnica del intérprete, sino que también va a desplazar el punto de gravedad del arco más hacia la punta.

Sonido generado. A continuación se van a mostrar gráficas representativas para los sonidos previamente enumerados. El orden que se va a seguir va a ser de



más grave a más agudo, representando en primer lugar una gráfica con el análisis espectral y en segundo lugar el espectrograma de la nota.

Por una parte, en todas las gráficas del análisis espectral mostrado, obtenidas con Audacity y comprobadas con SMS-Tools, la duración de la muestra ha sido de un segundo y siempre dentro de la fase *sustain* de la nota, que es la fase más estable y en la que se pueden apreciar mejor las diferencias espectrales producidas, ya que en las otras fases de la onda inciden demasiados parámetros como por ejemplo el agarre de la resina.

Los parámetros de estas gráficas del análisis espectral son siempre con las frecuencias en el eje de las abscisas y con la amplitud en decibelios a escala completa en el eje de ordenadas. El tamaño de las muestras para calcular la FFT, *Fast Fourier Transform*, es de 8192 con la intención de establecer una relación entre precisión y comodidad al ver las gráficas. La vista es logarítmica para poder apreciar mejor las frecuencias bajas, que son las que utilizamos y en todos los casos se ha situado el cursor en la nota fundamental del acorde, mostrando así su amplitud y su frecuencia.

Por otra parte, los espectrogramas generados son de toda la nota, abarcando así todas las fases, *attack*, *decay*, *sustain* y *release* de la nota. De nuevo obtenidas con Audacity, la intención es ver aproximadamente qué armónicos aparecen en los diferentes sonidos, con qué amplitud y cuándo aparecen temporalmente así como la fase en la que ocurren.

Los parámetros de esta gráfica van a ser de un tamaño de ventana de 16384 bits y con el tipo *Hanning Window*. En el eje de las abscisas, situado en el superior de las figuras, se muestra el tiempo en segundos, y en el eje de las ordenadas, la frecuencia desde los 20 Hz hasta los 20.000 Hz correspondientes más o menos al rango auditivo del ser humano. Según la calidez y el brillo de los colores se puede intuir aproximadamente la presión sonora de cada uno de los armónicos generados, a más brillo y más calidez le corresponde mayor presión sonora.



III. La nota más grave que se puede hacer con un contrabajo de cuatro cuerdas y afinación de orquesta. La ejecución consiste en un paso de arco desde la nuez a la punta una vez en la cuarta cuerda, la más grave.

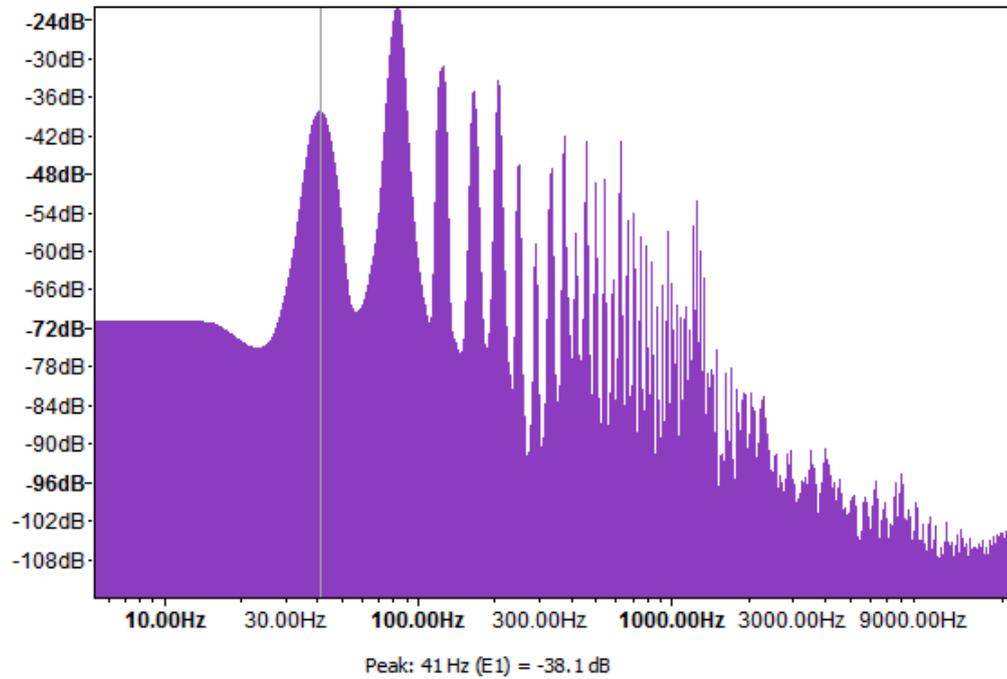


Figura 36: Análisis de frecuencias de la nota III en el arco de pernambuco

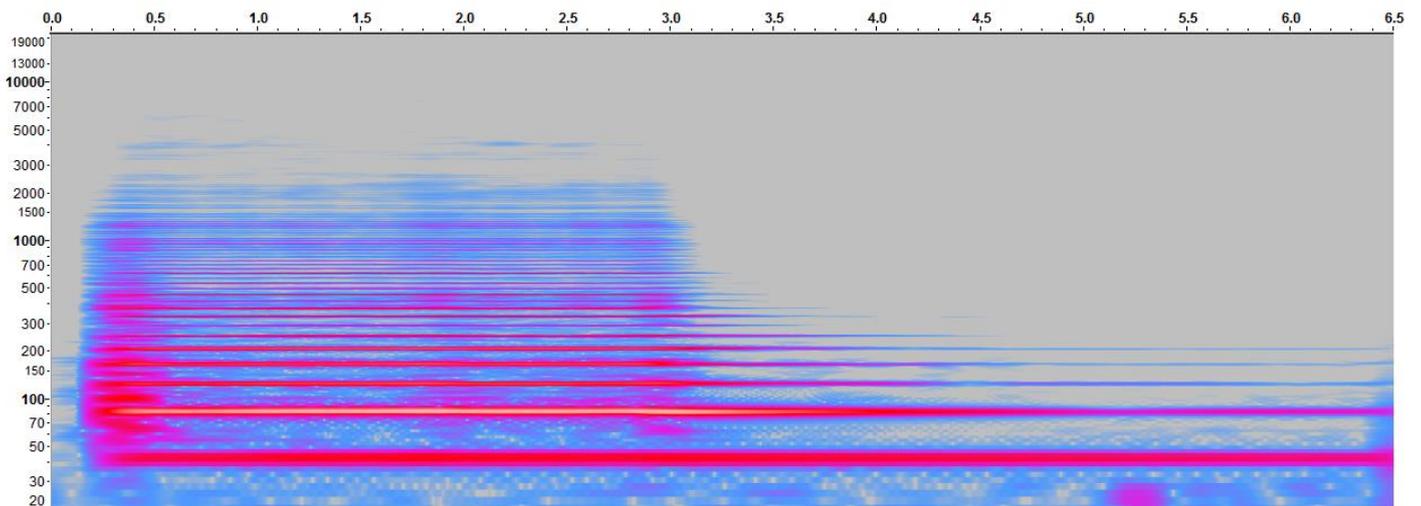


Figura 37: Espectrograma de la nota III en el arco de pernambuco



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO

Como se puede apreciar en la Figura 36 y en la Figura 37, el armónico más sonoro producido se encuentra en 82 Hz, correspondiente con la nota MI2 en vez de la nota MI1. Sin embargo, al aparecer la frecuencia de 41 Hz correspondiente con la nota MI1, aun siendo mucho menor en términos de amplitud, se aporta la base de los armónicos y hace que sea perceptible esta nota al ser escuchado.

Básicamente, lo que se puede observar es que todos los armónicos ilustrados vienen dados por la nota más grave, el MI1. A partir de esta nota se han ido formando todos los armónicos superiores básicamente hasta los 1.500 Hz, quedándose a partir de aquí unos armónicos con poca amplitud.

En cuanto al *attack* de la nota, se ve que tarda cerca de 1,5 décimas de segundo en generar los armónicos, y en el *release* de la nota se puede apreciar que los armónicos van desapareciendo de forma gradual de agudo a grave.

RE2. Una de las notas en el contrabajo que más se repite con armónicos naturales de técnica simple. La ejecución consiste en un paso de arco desde la nuez a la punta una vez en la segunda cuerda.

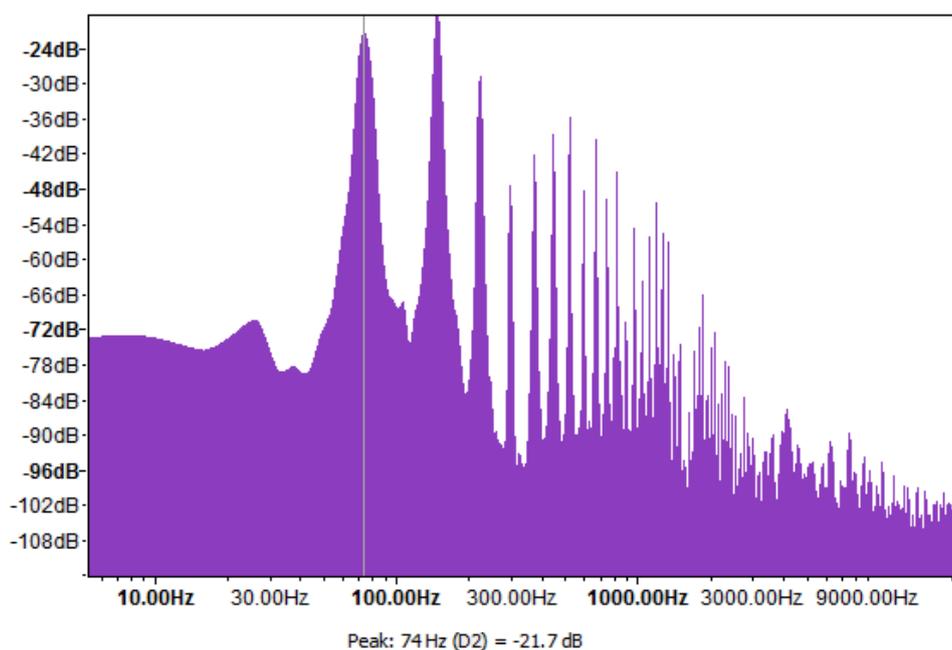


Figura 38: Análisis de frecuencias de la nota RE2 en el arco de pernambuco



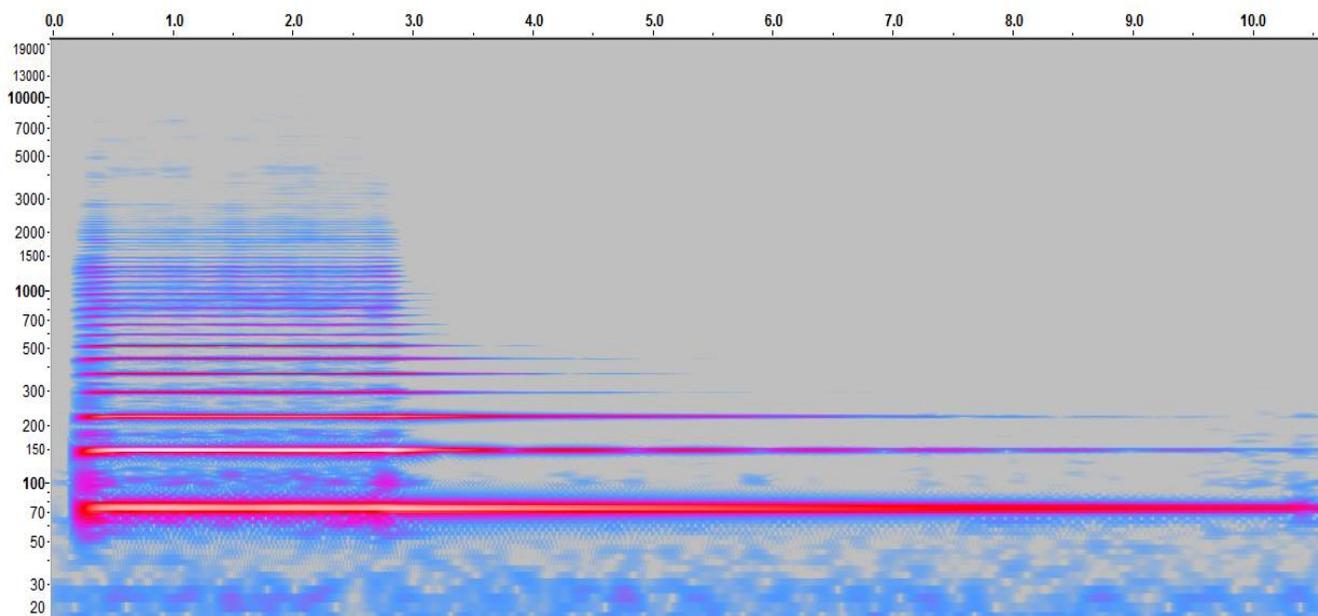


Figura 39: Espectrograma de la nota RE2 en el arco de pernambuco

En la Figura 38 y en la Figura 39 se puede ver que el armónico más sonoro producido se encuentra en 74 Hz, correspondiente con la nota RE2. Esta vez se pueden distinguir mejor los armónicos, viéndose claramente en el segundo 1 que armónicos están sonando.

En estas gráficas se pueden distinguir todos los armónicos que han sido generados con la nota RE2 como base de ellos. De nuevo, se puede apreciar que los armónicos de mayor amplitud llegan hasta los 1.500 Hz, quedándose el resto de armónicos a partir de aquí con una fuerza menor.

En el *attack* de la nota, se puede ver que se tarda cerca de 0,1 segundos en establecer claramente los armónicos. Este ruido se puede apreciar en la frecuencia de 100 Hz tanto en el inicio del paso del arco como en el final, empezando la fase de *release*, donde se puede ver claramente una desaparición gradual de los armónicos de agudo a grave.



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO

RE3. Primer armónico de la segunda cuerda con fácil interpretación. La ejecución consiste en un paso de arco desde la nuez a la punta una vez y con la mano izquierda en la mitad de la segunda cuerda sin presionar.

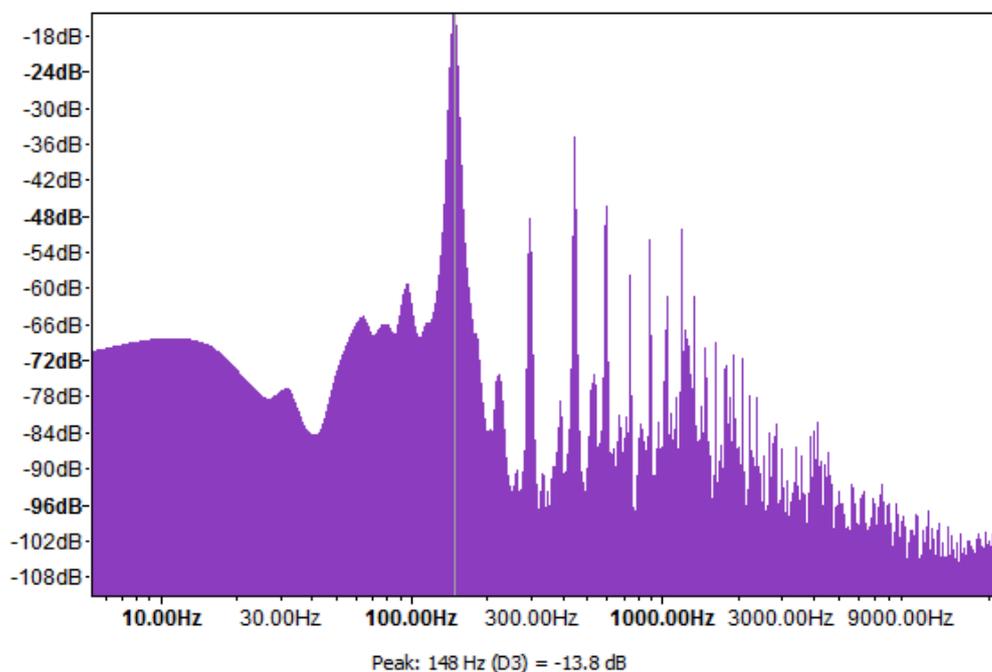


Figura 40: Análisis de frecuencias de la nota RE3 en el arco de pernambuco

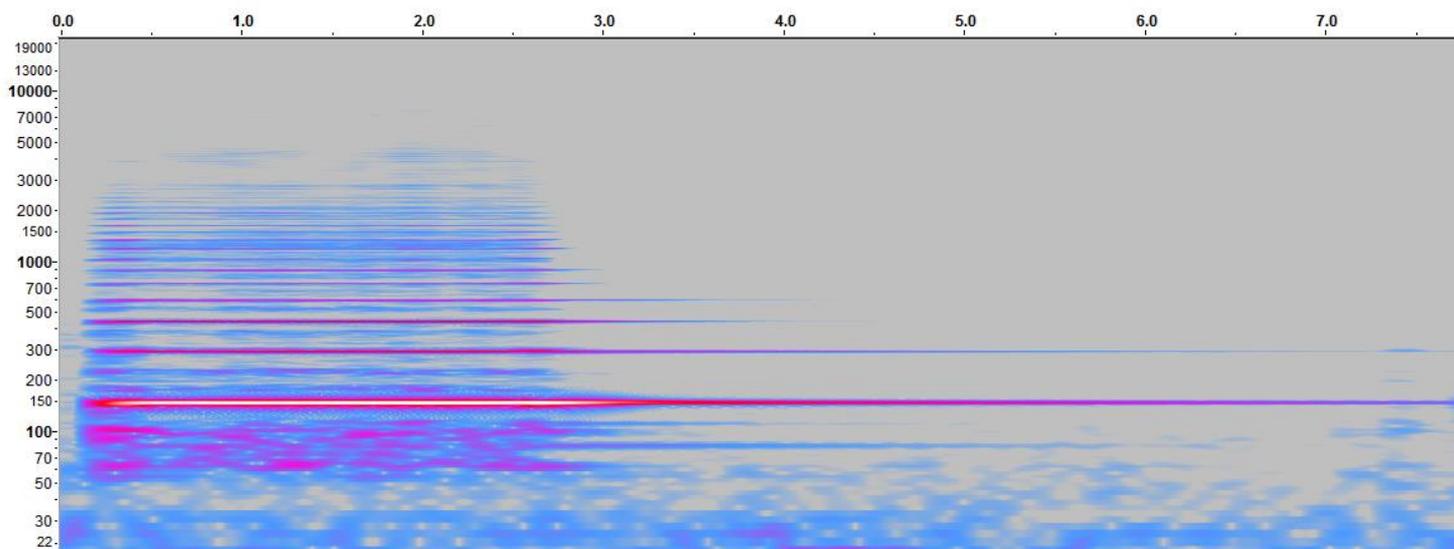


Figura 41: Espectrograma de la nota RE3 en el arco de pernambuco



Al observar la Figura 40 y la Figura 41, el armónico más sonoro producido se encuentra en 148 Hz, correspondiente con la nota RE3. Con cada vez menos colorido y menos contenido de frecuencias graves, en estas dos gráficas todavía se pueden apreciar cómo se forman los armónicos a partir de la nota RE3.

Otra vez, se distinguen unos armónicos de mayor amplitud hasta los 1.500 Hz. Si contamos el número de picos que se pueden ver en la Figura 40, se pueden ver aproximadamente 8 armónicos, siempre múltiplos de la frecuencia fundamental.

El *attack* de la nota vuelve a tardar cerca de 1 décima de segundo para establecer las frecuencias que van a sonar y, sin embargo, esta vez se puede apreciar como en la fase de *sustain* un ruido en torno a los 100 Hz e inferiores que no va a cesar. En el *release* se aprecia lo mismo que en las notas anteriores.

RE4. Armónico natural sencillo disponible en dos cuerdas del contrabajo. La ejecución consiste en un paso de arco desde la nuez a la punta una vez y con la mano izquierda en la posición del segundo armónico natural de la primera cuerda sin pisar la cuerda.

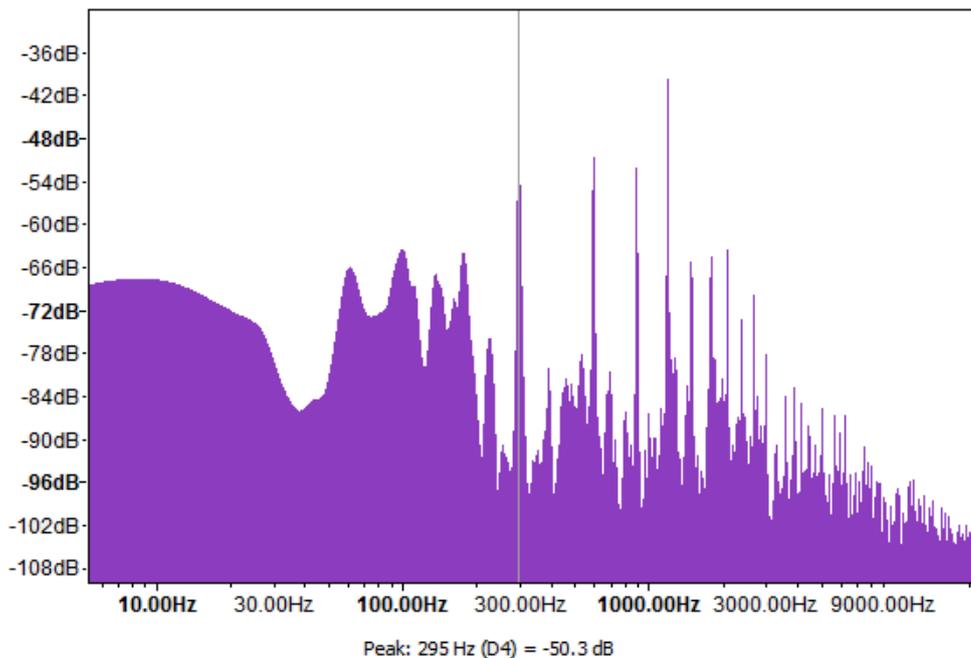


Figura 42: Análisis de frecuencias de la nota RE4 en el arco de pernambuco



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO

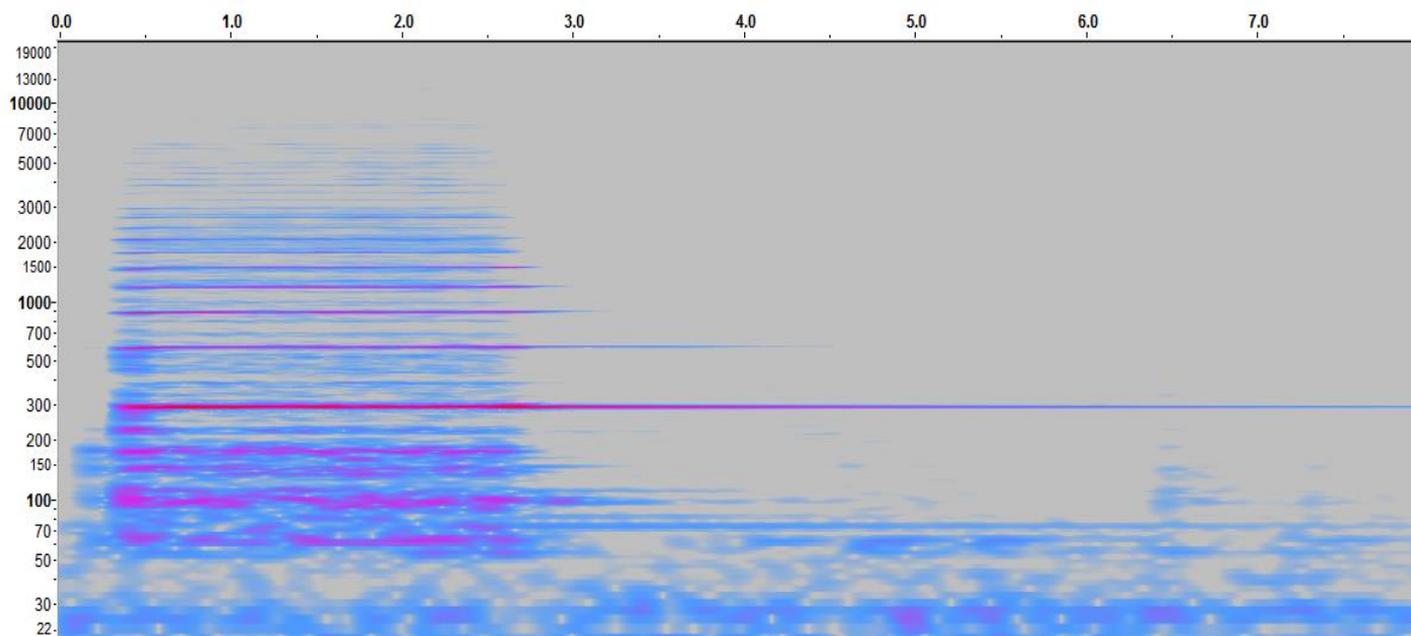


Figura 43: Espectrograma de la nota RE4 en el arco de pernambuco

En la Figura 42 y en la Figura 43 se puede observar que el armónico más sonoro producido se encuentra en 295 Hz, correspondiente con la nota RE4. Vemos que cada vez los armónicos inferiores van desapareciendo y tan solo quedan los armónicos superiores a esta nota.

Como sucedía en las anteriores notas, se puede apreciar que los armónicos de mayor amplitud desde la nota RE4 llegan hasta los 1.500 Hz, quedándose a partir de ahí disminuidos. Además, si contamos el número de picos de mayor altitud en la Figura 42 vemos que son 4 desde la nota fundamental hasta los 1.500 Hz, justo la mitad que en el caso anterior.

Esta vez, en el *attack* de la nota, se puede ver que el tiempo que tarda en establecerse la nota es menor que en los otros casos, siendo aproximadamente 0,07 segundos. Como en el caso anterior, sigue habiendo ruido en la fase de *sustain* durante toda la nota y, en la fase de *release*, se ve que tras desaparecer los armónicos superiores solo se queda una frecuencia sonando y un poco de ruido.



RE5. Armónico natural en el extremo del batedor del contrabajo. La ejecución consiste en un paso de arco desde la nuez a la punta una vez y con la mano izquierda en la posición del quinto armónico natural de la primera cuerda sin pisar la cuerda.

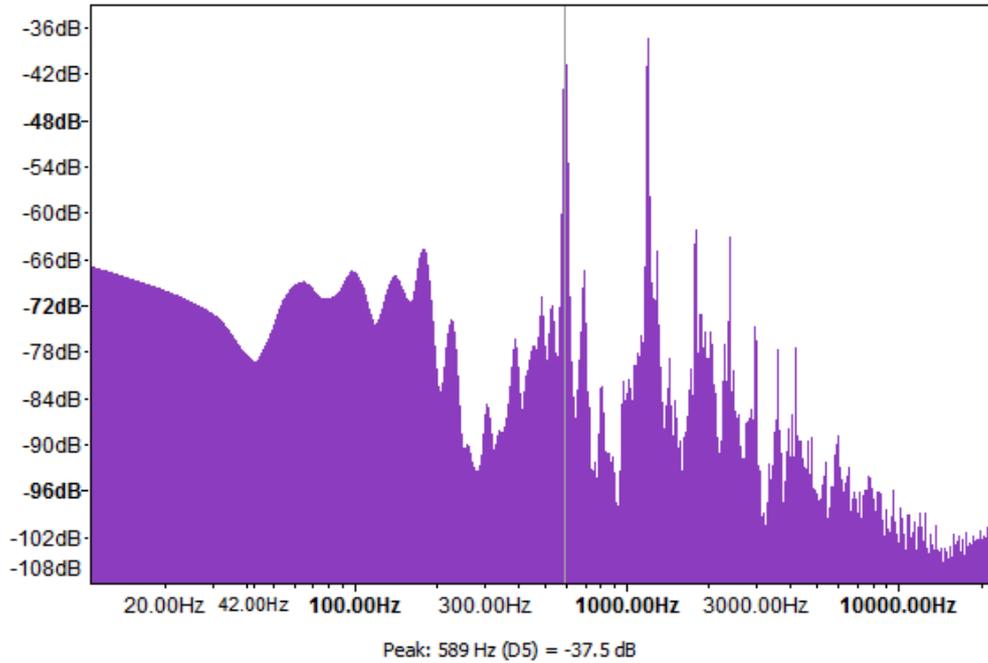


Figura 44: Análisis de frecuencias de la nota RE5 en el arco de pernambuco

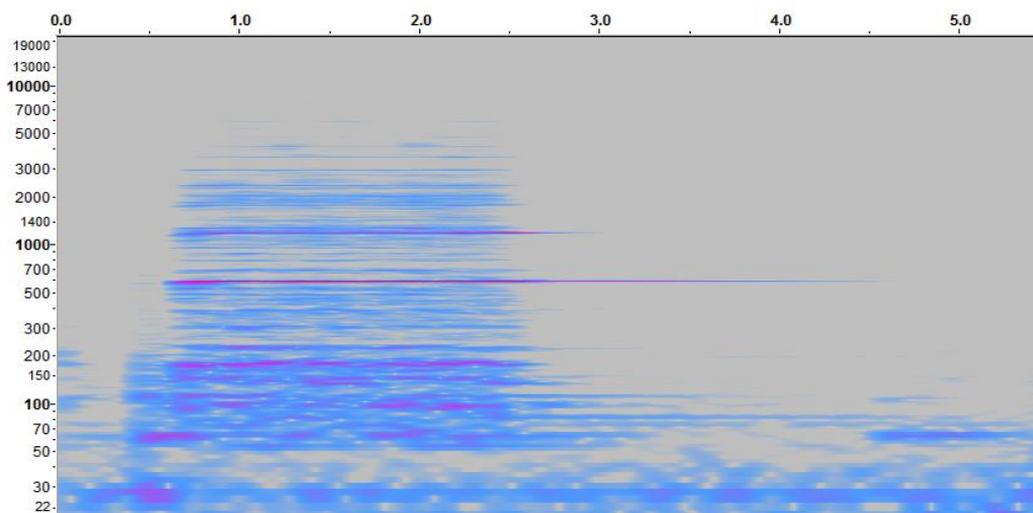


Figura 45: Espectrograma de la nota RE5 en el arco de pernambuco



Como se aprecia en la Figura 44 y en la Figura 45, el armónico más sonoro producido se encuentra en 589 Hz, correspondiente con la nota RE5. Esta vez, en la figura 44 se puede ver prácticamente 2 líneas en 589 Hz y 1.178 Hz, siendo todo lo demás prácticamente ruido y frecuencias muy difusas.

Nuevamente, los armónicos de mayor amplitud van desde la nota RE5 hasta los 1.500 Hz, quedando muy flojos a partir de ahí. Esta vez, si contamos el número de picos de mayor altitud en la Figura 44 vemos que son 2 desde la nota fundamental hasta los 1.500 Hz, siendo la mitad que en la nota RE4.

En la fase de *attack* de la nota se aprecia un tiempo de aproximadamente 0,02 segundos en establecer el sonido. Esta disminución de tiempo es debido a la poca cantidad de frecuencias que se excitan en comparación a las notas más graves. De nuevo, sigue habiendo ruido en la fase de *sustain* durante toda la nota en frecuencias más bajas. Este ruido se puede apreciar en todas las notas sobre todo en los 100 Hz y sus múltiplos. En la fase de *release*, se ve cómo desaparece el armónico superior y prácticamente solo se queda una frecuencia sonando y un poco de ruido en las frecuencias de 70 Hz y 100 Hz.

7.3.2 El sonido en el arco de aluminio

A continuación, se va a iniciar el análisis con el arco de aluminio perfeccionado para contrabajo. Se va a proceder de un modo similar al apartado anterior pero comparando en cada caso cada una de las gráficas para señalar las principales diferencias existentes.

Los sonidos analizados van a ser los mismos que en el arco de pernambuco y el orden que se va a seguir va a ser el mismo, de más grave a más agudo y representando primero una gráfica con el análisis espectral y después el espectrograma de la nota.



III. De igual forma que se hizo con el arco de pernambuco, la ejecución consiste en un paso de arco desde la nuez a la punta una vez en la cuerda más grave, la cuarta.

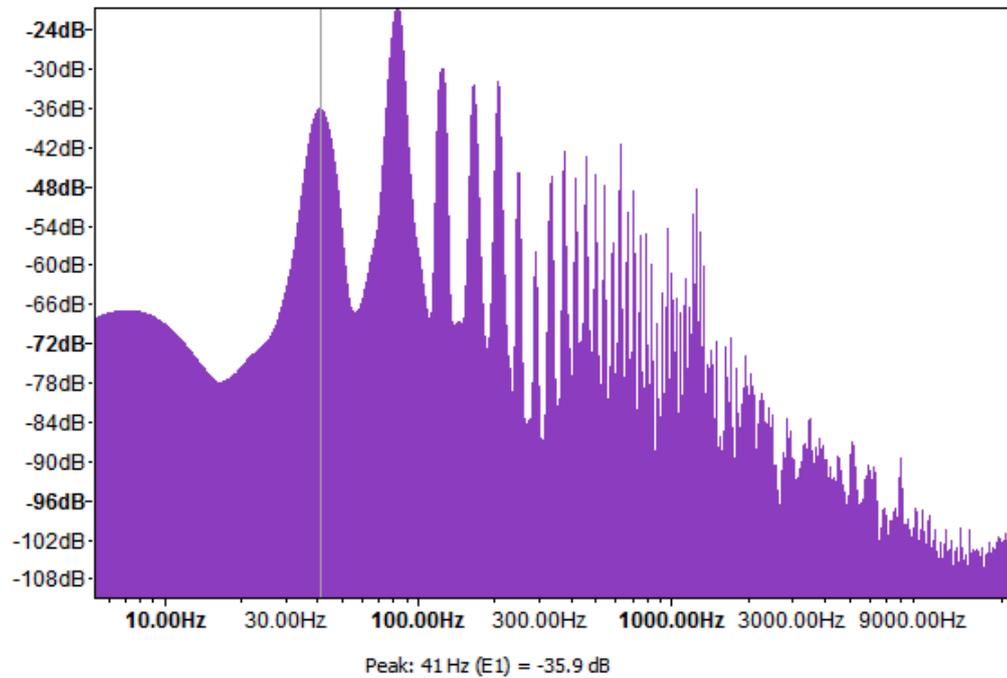


Figura 46: Análisis de frecuencias de la nota III en el arco de aluminio

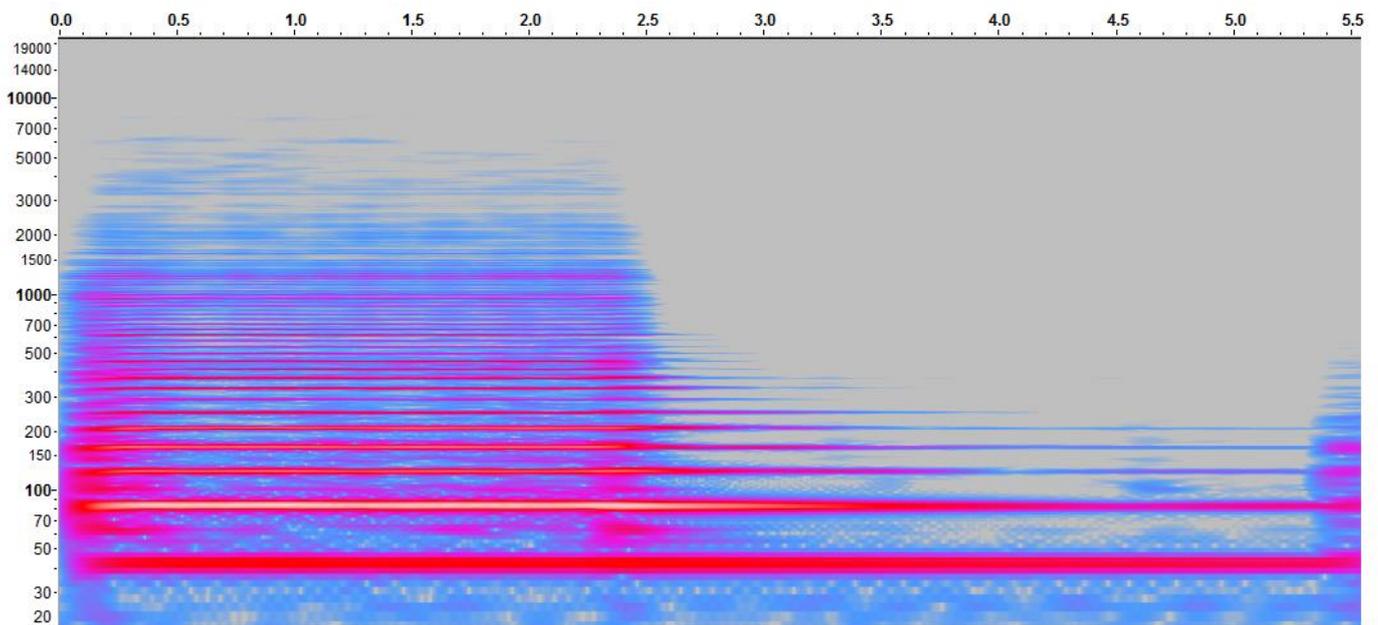


Figura 47: Espectrograma de la nota III en el arco de aluminio



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO

Del mismo modo que sucedía en el arco de pernambuco, la Figura 46 y la Figura 47 muestran la información espectral al tocar la nota de 41 Hz correspondiente al MI1.

En cuanto a la Figura 46, se puede ver que es casi idéntica a la Figura 36. Las principales diferencias que se encuentran son por debajo de los 20 Hz, que son imperceptibles por el oído humano, y en la franja de los 1.000 Hz a los 6.000 Hz, donde se puede apreciar una mayor amplitud en el arco de aluminio.

Por lo que hace a la Figura 47, se puede ver que tiene los armónicos más claros que los de la Figura 37 ya que se pueden apreciar las líneas más definidas en cuanto a los armónicos superiores y con colores más claros. Además, la fase de *attack* se puede ver que es más rápida, durando 0,1 segundos frente a los 0,15 del arco de pernambuco. Por otro lado, se puede ver que hay más ruido durante toda la fase de *sustain* y que la fase de *release* es prácticamente igual.

RE2. Del mismo modo que en el arco de pernambuco, la ejecución consiste en un paso de arco desde la nuez a la punta una vez en la segunda cuerda.

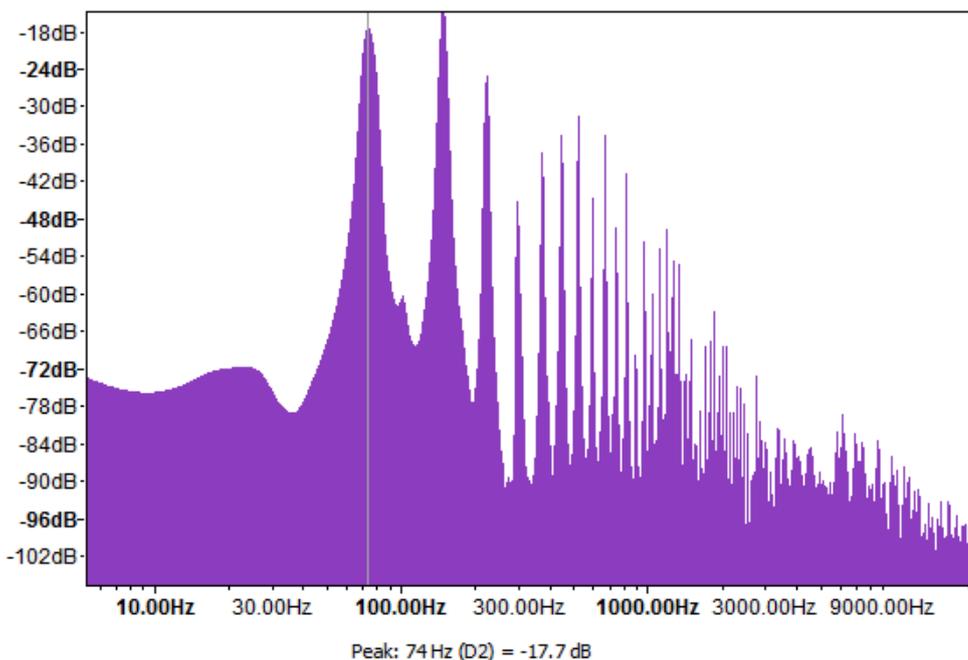


Figura 48: Análisis de frecuencias de la nota RE2 en el arco de aluminio



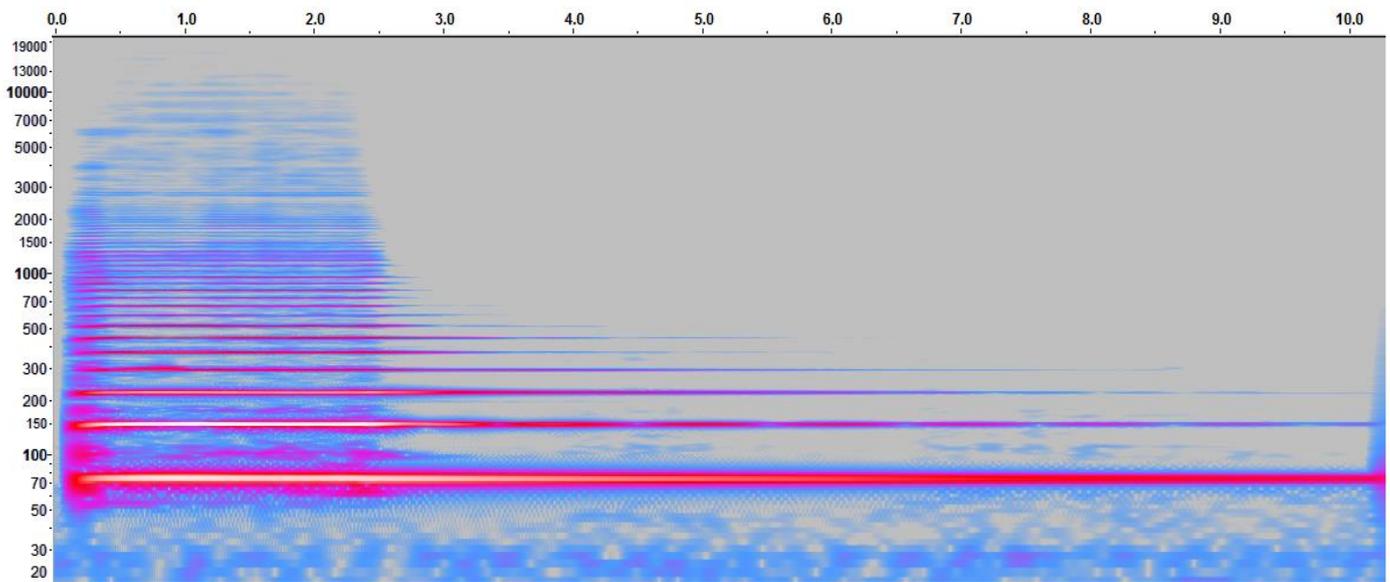


Figura 49: Espectrograma de la nota RE2 en el arco de aluminio

En la Figura 48 y la Figura 49 se puede ver la información espectral de la nota de 74 Hz correspondiente al RE2 tocada con el arco de aluminio.

La Figura 48 se puede ver que también es muy parecida a la Figura 38. De nuevo, las principales diferencias que se encuentran son por debajo de los 20 Hz y en la franja de a partir prácticamente de los 3.000 Hz, donde se puede ver una ligera modificación del contenido espectral. Otra diferencia es el cambio de magnitudes, mientras que en el arco de pernambuco no se superan los 18 dB negativos, en el arco de aluminio sí que se llegan a superar.

En cambio, en la Figura 49 sí que se pueden apreciar algunas diferencias fácilmente respecto a la Figura 39. Si bien es verdad que los primeros armónicos así como la fundamental son casi iguales, los armónicos superiores llegan a una frecuencia mayor en el arco de aluminio, hasta los 13.000 Hz frente a los 8.000 del arco de pernambuco. En cuanto a las fases del sonido, en el *attack* se puede observar una mayor cantidad de ruido en el arco de aluminio pero una duración prácticamente igual, de 0,1 segundos. La fase de *sustain* y de *release* son casi iguales en ambos arcos pero con un poco más de ruido en el arco de aluminio.



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO

RE3. La ejecución de esta nota será también igual a la del arco de pernambuco y consiste en un paso de arco desde la nuez a la punta una vez en la segunda cuerda con la mano izquierda en la mitad de la segunda cuerda sin presionar.

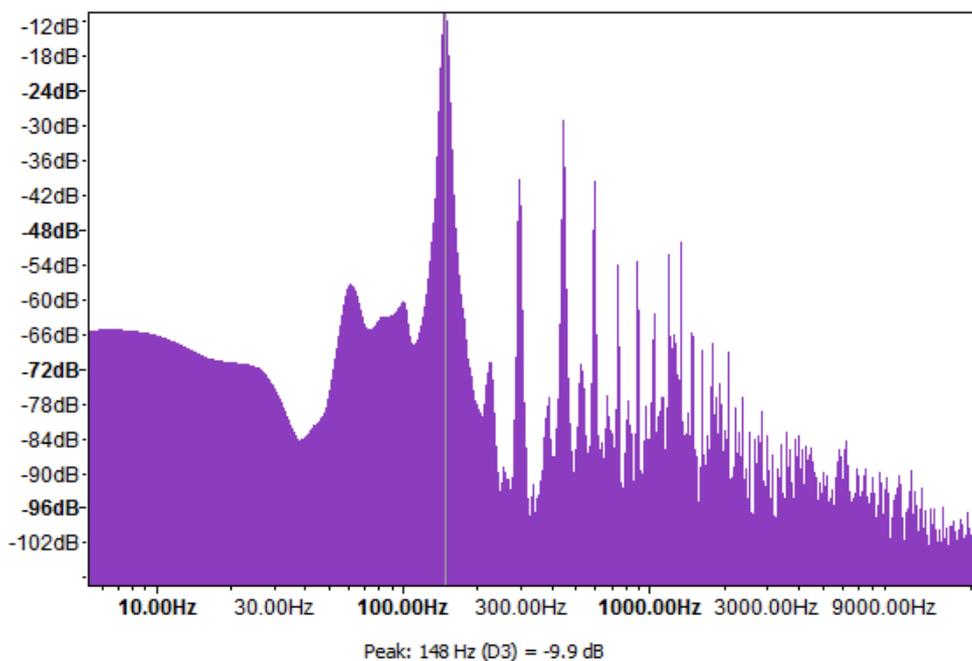


Figura 50: Análisis de frecuencias de la nota RE3 en el arco de aluminio

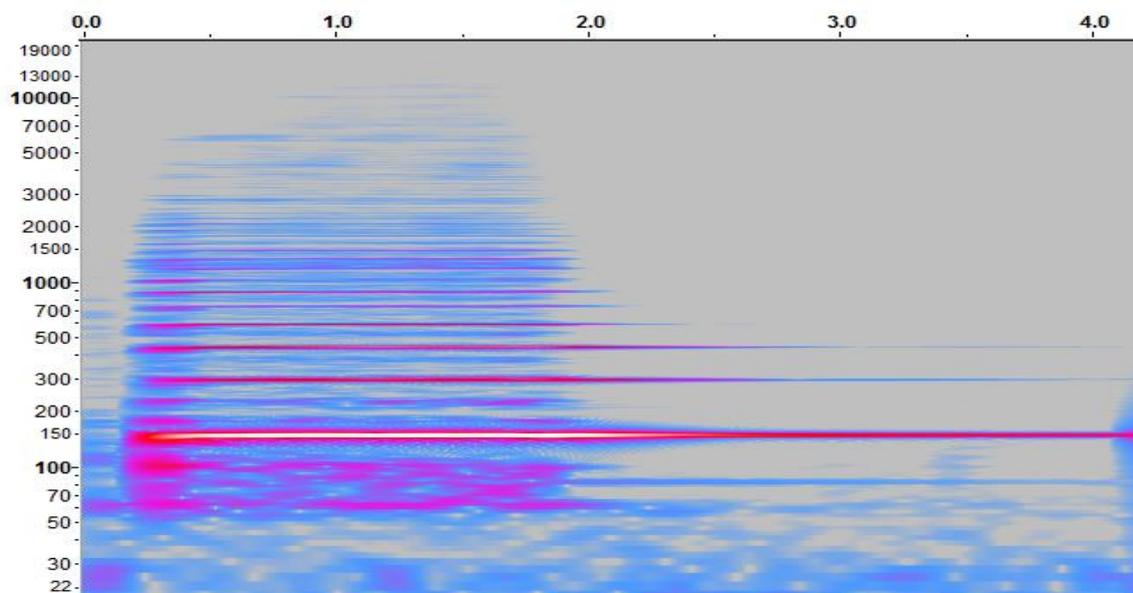


Figura 51: Espectrograma de la nota RE3 en el arco de aluminio



La nota de 148 Hz correspondiente al RE3 tocada por el arco de aluminio se muestra en la Figura 50 y la Figura 51.

En la Figura 50 se sigue viendo una relación estrecha entre el arco de pernambuco y el arco de aluminio. Las diferencias con la Figura 40 vienen en frecuencias por encima de los 3.000 Hz, donde aparece una ligera modificación, y en las frecuencias de 100 Hz hacia abajo, especialmente en 100 Hz y 60 Hz.

En cuanto a la Figura 51, se puede volver a apreciar de nuevo un mayor contenido de armónicos superiores en la nota tocada por el arco de aluminio sobre el de la nota producida por el arco de pernambuco de la Figura 41. En el *attack* se observa una llegada a los armónicos de 0,08 segundos frente a los 0,1 segundos que tardaba el arco de pernambuco, sin embargo, se sigue viendo tanto en esta fase como en la de *sustain* un mayor contenido de ruido en este arco.

RE4. Del mismo modo que en el arco de pernambuco, la ejecución consiste en un paso de arco desde la nuez a la punta una vez en la primera cuerda con la mano izquierda puesta en la posición del segundo armónico natural.

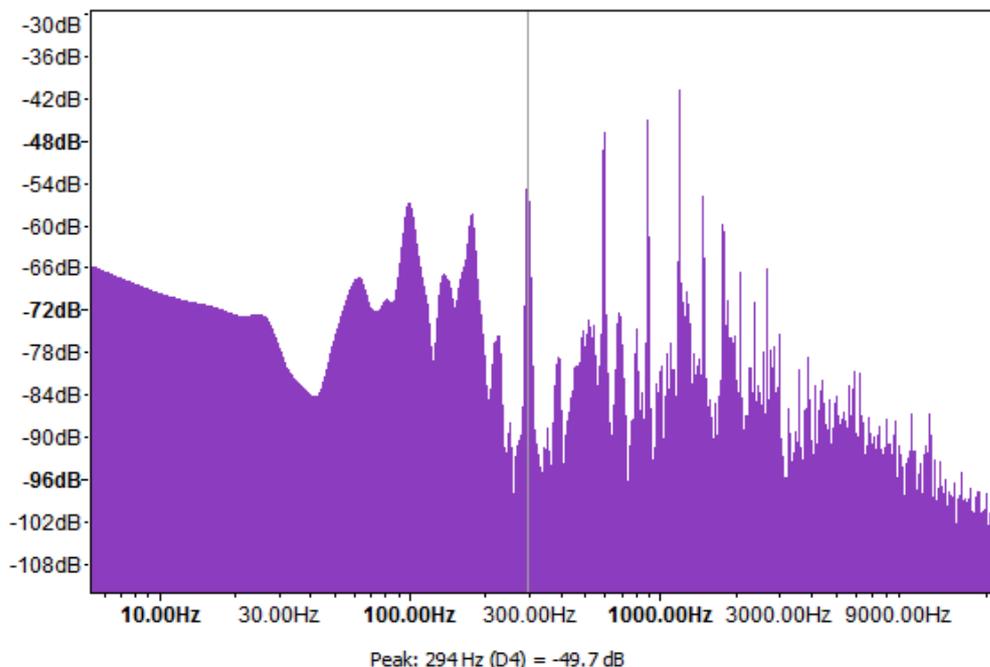


Figura 52: Análisis de frecuencias de la nota RE4 en el arco de aluminio



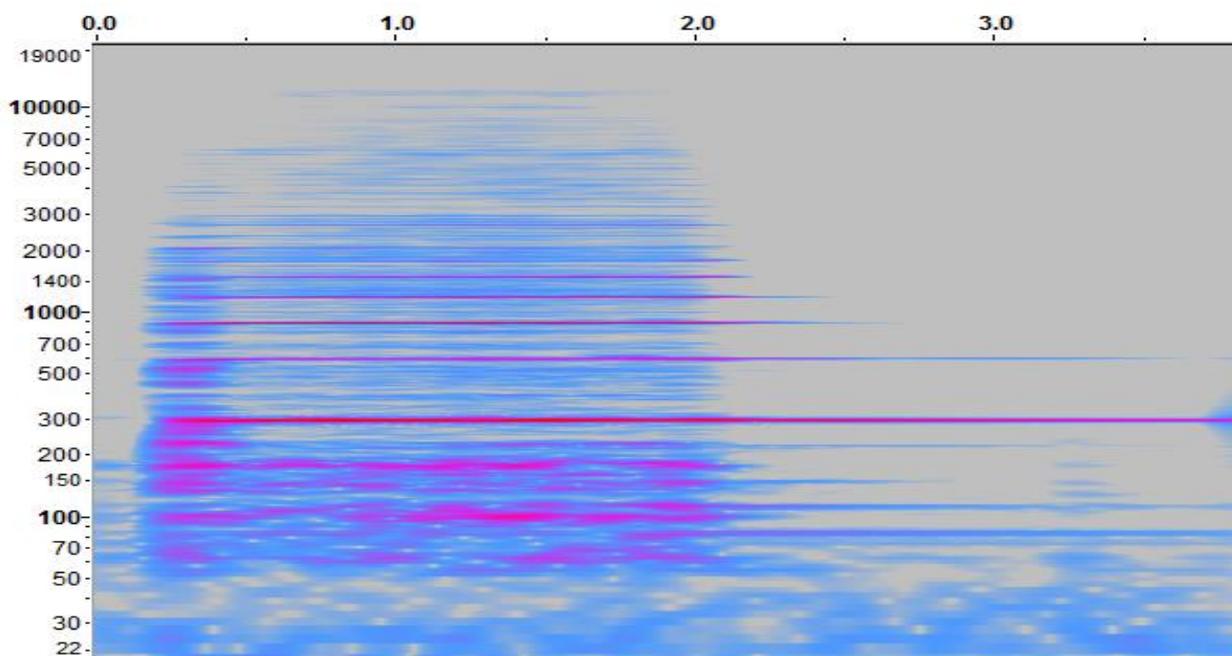


Figura 53: Espectrograma de la nota RE4 en el arco de aluminio

En la Figura 52 y la Figura 53 se encuentra la información espectral de la nota de 294 Hz correspondiente al RE4.

En la Figura 52, aunque siguen viéndose similitudes con la Figura 42, se puede apreciar también una diferencia en la amplitud de los armónicos en los arcos, siendo los del arco de pernambuco más débiles que los del arco de aluminio. Aunque se observa que hay picos antes de la nota RE4, especialmente en 100 Hz y 176 Hz, estas notas son el SOL2 y el FA3 que no pertenecen al espectro inferior de RE4 y por lo tanto no los percibimos como parte de la nota.

Como ocurría en los anteriores casos, en la Figura 53 se puede apreciar una gran similitud con la Figura 43. Las diferencias fundamentales son la mayor presencia de armónicos superiores en el arco de aluminio que en el arco de pernambuco y la presencia de ruido por debajo de la frecuencia de la nota en los 100 Hz y 176 Hz. Las fases de *attack*, *sustain* y *release* son prácticamente iguales en las notas producidas por ambos arcos.

RE5. De nuevo, la ejecución de esta nota ha de ser igual que en el arco de pernambuco, pasando el arco desde la nuez a la punta una vez en la primera cuerda con la mano izquierda en la posición del quinto armónico natural.

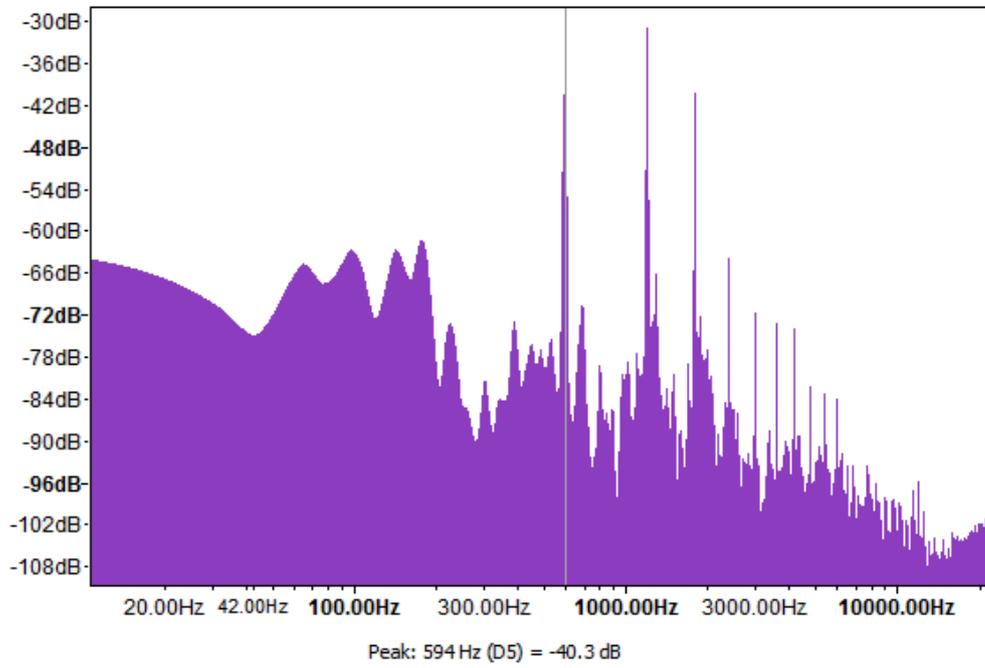


Figura 54: Análisis de frecuencias de la nota RE5 en el arco de aluminio

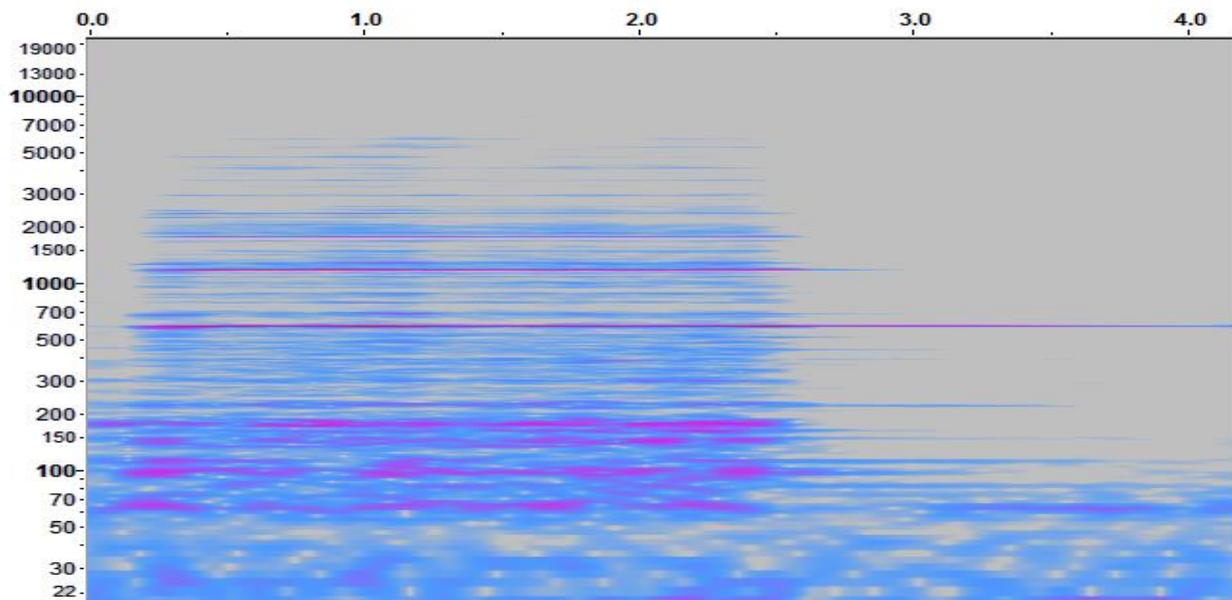


Figura 55: Espectrograma de la nota RE5 en el arco de aluminio



La información espectral de la nota de 594 Hz correspondiente al RE5 interpretada con el arco de aluminio se muestra en la Figura 54 y la Figura 55.

Los parecidos entre la Figura 54 y la Figura 44 siguen siendo grandes como en los otros casos, sin embargo, en el arco de aluminio sí que se puede ver un armónico que sobresale sobre el espectro más que lo hace el armónico correspondiente en el espectro del arco de pernambuco. Esta frecuencia es la de 1.775 Hz, correspondiente a la nota LA6. También se pueden apreciar unos pocos picos más sin demasiada amplitud a partir de los 4.000 Hz.

Por otra parte, en la Figura 55 se puede apreciar que esta vez sí que hay un contenido espectral muy parecido al de la Figura 45. Los armónicos superiores son prácticamente iguales en ambos arcos y la única diferencia notable es el ruido que aparece en frecuencias bajas. La fase de *attack* dura aproximadamente 0,02 segundos, como en el arco de pernambuco y las fases *sustain* y *release* son prácticamente idénticas.

7.3.3 Las vibraciones producidas en ambos arcos

Una vez visto el contenido espectral de cada una de las notas representativas de las octavas del contrabajo y de la diferencia en amplitud entre las ondas, se va a proceder con las diferencias vibratorias que suceden en ambos arcos a la hora de tocar con ellos, medidas con un acelerómetro puesto en la punta de los arcos.

Aunque estas vibraciones ocurridas en el arco no son perceptibles por el oído humano debido a su baja amplitud en relación a la nota que resuena en el instrumento, es interesante ver las diferencias que se producen en el movimiento que se produce en el arco al ser tocado.

A continuación se muestran los espectrogramas de las vibraciones ocurridas en los arcos. Las notas que se van a mostrar vuelven a ser la más grave, el MI1, y una nota que sea fácil para interpretar en todas las octavas, el RE2.



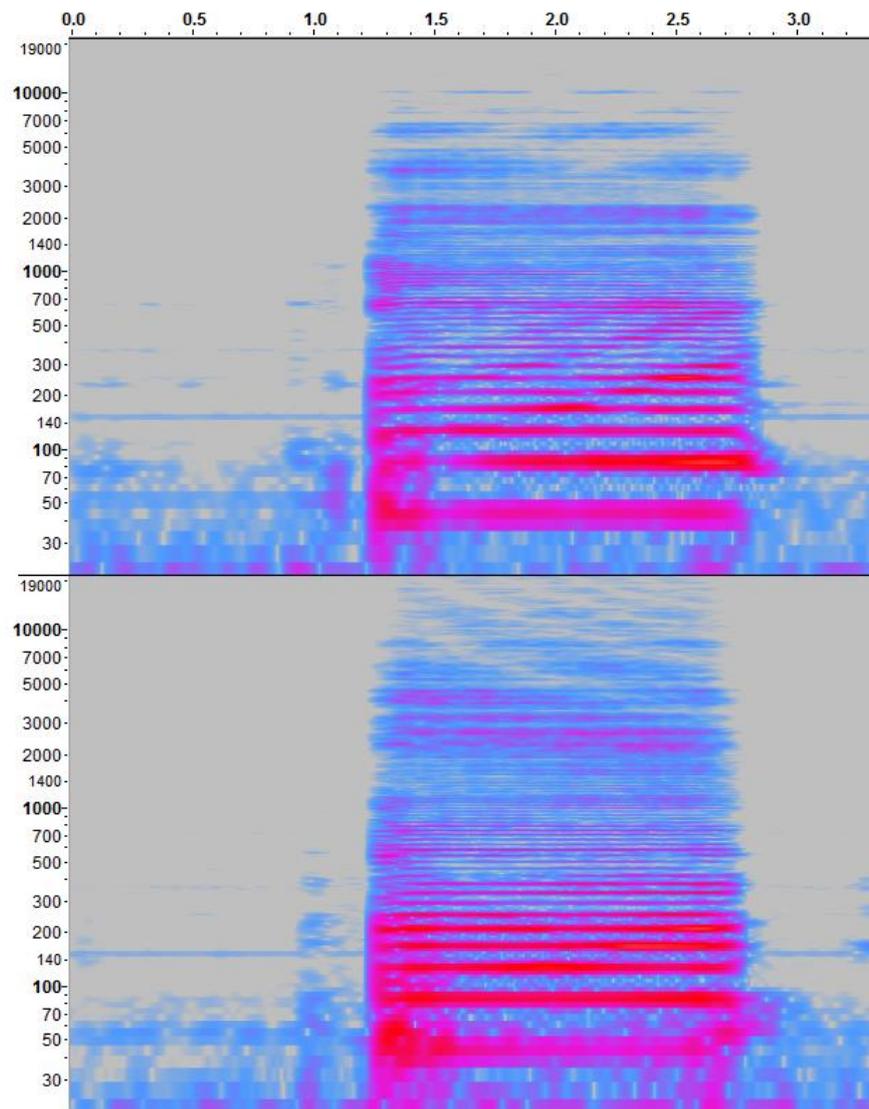


Figura 56: Espectrograma de las vibraciones que produce la nota MII medidas con un acelerómetro en el arco de aluminio, arriba, y en el arco de pernambuco, abajo

En la Figura 56 se puede ver las diferencias que ocurren en las vibraciones del arco de aluminio, parte superior, las que ocurren en el arco de pernambuco, parte inferior. Aunque los armónicos son prácticamente los mismos, generándose más superiores en el arco de pernambuco, el detalle que más llama la atención es el hecho de que en el arco de aluminio los armónicos se van produciendo en intervalos de tiempo de unas 2 décimas, siendo perceptibles por el oído humano si solo se escucha el arco. En el arco de pernambuco en cambio los armónicos se producen al principio y se mantienen más estables.



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO

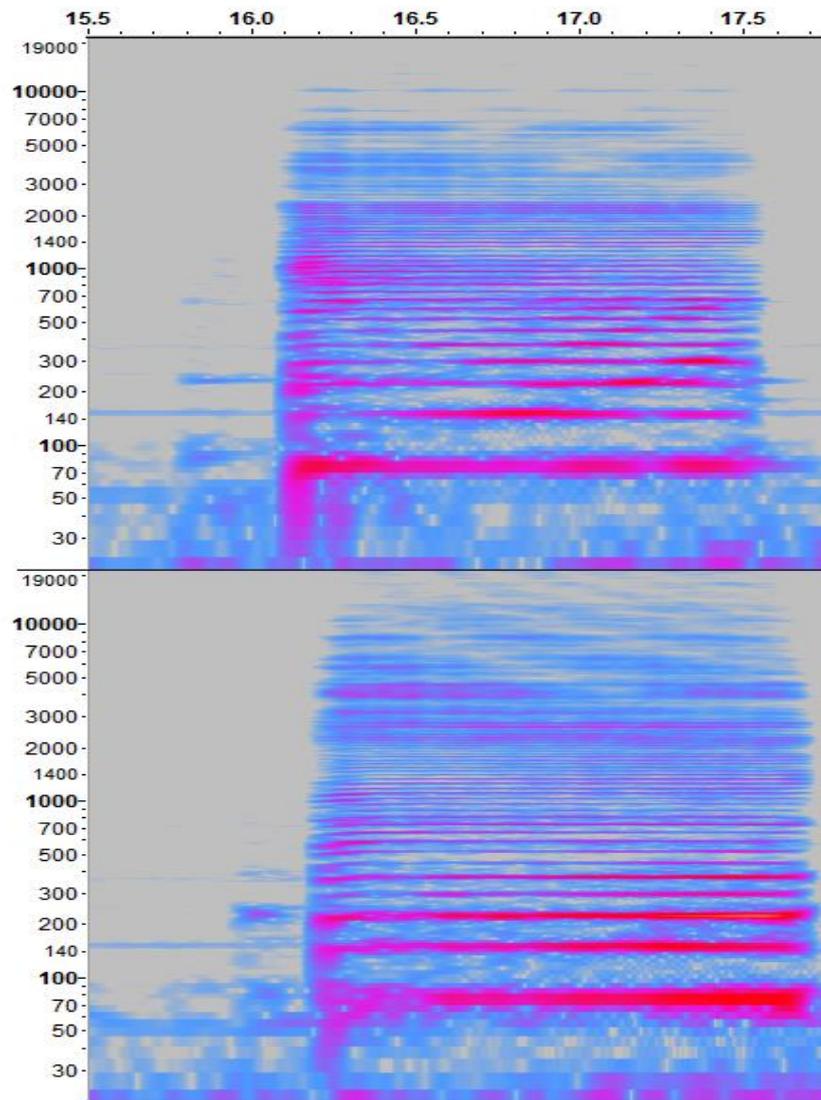


Figura 57: Espectrograma de las vibraciones que produce la nota RE2 medidas con un acelerómetro en el arco de aluminio, arriba, y en el arco de pernambuco, abajo

En esta Figura 57 se puede apreciar básicamente lo mismo que en la Figura 56 pero con otra nota como fundamental. Vuelven a aparecer más armónicos superiores en el arco de pernambuco y todos los armónicos empiezan a la vez, mientras que en el arco de aluminio los armónicos se van añadiendo cada 2 décimas aproximadamente, siendo este fenómeno audible si solo se escucha el arco.



7.4 Resultados obtenidos

Recopilando toda la información expuesta en el anterior apartado, se han observado ciertas diferencias a nivel espectral en el sonido generado por ambos arcos.

En primer lugar, la primera diferencia fundamental entre estos arcos es el peso, debido al valor más grande de densidad del aluminio sobre la densidad del pernambuco y al mantener las dimensiones de la vara muy parecidas. Este cambio de peso, de casi el doble en el aluminio, influye de gran modo en la técnica del intérprete para obtener los sonidos y también en la potencia que se le saca al sonido del instrumento.

En segundo lugar, se ha comprobado que la amplitud de la onda es mayor en las notas producidas por el arco de aluminio que en las notas producidas por el arco de pernambuco. Esto se debe en gran parte al peso previamente mencionado.

En tercer lugar, entrando en el terreno del espectro de frecuencias, se ha observado que en el arco de aluminio se produce una mayor cantidad de frecuencias superiores a la nota tocada. Estas frecuencias reforzadas iban a partir de los 1.500 Hz, o los 4.000 Hz según la nota, hasta casi los 13.000 Hz, aportando al arco de aluminio más brillo perceptivo, que es juicio subjetivo que se le aporta al refuerzo de las frecuencias altas. Además, estas frecuencias reforzadas se encuentran en las bandas críticas del oído, resultando en un aumento de volumen en la percepción sonora más allá del aumento de presión sonora. No obstante, estas frecuencias superiores iban siendo menos visibles a medida que la octava era más aguda hasta que, en la nota RE5, prácticamente no se notaba diferencia entre ambos arcos.

Por otra parte, en cuanto a las fases que definen un sonido, en la fase de *attack* se puede apreciar una diferencia en el tiempo que tardan los armónicos en establecerse. Si bien es verdad que en las notas más graves, el MI1 y el RE2, se ha observado un tiempo menor para establecer las frecuencias en el arco de aluminio que en el arco de pernambuco, a medida que se ascendía de octava se veían tiempos de ataque cada vez más próximos hasta ser idénticos. La fase de



decay de ambos arcos ha sido prácticamente igual en todos los casos. En la fase de *sustain*, lo que se podía apreciar era que las frecuencias más bajas del sonido que se interpretaba se mantenían con más intensidad en el arco de aluminio, pero de nuevo al ascender de octava se iba igualando. Por último, la fase *decay* también ha sido muy parecida en ambos arcos, ya que era el instrumento el que iba apagando su resonancia.

Finalmente, con las mediciones hechas con el acelerómetro se ha obtenido una diferencia en las vibraciones que suceden en ambos arcos al ser tocados. Mientras que en el arco de pernambuco se establecían los armónicos del sonido que se tocaba con suma rapidez y se mantenían durante toda la duración, en el arco de aluminio se iban sumando los armónicos naturales de la nota gradualmente, con un margen de 2 décimas y siendo perceptibles al oído humano si se escucha el arco sin escuchar el sonido del instrumento.



8. Conclusiones

A lo largo del presente trabajo, se ha creado un arco alemán de contrabajo con vara de aluminio apto para el uso y con unas particularidades sonoras al estar hecho con un material distinto a todos los arcos de hoy en día.

Posteriormente, se ha utilizado dicho arco para obtener unas muestras de sonido con unas condiciones de grabación determinadas y se le ha adherido un acelerómetro con el que se han captado las vibraciones que se producían en la vara mientras era utilizado.

Una vez tomadas las muestras, se han analizado los sonidos más representativos del contrabajo, uno por cada octava y en el que no influyera la mano izquierda, y se ha realizado una comparación entre los sonidos que se generaban y las vibraciones que se producían en el arco de aluminio y un arco de pernambuco de alta calidad.

Por último, esta nueva herramienta ha sido elaborada con la intención de abrir nuevos caminos tanto técnicos como pedagógicos y sonoros en los instrumentos de cuerda frotada y con la intención de ampliar el abanico de recursos de los compositores de música contemporánea.

Aun así, el arco presentado todavía debe ser analizado más exhaustivamente para obtener todos los datos que pueda ofrecer. De este modo, un análisis basado en ondículas, o *wavelets*, y con herramientas de CSD, *Cummulative Spectral Decay*, con los que obtener representaciones 3D de la evolución de cada uno de los armónicos entre otras funciones, se deja para el futuro. Al mismo tiempo, la técnica de grabación VNF, *Very Near Field*, para obtener muestras de la moción en el arco con micrófonos también se deja para futuros análisis. Por otra parte, en el arco se ha visto la influencia que tiene el peso en el intérprete, también se propone un análisis con un arco hecho de aluminio pero con el peso de un arco estándar de pernambuco para el futuro. Estas ramas serán exploradas próximamente a lo largo de mi futura tesis doctoral.



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE
CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO



9. Referencias

- Almenara, F. J. (2007). *El Contrabajo a través de la Historia*. México: Fides.
- Askenfelt, A. (1988). Measurement of the bowing parameters in violin playing. *STL-QPSR*, 29(1), 1-30.
- Askenfelt, A. (1989). Measurements of the bowing parameters in violin playing II: Bow-bridge distance, dynamic range, and limits of bow force. *Journal of the Acoustical Society of America*. 86, 503-516.
- Askenfelt, A. (1992). Observations on the dynamic properties of violin bows. *STL-QPSR*, 33(4), 43-49.
- Bavu, E., Smith, J. & Wolfe, J. (2005). Torsional waves in a bowed string. *Acta Acustica united with Acustica*, 91(2), 241-246.
- Bavu, E., Yew, M., Plaçais, P. Y., Smith, J. & Wolfe, J. (2004). Rotational and translational waves in a bowed string. *International Symposium on Musical Acoustics*.
- Caussé, R., Maigret, J. P., Dichtel, C. & Bensoam, J. (2001). Study of the violin bow quality. *International Symposium on Musical Acoustics*. Recuperado de: <http://articles.ircam.fr/textes/Causse01a/index.pdf>
- Francés, E. (8 de Septiembre de 2010). Diccionario de Luthería: ARCO. Recuperado de <http://www.abetoyarce.com/diccionario-de-lutheria-arco/>
- Guettler, K. (2002). *The bowed string on the Development of Helmholtz Motion and On the Creation of Anomalous Low Frequencies*. (Tesis doctoral, Royal Institute of Technology). Recuperado de <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:9153/FULLTEXT01.pdf>
- Guettler, K. & Askenfelt, A. (1995). Some aspects of bow resonances - conditions for spectral influence on the bowed string. *STL-QPSR*, 36(2-3), 107-118.
- Helmholtz, H. (1954). *On the sensations of tone*. Nueva York: Dover.



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE
CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO

- Matsunaga, M. & Minato, K. (1998). Physical and mechanical properties required for violin bow materials II: Comparison of the processing properties and durability between pernambuco and substitutable wood species. *Journal of Wood Science*, 44, 142-146.
- Matsunaga, M., Sugiyama, M., Minato, K. & Norimoto, M. (1996). Physical and Mechanical Properties Required for Violin Bow Materials. *Holzforschung*, 50, 511-517.
- Mejía, E. & Buitrón, X. (2008). Brazilwood (*Caesalpinia Echinata*) in Brazil. Recuperado de https://cites.org/sites/default/files/ndf_material/WG1-CS5.pdf
- Pantelic, F. & Prezelj, J. (2013). Sound Generating Mechanism of the Double Bass. *Telfor Journal*, 5(2), 140-144.
- Schimleck, L. R., Espey, C., Mora1, C. R., Evans, R., Taylor, A. & Muniz, G. (2009). Characterization of the wood quality of pernambuco (*Caesalpinia echinata* Lam) by measurements of density, extractives content, microfibril angle, stiffness, color, and NIR spectroscopy. *Holzforschung*, 63, 457-463. doi: 10.1515/HF.2009.082
- Smith, J. O. (2006). *Physical audio signal processing: for virtual musical instruments and digital audio effects*. Estados Unidos: W3K. Recuperado de: <https://ccrma.stanford.edu/~jos/sasp/>
- Smith, J. O. (2011). *Spectral audio signal processing*. Estados Unidos: W3K. Recuperado de: <https://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/>
- Turetzky, B. (1989). *The contemporary contrabass*. California: University of California Press.
- Woodhouse, J. & Galluzzo, P. M. (2004). The Bowed String As We Know It Today. *Acta Acustica United with Acustica*, 90, 579-589.



10. Índice de tablas

Tabla 2: Propiedades y características del aluminio en general.....	36
Tabla 2: Características del arco de aluminio prototipo.....	49
Tabla 3: Características del arco de aluminio perfeccionado.....	51
Tabla 4: Características del arco de pernambuco.....	65



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE
CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO



11. Índice de figuras

Figura 1: Contrabajo italiano de 3 cuerdas	20
Figura 2: Violón vienés de 5 cuerdas	20
Figura 3: Contrabajo actual	21
Figura 4: Representación esquemática del movimiento de Helmholtz. Si el arco va hacia arriba el sentido de rotación será anti horario y si el arco va hacia abajo el sentido de rotación será como el de las horas del reloj	22
Figura 5: Esquema de una relación típica entre el coeficiente de fricción de la resina y la velocidad instantánea de deslizamiento	23
Figura 6: Distorsión de la fricción en la trayectoria parabólica simétrica. En la práctica, la fricción causa un tiramiento constante en la dirección del arco cuando éste pasa de forma consistente	24
Figura 7: Las ondas secundarias se quedan atrapadas entre el arco y el puente durante la fase de adhesión	25
Figura 8: Representación esquemática de los desplazamientos de una cuerda durante el paso de arco. El punto negro indica si estamos en la fase de adhesión	25
Figura 9: Movimiento de torsión en una cuerda al ser frotada por un arco	26
Figura 10: Arco convexo arcaico	27
Figura 11: Arco convexo del Renacimiento	28
Figura 12: Arco convexo del siglo XVIII	28
Figura 13: Arco cóncavo actual	28
Figura 14: Ejemplos de arco alemán en la parte superior y arco francés en la parte inferior.....	29



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE
CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO

Figura 15: Sensor de aceleración	40
Figura 16: Interior de una cámara anecoica	41
Figura 17: Logo e interfaz de usuario de Audacity.....	42
Figura 18: Captura de pantalla de la herramienta SMS Tools	44
Figura 19: Arco de aluminio prototipo.....	48
Figura 20: Punta del arco de aluminio prototipo.....	48
Figura 21: Arco de aluminio perfeccionado.....	50
Figura 22: Punta del arco de aluminio perfeccionado.....	51
Figura 23: Estructura del material poroso presente en la cámara anecoica de Gandía	53
Figura 24: Micrófono M30 de Earthworks	54
Figura 25: Respuesta en frecuencias del micrófono M30 de Earthworks.....	55
Figura 26: Respuesta polar del micrófono M30 de Earthworks	55
Figura 27: Tarjeta de sonido AudioBox 44VSL de PreSonus	56
Figura 28: Parte trasera del AudioBox 44VSL de PreSonus	57
Figura 29: Acelerómetro 352A73 de la casa PCB PIEZOTRONICS.....	57
Figura 30: Posición de los micrófonos y del contrabajo durante la grabación de la cámara anecoica de Gandía.....	59
Figura 31: Acelerómetro instalado en el arco de aluminio	61
Figura 32: 75 milisegundos de grabación de la fase sustain de la nota MI1, izquierda, y RE2, derecha, por el arco de aluminio, arriba, y el arco de pernambuco, abajo	62
Figura 33: Forma de onda de la nota RE2 en decibelios tocada por el arco de aluminio, superior, y el arco de pernambuco, inferior	63



Figura 34: Arco de pernambuco.....	64
Figura 35: Punta del arco de pernambuco.....	64
Figura 36: Análisis de frecuencias de la nota MI1 en el arco de pernambuco.....	67
Figura 37: Espectrograma de la nota MI1 en el arco de pernambuco.....	67
Figura 38: Análisis de frecuencias de la nota RE2 en el arco de pernambuco	68
Figura 39: Espectrograma de la nota RE2 en el arco de pernambuco	69
Figura 40: Análisis de frecuencias de la nota RE3 en el arco de pernambuco	70
Figura 41: Espectrograma de la nota RE3 en el arco de pernambuco	70
Figura 42: Análisis de frecuencias de la nota RE4 en el arco de pernambuco	71
Figura 43: Espectrograma de la nota RE4 en el arco de pernambuco	72
Figura 44: Análisis de frecuencias de la nota RE5 en el arco de pernambuco	73
Figura 45: Espectrograma de la nota RE5 en el arco de pernambuco	73
Figura 46: Análisis de frecuencias de la nota MI1 en el arco de aluminio	75
Figura 47: Espectrograma de la nota MI1 en el arco de aluminio	75
Figura 48: Análisis de frecuencias de la nota RE2 en el arco de aluminio	76
Figura 49: Espectrograma de la nota RE2 en el arco de aluminio	77
Figura 50: Análisis de frecuencias de la nota RE3 en el arco de aluminio	78
Figura 51: Espectrograma de la nota RE3 en el arco de aluminio	78
Figura 52: Análisis de frecuencias de la nota RE4 en el arco de aluminio	79
Figura 53: Espectrograma de la nota RE4 en el arco de aluminio	80
Figura 54: Análisis de frecuencias de la nota RE5 en el arco de aluminio	81
Figura 55: Espectrograma de la nota RE5 en el arco de aluminio	81



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE
CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO

Figura 56: Espectrograma de las vibraciones que produce la nota MI1 medidas con un acelerómetro en el arco de aluminio, arriba, y en el arco de pernambuco, abajo 83

Figura 57: Espectrograma de las vibraciones que produce la nota RE2 medidas con un acelerómetro en el arco de aluminio, arriba, y en el arco de pernambuco, abajo 84





ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE UN ARCO DE
CONTRABAJO HECHO DE ALUMINIO

