

# RDA.III

III CONGRESO INTERNACIONAL DE ARTES  
REVUELTAS DEL ARTE



UNIVERSIDAD NACIONAL  
DE LAS ARTES



## III CONGRESO INTERNACIONAL DE ARTES “REVUELTAS DEL ARTE”

Buenos Aires, 10 al 12 de octubre de 2023

Actas del III Congreso Internacional de Artes : revueltas del arte / Cristina Híjar... [et al.] ;

Compilación de Lucía Rodríguez Riva. - 1a ed - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Universidad Nacional de las Artes, 2024.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-3946-31-8

1. Arte. 2. Actas de Congresos. I. Híjar, Cristina II. Rodríguez Riva, Lucía, comp.  
CDD 700.71

# RDA.III

III CONGRESO INTERNACIONAL DE ARTES  
REVUELTAS DEL ARTE



UNIVERSIDAD NACIONAL  
DE LAS ARTES

## III CONGRESO INTERNACIONAL DE ARTES “REVUELTAS DEL ARTE”

Buenos Aires, 10 al 12 de octubre de 2023

El Congreso fue realizado por la Secretaría de Investigación y Posgrado de la Universidad Nacional de las Artes.

### ACTAS DEL III CONGRESO INTERNACIONAL DE ARTES “REVUELTAS DEL ARTE”

#### COMPILADORA

Lucía Rodríguez Riva

#### CORRECTORAS

Leonora Madalena y Diana Marina Gamarnik

#### ILUSTRACIONES

Facundo Marcos

#### DISEÑO

Soledad Sábato

#### COORDINACIÓN DE DISEÑO

Viviana Polo

**RDA.III**

III CONGRESO INTERNACIONAL DE ARTES  
REVUELTAS DEL ARTE



UNIVERSIDAD NACIONAL  
DE LAS ARTES

# EJE 3

**ARTES, CIENCIA Y  
VINCULACIÓN TECNOLÓGICA**



*EJE 3: ARTES, CIENCIA Y VINCULACIÓN TECNOLÓGICA; 3.3: ARTES, SUSTENTABILIDAD Y TECNOLOGÍA*

## Determinación de la constante elástica de la tapa de un violonchelo

Pablo Paupy (Universidad Tecnológica Nacional)

Pablo Tabla (Universidad Tecnológica Nacional)

Federico Elfi (Universidad Tecnológica Nacional)

Jorge Torga (Universidad Tecnológica Nacional)

Darío Huggenberger (Universidad Tecnológica Nacional)

**RESUMEN:** El trabajo que se presenta se enmarca en el campo de las artes musicales y en interacción con otras ciencias como la acústica y la física, para la producción de instrumentos aumentados y para una ampliación de los conocimientos propios de la luthería tradicional. Se ha determinado la constante elástica equivalente de la tapa de un violonchelo en interacción con el puente. Para ello se ha medido la deformación forzada por las cuerdas por medio de métodos de interferometría óptica con resolución de unos pocos micrones. Utilizando resortes calibrados, se forzó la misma deformación, midiendo la compresión de los resortes y, por lo tanto, la fuerza elástica equivalente a la impuesta por las cuerdas. Con ambos parámetros medidos en las proximidades de los puntos de apoyo, se obtuvieron valores de constante elástica estática equivalentes en los puntos de apoyo del puente. Por otro lado, como producto de lo estudiado, se adelanta una hipótesis acerca de la función mecánica del alma y de la barra de graves.

**Palabras clave:** Elasticidad; Interferometría; Organología; Puente violonchelo; Metrología.

## Introducción

El puente del violonchelo tiene como principal función transformar las vibraciones generadas en las cuerdas en vibraciones de la placa de la caja del instrumento. Las cuerdas transmiten esta vibración al puente en los puntos de contacto entre ambos elementos y este la transmite a la placa a través de los dos pies de apoyo. La forma en que el puente realiza esta transmisión y cómo son sus modos de vibración son temas centrales en las características finales del instrumento y han sido estudiados por varios autores. El trabajo de Minnaert (1937) ha sido uno de los pioneros en este tipo de investigaciones, estudiando los modos normales, flexionales o torsionales, del puente. Posteriormente, en los trabajos de Steiknoff (1963) se introducen modelos mecánicos básicos del puente para obtener la respuesta en frecuencia. Bissinger (2006) realizó estudios de diversos puentes de violín y realizó un detallado análisis del puente como filtro en la transmisión de vibraciones a la tapa del instrumento. Entre los trabajos con resultados experimentales se puede mencionar el de Reinicke (1970) como uno de los primeros en utilizar técnicas ópticas interferométricas para medir vibraciones en el instrumento; posteriormente Jansson y colaboradores (1992) realizan interesantes aportes al análisis experimental en las vibraciones de la caja del violín y sus efectos en la respuesta en frecuencia. En Jansson (2004) se determina la importancia de la forma y de las dimensiones de la base del puente y del pie en las características del acople con la tapa del instrumento, demostrando una correlación entre la calidad del violín y la forma del puente. En un trabajo reciente, Lodetti (2023) estudió la influencia de la forma del pie del puente del violonchelo en su comportamiento estático y vibracional, mediante modelamiento paramétrico y simulaciones, utilizando métodos de elementos finitos. A partir de los resultados obtenidos en todos estos trabajos, se evidencia la importancia de

conocer las condiciones de borde a las que se encuentra sometido el puente durante la operación normal del instrumento. Estas condiciones serán variables de instrumento a instrumento y dependen de las características constructivas, las condiciones ambientales, la calidad y el tipo de cuerdas empleadas, entre otras. Si bien todas estas condiciones son variables, el estudio propuesto tiene como eje determinar la constante elástica de cada apoyo del puente para el instrumento del que disponemos, en condiciones de experimentación en el laboratorio. A través de este ensayo se busca determinar el valor de la constante elástica equivalente en cada uno de los apoyos de los pies del puente, y la diferencia entre ambos como resultado de la asimetría constructiva, tanto del puente como de la tapa del instrumento. Esta asimetría queda determinada por la curvatura de la parte superior en el caso del puente y por la asimetría de rigidez en la tapa. En este caso la asimetría es debida a la colocación del alma (*sound-post*) del lado del apoyo agudo (cuerda de la) y de la cadena armónica (*bass-bar*) situada en las cercanías del apoyo grave (cuerda de do).

Para obtener los valores de las constantes elásticas mencionadas, se implementó un montaje experimental que permite medir la deformación de la tapa en los apoyos del puente en función de la fuerza aplicada en cada punto. El esquema experimental se centró en métodos de medición de distancias mediante interferometría óptica y fuerza aplicada en forma indirecta por deformación de un resorte de constante elástica conocida. Con ese esquema experimental se realizaron mediciones de deformación en distintas condiciones y se obtuvieron resultados de las constantes elásticas en los puntos mencionados.

## Descripción del ensayo

El ensayo consiste en la medición del desplazamiento de la tapa del violonchelo al ejercer una fuerza de compresión en los puntos de apoyo del puente. A partir de la medición de esa deformación, y conociendo la fuerza aplicada, se busca obtener la constante elástica de la

tapa. Para esto se diseñó un dispositivo especial, para montar sistemas de medición y deformación que se adaptaran a la estructura del violonchelo. Este dispositivo permite ejercer presión sobre los puntos de apoyo del puente en forma controlada, determinar la fuerza aplicada y, simultáneamente, registrar la deformación de la tapa en dichos puntos.

El dispositivo experimental de medición y el instrumento utilizado como muestra se montaron sobre una mesa antivibratoria que permite aislar el sistema de vibraciones externas. La fijación del instrumento a la mesa es un punto crítico del experimento y se realizó por medio de una estructura diseñada y construida específicamente para ese fin, que es utilizada, además, como soporte del sistema, para ejercer la fuerza de compresión sobre la tapa del instrumento, y del sistema de medición de su deformación. El dispositivo de compresión permite aplicar una fuerza gradual y controlada sobre la tapa a medida que se mide su desplazamiento. Estas mediciones se hicieron en varios puntos próximos a los puntos de apoyo del puente sobre la tapa del instrumento. Las mediciones de desplazamiento se realizan mediante la técnica de interferometría óptica, que permite obtener la diferencia de camino óptico de un haz láser entre la superficie de la tapa del instrumento y una superficie de referencia y, a partir de este valor, determinar la deformación de la tapa con una resolución espacial cercana al micrón.

En la primera etapa del experimento se midieron los desplazamientos nominales de la tapa del instrumento, producidos por la presión ejercida por el puente en condiciones de afinación normal. Estas mediciones se realizaron en ciertos puntos de interés que se eligen cerca del apoyo del puente, sobre la tapa del instrumento. Para mayor claridad se enumeran los puntos de estudio, comenzando por el punto 1, junto al apoyo del pie correspondiente a la cuerda aguda (nota la3 220 Hz), del lado del cordal del instrumento, girando en sentido antihorario, se sigue con el punto 2, ubicado en el lateral derecho del puente, visto siempre desde el lado cordal, el punto 3 del lado del diapasón, opuesto a la ubicación del punto 1, y así sucesivamente en orden correlativo para los puntos 4 y 5, en el

pie correspondiente a la cuerda grave. En la Imagen 1 se muestra la ubicación de estos puntos sobre la tapa del instrumento.

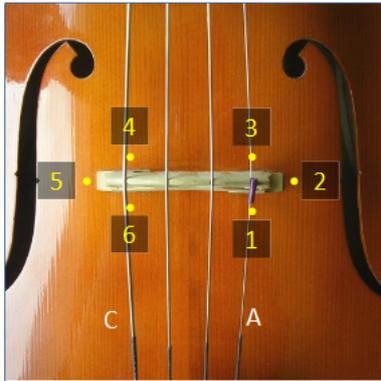


Imagen 1 – Puntos de medición indicados sobre la tapa del instrumento

Estas primeras mediciones tuvieron como objetivo estimar el valor de los desplazamientos de la tapa en condiciones normales de operación del instrumento, para luego, en la segunda etapa, ejercer la fuerza de compresión con el sistema experimental de deformación con valores comparables de fuerza y evitar la deformación en exceso de la tapa, que puede producir fisuras o roturas no deseadas.

Las cuerdas utilizadas para este experimento, en reemplazo de las originales, son de la marca Jargar® Classic Medium. El fabricante proporciona la tensión nominal de cada cuerda en condiciones de afinación normal, siendo los valores de tensión de las cuerdas agudas mayores a los de las cuerdas graves.

Una vez obtenidos los valores nominales, se realizó la segunda etapa de medición quitando el puente original y ubicando, en los puntos de apoyo, los dispositivos de compresión diseñados *ad hoc*. Con este dispositivo se ejercen las sollicitaciones de esfuerzo requeridas para lograr la deformación de la tapa. Se obtiene de esa manera una secuencia de pares ordenados. En cada uno de estos pares se obtiene la fuerza ejercida sobre la tapa y la

deformación correspondiente. La fuerza se registra por medio del número de vueltas del sistema de compresión y la deformación en la tapa del instrumento con el sistema de interferometría óptica mencionado.

## Fijación del instrumento

La sujeción del instrumento en la mesa de ensayo conlleva un desafío importante en materia del diseño de la estructura requerida para tal fin por dos razones. La primera es conseguir que el instrumento se fije estáticamente a la mesa. De esa manera las deformaciones registradas en los puntos de interés serán, efectivamente, debidas a la deformación de la tapa y no a movimientos del instrumento respecto al punto de medición. La segunda es que la misma estructura se utilizó para la ubicación del dispositivo de compresión de la tapa, reemplazando la acción del puente.

Un detalle importante para tener en cuenta es que el proceso de afinación del instrumento en condiciones normales de funcionamiento implica un trabajo arduo del lado del clavijero, especialmente cuando se trata del montaje de un juego de cuerdas nuevo o, como en nuestro caso particular, cuando requerimos pasar del estado de tensión cero a tensión nominal del encordado. A medida que las cuerdas se van ajustando secuencialmente, el instrumento va a adquiriendo un estado de mayor tensión, lo que implica movimientos en la tapa. Cuando una cuerda llega a su punto de tensión (afinación) deseada, se requiere ajustar las otras cuerdas, lo que a su vez origina nuevas tensiones que modifican el estado de reposo de la anterior. Esto muestra que el proceso de afinación es iterativo, por ser dependiente cada cuerda del estado de las demás, y muy laborioso, hasta que se logra el estado de equilibrio (afinación) deseado. Este proceso implica un considerable movimiento en el sector del lado del clavijero, que no debe alterar la posición de la tapa del instrumento para las mediciones propuestas en este trabajo. En otras palabras, el procedimiento normal de afinación de estos instrumentos implica movimientos de las clavijas que se traducen en

esfuerzos en el mástil y en la caja, que deben ser minimizados o neutralizados en este ensayo para evitar perturbaciones en las lecturas de deflexión de la tapa que no sean debidas, exclusivamente, a la acción de los apoyos del puente.

Otro aspecto no menos importante es preservar el instrumento y desarrollar un método de sujeción y montaje que no dañe su estructura. Ciertas zonas del instrumento son frágiles y hacen imposible pensar en cualquier método de fijación. En los puntos donde puede sujetarse debido a que las características estructurales lo permiten, se debe priorizar con igual importancia no dañar los aspectos estéticos como el barniz y el lustre de la madera.

El desafío inicial consistió en hacer un análisis para encontrar los puntos estructuralmente más resistentes del instrumento para ser utilizados como vínculo de la estructura de fijación y soporte. Los puntos seleccionados para esta función fueron los puntos de unión de las fajas con las "C" del instrumento, que se muestran en la Imagen 2. En estos puntos se forma un ángulo agudo e interiormente se ubican postes de abeto o sauce conocidos como *bloques* que, junto con las *contra fajas*, sirven para unir la tapa del instrumento con el fondo y dar rigidez a la caja de resonancia en su conjunto. Estos cuatro puntos, junto con el taco, que permite el anclaje del puntal, y el extremo opuesto, donde se fija el mango o mástil, son los puntos de mayor resistencia mecánica del instrumento.

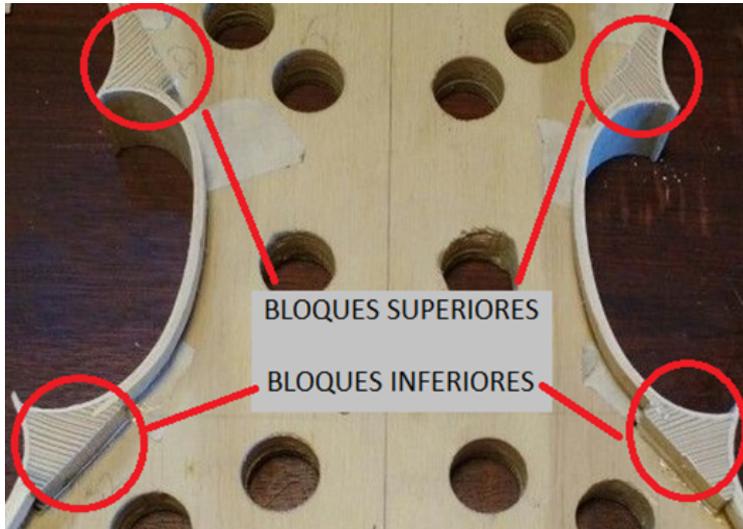


Imagen 2 – Bloques superiores e inferiores

Considerando el análisis mencionado y habiendo identificado la parte más adecuada y rígida disponible en el instrumento, se diseñó y se construyó un elemento mecánico de mordaza separada en dos partes, inferior y superior. La parte inferior se atornilla a la mesa de medición y la parte superior presiona la tapa del instrumento como se indica en la Imagen 3. Tanto la parte inferior como la superior presionan sobre tacos de madera cubiertos de felpa que están en contacto directo con el instrumento. De esta manera, el instrumento queda soportado por este sistema de mordaza y ninguna otra parte resulta estar en contacto directo con la mesa de medición. Los puntos establecidos en los cuatro bloques son los únicos elementos de vinculación del instrumento con la mesa de medición. La Imagen 3 muestra el instrumento emplazado en la mesa de medición y el sistema de compresión de la tapa en situación de medición.



Imagen 3 – Violonchelo montado en la mesa de medición mediante la estructura de fijación

## Compresión de la tapa

Para ejercer la fuerza de compresión sobre la tapa del instrumento en los puntos exactos donde actúa el puente en condiciones normales, se diseñó especialmente un dispositivo mecánico que se replicó en cada uno de los puntos seleccionados para la medición. Este dispositivo tiene una configuración mecánica, con un punto de apoyo sobre la tapa del instrumento (réplica del pie del puente), un cilindro que contiene un resorte de constante elástica conocida y medida para este experimento y un pistón que comprime dicho resorte dentro del cilindro. El vástago del pistón se ha roscado con paso milimétrico de 1 mm por vuelta, utilizando rosca Withworth.

Se construyeron dos dispositivos como los mencionados, que se montaron en sustitución del puente original, utilizando la estructura de fijación del instrumento descrita en el

apartado anterior. Para realizar este montaje, el violonchelo queda desprovisto del puente, del cordal y de las cuerdas.

El punto de apoyo de ambos dispositivos en la tapa es un pie de resina epoxi con la forma copiada del puente original. El otro extremo de este dispositivo es el pistón que comprime el resorte y va roscado sobre la estructura de fijación antes descrita. La rosca que interactúa con el vástago del pistón está soldada, y queda rígidamente vinculada a la estructura que fija el violonchelo a la mesa. Esta configuración mecánica permite que, roscando el vástago desde la estructura metálica de anclaje del instrumento, se ejerza una fuerza sobre el cilindro que contiene el resorte calibrado y este transmita una fuerza igual y contraria sobre la tapa del instrumento en el punto de interés (apoyo del puente). Así, la fuerza aplicada a la tapa debido a la compresión del resorte está determinada por el ángulo de giro del vástago.

La medición del desplazamiento de la tapa en conjunto con la fuerza determinada indirectamente por el número de vueltas del émbolo de compresión nos permite conocer los dos parámetros fundamentales para determinar analíticamente la constante elástica de la tapa del instrumento.

## Mediciones y obtención de valores

Para tener como parámetro el desplazamiento nominal de la tapa del violonchelo en condiciones de afinación normal, es necesario hacer mediciones de deformación en los puntos 1, 3, 4 y 6 con el instrumento armado con puente cordal y cuerdas. Los valores en los puntos 2 y 5, pero desplazados debajo del apoyo de los pies del puente, se obtienen a partir del promedio de los valores medidos en 1 y 3 y 4 y 6, respectivamente.

En estas condiciones se midió el desplazamiento nominal de la tapa en dos situaciones: con las cuerdas originales del instrumento de origen chino y con cuerdas Jargar® Medium Classic. En la Tabla 1 se muestran los desplazamientos obtenidos para ambos juegos de

cuerdas. Se puede observar que, con las cuerdas originales del instrumento, el desplazamiento es sensiblemente menor debido a que estas cuerdas requieren mucha menor tensión mecánica para obtener los valores de afinación deseados. Es posible asociar estos resultados a la diferencia tímbrica de ambos juegos de cuerda, siendo las originales de menor riqueza tímbrica que las Jargar® Medium Classic.

Tabla 1 – Desplazamientos nominales de la tapa en condiciones de afinación

Punto	Lado Cuerda	Desplazamiento	Desplazamiento
		Cuerdas Chinas [ $\mu\text{m}$ ]	Cuerdas <i>Jargar® Classic</i> [ $\mu\text{m}$ ]
1	A	381	485
6	C	458	676
3	A	471	663
4	C	470	659

Una vez obtenidos los desplazamientos de la tapa del violonchelo en los puntos de interés, con los dos juegos de cuerda mencionados y en condiciones normales de afinación, se colocó el sistema de compresión descrito anteriormente, para determinar la fuerza necesaria a ejercer en los puntos de apoyo del puente y para producir desplazamientos similares a los obtenidos con las cuerdas. A tal fin se colocaron los dispositivos de compresión formados por los cilindros con resortes calibrados y se procedió a dar el número de vueltas necesarias para producir las deformaciones en el orden esperado.

En la Tabla 2 se presentan los valores obtenidos respetando los desplazamientos máximos alcanzados con las cuerdas Jargar® Medium Classic. Para determinar la constante elástica, asumimos un modelo para la elasticidad de la tapa de ley de Hooke y que las condiciones experimentales mantienen el sistema dentro de la zona lineal. También se asume que las constantes en cada punto medido sobre la tapa son diferentes e independientes entre sí. Dentro de este modelo la constante elástica se obtiene como el cociente entre la fuerza total aplicada y el desplazamiento correspondiente.

Tabla 2 – Valores obtenidos para la constante elástica con el sistema experimental descrito

Punto	Vueltas	Desplazamiento [ $\mu\text{m}$ ]	Fuerza [N]	K [N/m]
<b>1</b>	<b>14</b>	<b>417</b>	<b>85,70</b>	<b>205515</b>
6	10	561	61,21	109108
<b>3</b>	<b>15</b>	<b>515</b>	<b>91,82</b>	<b>178291</b>
4	9	509	55,09	108231

Los valores obtenidos para la constante elástica en los puntos 1 y 3 son considerablemente mayores que los obtenidos en los puntos 4 y 6. Estas diferencias son esperables por las características constructivas del instrumento. En el sector cercano al alma, es decir, en el apoyo del pie del puente del lado de la cuerda de la, el sistema es más rígido que el sector de la tapa del lado do. Siendo que las cuerdas agudas requieren mayor tensión mecánica para lograr la afinación deseada, es esperable que el alma tenga funciones estructurales en el instrumento para disminuir las deformaciones en la tapa debido a la presión ejercida por el puente. Las obtenciones de estos valores implicaron simplificaciones de cálculo y del

modelo del sistema, pero sobre la base de los resultados obtenidos consideramos que se trata de una buena aproximación.

## Conclusiones

Se ha presentado un sistema experimental que permite medir fuerza y desplazamiento de la tapa de un violonchelo, y estimar la constante elástica de ese elemento en distintos puntos. El método empleado para medir el desplazamiento de la tapa se basa en técnicas ópticas y permite medir sin contacto con la muestra y con resolución en el orden del micrón. El procedimiento desarrollado para medir la fuerza aplicada se basó en un sistema de resorte calibrado, montado sobre un dispositivo diseñado y construido para ese fin, que permite ser ubicado sobre el mismo sistema de fijación del instrumento. Este diseño permite además evitar deformaciones y desplazamientos espurios.

Se obtuvieron valores de constante elástica que son una buena referencia para poder avanzar en el modelado del puente por el método de diferencias finitas, donde es fundamental conocer las condiciones de contorno del puente.

Nos proponemos a futuro avanzar mejorando estos métodos y extender las mediciones a otros instrumentos para poder comparar valores obtenidos y profundizar el método de cálculo.

## Referencias bibliográficas

Bissinger, G. (2006). The violin bridge as filter. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(1), 482-491.

Jansson, E. V. (2004). Violin frequency response – bridge mobility and bridge feet distance, *Applied Acoustics*, Vol. 65, N.º 12, 1197-1205, ISSN 0003-682X, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2004.04.007>.

Jansson, E. S., Molin, N. E. & Saldner, H. O. (1994). On eigenmodes of the violin-Electronic holography and admittance measurements. *Journal of the Acoustical Society of America*, 95, 1100-1105.

Lodetti, L., Gonzalez, S., Antonacci, F., & Sarti, A. (2023). Stiffening Cello Bridges with Design. *Appl. Sci.*, 13, 928. <https://doi.org/10.3390/app13020928>

Minnaert, M., & Vlam, C. C. (1937). The vibrations of the violin bridge, *Physica*, Vol. 4, N.º 5, 361-372, ISSN 0031-8914, [https://doi.org/10.1016/S0031-8914\(37\)80138-X](https://doi.org/10.1016/S0031-8914(37)80138-X)

Reinicke, W., & Cremer, L. (1970). Application of holographic interferometry to vibrations of the bodies of string instruments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 47(1A\_Supplement), 131-132.

Steinkopf, G. (1963). Unpublished thesis. Techn. Univ. Berlin, described by Cremer (1984).