



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación

**Área de Conocimiento de Ingeniería de los Procesos de
Fabricación**

TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN VIOLÍN MEDIANTE FABRICACIÓN ADITIVA
POR FILAMENTO FUNDIDO**

Grado en Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo del Producto

Autor: Alicia García Pérez

Tutor: Sergio Martín Béjar

Cotutora: Carolina Bermudo Gamboa

MÁLAGA, junio de 2025

Resumen

La fabricación aditiva (FA) ha emergido como una tecnología disruptiva en el diseño y la fabricación, permitiendo la creación de piezas complejas con un alto grado de personalización y precisión. En particular, el método de fabricación por filamento fundido (FFF, por sus siglas en inglés) se ha posicionado como una técnica accesible y versátil, gracias a su capacidad para procesar una amplia gama de materiales termoplásticos y su bajo costo de implementación.

En el ámbito de la música, los instrumentos tradicionales como el violín presentan características técnicas y acústicas complejas, que históricamente han sido alcanzadas mediante procesos artesanales utilizando madera y herramientas especializadas. Sin embargo, la fabricación aditiva abre nuevas posibilidades para explorar la construcción de estos instrumentos, permitiendo no solo reducir costos y tiempos de producción, sino también nuevos diseños y materiales que puedan optimizar sus propiedades acústicas y estructurales.

Este trabajo tiene como objetivo principal el diseño y la fabricación de un violín utilizando la tecnología de fabricación aditiva FFF. Se investigan los aspectos fundamentales del diseño del violín, adaptándolo a las posibilidades y limitaciones del proceso FFF, tales como la elección del material (PLA, ABS o filamentos compuestos), los parámetros de impresión (resolución, orientación, relleno) y los tratamientos posprocesamiento necesarios para mejorar su estética y funcionalidad. Además de la construcción del instrumento, el trabajo busca evaluar su desempeño acústico en comparación con un violín tradicional, identificando las ventajas y desafíos de esta metodología. Este enfoque no solo explora la innovación tecnológica en el ámbito de los instrumentos musicales, sino que también propone una alternativa accesible y sostenible para su fabricación, contribuyendo a democratizar el acceso a la música mediante soluciones más económicas y personalizables.

Abstract

Additive manufacturing (AM) has emerged as a disruptive technology in design and manufacturing, enabling the creation of complex pieces with a high degree of customization and precision. In particular, the Fused Filament Fabrication (FFF) method has positioned itself as an accessible and versatile technique, thanks to its ability to process a wide range of thermoplastic materials and its low implementations cost.

In the realm of music, traditional instruments like the violin present complex technical and acoustic characteristics, which have historically been achieved through artisanal processes using wood and specialized tools. However, additive manufacturing opens up new possibilities for exploring the construction of these instruments, allowing not only the reduction of production costs and times, but also new designs and materials that can optimize their acoustic and structural properties.

This work has as its main objective the design and fabrication of a violin using FFF additive manufacturing technology. It investigates the fundamental aspects of violin design, adapting it to the possibilities and limitations of the FFF process, such as material selection (PLA, ABS or composite filaments), printing parameters (resolution, orientation, infill) and necessary post-processing treatments to enhance its aesthetics and functionality. In addition to constructing the instrument, the work aims to evaluate its acoustic performance compared to a traditional violin, identifying the advantages and challenges of this methodology. This approach not only explores technological innovation in the field of musical instruments but also proposes an accessible and sustainable alternative for their manufacture, contributing to democratizing access to music through more economical and customizable solutions.

Agradecimientos

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han hecho posible, de una u otra manera, la realización de este trabajo.

En primer lugar, deseo dar las gracias a mi tutor, Sergio Martín, por su dedicación, orientación y valiosos consejos, que han sido fundamentales en cada etapa del proyecto. Y agradezco también la participación en el trabajo de mi cotutora, Carolina Bermudo.

Asimismo, quiero mostrar mi gratitud a Manuel Herrera, cuya amable ayuda en el taller ha sido de gran valor a la hora de acometer la fase de fabricación del trabajo.

De igual forma, mi agradecimiento a Chico Chacón, lutier, por revisar las características del prototipo fabricado en relación con los modelos tradicionales, y a Lorenzo Tardón, Catedrático de Ingeniería de Comunicaciones, por sus aportes técnicos y sus consejos. Ambos han compartido su experiencia profesional, contribuyendo significativamente a mejorar la calidad y los resultados del proyecto.

Y deseo hacer una mención especial a Blanca, la alegre y talentosa violinista que hizo sonar el instrumento.

Finalmente, quiero dar las gracias a mis padres, familiares y amigos, por su apoyo incondicional, su comprensión y el ánimo constante que me han brindado a lo largo de todo el proceso.

Índice general

1.	Introducción	1
2.	Objetivos	3
3.	El violín, un instrumento de cuerda frotada	5
3.1.	Origen del violín	5
3.2.	Características del violín.....	6
3.3.	Tipos de violín.....	7
3.4.	Partes de un violín.....	10
3.5.	Materiales.....	15
3.6.	Proceso tradicional de fabricación y montaje	17
3.6.1.	Selección y preparación de maderas	18
3.6.2.	Corte y montaje de la caja de resonancia	19
3.6.3.	Corte y montaje del mástil.....	20
3.6.4.	Barnizado y montaje final	20
3.7.	Pruebas y ajustes de sonido	21
4.	Procesos de fabricación aditiva.....	23
4.1.	Procesos y tecnologías de fabricación aditiva	23
4.2.	Proceso de extrusión de material	27
5.	Diseño y modelado	29
5.1.	Piezas del violín para su impresión 3D.....	29
5.2.	Diseño de las piezas	29
5.2.1.	Caja de resonancia	30
5.2.2.	Mástil	42
5.2.3.	Cordal	46
5.2.4.	Ayudas.....	48
6.	Fabricación y montaje	53

6.1. Impresora 3D	53
6.1.1. Equipo de impresión	53
6.1.2. <i>Software</i> de impresión.....	54
6.2. Materiales de impresión	56
6.3. Impresiones	61
6.3.1. Caja de resonancia	61
6.3.2. Mástil	66
6.3.3. Cordal	70
6.3.4. Ayudas	71
6.3.5. Reimpresiones	72
6.4. Ensamblaje y tratamientos	74
7. Validación del modelo	79
7.1. Análisis de resultados del modelo impreso.....	79
7.2. Prueba de sonido.....	85
7.3. Análisis del sonido	87
7.4. Análisis económico.....	95
7.5. Análisis de tiempo	99
8. Conclusiones.....	103
9. Bibliografía y webgrafía	105

Índice de figuras

<i>Figura 1. Violín Mesías de Antonio Stradivari (1716), museo Ashmolean, Universidad de Oxford [11]</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2. Violín de Andrea Amati (1560), museo MET, Nueva York [15]</i>	<i>7</i>
<i>Figura 3. Despiece de un violín [26]</i>	<i>10</i>
<i>Figura 4. Voluta y clavijero [15]</i>	<i>12</i>
<i>Figura 5. Violín de Andrea Amati (1560), museo MET, Nueva York [15]</i>	<i>13</i>
<i>Figura 6. Barbada [27]</i>	<i>14</i>
<i>Figura 7. Arco [28]</i>	<i>14</i>
<i>Figura 8. Ayuda para el agarre del arco [31]</i>	<i>14</i>
<i>Figura 9. Guía para el arco [32]</i>	<i>14</i>
<i>Figura 10. Tapa superior rota debido a grietas de la madera [41]</i>	<i>18</i>
<i>Figura 11. Posición del alma y la barra armónica [24]</i>	<i>21</i>
<i>Figura 12. Método "Four Circle" [57]</i>	<i>30</i>
<i>Figura 13. Método "Four Circle". Paso 1</i>	<i>31</i>
<i>Figura 14. Método "Four Circle". Paso 2</i>	<i>31</i>
<i>Figura 15. Método "Four Circle". Paso 3</i>	<i>32</i>
<i>Figura 16. Método "Four Circle". Paso 4</i>	<i>32</i>
<i>Figura 17. Método "Four Circle". Paso 5</i>	<i>32</i>
<i>Figura 18. Método "Four Circle". Paso 6</i>	<i>33</i>
<i>Figura 19. Método "Four Circle". Paso 7</i>	<i>33</i>
<i>Figura 20. Método "Four Circle". Pasos 8-10</i>	<i>34</i>
<i>Figura 21. Método "Four Circle". Paso 11</i>	<i>34</i>
<i>Figura 22. Método "Four Circle". Paso 12</i>	<i>35</i>
<i>Figura 23. Silueta final</i>	<i>35</i>
<i>Figura 24. Diseño de caja de resonancia en una única pieza</i>	<i>36</i>
<i>Figura 25. Diseño de la tapa</i>	<i>37</i>
<i>Figura 26. Diseño de las efes</i>	<i>38</i>
<i>Figura 27. Barra armónica</i>	<i>38</i>
<i>Figura 28. Diseño de la tapa del violín con las indicaciones de posición de la barra armónica</i>	<i>39</i>
<i>Figura 29. Diseño del alma</i>	<i>40</i>
<i>Figura 30. Diseño del botón</i>	<i>41</i>
<i>Figura 31. Diseño de la base del violín</i>	<i>41</i>
<i>Figura 32. Puente</i>	<i>42</i>
<i>Figura 33. Diseño del mango</i>	<i>43</i>
<i>Figura 34. Diseño del diapasón</i>	<i>44</i>
<i>Figura 35. Diseño del clavijero y la voluta</i>	<i>45</i>
<i>Figura 36. Diseño de las clavijas</i>	<i>46</i>

<i>Figura 37. Diseño del cordal.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 38. Posición dedos en el agarre del arco en forma de silencio de negra.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 39. Diseño de agarre del arco (Opción 1).....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 40. Diseño de agarre del arco (Opción 2).....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 41. Diseño de agarre del arco (Opción 3).....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 42. Rediseño de agarre del arco (Opción 3).....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 43. Diseño de guía del arco (Opción 1).....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 44. Diseño de guía del arco (Opción 2).....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 45. Distintas resoluciones de impresión en el mismo modelo [63]</i>	<i>56</i>
<i>Figura 46. Bobinas de filamento PLA para impresora 3D [69]</i>	<i>59</i>
<i>Figura 47. Impresión primer diseño de la pieza tapa</i>	<i>62</i>
<i>Figura 48. Impresión primer diseño de la pieza base</i>	<i>62</i>
<i>Figura 49. Impresión segundo diseño de la pieza tapa (Opción A)</i>	<i>64</i>
<i>Figura 50. Impresión segundo diseño de base</i>	<i>64</i>
<i>Figura 51. Impresión alternativa del segundo diseño de la pieza tapa (Opción B)</i>	<i>64</i>
<i>Figura 52. Impresión del puente (Opción A).....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 53. Impresión del puente (Opción B).....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 54. Impresión del mango y el diapasón</i>	<i>67</i>
<i>Figura 55. Impresión del clavijero y la voluta (Opción A).....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 56. Impresión del clavijero y la voluta (Opción B).....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 57. Parámetros de impresión de las clavijas (Opción A)</i>	<i>69</i>
<i>Figura 58. Parámetros de impresión de las clavijas (Opción B)</i>	<i>69</i>
<i>Figura 59. Parámetros de impresión del cordal (Opción A)</i>	<i>70</i>
<i>Figura 60. Parámetros de impresión del cordal (Opción B).....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 61. Parámetros de impresión del agarre del arco.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 62. Parámetros de impresión de la guía del arco.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 63. Parámetros para la reimpresión de la tapa</i>	<i>72</i>
<i>Figura 64. Parámetros para la reimpresión de la base</i>	<i>73</i>
<i>Figura 65. Parámetros para la reimpresión del diapasón</i>	<i>73</i>
<i>Figura 66. Parámetros para la reimpresión del cordal.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 67. Herramienta para la posición de las cuerdas en el puente</i>	<i>75</i>
<i>Figura 68. Marcas para la posición de las cuerdas en la cejilla</i>	<i>76</i>
<i>Figura 69. Colocación del cordal</i>	<i>76</i>
<i>Figura 70. Colocación de las clavijas</i>	<i>77</i>
<i>Figura 71. Base y tapa.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 72. Puente</i>	<i>82</i>
<i>Figura 73. Mango.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 74. Diapasón</i>	<i>82</i>

<i>Figura 75. Cordal.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 76. Clavijero y voluta</i>	<i>83</i>
<i>Figura 77. Clavijas.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 78. Mástil montado</i>	<i>83</i>
<i>Figura 79. Caja de resonancia montada</i>	<i>83</i>
<i>Figura 80. Caja de resonancia y mástil montados</i>	<i>84</i>
<i>Figura 81. Montaje final del violín</i>	<i>84</i>
<i>Figura 82. Agarre del arco</i>	<i>85</i>
<i>Figura 83. Guía del arco.....</i>	<i>85</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Principales tipos de violines.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabla 2. Materiales más utilizados en la fabricación de un violín artesanal</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 3. Ventajas y desventajas de los procesos de fabricación aditiva</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 4. Opciones de diseño de la tabla superior</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 5. Opciones de diseño de la tabla inferior y el aro</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 6. Dimensiones del mango</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 7. Dimensiones del diapasón.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 8. Dimensiones del clavijero y la voluta</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 9. Dimensiones de las clavijas</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 10. Dimensiones del cordal</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 11. Materiales de impresión 3D FFF: características y aplicaciones</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 12. ABS, PLA y PVA: Ventajas y desventajas</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 13. Parámetros de impresión para el primer diseño de las piezas tapa y base</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 14. Parámetros de impresión para el segundo diseño de las piezas tapa y base</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 15. Parámetros de impresión para la pieza puente</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 16. Parámetros de impresión para las piezas mango y diapasón</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 17. Parámetros de impresión para las piezas del clavijero y la voluta.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 18. Parámetros de impresión para las clavijas (por unidad).....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 19. Parámetros de impresión para el cordal</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 20. Análisis de las medidas de las piezas impresas.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 21. Afinación del violín impreso en 3D.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 22. Comparación de las ondas sonoras.....</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 23. Análisis del espectro de las ondas.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 24. Frecuencia obtenida de un violín tradicional</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 25. Frecuencia obtenida del violín impreso 3D</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 26. Comparativa de violines acústicos 1/16 y 1/8 disponibles en el mercado</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 27. Fabricación de violines acústicos por impresión 3D.....</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 28. Consumo de material en la fabricación del violín</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 29. Comparativa del coste de material de violines FFF</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 30. Coste final del violín</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 31. Tiempos de impresión de las piezas del violín.....</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 32. Tiempo de fabricación del violín.....</i>	<i>101</i>

Lista de Acrónimos

Acrónimo / Abreviatura	Nombre
ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
BJ	Inyección de aglutinante (<i>Binder Jetting</i>)
CADFA	Diseño asistido por ordenador (<i>Computer Aided Design</i>)
DOD	Goteo bajo demanda (<i>Drop on Demand</i>)
DLP	Procesamiento digital de luz (<i>Digital Light Processing</i>)
DMLS	Sinterizado directo de metal por láser (<i>Direct Metal Laser Sintering</i>)
EBM	Fusión por haz de electrones (<i>Electron Beam Melting</i>)
FA (AM)	Fabricación aditiva (<i>Additive Manufacturing</i>)
FDM	Modelado por deposición fundida (<i>Fused Deposition Modeling</i>)
FFF	Fabricación por filamento fundido (<i>Fused Filament Fabrication</i>)
g	Gramos
h	Hora
HIPS	Poliestireno de alto impacto (<i>High Impact Polystyrene</i>)
Hz	Herzios
LOM	Fabricación por corte y laminado (<i>Laminated Object Manufacturing</i>)
m	Metros
min	Minutos
mm	Milímetros
PA	Poliamida
PC	Policarbonato
PETG	Tereftalato de polietileno modificado con glicol (<i>Polyethylene Terephthalate Glycol-Modified</i>)
PLA	Ácido poliláctico
PP	Polipropileno
PVA	Alcohol polivinílico
s	Segundos

SHS	Sinterizado selectivo por calor (<i>Selective Heat Sintering</i>)
SLA	Estereolitografía (<i>Stero Lithography Apparatus</i>)
SLM	Fusión selectiva por láser (<i>Selective Laser Melting</i>)
SLS	Sinterizado selectivo por láser (<i>Selective Laser Sintering</i>)
SMS	Sinterizado selectivo con máscara (<i>Selective Mask Sintering</i>)
STL	Lenguaje de triangulación estándar (<i>Standard Triangle Language</i>)
TPU	Poliuretano termoplástico (<i>Thermoplastic Polyurethane</i>)
UAM	Fabricación Aditiva Ultrasónica (<i>Ultrasonic Additive Manufacturing</i>)
\$	Dólares
€	Euros
°	Grados angulares
°C	Grados Celsius

1. Introducción

La música puede jugar un importante papel en el desarrollo cognitivo de niños y adolescentes; entre otros muchos efectos, mejora la concentración, la memoria, las capacidades motoras, la creatividad, la comprensión lectora y la autoestima [1]. Con todos estos beneficios se hace esencial implementar programas de educación musical en las aulas; sin embargo, no todas las escuelas disponen de los recursos económicos necesarios para fomentar la enseñanza instrumental.

Los instrumentos musicales facilitan el aprendizaje práctico de la música al tiempo que estimulan las habilidades cognitivas, emocionales y sociales durante el desarrollo infantil. Permiten que los estudiantes experimenten con sonidos, ritmos y melodías, mejorando su comprensión musical. Los instrumentos encontrados comúnmente en las aulas son [2]:

- Instrumentos de percusión, que favorecen el desarrollo del ritmo y la coordinación, como triángulos, panderetas, maracas o cajón.
- Instrumentos melódicos simples, que permiten tocar melodías y desarrollar el oído musical, como flauta dulce o melódica (instrumentos de viento) o xilófono (instrumento de percusión).
- Instrumentos de cuerda, para aprender acordes, acompañar melodías o iniciarse en la lectura de partituras simples, como guitarra o ukelele.

Sin embargo, el acceso a otros instrumentos es limitado, siendo infrecuente encontrar en las escuelas algunos tan populares como el teclado eléctrico o el violín, un instrumento de cuerda frotada, y las razones son básicamente dos, por un lado, el costo, pues se trata de instrumentos cuyos modelos para principiantes son considerablemente caros, y, por otro lado, el mantenimiento y la reparación, dado que son delicados y se pueden deteriorar fácilmente al manipularlos.

Actualmente, existen numerosas herramientas digitales, como plataformas interactivas y aplicaciones musicales, que están revolucionando la educación musical. Esta revolución también ha llegado a la práctica instrumental con la fabricación aditiva, que permite crear instrumentos resistentes, económicos y personalizables, destacando su potencial para crear sonidos y diseños nuevos, pudiendo dar lugar a una nueva clase de instrumentos musicales [3].

Mediante la fabricación aditiva se pueden crear prototipos 3D aplicando materiales capa sobre capa a partir de un diseño digital. Los primeros instrumentos fabricados con esta técnica han sido violines acústicos, guitarras y flautas [4].

Entre los proyectos de violines acústicos más populares cabe destacar algunos ejemplos:

- Hovalin [5] es un modelo de violín de código abierto que se puede imprimir sin estructura de soporte, lo que aumenta su velocidad de producción; estaba formado inicialmente por siete piezas pegadas.
- Openfab PDX [6] imprime el cuerpo de un violín en una sola pieza, mejorando el sonido, pero con una calidad inferior a la del sonido de los violines de madera.
- AVIVA [7] es un programa de educación musical que ha fabricado un violín en dos secciones, el cuerpo se imprime con un polímero plástico y el mástil y la voluta, con plástico ABS.

Como se ha indicado brevemente, son varias las ventajas de la fabricación aditiva en violines, pero también presenta algunas desventajas considerables, especialmente en lo que respecta a la calidad del sonido, alejada hasta la fecha de la riqueza sonora que ofrecen los violines artesanales [4, 8].

Dentro de este contexto se aborda el reto de diseñar un violín, siguiendo los estándares clásicos empleados por los lutieres, con el propósito de imprimir un prototipo mediante el método de fabricación por filamento fundido (FFF) y de evaluar la calidad del sonido, midiendo diferentes parámetros que permitan su comparación con un violín tradicional.

El violín, de tamaño infantil y escalable, pretende ser lo suficientemente asequible como para que cualquier niño tenga acceso a él en su escuela.

2. Objetivos

Objetivo general

Diseñar, fabricar y evaluar un violín acústico mediante fabricación aditiva FFF como alternativa económica y funcional al violín tradicional, orientado al uso en entornos experimentales y educativos.

Objetivos específicos

1. Desarrollar el modelo CAD del violín, creando una representación digital 3D del instrumento mediante un *software* de diseño asistido por computadora (CAD), definiendo las dimensiones y formas básicas del violín a partir de los modelos tradicionales.
2. Establecer estrategias para optimizar el proceso de fabricación, seleccionando los materiales y parámetros de impresión más adecuados y planificando la disposición de las piezas en la impresora 3D y ajustando el flujo de trabajo para reducir tiempos y costes.
3. Fabricar el prototipo del violín mediante impresión 3D materializando el diseño digital mediante la tecnología FFF e incluyendo el ensamblaje de las piezas impresas y la verificación de la calidad final del prototipo.
4. Evaluar la capacidad sonora del instrumento, realizando mediciones y pruebas para determinar la calidad y características del sonido producido por el violín fabricado.
5. Realizar un análisis de los violines que hay actualmente en el mercado, estudiando las características, materiales, métodos de fabricación y precios de los modelos tradicionales y de los fabricados mediante impresión 3D.
6. Generar ayudas para el proceso de aprendizaje del violín, diseñando elementos que mejoren la postura y el manejo del instrumento.
7. Proponer recomendaciones y mejoras para futuras iteraciones del diseño, analizando los resultados obtenidos e identificando posibles oportunidades de optimización en aspectos como la funcionalidad, la calidad sonora, la durabilidad o la facilidad de fabricación.

3. El violín, un instrumento de cuerda frotada

3.1. Origen del violín

El violín nació en Cremona, en torno al año 1555, de la mano de un lutier llamado Andrea Amati. Su creación fue fruto de diversos intercambios culturales entre Europa, Medio Oriente y Asia [9, 10].

Esta ciudad del norte de Italia, conocida actualmente como la “capital mundial del violín”, fue durante siglos un lugar emblemático en el que muchos maestros lutieres de prestigio, además de la familia Amati, como Gasparo Bertolotti da Salò, Giuseppe Guarneri del Gesù, Carlo Bergonzi o Antonio Stradivari, perfeccionaron el diseño del instrumento, creando piezas tan apreciadas en la actualidad como los violines Stradivarius.

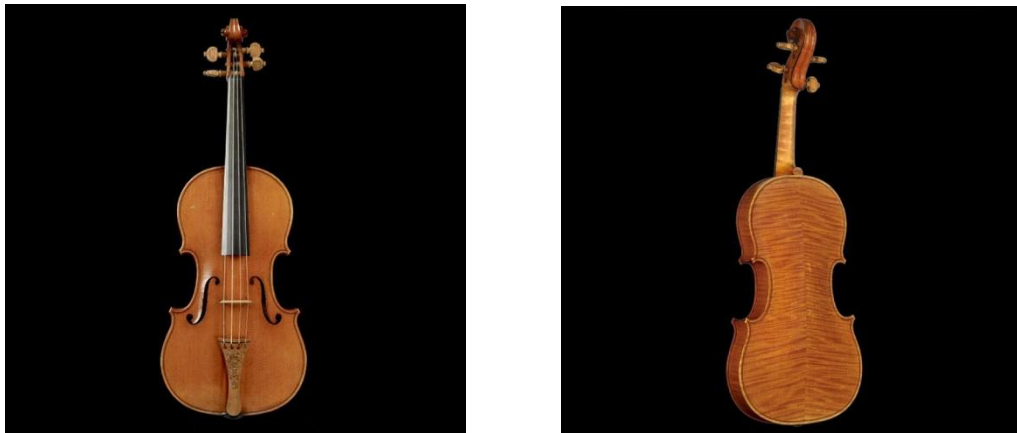


Figura 1. Violín Mesías de Antonio Stradivari (1716), museo Ashmolean, Universidad de Oxford [11]

Son ellos quienes sentaron las bases de la fabricación de violines de alta calidad, tanto en lo que se refiere al sonido como a la artesanía, formando parte de la llamada “edad dorada del violín en Italia” (siglos XVII-XVIII). En esa época, grandes compositores de música clásica y barroca, como Bach, Vivaldi, Monteverdi o Mozart, escribieron música para violín.

En el siglo XIX la industrialización supuso un cambio en el arte de la fabricación de violines, pues creció la producción y se comenzaron a imitar diseños antiguos, pero sustituyendo algunos materiales por otros más económicos y accesibles. Al mismo tiempo, el violín se consolidaba como un instrumento principal de la música del

Romanticismo, con obras maestras de compositores tan reconocidos como Beethoven, Brahms o Tchaikovsky.

A partir del siglo XX el uso del violín se extiende a otros géneros (Jazz, Rock, Folk...) y se mantiene en la actualidad, 500 años después de su origen, como uno de los instrumentos de cuerda frotada más populares, conviviendo los violines antiguos con diseños modernos de gran calidad, en una evolución constante, con cambios en la forma, con diferentes materiales y con técnicas de fabricación novedosas.

3.2. Características del violín

El violín que creó Amati fue el resultado de trabajar en el taller con los instrumentos de cuerda frotada de la época, como el rabel, la “lira da braccio” o la “viola da braccio” [12]. Perfeccionó la forma de estos instrumentos y estableció las bases de fabricación del violín actual, introduciendo innovaciones fundamentales que lo diferencian de los instrumentos predecesores [13, 14]:

- Cambio de posición del puente, más alto y cercano al diapasón: reduce la longitud de vibración de las cuerdas y mejora la respuesta del instrumento.
- Desplazamiento de los agujeros sonoros hacia abajo y cambio de su forma en *f*: confiere su timbre característico al violín.
- Utilización de un molde interior: se consiguen paredes más delgadas y superficies encoladas más pequeñas, mejorando el comportamiento vibratorio del cuerpo y la calidad tonal.
- Definición de la forma básica, el tamaño, las proporciones y los materiales: se establece un estándar para la familia de instrumentos de cuerda frotada (violín, viola y violonchelo).
- Selección de maderas de alta calidad, utilizando una madera especial para la tapa armónica (pino rojizo) y otra para la tapa trasera y los aros (arce): mejora la resonancia del instrumento.
- Aplicación de barnices y lacas elaborados con materias primas tales como el ámbar amarillo: aportan belleza y protección.



Figura 2. Violín de Andrea Amati (1560), museo MET, Nueva York [15]

A pesar de haber transcurrido 5 siglos desde su diseño, el modelo de violín de Andrea Amati prácticamente no ha cambiado, tan solo leves modificaciones en lo que respecta al contorno y las dimensiones; sin embargo, la búsqueda de diferentes resultados sonoros ha llevado a los luthiers a experimentar con las curvaturas de las tapas que se elevan constituyendo las bóvedas. La variación en la altura y forma de estas curvas confiere al instrumento unas características sonoras particulares [16].

3.3. Tipos de violín

Actualmente existen diversos tipos de violines, fruto de su adaptación a cambios musicales, culturales y tecnológicos. El primer gran cambio se produjo desde el violín barroco de los siglos XVI-XVIII al violín clásico del siglo XIX, predecesor, a su vez, del moderno, que convive desde el siglo XX con los violines eléctricos y con otras versiones acústicas [17, 18]:

Tabla 1. Principales tipos de violines

TIPO DE VIOLÍN	CARACTERÍSTICAS
	<p>Arco curvado y ligero.</p> <p>Mástil poco inclinado, diapasón más corto y puente más bajo.</p> <p>Cuerdas de tripa. Cuerpo de madera.</p> <p>Sonido suave y cálido, con menos vibrato.</p> <p>Sin barbada.</p> <p>Música antigua y barroca.</p>
Barroco [17]	
	<p>Arco más largo y fuerte, menos curvado.</p> <p>Mástil más inclinado hacia atrás, diapasón más largo y puente más alto.</p> <p>Cuerdas de tripa con recubrimiento metálico. Cuerpo de madera.</p> <p>Sonido más brillante y potente, con más proyección.</p> <p>Con barbada.</p> <p>Música barroca y clásica.</p>
Clásico [19]	
	<p>Arco más largo y cóncavo, con mayor tensión.</p> <p>Mástil, diapasón y puente similar al clásico. Diseño más robusto.</p> <p>Cuerdas de acero o sintéticas. Cuerpo de madera.</p> <p>Sonido más fuerte y brillante, con más proyección y más vibrato.</p> <p>Con barbada y afinadores de precisión.</p> <p>Música orquestal y géneros contemporáneos.</p>
Moderno [17]	



Electroacústico [20]

Híbrido entre acústico y eléctrico.

Cuenta con caja de resonancia y con amplificador.

Cuerdas de acero o sintéticas. Cuerpo sintético.

Sonido acústico o amplificado con señal limpia y potente.

Con barbada.

Diferentes estilos de música, tanto en vivo como en estudio.



Eléctrico [21]

Cuerpo sólido, sin caja de resonancia.

Cuenta con amplificador mediante pastillas.

Cuerdas de acero o sintéticas, en número variable de 4 a 7. Cuerpo sintético y diseño personalizado.

Sonido electrónico, con efectos como distorsión, *reverb* o *delay*.

Con barbada.

Música rock, pop, jazz, electrónica...

Además de los tipos indicados en la tabla, existen otros violines que han surgido para cubrir necesidades específicas o como resultado de experimentar con los sonidos y los materiales:

- Violín silencioso: violín eléctrico diseñado para tocar con auriculares, lo que facilita el aprendizaje y la práctica al evitar molestar a otras personas.
- Violín folk o *fiddle*: violín acústico utilizado en música folk, *country* y *bluegrass*; tiene la particularidad de constar de un puente más aplanado, lo que facilita poder tocar varias cuerdas simultáneamente.
- Violinofón o violín Stroh: violín acústico que utiliza un tubo o bocina metálica como caja de resonancia. El sonido es fuerte y metálico, alejado del habitual sonido del violín; suele utilizarse en actuaciones al aire libre.

- Violín de 5, 6 o 7 cuerdas: violín que amplía el rango tonal al incorporar más cuerdas. Modifica el tamaño del cuerpo para potenciar el sonido de todas las cuerdas. Se utiliza para música jazz, folk y experimental.
- Violín Hardanger: violín originario de Noruega con 8 o 9 cuerdas, cuatro son principales y el resto, resonantes. Fabricado con madera más delgada y muy decorado, nácar para el diapasón y el cordal y pintura negra para el resto. Se utiliza para música folclórica noruega.
- Violín *mezzo*: violín de tamaño intermedio entre violín y viola, con un sonido más oscuro y melódico. Se usa especialmente en música de cámara.
- Violín *piccolo*: violín pequeño afinado una octava más alta. Se utiliza en música barroca y experimental.

Toda esta variabilidad hace del violín un instrumento muy versátil, capaz de adaptarse a las necesidades de los músicos y de las tendencias y estilos musicales. Ha pasado de ser un instrumento exclusivamente artesanal y acústico, creado para la música barroca, a convertirse en una amplia familia de instrumentos con características y aplicaciones propias, adecuados a cualquier género musical, y con una producción industrializada que ha permitido democratizar su aprendizaje, acercando la práctica del instrumento a nuevas generaciones de músicos.

3.4. Partes de un violín

Un violín artesanal es un instrumento complejo formado por más de 70 piezas de madera unidas con precisión para formar las distintas partes [22-25].



Figura 3. Despiece de un violín [26]

A. CAJA DE RESONANCIA

La caja de resonancia constituye el cuerpo del violín, una de las partes más importantes, ya que es la responsable de amplificar y proyectar el sonido producido por la vibración de las cuerdas. Su forma es ovalada y presenta unos recortes laterales en forma de C (*C-bouts*) que facilitan la movilidad del arco. Está compuesta por diversas piezas:

- a. **Tapa o tabla superior o armónica:** pieza formada por dos finas capas de madera encoladas entre sí; suelen utilizarse maderas de abeto o de píceas. Lleva incrustado en el contorno el filete, un elemento estructural y ornamental. En su borde inferior se ubica una cejilla de madera que la protege de la fricción del cordal.
- b. **Tapa o tabla inferior:** corresponde al fondo de la caja de resonancia y se fabrica, generalmente, en madera de arce.
- c. **Aro:** pieza lateral que une ambas tapas formando el contorno de la caja acústica. Para el aro se utiliza la misma madera que para la tapa inferior.
- d. **Alma:** pequeña pieza cilíndrica situada perpendicularmente a presión entre las dos tapas, su función es transferir la vibración de las cuerdas de la tapa superior a la inferior, por lo que es importante su buen ajuste para la calidad del sonido. Se coloca bajo el puente, en el lado derecho del eje de simetría, a la altura de la cuerda de la nota más aguda.
- e. **Barra armónica:** listón de madera adherido a la cara interna de la tapa superior con la función de reforzar la estructura y ayudar a transmitir el sonido. Se coloca en el lado contrario al alma, en la zona de las cuerdas más graves.
- f. **Botón:** pieza colocada al final del cuerpo que sirve para sujetar el cordal del violín mediante una cuerda tensa. Permite, a su vez, comprobar desde fuera si el alma está en la posición correcta.
- g. **Puente:** pieza independiente colocada perpendicularmente sobre la tapa superior, sirve de soporte para las cuerdas y permite transmitir las vibraciones hacia la caja de resonancia, siendo fundamental para la amplificación del sonido. El espacio comprendido entre el mástil y el puente es la zona en la que el arco frota las cuerdas para producir el sonido.
- h. **Efes:** dos orificios simétricos con forma de *f* en la tapa superior, a través de ellas se proyecta el sonido previamente amplificado. Estas aperturas permiten colocar el alma en el interior de la caja de resonancia. Son además un elemento estético característico de los artesanos.

B. MÁSTIL

El mástil cumple fundamentalmente dos funciones, la de sujeción del violín y la de afinación y presión de las cuerdas. Consta de varios elementos:

- i. **Mango:** pieza por la que el violinista coge el instrumento. En la base del mango hay una zona de forma redondeada por la que se sujeta a la parte superior del cuerpo. Generalmente es de madera de arce sin barnizar.
- j. **Diapasón:** pieza sobre la que se presionan las cuerdas para reproducir las notas. Presenta una cejuela o cejilla que sirve para ajustar la altura de las cuerdas. Está pegada al mango y suele ser de madera de ébano finamente lijada, sin barniz y sin aceite, apropiada por su dureza y densidad.
- k. **Voluta:** parte superior del mástil que suele tener forma de espiral, siendo un detalle ornamental que cada luter puede variar. También se fabrica habitualmente con madera de arce. Sirve como apoyo del instrumento.
- l. **Clavijero:** pieza rectangular hueca ubicada entre el mango y la voluta que dispone de cuatro orificios en los que se insertan las clavijas.
- m. **Clavijas:** cuatro llaves que sujetan las cuerdas y permiten tensarlas o destensarlas para afinarlas correctamente.
- n. **Cuerdas:** cuatro cuerdas de materiales naturales o sintéticos, que se afinan en intervalos de quintas: Sol (G), Re (D), La (A) y Mi (E).



Figura 4. Voluta y clavijero [15]

C. CORDAL

El cordal es una pieza, generalmente de madera, que sirve para sujetar las cuerdas en la parte inferior del violín. Se coloca en tensión con una cuerda o cable unido al botón, sin llegar a apoyarse sobre la tapa superior. Cuenta con unos tensores en forma de tornillos que permiten afinar las cuerdas con precisión. En la actualidad, para su fabricación se pueden emplear diferentes materiales.



Figura 5. Violín de Andrea Amati (1560), museo MET, Nueva York [15]

D. BARBADA

La barbada o mentonera sirve para apoyar la barbilla mientras se toca el violín. Se trata de una pieza ergonómica que se adapta al violinista para su comodidad.

E. ARCO

El arco es el componente complementario al instrumento responsable de generar el sonido, al hacerlo deslizar por las cuerdas y frotarlas provoca su vibración y esa vibración es amplificada por la caja de resonancia, produciendo el sonido.

Consta, a su vez, de varias partes: vara o baqueta, nuez, cerdas, tornillo, cuero y entorchado. Son las cerdas, de cola de caballo, las que se frota con las cuerdas del violín haciéndolas vibrar.



Figura 6. Barbada [27]



Figura 7. Arco [28]

F. ACCESORIOS PARA AGARRE DEL ARCO

Para obtener un buen sonido a la hora de tocar el violín hay que agarrar correctamente el arco, poniendo la mano en la posición correcta para evitar tensiones y lesiones. Para ello, existen en el mercado diversas opciones que facilitan la técnica, permitiendo la relajación y la correcta distribución del peso entre los dedos [29].

G. GUÍA PARA EL ARCO

La guía para el arco es un accesorio que facilita que la trayectoria del arco al frotar las cuerdas sea perpendicular a ellas y en la zona correcta, produciendo un sonido limpio y uniforme. Es de gran utilidad para los aprendices, les permite adquirir la técnica adecuada, corregir la postura y prevenir malos hábitos [30].



Figura 8. Ayuda para el agarre del arco [31]



Figura 9. Guía para el arco [32]

3.5. Materiales

Para la fabricación de cada una de las piezas de un violín artesanal se utiliza un material específico, elegido en función de sus propiedades sonoras y de su resistencia. En la mayoría de los casos se trata de maderas nobles y productos naturales [33, 34]:

Tabla 2. Materiales más utilizados en la fabricación de un violín artesanal

TIPO DE MATERIAL	MATERIAL ESPECÍFICO	APLICACIONES
Maderas nobles	Abeto europeo (<i>Picea abies</i>).	Tapa superior, barra armónica, alma.
	Arce europeo (<i>Acer pseudoplatanus</i>).	Tapa inferior, aro, mango, clavijero, voluta, puente, filete.
	Ébano (<i>Diospyros spp.</i>).	Diapasón, filete, cejillas, clavijas, cordal, barbada.
	Sauce (<i>Salix spp.</i>).	Taquillos, listones.
Adhesivos	Cola animal (de piel, de hueso, de pescado).	Ensamblaje de todas las partes del violín.
Barnices y otros materiales de acabado	Resinas naturales.	Protección, conservación y embellecimiento de la madera.
	Aceites de linaza.	
	Bálsamos y ceras.	Coloración de la madera.
	Pigmentos y colorantes.	
	Polvos abrillantadores.	Pulido del instrumento.
Metales	Acero, latón.	Microafinadores, tira-cuerdas.
Cuerdas	Tripa animal, acero, plata, aluminio, nailon.	Cuerdas desnudas o recubiertas por alambre metálico.

En la tabla se indican los materiales de uso más habitual, pero se pueden utilizar materiales alternativos con propiedades similares.

La elección de las maderas para cada una de las piezas del violín se debe a sus cualidades específicas, ideales para la función que debe cumplir en el instrumento [33, 35]:



Abeto

Madera ligera y resistente con una velocidad de transmisión del sonido muy alta. Además, sus vetas son regulares y están poco espaciadas, lo que mejora sus propiedades acústicas.



Arce

Madera con una buena relación dureza/elasticidad y con un peso medio, es idónea para la función estructural que desempeña, en la tapa inferior soporta la presión del alma y en el mástil, la tracción de las cuerdas.



Ébano

Madera que destaca por su dureza, durabilidad y propiedades tonales; cualidades que la hacen resistente al desgaste, la opción ideal para piezas pequeñas y para soportar la tensión de las cuerdas en el diapasón.



Sauce

Madera ligera, flexible, con buena adherencia y fácil de trabajar, perfecta para el revestimiento interno del violín, cumple funciones estructurales sin afectar al peso ni a la calidad del sonido.

Siendo estas las maderas más utilizadas, cabe indicar que algunos lutieres trabajan con otras de características análogas, pero con propiedades sonoras y estéticas diferentes que pueden alterar la calidad del sonido; por ejemplo, álamo, palisandro, cerezo, nogal, boj, entre otras.

La cola animal como adhesivo de todos los elementos del violín ofrece una unión fuerte, rígida y reversible sin interferir en la calidad del sonido. Se disuelve con el agua a partir de 50° C, lo que permite al lutier desmontar y reparar las piezas sin dañarlas [24]. Su componente principal es la gelatina, que se obtiene de la transformación del colágeno presente en pieles, tendones, cartílagos, huesos y espinas de peces, y puede tener diferente poder de adhesión [36].

Para proteger la madera del instrumento, realzar su belleza y mejorar sus cualidades acústicas se utilizan varios barnices y productos de acabado que el lutier aplica pacientemente capa a capa: barnices elaborados con resinas o aceites; fondos o bases de color con pigmentos; bálsamos y ceras que aportan flexibilidad, brillo y protección a la superficie barnizada; pastas y polvos para pulir; etc.

Si bien el cuerpo y las partes estructurales del violín están fabricados en madera, algunos componentes específicos son metálicos, como los microafinadores o el tira-cuerdas que son de acero o de latón.

Respecto a las cuerdas, conviene indicar que actualmente se utilizan diversos tipos: cuerdas tradicionales, hechas de tripa; cuerdas de tripa envueltas con alambre de acero; cuerdas de alambre de acero y cuerdas de nailon. Como curiosidad, la cuerda Mi suele ser de acero, para mejorar los agudos, y la cuerda Sol suele estar envuelta en plata o aluminio, para mejorar los graves [37].

Además de los materiales que conforman el instrumento, cabe mencionar las herramientas que el lutier utiliza en su taller para trabajar la madera con precisión, ensamblar las piezas con delicadeza y aplicar el acabado final al violín. Entre otras, hablamos de sierras, serruchos, cepillos, formones, gubias, limas, lijas, plantillas, moldes, gatos, sargentos, escuadras, calibradores, brochas, etc.

3.6. Proceso tradicional de fabricación y montaje

El proceso de fabricación artesanal de violines sigue una secuencia constante, con una serie de etapas y pasos que los lutieres siguen minuciosa y pacientemente, un trabajo de más de 200 horas [38, 39]:

3.6.1. Selección y preparación de maderas

Lo primero que debe hacer el lutier es seleccionar maderas de gran calidad que hayan sido secadas de forma natural. El proceso de secado puede durar varios años, pero es necesario para la calidad acústica del violín.

Un mal secado de la madera puede provocar diversos problemas en la fabricación de un violín, entre ellos [40]:

- **Deformaciones:** la madera húmeda se contrae al secarse, por lo que un violín fabricado con una madera que no esté lo suficientemente seca sufrirá deformaciones al cabo de un tiempo.
- **Grietas y rajaduras:** cuando en el proceso de secado la pérdida de humedad es excesiva se pueden generar grietas en la superficie de la madera debido a la fuerza de la tensión de las fibras al separarse.
- **Superficies peludas:** al cortar la madera húmeda y cepillarla, sus fibras flexibles se levantan, ofreciendo un aspecto de superficie peluda en lugar de la superficie uniforme deseada.
- **Manchas:** un exceso de humedad puede provocar el desarrollo de hongos, dando lugar a un aspecto manchado de la madera.
- **Encolados débiles:** muchas colas son a base de acetato de polivinilo y se diluyen con el agua, debilitando el ensamblado.



Figura 10. Tapa superior rota debido a grietas de la madera [41]

El secado de la madera puede ser natural o artificial, pero el primero ofrece mejores resultados en cuanto a las propiedades acústicas y estructurales, por lo que suele ser la elección de los lutieres a pesar de ser un proceso más lento.

Habitualmente, se utilizan tres tipos de madera: abeto para la tapa armónica, arce para la tapa inferior, los aros y el mástil y ébano para el diapasón.

3.6.2. Corte y montaje de la caja de resonancia

Una vez se dispone de las respectivas maderas, comienza la elaboración de las tapas del violín:

- Se pegan dos tablas simétricas para cada una de las tapas con una cola caliente de origen animal y se dejan secar en una prensa durante 24 horas.
- Encoladas las dos piezas de cada tapa, se dibuja el perfil con una plantilla, se corta la silueta con una sierra de cinta y se lima todo el contorno.
- Se inicia el conformado de ambas tapas, que consiste en el curvado de la madera mediante unas gubias bien afiladas, rebajando poco a poco los grosores de cada zona para dar forma a las bóvedas, un proceso delicado y lento que termina con el lijado de la madera.
- Se dibujan las efes en la tapa superior, utilizando una plantilla, y se cortan mediante un hilo de sierra.
- Se coloca y pega la barra armónica en la tapa superior, una pieza longitudinal de madera que se talla para que adquiera la forma necesaria.
- Se hace una ranura a lo largo del contorno de ambas tapas para introducir el filete, una tira fina compuesta por tres capas de madera (ébano-arce-ébano) que permite dar una pequeña vibración a las tapas, mejorando el sonido.

Terminadas las tapas, se procede a fabricar el aro, que consta de seis fajas de madera que se humedecen para darles forma cuidadosamente en un molde de hierro calentado. Tras encolar el aro, se colocan como refuerzo unos taquillos interiores y doce listones o contra-aros, lo que permitirá que el violín soporte la tensión que ejercen las cuerdas.

Posteriormente, se pegan ambas tapas al aro con sus refuerzos, utilizando para ello diferentes tipos de gatos. Todas estas piezas del cuerpo del violín se deben ajustar con precisión, respetando los tiempos de secado de la cola que sean necesarios en cada uno de los pasos. El tipo de cola utilizado es de origen animal, lo que permite separar las piezas fácilmente sin dañarlas.

3.6.3. Corte y montaje del mástil

Para fabricar el mango, el clavijero y la voluta se utiliza un único bloque de madera de arce, se dibuja el perfil con una plantilla, se corta la pieza con una sierra de cinta y se repasa cuidadosamente con la lima.

El clavijero se talla con un cincel y los agujeros de las clavijas se realizan con un mandril cónico. Para la voluta se emplean diversas herramientas, como sierra, limas, gubia, cinceles o lijas.

El diapasón se realiza con un listón de madera de ébano al que se da forma cóncava en uno de sus extremos mediante una cuchilla y una lija.

Sobre el mango se coloca el diapasón aplicando muy poca cantidad de cola, pues se retira más adelante para barnizarlo. Finalmente, se pega el mástil a la caja de resonancia.

3.6.4. Barnizado y montaje final

El barnizado del instrumento es un proceso muy importante, ya que, más allá de su valor estético, aporta protección y contribuye a la calidad sonora. Antes de iniciar el barnizado del violín, se repasa la madera cuidadosamente con la lima. A continuación, se aplican a mano varias capas de resinas y barnices, en torno a 10 capas, con un tiempo de secado entre aplicación y aplicación de 24 horas.

Secadas las capas de barniz, se procede a eliminar las posibles imperfecciones que haya dejado la brocha pasando un papel de lija muy fino. Para el acabado final, se pule toda la superficie del instrumento con un trapo de hilo con vaselina y polvo de piedra pómez muy fino.

Tras el barnizado, el diapasón, que habría sido desmontado, se pega definitivamente al mango. Por último, se procede a la fabricación y montaje del resto de las piezas:

- Clavijas: se fabrican con palo santo o ébano, maderas que pueden resistir la tensión de las cuerdas. Para instalarlas en el clavijero, se untan previamente con jabón de sosa, que facilita el movimiento.
- Cordal: actualmente se puede hacer de diferentes materiales, madera, plástico o metal, y puede tener o no instalados cuatro microafinadores, lo que afecta al peso y, por consiguiente, a la vibración. Se fija al botón del violín mediante un cable, de nailon o de cordón, quedando lo más cercano posible a la cejilla inferior e intentando que el ángulo de paso de las cuerdas en el puente sea de 158° [42].

- Cuerdas: son de fabricación artesanal, se hacen a partir de tripas de animales y se recubren con una capa muy fina de oro, plata o aluminio. Cada cuerda que sale del cordal se introduce por su extremo en el agujero de la clavija correspondiente y se enrolla hasta tensarla.
- Punte: se fabrica en una madera resistente, como el arce o el plátano. Se ubica bajo las cuerdas, perpendicularmente a la parte trasera de la tapa superior, entre las dos efes; conviene hacerlo cuando las cuerdas no están muy tensas o después de colocar el alma, para que la tapa superior soporte la tensión,
- Alma: consiste en una pequeña pieza cilíndrica de madera de abeto, se coloca cuidadosamente en el interior de la caja armónica introduciéndola por una de las efes, queda encajada entre las dos tapas, unos 2 mm por detrás del puente por el lado correspondiente a la cuerda más aguda. Es importante que ocupe su posición exacta.

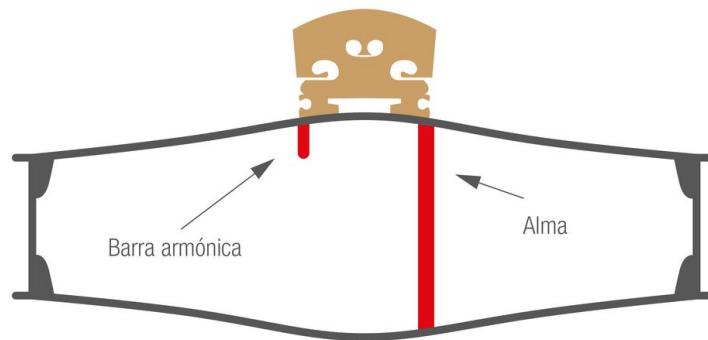


Figura 11. Posición del alma y la barra armónica [24]

3.7. Pruebas y ajustes de sonido

La fabricación del violín concluye con el afinado de las cuerdas y las pruebas de sonido, durante las cuales el lutier realiza los ajustes que considera necesarios para optimizar la proyección y el timbre del instrumento.

Para el calibrado, hay que ajustar bien algunos de los elementos que se han colocado, principalmente el puente, el alma y el cordal, pequeños cambios en la posición de estos elementos pueden transformar la respuesta y la sonoridad del violín [43, 44].

Por otro lado, las cuerdas deben ser de calidad y estar en buen estado y bien afinadas. Es importante tener en cuenta que el tono de la cuerda va a depender de cuatro factores [45]:

- Cuando más gruesa es la cuerda, más lento es su movimiento y más bajo su tono. En un violín la longitud de las cuatro cuerdas es constante, pero el grosor va aumentando desde la cuerda más aguda, Mi, hasta la más grave, Sol.
- Cuando se modifica la tensión de la cuerda varía su frecuencia de vibración, al tensarla produce un tono más agudo y al destensarla, más grave. Para afinar el instrumento se gradúa la tensión de las cuerdas con las clavijas.
- Cuando varía la longitud de la cuerda también varía su frecuencia de vibración, al acortarla el tono que produce al vibrar es más agudo. El violinista pisa la cuerda sobre el diapasón con su mano izquierda acortando su longitud y modificando el tono.
- Cuando la vibración es por cuerda frotada se producen ondas de diente de sierra, rica en armónicos, mejorando el espectro acústico del instrumento [46].

4. Procesos de fabricación aditiva

4.1. Procesos y tecnologías de fabricación aditiva

La fabricación aditiva (FA) es un método de fabricación que permite crear objetos tridimensionales mediante la adición sucesiva de material capa por capa a partir de un modelo digital, a diferencia de otros procesos de fabricación más tradicionales en los que se sustrae material para conformar la pieza final, como el fresado o el torneado.

Según la norma UNE EN-ISO/ASTM 17296-2, que establece la terminología y clasificación de los procesos de fabricación aditiva, se distinguen siete categorías básicas de procesos de fabricación aditiva [47]:

1. Extrusión de material: se calienta el material en un cabezal y va depositándose a través de un extrusor, capa a capa. Hay dos tipos de tecnologías:
 - **Modelo de deposición fundida** (Fused Deposition Modeling, FDM): se calienta el material termoplástico hasta un rango cercano al punto de fusión y se extruye por una boquilla mientras se traza la sección transversal de la pieza en cada capa. Está patentado por Stratasys y se utiliza legalmente solo por esta empresa y por sus licenciarios.
 - **Fabricación de Filamento Fundido** (Fused Filament Fabrication, FFF): es el mismo proceso de extrusión de filamento fundido capa por capa, pero de uso abierto, para impresoras 3D de código abierto, siendo un método más común y asequible.
2. Fotopolimerización en tanque o cuba: proceso en el que un polímero líquido contenido en una cuba se cura selectivamente mediante polimerización activada por luz. Se utiliza una fuente de energía, como luz ultravioleta o un láser, para endurecer la resina. Este proceso se realiza capa a capa, de modo que la incidencia lumínica se aplica únicamente a la superficie definida por la geometría de la figura. Utiliza dos tipos de tecnologías:
 - **Estereolitografía (stereolithography, SLA)**: emplea un láser ultravioleta móvil sobre una resina termoestable líquida, que va curando punto por punto en cada capa. Se utiliza para prototipos pequeños y piezas con un alto nivel de detalle; es rápida y asequible.

- **Procesamiento digital de luz (*Digital Light Processing, DLP*):** es similar a la SLA, pero sustituyendo el láser por un proyector de luz digital que cura la capa de resina completa de una sola vez. Fabrica piezas precisas y asequibles de forma rápida.
3. Fusión de lecho de polvo: según la norma, se considera un proceso de fabricación aditiva en el que la energía térmica funde ciertas zonas de un lecho de polvo. Es un proceso muy parecido a la polimerización, aunque la principal diferencia es que en este proceso no se necesita soporte, ya que utiliza el propio lecho de polvo para apoyar la pieza. Comprende varias tecnologías:
- **SLS (*Selective Laser Sintering*):** la impresora deposita una capa de polvo que luego se sinteriza mediante un láser de alta potencia. Es un método preciso que se utiliza para fabricar piezas de plástico.
 - **SLM (*Selective Laser Melting*):** proceso equivalente al anterior utilizado para la creación de piezas de metal precisas y resistentes. Los láseres que emplea son de mayor potencia.
 - **DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*):** utiliza un láser para el sinterizado de polvo metálico.
 - **SHS (*Selective Heat Sintering*):** genera energía térmica para el sinterizado de polvo polimérico.
 - **EBM (*Electron Beam Melting*):** utiliza un haz de electrones para calentar el polvo metálico.
 - **SMS (*Selective Mask Sintering*):** utiliza radiación infrarroja para el sinterizado de polvo polimérico.
4. Proyección del material: un cabezal deposita material en estado líquido sobre una plataforma y, mientras se va depositando el material, una fuente de radiación, térmica o ultravioleta, realiza el curado de la capa añadida. Para este proceso se consideran dos tecnologías diferentes:
- **Chorro de tinta (*Inkjet Printing*):** aporta material de manera continua en forma de chorro, el curado se produce solo en la superficie de la pieza, el resto de material no curado se puede reutilizar, ya que se mantiene en estado líquido.
 - **Goteo bajo demanda (*Drop on Demand, DOD*):** aporta el material mediante gotas, conforme va siendo necesario. Es una tecnología más precisa y optimiza el uso de material, pero es más lenta que otras.

5. Proyección de aglutinante: es un proceso de fabricación aditiva en el que un agente líquido aglutinante se deposita selectivamente para unir materiales en polvo. Este aglutinante se inyecta a través de un cabezal, adhiriendo el polvo y las capas entre sí.
6. Deposición de energía dirigida: es un proceso de fabricación aditiva en el que se utiliza energía térmica focalizada para unir materiales mediante fusión, a medida que se depositan. El material, en forma de polvo, se suministra mediante un sistema de alimentación por inyección y utiliza, como energía dirigida para fundir y depositar el material, un láser, un haz de electrones o un arco de plasma.
7. Laminado de hojas: es un proceso de fabricación aditiva en el que el material, en forma de láminas u hojas, se une para formar una pieza. Cada lámina se coloca sobre la plataforma de construcción y se corta el contorno de la pieza a construir antes de colocar la siguiente, quedando adheridas entre ellas. Este proceso consta de dos tecnologías de fabricación:
 - **LOM (*Laminated Object Manufacturing*)**: se apilan láminas de papel o cartón, que se unen mediante un adhesivo y posteriormente se recortan con un cabezal de corte.
 - **UAM (*Ultrasonic Additive Manufacturing*)**: láminas de metal que se unen entre sí mediante una soldadura ultrasónica.

Para seleccionar el proceso de fabricación aditiva más adecuado para un proyecto es fundamental analizar tanto las ventajas como las desventajas que presentan cada uno de ellos, así como los materiales que utilizan para la construcción de las piezas. Cada método ofrece diferentes niveles de precisión, resistencia, acabado superficial o velocidad de procesado; del mismo modo que cada material confiere propiedades distintas en cuanto a ligereza, resistencia mecánica o comportamiento térmico. Además, es importante tener en cuenta otros factores como el tamaño máximo de las piezas que se pueden fabricar, los requisitos de posprocesado para alcanzar el acabado deseado, la sostenibilidad del proceso y la facilidad para realizar iteraciones o modificaciones durante el desarrollo del proyecto. Considerar estos factores permite optimizar los recursos, adaptar el proceso a las necesidades técnicas y económicas del proyecto y garantizar el resultado de las piezas fabricadas, que deberán ser funcionales y de calidad. Una elección adecuada facilita la personalización y flexibilidad en el desarrollo de los nuevos productos.

Tabla 3. Ventajas y desventajas de los procesos de fabricación aditiva

PROCESO DE FABRICACIÓN ADITIVA	MATERIALES	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Extrusión de material	Polímeros termoplásticos.	Bajo coste de la tecnología.	No tiene buen acabado superficial.
		Gran variedad de materiales.	Velocidad baja.
		Propiedades obtenidas similares a procesos convencionales.	Precisión de la pieza baja.
Fotopolimerización en tanque o cuba	Resinas fotocurables.	Buena tolerancia.	Necesita tiempos de poscurados.
		Buen acabado superficial.	Mayor longitud de las piezas (mayor coste y tiempo).
		Piezas de grandes dimensiones.	Relativamente caro.
		Velocidad alta en comparación con otros procesos.	Materiales limitados a fotopoliméricos.
Fusión de lecho en polvo	Nailon, PA, PP, TPU y aleaciones de titanio, aluminio, acero inoxidable, cobre y cromo.	Relativamente económico.	Velocidad baja.
		Adecuado para prototipos.	Gasto de energía elevado.
		Amplio rango de materiales.	Tamaño de pieza limitado.
		No necesita soporte.	
		Propiedades mecánicas similares a las obtenidas en procesos tradicionales.	
Proyección del material en tanque o cuba	Polímeros o resinas fotocurables.	Ausencia de soportes.	Coste elevado, máquinas industriales y materiales caros.
		Creación de piezas móviles con geometrías internas complicadas.	Limpieza de máquina precisa para evitar la contaminación.
		Buen acabado superficial.	Gran tiempo de impresión.
		Durabilidad de las impresiones, con alta resistencia mecánica y química.	Requiere posprocesamiento: uso de aspiradora y aire comprimido para evitar acumulación de polvo.
		Polvo reutilizable tras la impresión.	
		Bajo/moderado coste de material.	
		Baja cualificación de mano de obra.	

Proyección de aglutinante	ABS, PA, PC, aceros rápidos y materiales arenosos (vidrio).	Amplia gama de colores.	Posprocesado que aumenta los tiempos.
		Amplio rango de materiales.	Acabado poroso, necesita adición de resina.
		Rápido.	No es adecuado para las piezas de tipo estructural.
		Utiliza todo el volumen de fabricación mediante anidación.	
Deposición de energía dirigida	Cobalto, cromo y titanio.	Obtención de piezas con diferentes propiedades mecánicas.	
		Aporte de calor sobre la pieza bajo (poca deformación y corrosión).	Requieren acabado superficial.
		Obtención de piezas con alta densidad y mínima porosidad.	Necesita superficie de apoyo.
		Creación de piezas funcionales con alto control de estructura.	Control de tiempos de enfriamiento.
Laminado de hojas	Papel formato A4 y materiales metálicos de cualquier aleación que puedan ser laminados.	Alto ratio de producción.	
		Rápido y bajo coste.	Material limitado por la forma específica.
		Facilidad en el manejo del material.	Requiere posprocesado.
		Objetos a color.	No es adecuado para piezas de tipo estructural.
		Puede ser material reciclado.	
		Proceso limpio.	

Tras analizar las especificaciones de cada tipo de proceso, con sus ventajas y desventajas, así como los recursos disponibles en el taller, se toma la decisión de fabricar el violín mediante el proceso de extrusión de material, una tecnología especialmente adecuada para la creación de prototipos y de un coste menor en comparación con otros procesos.

4.2. Proceso de extrusión de material

Los puntos fuertes de este método de fabricación aditiva son, fundamentalmente, la amplia variedad de materiales que se pueden emplear, la utilización de estructuras de soporte integradas, los tiempos de producción, el bajo coste y su facilidad de uso, siendo la opción ideal para realizar un prototipo [48].

Cabe recordar que el proceso de fabricación elegido es el mismo que el FDM (Modelado por Deposición Fundida), patentado por Stratasys y utilizado legalmente solo por esta

empresa y por sus licenciarios. Para poder utilizarlo sin restricciones se acuñó otro nombre, el FFF (Fabricación por Filamento Fundido), al que se hace referencia en esta memoria [49].

FFF es una tecnología de fabricación por la que se extruye un filamento de material termoplástico a través de una boquilla caliente de una impresora 3D controlada por ordenador, depositando el material fundido capa por capa sobre una plataforma, trazando la pieza que se desea fabricar conforme a un modelo digital. El proceso se produce dentro de una cámara con un ambiente controlado [50].

Con este método se pueden construir con gran precisión piezas fuertes y duraderas. Se trata de una de las tecnologías más difundidas y populares: los materiales que utiliza y el equipamiento son asequibles, por lo que requiere una inversión inicial baja; permite imprimir con una amplia gama de materiales, para distintas aplicaciones, y, además, su funcionamiento es simple, en comparación con otros métodos, y no necesita personal especializado [51].

La impresión empieza con la creación de un modelo digital en 3D en un archivo *.stl* que se lanza a la impresora. Una vez cargado el archivo, la pieza se divide en capas finas con un *software* especializado. La pieza se imprime en el plano XY y se da volumen a través del eje Z.

5. Diseño y modelado

5.1. Piezas del violín para su impresión 3D

Para el diseño del violín que se va a construir por fabricación aditiva se valora la necesidad de realizar la impresión de las distintas partes por piezas individuales o imprimir el menor número de piezas posibles, agrupando algunas partes, disminuyendo así los tiempos de fabricación y el gasto de material.

Durante el desarrollo del proyecto se toma la decisión de diseñar las siguientes piezas:

A. CAJA DE RESONANCIA:

- Tapa: tabla superior, efes y barra armónica.
- Base: tabla inferior, aro, alma y botón.
- Puente.

B. MÁSTIL

- Mango.
- Diapasón.
- Clavijero y voluta.
- Clavijas (cuatro piezas).

C. CORDAL

D. AYUDAS

- Agarre del arco (tres piezas).
- Guía del arco (dos piezas).

5.2. Diseño de las piezas

Se parte de un diseño tradicional, respetando dentro de lo posible las proporciones y dimensiones de los violines artesanales, para poder comparar su acústica y calidad sonora.

Para la creación del modelo digital del violín se emplea *software* de diseño asistido por computadora (CAD), concretamente AutoCAD y SolidWorks, mientras que para preparar los archivos de impresión y gestionar los parámetros de fabricación aditiva se utiliza el *software* ideaMaker.

Además, se cuenta con la inestimable colaboración del lutier Chico Chacón, quien revisa un primer diseño impreso y verifica la correcta posición de las piezas del violín, un aspecto fundamental en la producción del sonido.

Cada una de las piezas se modela individualmente, asegurando que sus proporciones y sistemas de ensamble sean compatibles con la tecnología FFF, como la orientación, los espesores mínimos y la necesidad de soportes. Se utilizan diferentes fuentes para la recopilación de las medidas de un violín 1/16 [52-55].

Con el modelo CAD resultante se generan los archivos digitales para la impresora 3D, lo que permite realizar los ajustes y modificaciones previas a la fabricación final, facilitando la iteración y mejora del instrumento.

5.2.1. Caja de resonancia

Silueta

Para diseñar la caja de resonancia se utiliza el Método “Four Circle”, que permite realizar la silueta característica del violín y da la posibilidad de poder escalarlo al tamaño deseado. Este método aparece en el artículo “The ‘Four Circles’ system of violín making”, explicado por el Lutier Kevin Kelly [56].

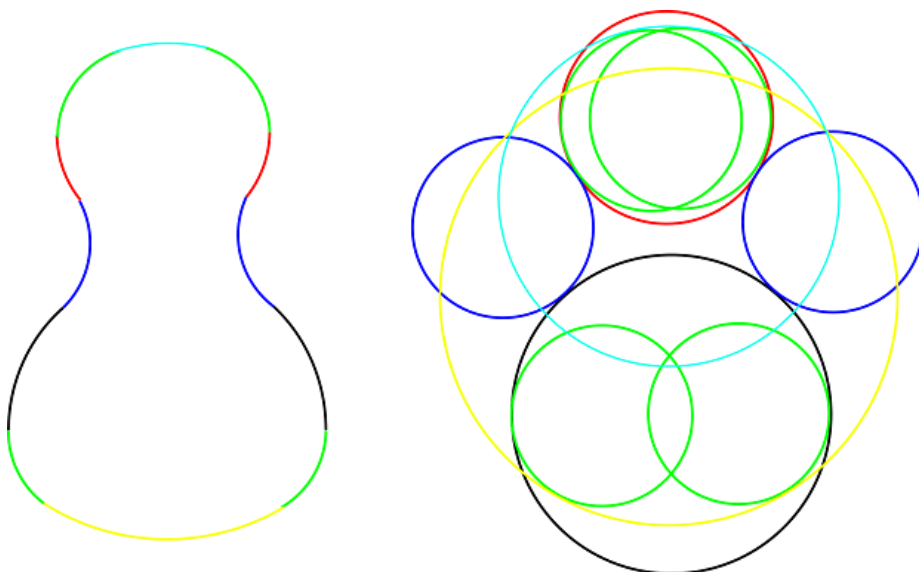


Figura 12. Método “Four Circle” [57]

El método parte de dos círculos principales, que corresponderían a la parte superior e inferior de la caja. Al ser escalable, no importa el radio que se escoja, siempre y cuando entre ellos exista una relación de proporción de 0.8. Para nuestro diseño se ha escogido una circunferencia de radio 16 mm y otra de 20 mm, que cumplen dicha relación ($16/20=0.8$):

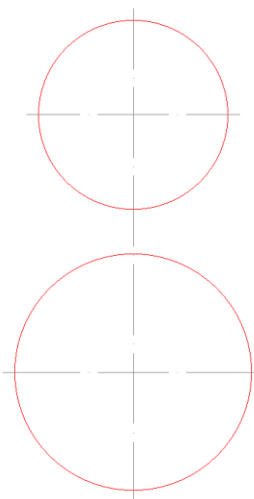


Figura 13. Método "Four Circle". Paso 1

Estas dos circunferencias deben tener sus centros en el mismo eje vertical. A continuación, se dibujan otras dos circunferencias tangentes a las primeras con el mismo radio que la circunferencia pequeña, es decir, 16 mm. Estas últimas van a definir la curvatura del violín, las *C-bouts*:

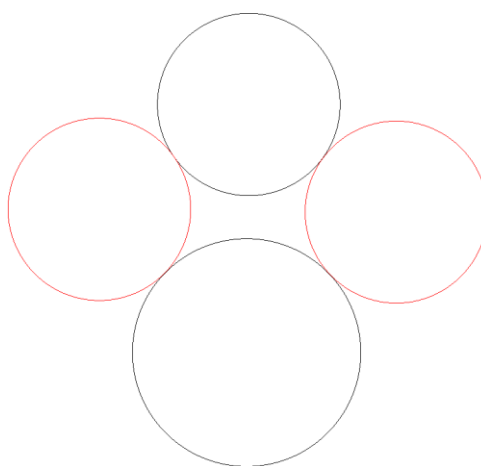


Figura 14. Método "Four Circle". Paso 2

La distancia entre las circunferencias laterales corresponde a la cintura del violín y es la que va a determinar la forma de la silueta. Si la aumentamos, la longitud se acorta, y si la reducimos, la longitud se alarga:

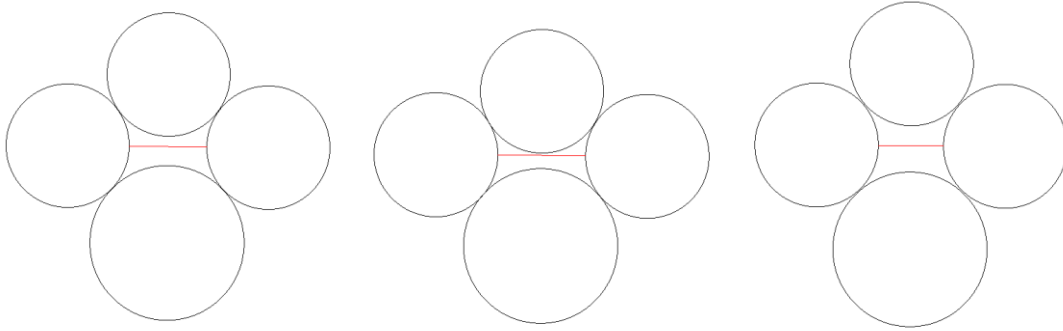


Figura 15. Método "Four Circle". Paso 3

En el siguiente paso, se divide el diámetro de la circunferencia de abajo en tres partes iguales y se dibujan dos circunferencias como las que se muestran en la figura:

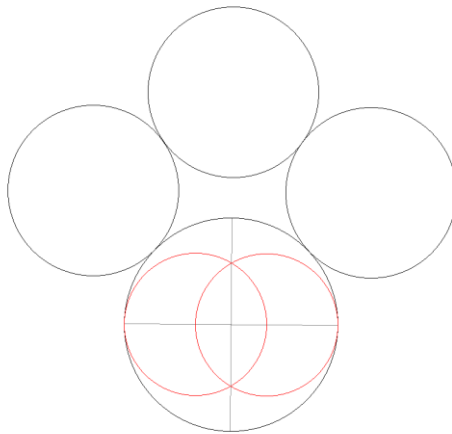


Figura 16. Método "Four Circle". Paso 4

Estas dos circunferencias se llevan al interior de la de arriba, de forma que sean tangentes en un punto en el eje horizontal, quedando de esta manera:

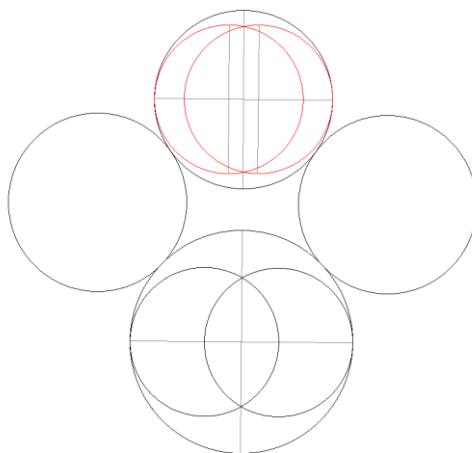


Figura 17. Método "Four Circle". Paso 5

A continuación, se traza una línea como la que se representa en la siguiente imagen:

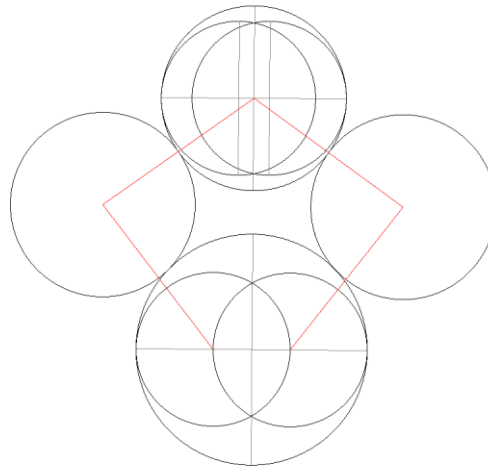


Figura 18. Método "Four Circle". Paso 6

Una vez realizada esta línea, se dibujan dos circunferencias concéntricas en las circunferencias laterales, con una proporción de 5/6. Los cuatro puntos de la intersección de estas circunferencias con la línea del paso anterior se unen dos a dos por sendas líneas horizontales:

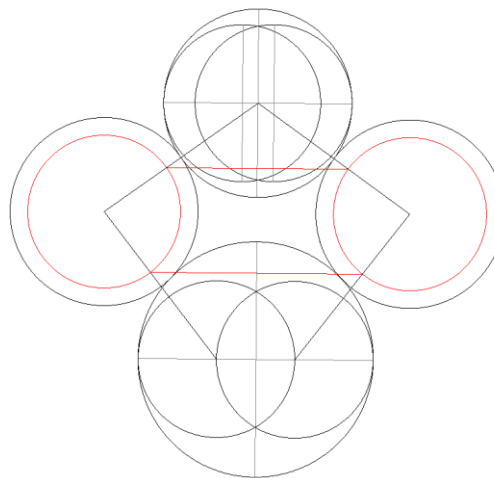


Figura 19. Método "Four Circle". Paso 7

Posteriormente, se trazan varias líneas siguiendo la secuencia que se ve a continuación:

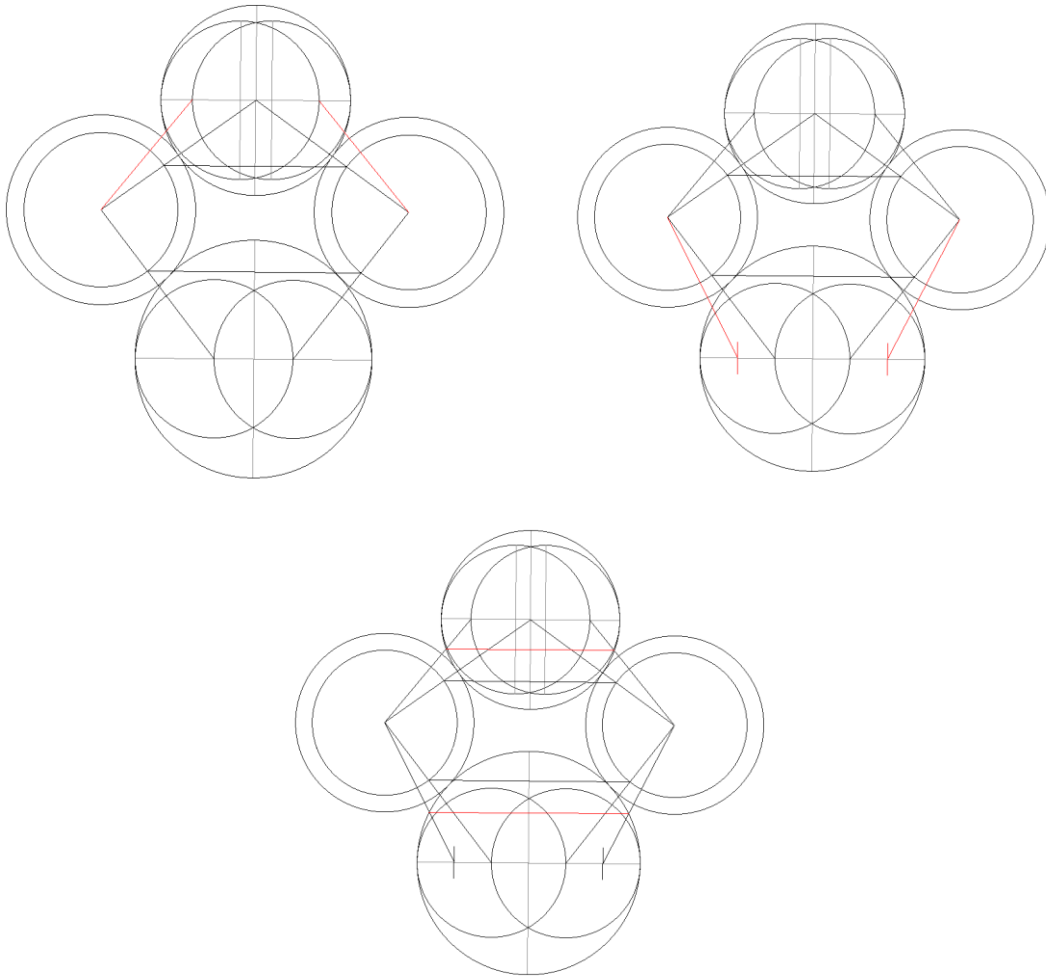


Figura 20. Método "Four Circle". Pasos 8-10

En este punto, se cogen de referencia las cuatro líneas horizontales que se han dibujado previamente; la distancia entre ellas va a determinar el valor del radio de las esquinas de las *C-bouts* superior e inferior, respectivamente:

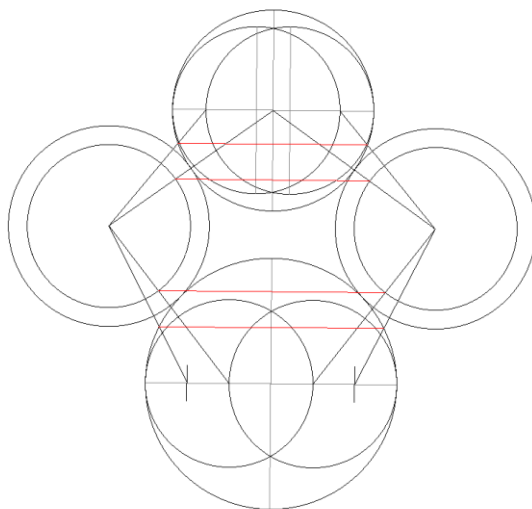


Figura 21. Método "Four Circle". Paso 11

Seguidamente, se dibujan cuatro circunferencias: en la parte inferior, dos circunferencias de radio igual a la distancia entre las dos líneas horizontales inferiores; en la parte superior, otras dos circunferencias, una con un radio igual a la distancia de las dos líneas superiores y la otra con un radio de valor igual a $\frac{4}{5}$:

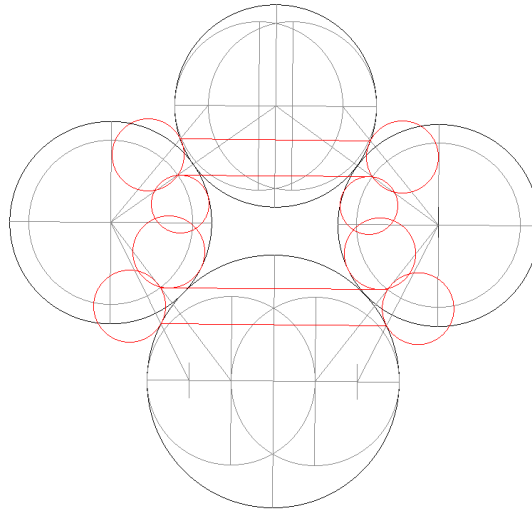


Figura 22. Método "Four Circle". Paso 12

El resultado final es una silueta como la que aparece en la siguiente imagen, con un tamaño fácilmente escalable:

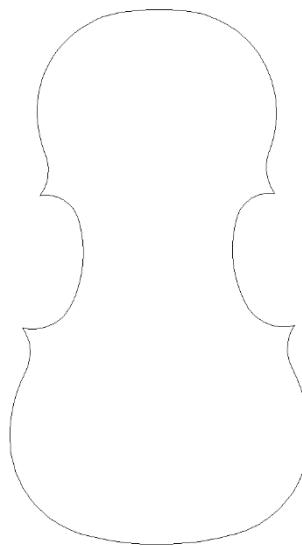


Figura 23. Silueta final

Para este proyecto se opta por realizar un violín 1/16 por dos razones fundamentales, por un lado, porque va dirigido a niños pequeños, y es el tamaño más adecuado a su edad y complejión, y, por otro lado, porque la impresora que se va a utilizar cuenta con un volumen de impresión pequeño.

Las medidas del cuerpo del violín, son, por tanto, las siguientes:

Largo: 230.00 mm

Ancho superior: 103.24 mm

Cintura: 65.01 mm

Ancho inferior: 129.05 mm

A partir de la silueta se realiza un primer diseño de la caja de resonancia en una única pieza, con una altura de aro de 29.07 mm y un espesor de paredes de 1.62 mm:

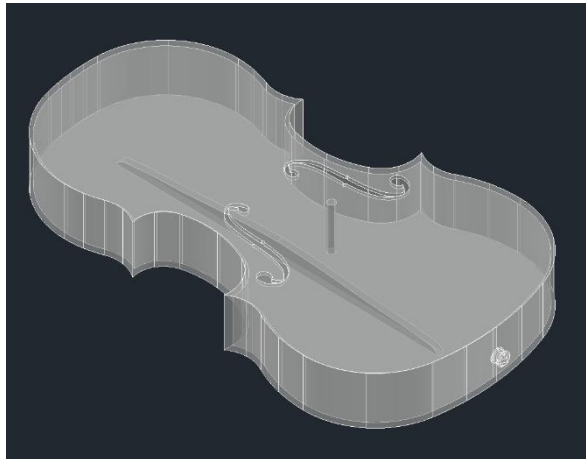


Figura 24. Diseño de caja de resonancia en una única pieza

Este diseño se descarta por requerir para su impresión material de soporte en el interior de la caja, sin posibilidad de ser retirado con posterioridad, alterando las propiedades sonoras que corresponden a una caja de resonancia.

La solución a este problema podría ser utilizar un material de soporte soluble, pero se descarta para evitar un incremento de los costes de producción.

De esta manera, se decide realizar dos piezas que requieran poco material de soporte y solo en zonas accesibles, sin que interfiera en el resultado final.

Tapa: tabla superior, efes y barra armónica

A partir de la silueta obtenida se realiza el diseño de la tabla superior, incorporando la barra armónica y el dibujo de las efes.

TABLA SUPERIOR

Se realizan dos diseños, modificando del primero dos variables, el grosor de la tabla y las dimensiones de las ocho espigas que se colocan para encajar la tapa en la base y facilitar el montaje final:

Tabla 4. Opciones de diseño de la tabla superior

VARIABLES		DISEÑO 1	DISEÑO 2
Grosor de tabla		1.62 mm	4.00 mm
Dimensiones de espigas (8)	Longitud	12.25 mm	12.10 mm
	Diámetro	4.50 mm	4.00 mm

Las espigas se disponen en las cuatro esquinas de las *C-bouts* y, por parejas, en la parte superior e inferior de la tapa. Su tamaño debe permitir un buen ensamblaje con la base.

El grosor de la tapa debe ser aquel que aporte la suficiente consistencia al cuerpo sin llegar a hacerlo muy pesado.

Para facilitar su impresión, se decide omitir el diseño de las bóvedas que habitualmente se tallan en las tablas de madera de los violines artesanales.

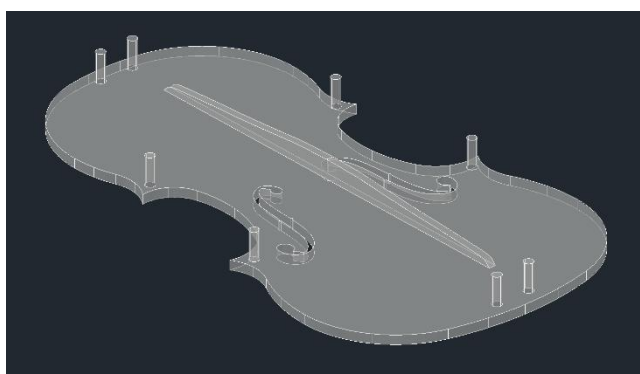


Figura 25. Diseño de la tapa

EFES

Para el diseño de las efes se utiliza una plantilla [53] que se escala para que sus medidas sean proporcionales a las dimensiones de la silueta de la tapa, resultando 45.68 mm de alto y 30.00 mm de ancho.

Se colocan a una distancia de 43.01 mm entre ellas, a la altura del trazo transversal de la *f*, quedando a una distancia de 128.05 mm respecto del borde superior de la tapa en su eje vertical.

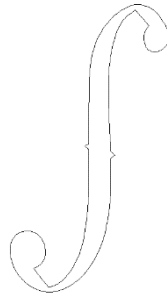


Figura 26. Diseño de las efes

BARRA ARMÓNICA

La barra armónica va pegada a la cara interna de la tabla superior, por lo que se decide incorporarla al diseño de la tapa.

Se realiza un primer diseño con las siguientes dimensiones:

145.00 mm de largo x 3.50 mm de ancho x 7.88 mm de alto

Por consejo del lutier se modifican las dimensiones de la barra armónica diseñada, pasando a ser las siguientes:

175.00 mm de largo x 3.00 mm de ancho x 7.88 mm de alto

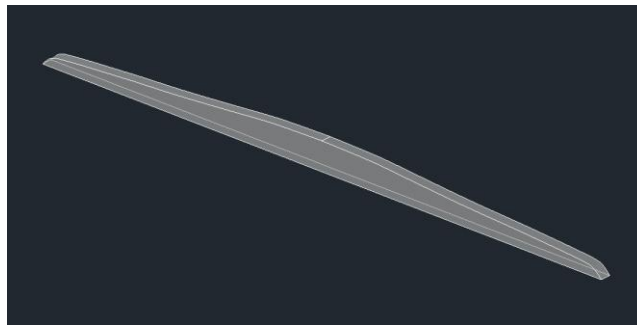


Figura 27. Barra armónica

Del mismo modo, se cambia su posición respecto al eje de la tapa, colocada inicialmente a 1.50 mm a su derecha y alineada con él, debiendo estar más cercana a la *f* derecha y ligeramente inclinada respecto al eje.

Para colocar la barra armónica en la ubicación correcta se realizan los cálculos habituales en la fabricación del violín artesanal: se toma la mayor distancia desde el eje de la tapa hasta el borde de la tapa en la parte superior (*e*) y en la parte inferior (*d*); cada medida se divide entre 7 y se obtiene el valor de la distancia a la que tiene que estar la

barra armónica en la parte superior (x) y en la parte inferior (y), respectivamente, consiguiendo así la inclinación óptima de la barra armónica:

$$e = 51.62 \text{ mm} \rightarrow x = \frac{51.62 \text{ mm}}{7} = 7.37 \text{ mm}$$

$$d = 64.53 \text{ mm} \rightarrow y = \frac{64.53 \text{ mm}}{7} = 9.22 \text{ mm}$$

El diseño definitivo de la tapa, con la posición correcta de las efes y de la barra armónica, es el de la figura que se muestra a continuación:

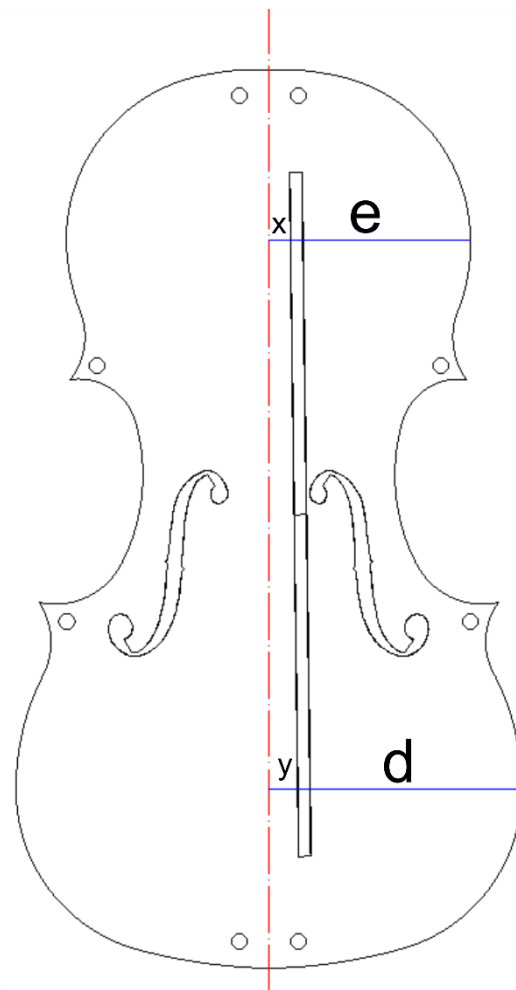


Figura 28. Diseño de la tapa del violín con las indicaciones de posición de la barra armónica

Base: tabla inferior, aro, alma y botón

Para diseñar la tabla inferior se parte, igualmente, de la silueta obtenida, incorporando en este caso el aro, el alma y el botón.

TABLA INFERIOR Y ARO

Como con la tapa, se realizan dos diseños para cada uno de los dos grosores de tabla; como resultado, se obtienen las siguientes medidas:

Tabla 5. Opciones de diseño de la tabla inferior y el aro

VARIABLES		DISEÑO 1	DISEÑO 2
Grosor de la tabla		1.62 mm	4.00 mm
Grosor de la pared		1.62 mm	3.50 mm
Altura del conjunto	Exterior	27.46 mm	29.07 mm
	Interior	25.84 mm	25.07 mm
Orificios para las espigas (8)	Profundidad	12.50 mm	12.50 mm
	Diámetro	5.00 mm	4.50 mm

Las perforaciones para encajar las espigas se ubican en las esquinas de las *C-bouts* y, por parejas, en sendos bloques de 38.76 mm x 22.29 mm colocados en la parte superior e inferior de la pieza.

Asimismo, se realizan dos orificios en el lateral superior para poder ensamblar el mástil, con una profundidad de 6.44 mm y un diámetro de 6 mm.

Tras la visita al lutier se decide reducir el volumen de los bloques de ensamblaje de las espigas al objeto de minimizar su efecto sobre la capacidad de producción de sonido de la caja de resonancia, pasando sus medidas a ser 38.76 mm x 12.29 mm.

ALMA

El diseño de la base incluye el alma, una pequeña pieza que tradicionalmente se coloca a presión entre las tablas superior e inferior.

Las dimensiones de este pequeño cilindro son 3.88 mm de diámetro y 25.07 mm de altura y se sitúa a una distancia de 114.69 mm respecto del borde superior de la tapa en su eje vertical y desplazada hacia la derecha 13.25 mm.



Figura 29. Diseño del alma

BOTÓN

Como ya se ha indicado, el botón es una pieza que cumple una doble función, por un lado, sirve para sujetar el cordal y, por otro, para observar a través del orificio en el que va encajado si el alma se encuentra en la posición correcta. En este diseño, el alma tiene una posición fija, por lo que no es necesario retirar el botón. Es por ello que se opta por incorporarlo a la base de la caja de resonancia.

Sus dimensiones son 5.81 mm de diámetro de la base y 4.52 mm de altura.

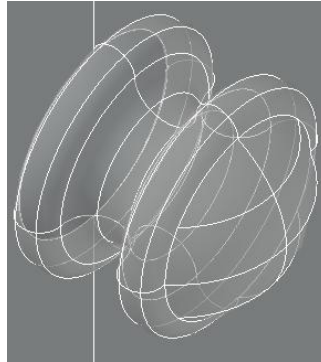


Figura 30. Diseño del botón

El diseño definitivo de la base, con todos los elementos descritos, es el de la figura que se muestra a continuación:

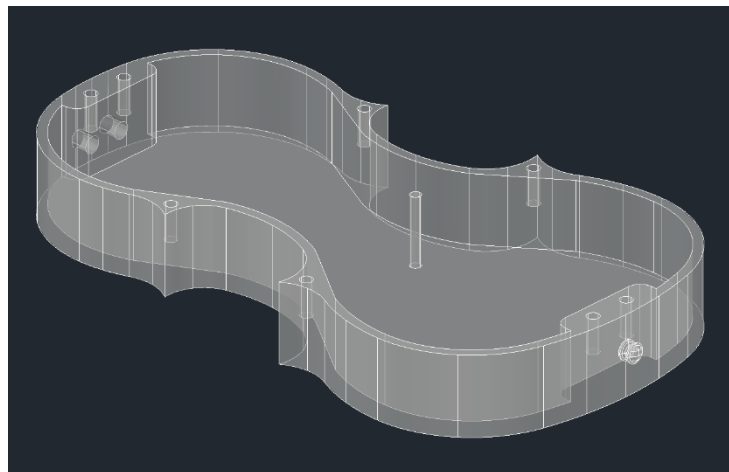


Figura 31. Diseño de la base del violín

Puente

El puente es una pequeña pieza que se coloca a presión, en posición vertical, entre las cuerdas y la tapa de la caja de resonancia, por lo que no puede integrarse en el diseño de las piezas precedentes.

Para diseñar el puente se utiliza una plantilla [53] como idea base a partir de la cual se obtiene su forma característica. Además, se tiene en cuenta la peculiaridad de presentar un mayor grosor en la base que en el extremo superior.

Este primer diseño se escala modificando algunas de sus variables, como el grosor de la base, el ancho o la altura, obteniendo un diseño final con las siguientes medidas:

Altura máxima: 27.70 mm

Anchura mínima: 26.50 mm

Anchura máxima: 30.30 mm

Grosor de la base: 4.00 mm

Grosor superior: 2.40 mm

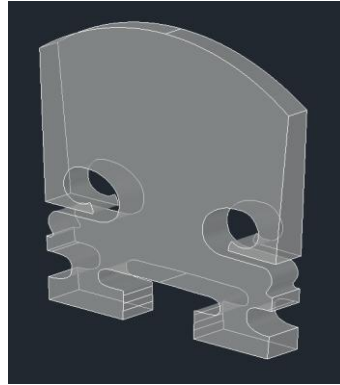


Figura 32. Puente

5.2.2. Mástil

Se considera diseñar el mástil como una única pieza; sin embargo, esta opción presenta inconvenientes en cuanto a tiempos de impresión y consumo de material debido a la utilización de material de soporte, por lo que se decide finalmente dividir el mástil en tres piezas, lo que permite optimizar tanto el resultado final como los recursos empleados.

Mango

El mango se diseña con dos partes diferenciadas: una horizontal, que correspondería al mango propiamente dicho, y otra vertical, que correspondería al talón. En la parte horizontal se realizan tres orificios para encajar el diapasón. La geometría del mango no es rectangular, sino que adopta una forma troncocónica que debe coincidir con el diapasón, evitando que sobresalga en los laterales. Esta geometría se aprecia al observar la pieza desde arriba. En el lateral de su base menor se sitúa otro orificio para ensamblar el clavijero.

En la parte vertical o talón se alojan dos espigas de ensamble; esta parte no forma un ángulo de 90° respecto a la horizontal, ya que requiere de una inclinación específica para ajustarse al cuerpo del violín y asegurar la correcta posición del puente y el cordal.

El diapasón y el cordal deben quedar dispuestos de manera que formen entre ellos un ángulo de 158° , para que esto sea posible es necesario diseñar el talón con un ángulo de 83° , resultando una inclinación de 7° respecto de la tabla superior del instrumento.

Tabla 6. Dimensiones del mango

VARIABLES		MEDIDAS
Tronco cónico	Base mayor	24.20 mm
	Base menor	18.00 mm
	Longitud	92.00 mm
Grosor	Mango	13.95 mm
	Talón	10.08 mm
Orificios diapasón (3)	Profundidad	7.40 mm
	Diámetro	5.00 mm
Orificio clavijero (1)	Profundidad	7.60 mm
	Diámetro	5.00 mm
Espigas (2)	Longitud	6.00 mm
	Diámetro	5.50 mm

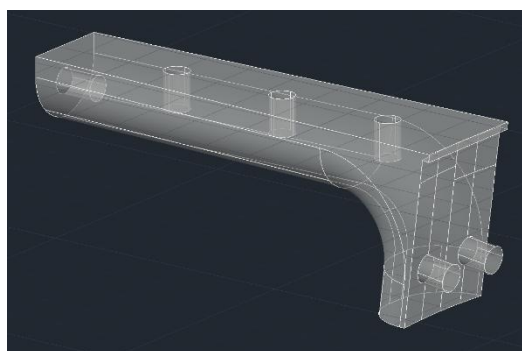


Figura 33. Diseño del mango

Diapasón

El diapasón, al igual que el mango, tiene forma troncocónica; sin embargo, es más largo, con una longitud de 180.10 mm y su superficie es convexa. Parte de la pieza se apoya sobre el mango y el resto queda situada sobre la tapa, pero sin apoyarse en ella, como un voladizo. Este tramo tiene una longitud de 79 mm y cuenta con una base cóncava,

una característica que sirve para adaptarse en los violines tradicionales a la curvatura de la tapa y que se decide mantener en este diseño. El tramo restante presenta la base recta y cuenta con tres espigas que encajan en los correspondientes orificios del mango. La superficie curva del diapasón facilita la ejecución de las notas al presionar las cuerdas. En el extremo del diapasón se sitúa una cejuela, cuya función es elevar las cuerdas para evitar su roce con el diapasón.

Tabla 7. Dimensiones del diapasón

VARIABLES		MEDIDAS
Tronco cónico	Base mayor	29.82 mm
	Base menor	17.82 mm
	Longitud total	180.10 mm
	Longitud voladizo	79.00 mm
Grosor	Tramo del mástil	5.68 mm
	Tramo del voladizo	4.55 mm
Cejuela	Longitud	17.82 mm
	Altura	2.00 mm
Espigas (3)	Longitud	7.00 mm
	Diámetro	4.40 mm

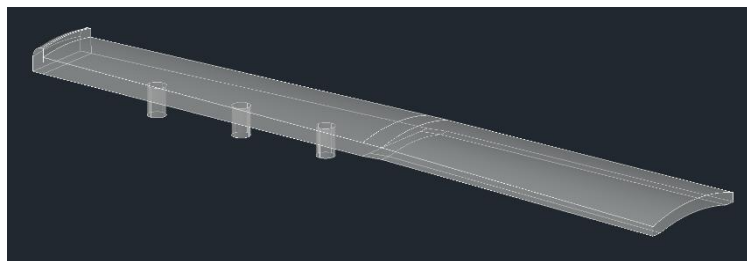


Figura 34. Diseño del diapasón

Clavijero y voluta

El clavijero se diseña para alojar las cuatro clavijas del instrumento. Es un bloque troncocónico hueco con ocho orificios, alineados a ambos lados en dos filas de cuatro. Estos orificios no son cilíndricos, sino de forma troncocónica, adaptándose a la

geometría de las clavijas, que también presentan esta forma, lo cual permite que se inserten a presión, asegurando su ajuste sin necesidad de adhesivos.

En el lado más distal del clavijero se coloca la voluta con su característico diseño en espiral. Para optimizar su impresión 3D se prescinde de detalles ornamentales que no afectan a su funcionalidad, reduciendo así su peso y evitando el uso excesivo de material de soporte. Se trata de un elemento meramente estético que puede servir de apoyo durante la afinación o para rematar el diseño del instrumento, pero que no afecta a la calidad del sonido.

Tabla 8. Dimensiones del clavijero y la voluta

VARIABLES		MEDIDAS
Clavijero/Voluta	Longitud al centro de la voluta	66.10 mm
	Altura	42.20 mm
	Anchura	18.00 mm
Hueco del clavijero	Longitud	10.00 mm
	Altura	44.35 mm
	Anchura	17.66 mm
Voluta	Diámetro	5.44 - 27.80 mm
Orificios (8)	Longitud	3.16 - 4.08 mm
	Diámetro	3.40 - 4.13 mm

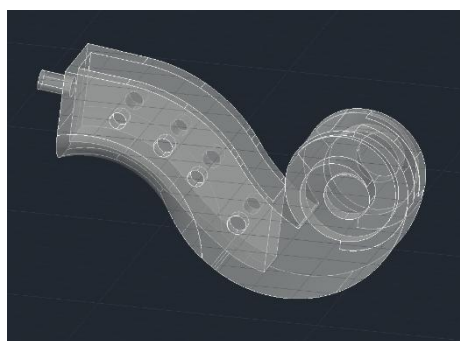


Figura 35. Diseño del clavijero y la voluta

Clavijas

Las clavijas presentan un diseño troncocónico que permite que se ajuste a presión en los orificios del clavijero. En un extremo se encuentra la cabeza de la clavija, de mayor tamaño y forma redondeada, que facilita el agarre con los dedos para girarla y tensar o destensar las cuerdas a la hora de afinar el violín. El cuerpo se estrecha hacia el otro extremo, que es el que se introduce en los orificios del clavijero.

Cada clavija tiene un pequeño orificio por el que pasar la cuerda para enrollarla y tensarla. Los orificios de las clavijas de las cuerdas graves, más gruesas, son ligeramente mayores que los de las cuerdas que producen las notas más agudas.

Tabla 9. Dimensiones de las clavijas

	VARIABLES	MEDIDAS
Clavijas (4)	Longitud del eje	33.00 mm
	Longitud de la cabeza	16.00 mm
	Diámetro en la base	4.50 mm
	Diámetro en el extremo	3.50 mm
Orificios	Diámetro mayor (2)	1.50 mm
	Diámetro menor (2)	1.00 mm

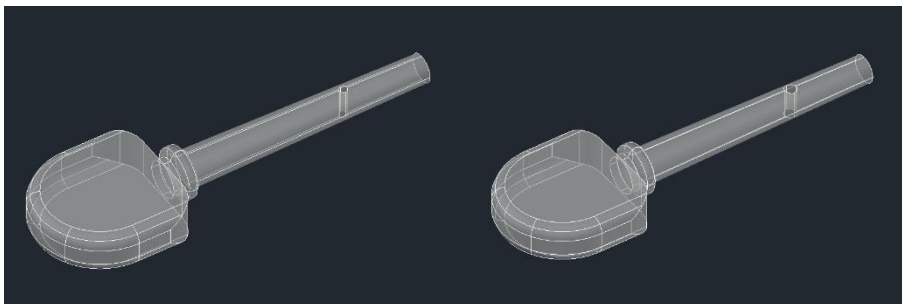


Figura 36. Diseño de las clavijas

5.2.3. Cordal

El cordal es una pieza plana y alargada, más ancha en la parte superior y se va estrechando hacia el extremo inferior. La parte superior presenta cuatro ranuras perforadas que sirven para colocar las cuerdas, mientras que la parte inferior cuenta con una lengüeta con dos orificios que se utiliza para fijar el cordal al instrumento

mediante un cordón que se engancha al botón de la base del violín. La superficie superior del cordal es curva, como la del diapasón, lo que facilita la correcta separación y altura de las cuerdas. Además, por consejo del lutier, se coloca una pequeña cejuela por encima de las ranuras de las cuerdas y se acorta su longitud.

El diseño del cordal se inspira en dos modelos: uno obtenido de un plano en PDF [52] y otro consultado en una página web especializada [53].

Tabla 10. Dimensiones del cordal

VARIABLES		MEDIDAS
Cordal	Longitud total	73.82 mm
	Grosor	7.00 mm
	Anchura máxima	28.40 mm
	Anchura mínima	17.12 mm
Ranuras (4)	Longitud	6.80 mm
	Anchura	2.00 mm
Cejuela	Longitud	28.40 mm
	Altura	2.00 mm
Orificios lengüeta	Longitud	8.23 mm
	Diámetro	3.00 mm

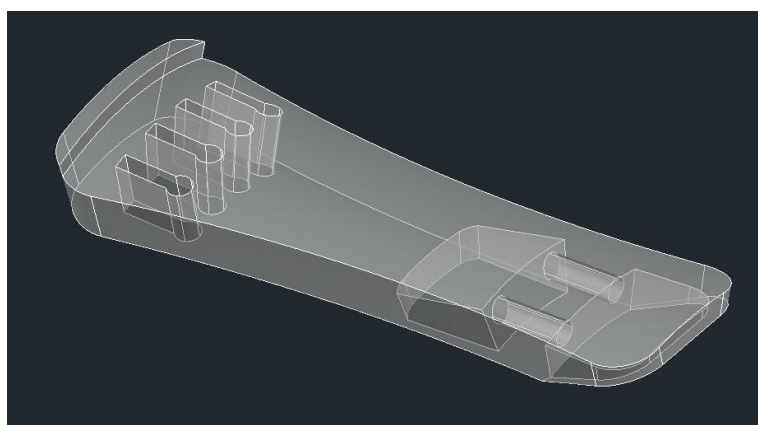


Figura 37. Diseño del cordal

5.2.4. Ayudas

Para facilitar el aprendizaje de los alumnos que se inician en la práctica del instrumento se diseñan dos piezas independientes que se adaptan específicamente a las dimensiones del violín.

Agarre del arco

Para el diseño de esta ayuda se desarrollan tres versiones diferentes que se describen a continuación:

SILENCIO DE NEGRA

La primera versión presenta una forma peculiar, está inspirada en una figura musical, el silencio de negra, y se utiliza su contorno característico como plantilla. Tiene un grosor de 11 mm y un hueco en la parte inferior que permite su anclaje al arco.

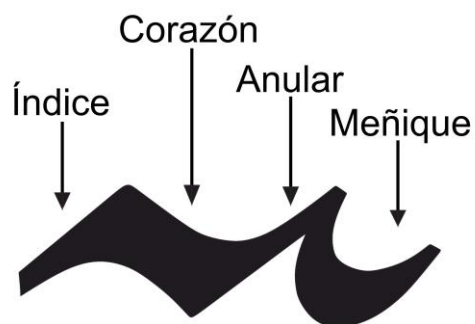


Figura 38. Posición dedos en el agarre del arco en forma de silencio de negra

A pesar de su originalidad, esta ayuda resulta poco funcional y ergonómica en comparación con las que se pueden encontrar en el mercado. Su forma no facilita un agarre cómodo ni una correcta posición de la mano para los principiantes, lo que dificulta el aprendizaje adecuado de la técnica del arco. Por estos motivos, se descarta este primer diseño.

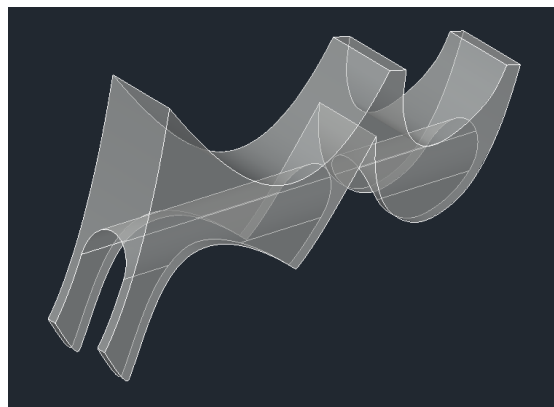


Figura 39. Diseño de agarre del arco (Opción 1)

AGARRE DE TUBO

Este diseño se basa en un modelo existente, al que se le realizan algunas modificaciones para adaptarlo a las necesidades de aprendizaje [58]. Consiste en un tubo con cuatro orificios, uno para cada dedo, estando el último de ellos desplazado, al objeto de facilitar la colocación del meñique.

Su funcionalidad mejora respecto a la del modelo anterior, dado que facilita la colocación de los dedos sobre el arco; sin embargo, no garantiza una correcta posición de la mano. Por este motivo, su utilidad no es del todo la deseada.

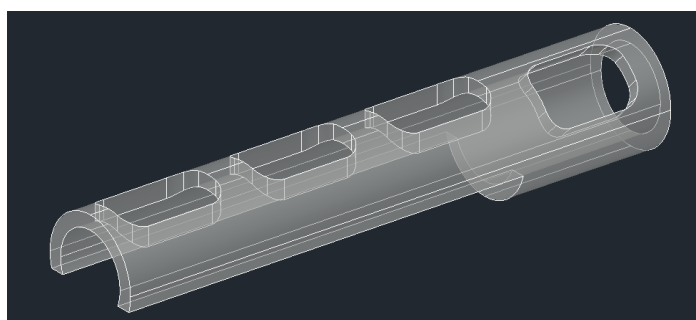


Figura 40. Diseño de agarre del arco (Opción 2)

AGARRE DE TUBO ERGONÓMICO

Se diseña un tercer agarre del arco a partir del anterior, incorporando mejoras significativas para optimizar la posición de la mano. Al tubo se le añade un saliente que permite colocar correctamente el meñique de forma perpendicular al arco, facilitando así una postura correcta y natural. Además, la superficie del tubo presenta una zona ergonómica para acomodar los otros tres dedos, guiando su colocación y mejorando la estabilidad.

Este diseño, el definitivo, ofrece una guía más precisa para la colocación de la mano, contribuyendo a un aprendizaje más efectivo y cómodo. Presenta las siguientes dimensiones:

Longitud: 57.00 mm

Longitud del saliente: 3.70 mm

Altura: 15.5 mm

Diámetro interior del saliente: 6.00 mm

Diámetro interior del tubo: 8.50 mm

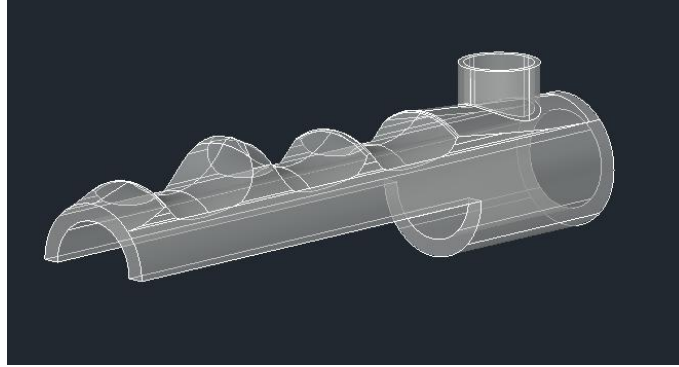


Figura 41. Diseño de agarre del arco (Opción 3)

Siendo el diseño anterior el definitivo, se realizan modificaciones para mejorar el agarre, como, la incorporación de un saliente entre los dedos índice y corazón, y el aumento del diámetro interior del saliente para el meñique, que pasa a ser de 7 mm.

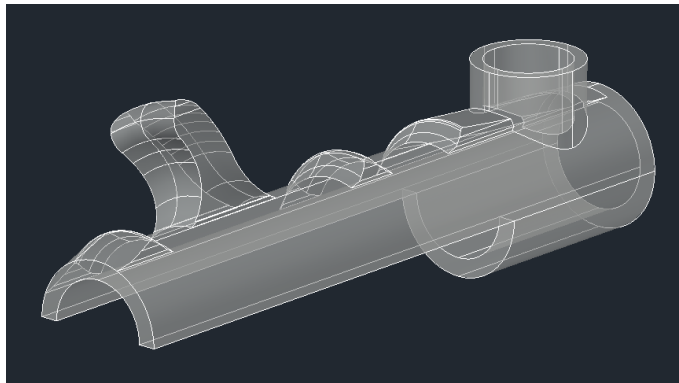


Figura 42. Rediseño de agarre del arco (Opción 3)

Guía del arco

GUÍA ENCAJADA EN LA CAJA DE RESONANCIA

Este diseño de guía está inspirado en modelos ya existentes y consta de tres piezas: una base y otras dos piezas superiores que conforman un canal por el que pasa el arco. Las piezas superiores se encajan en la base abrazando la caja de resonancia del violín.

El modelo se descarta porque tiene una limitación importante y es que sus dimensiones son muy específicas y solo resulta compatible con la caja de resonancia de este proyecto, no siendo, por tanto, una solución versátil para otros modelos.

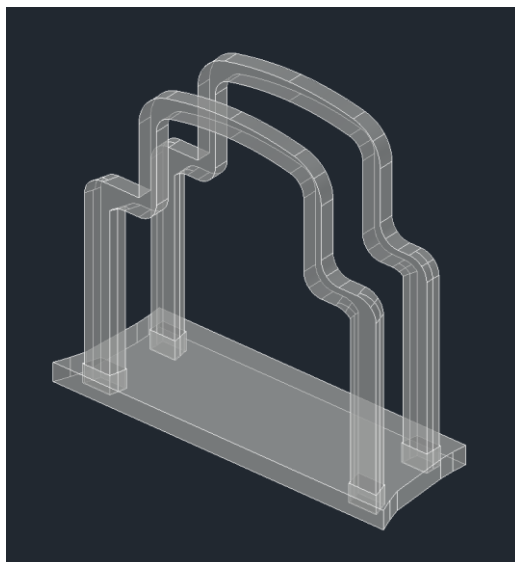


Figura 43. Diseño de guía del arco (Opción 1)

GUÍA ENCAJADA EN EL DIAPASÓN

Este diseño, al igual que el primero, se inspira en modelos ya existentes en el mercado [59], aunque incorpora algunas modificaciones estéticas propias. Consiste en una única pieza que se abre y se coloca fácilmente sobre el diapasón, de modo que la guía queda suspendida por encima de las cuerdas, al pasar el arco por el canal de la guía se mantiene perpendicular a las cuerdas y evita desviaciones laterales.

Se ha seleccionado este modelo como el diseño definitivo debido a su versatilidad: la abertura de la parte inferior tiene unas dimensiones estándar y se adapta a la mayoría de los diapasones, lo que facilita su reutilización en diferentes violines.

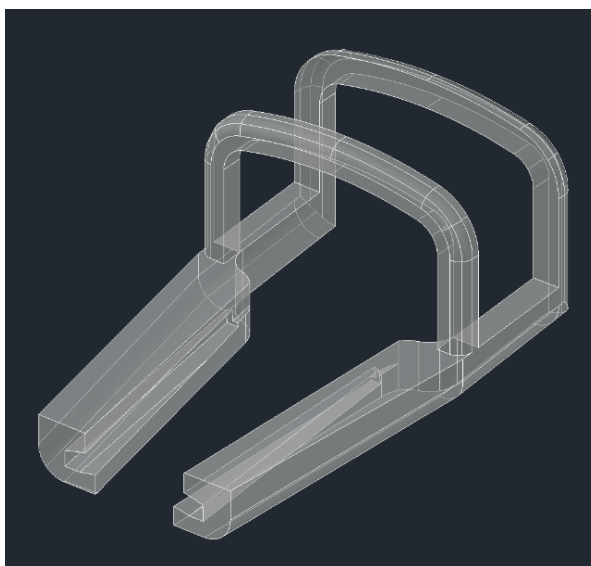


Figura 44. Diseño de guía del arco (Opción 2)

6. Fabricación y montaje

6.1. Impresora 3D

6.1.1. Equipo de impresión

Para imprimir el violín se utiliza una impresora Raise3d Pro 2 [60], con una extrusión doble, accionada electrónicamente, con extremos calientes retráctiles y con un rendimiento de torque 4 veces mayor que el del modelo inferior; con esto se permite producir objetos en 3D con diferentes tipos de materiales y diferentes colores.

El tamaño de la máquina es de 620 x 590 x 760 mm y tiene un volumen de impresión de 305 x 305 x 300 mm, un tamaño aceptable para el tipo de violín que queremos imprimir.

El diámetro del filamento que puede extruir es de 1.75 mm y la velocidad de impresión oscila entre 15 y 150 mm/s. Las boquillas compatibles pueden ser de 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1 mm, mientras que la altura de capa puede variar entre 0.05 y 0.6 mm.

Esta máquina se compone de los siguientes elementos:

- Placa de construcción de metal: de superficie plana, proporciona una distribución uniforme del calor para una mejor calidad de la impresión.
- Filtro de aire HEPA: elimina las partículas tóxicas liberadas durante el proceso de impresión.
- Monitoreo de *software* y pantalla táctil: tiene una pantalla táctil de 7 pulgadas que permite interactuar con la impresora. Como todas las impresoras de Raise3D es compatible con ideaMaker, *software* de corte 3D, y RaiseCloud, una plataforma de gestión de impresión en la nube. Además, tiene una cámara incorporada.
- Medidas de precaución: consta de un sensor que detecta el agotamiento del material o si hay un corte de energía; en tal caso, la impresora tiene un sistema de protección del progreso de la pieza.
- Marco de metal completo: sistema que permite un movimiento suave y un posicionamiento preciso para una mayor calidad.

Detalles técnicos:

- Alta repetibilidad: con una variación inferior a 0.005 mm (5 micras). Esta característica permite que la impresora no se desalinee con los movimientos durante la impresión, ya que para poder realizar todas las capas debe moverse incontables veces hacia delante y hacia atrás, por lo que se puede perder su posición y estropear la pieza.
- Velocidad del rayo: tarda menos de un segundo en cambiar de movimiento (tiempo de conmutación). El ahorro de tiempo siempre es un tema importante a la hora de imprimir, por ello, la velocidad del rayo o ultrarrápida permite que el tiempo total disminuya. Esta velocidad depende del objeto que se vaya a imprimir y de las propiedades/características que tenga, como la altura de capa. Al tener un tiempo de cambio inferior a un segundo permite a la máquina cambiar de dirección más rápidamente durante el proceso de impresión.
- Distancia de elevación de 1.5 mm: compatible con filamentos flexibles.
- La distancia de elevación es el trayecto entre la boquilla de impresión y el objeto que se está imprimiendo. Es necesario que haya distancia para poder garantizar que la boquilla no interfiera con la impresión y evitar cualquier problema.

Esta impresora tiene la capacidad de imprimir diferentes filamentos, como, PLA, ABS, HIPS, nailon, PVA, entre otros.

6.1.2. *Software* de impresión

Raise3D utiliza como *software* de impresión el ideaMaker, un *software* de laminado de modelos 3D creado para diseñar archivos de impresión. Permite preparar, personalizar y enviar modelos 3D a la impresora [61].

Además del propio *software*, incluye una plataforma en la nube que permite monitorizar y gestionar los trabajos de impresión de forma remota, el RaiseCloud.

IdeaMaker presenta varias virtudes, entre otras [62]:

- Alta velocidad de ejecución.
- Interfaz intuitiva.
- Buena estimación del tiempo de impresión.
- Preparación de piezas con diferentes superficies y texturas.
- Estimación del material necesario para realizar la pieza.

Asimismo, cuenta con multitud de opciones y características para la impresión de las piezas:

- Descargar e importar archivos de modelo desde su biblioteca.
- Modificar, añadir o eliminar fácilmente los soportes que se generan automáticamente.
- Modificar sección por sección los parámetros de las piezas 3D.
- Generar texturas 3D, con una gran selección en su biblioteca.
- Determinar los mejores parámetros de corte para la altura de las capas, la estructura del relleno y de los soportes, el consumo de filamento y el tiempo de impresión.
- Dividir un archivo *.stl* en varias partes e imprimirlas por separado.
- Detectar y reparar automáticamente defectos en los archivos.
- Conectar por red varias impresoras 3D.

Como otras herramientas de laminado, el ideaMaker calcula automáticamente una serie parámetros que determinan la calidad y la resistencia de la impresión 3D [51].

La **altura de la capa** es el grosor de la capa depositada. Capas delgadas o bajas (inferiores a 0.15 mm) dan como resultado impresiones más suaves, con mayor detalle, pero aumentan el tiempo de impresión. Por el contrario, capas gruesas o altas (superiores a 0.3 mm) provocan superficies más rugosas, con pérdida de resolución, pero disminuyen el tiempo de impresión.

Por otro lado, las piezas se pueden imprimir con más o menos cantidad de relleno, dependiendo de las necesidades. Una pieza densa, con mayor porcentaje de **relleno**, es más resistente que otra hueca o con poco porcentaje de relleno, pero gasta más material y emplea más tiempo.

Del mismo modo, la resistencia y la calidad de la pieza mejora con el **grosor de la pared**, determinado por el valor del diámetro de la boquilla, pero también aumenta el consumo de material y el tiempo de impresión.

Otro parámetro importante es la **velocidad de impresión**, que influye especialmente en el tiempo de impresión de las piezas más grandes. A menor velocidad, más detalle y calidad, pero también más tiempo. Influyen otros factores, como el material empleado, el tamaño de la boquilla o la altura de la capa.

La **temperatura** de impresión depende del tipo de material a utilizar y de la cantidad. Es importante que sea la temperatura más baja a la que se funde el material, para que no haya problemas durante o después de la impresión.

Para evitar que se deformen determinadas piezas con voladizos o formas complejas es necesario construir estructuras auxiliares de soporte. Como **material de soporte** se puede utilizar el mismo con el que se esté fabricando la pieza u otro diferente, si se contara con dos extrusores. El segundo material sería más débil para poder retirarlo con facilidad y ahorrar material principal y tiempo.

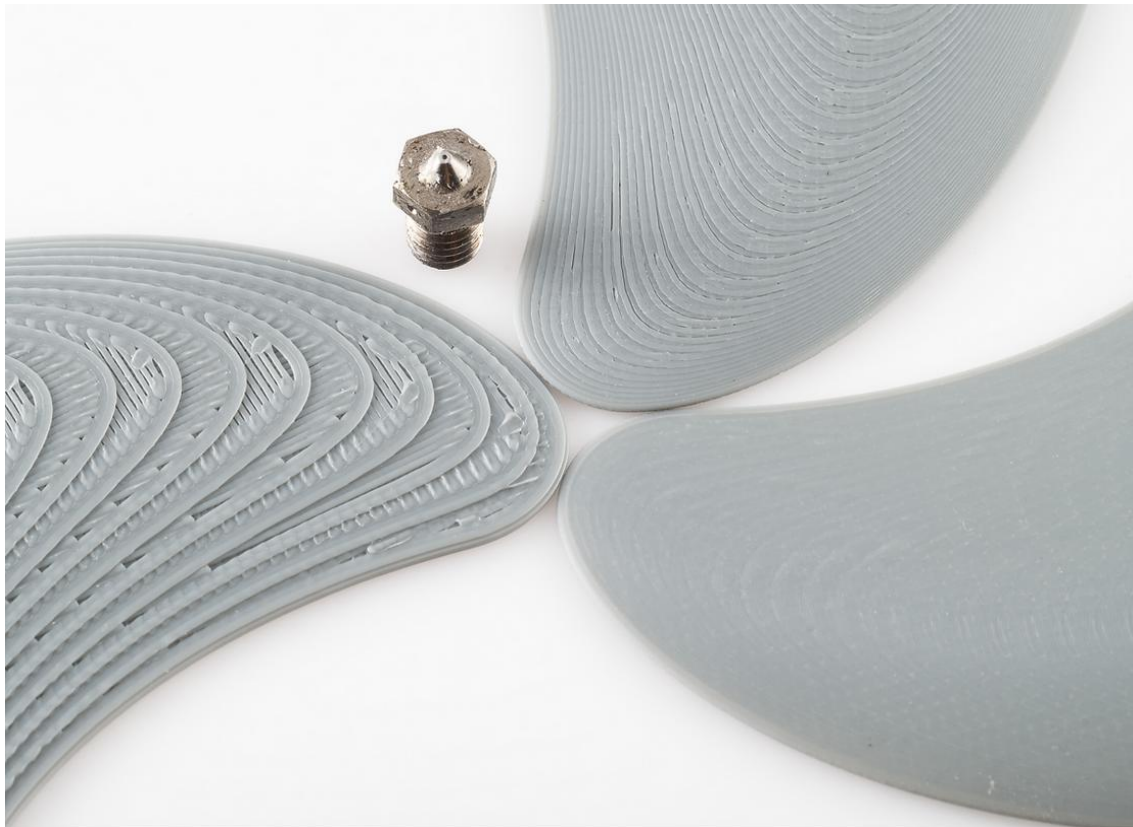


Figura 45. Distintas resoluciones de impresión en el mismo modelo [63]

6.2. Materiales de impresión

Como ya se ha comentado, la tecnología FFF utiliza una amplia variedad de filamentos termoplásticos, con distintas propiedades y para diferentes aplicaciones [64, 65]:

Tabla 11. Materiales de impresión 3D FFF: características y aplicaciones

MATERIAL	PROPIEDADES	APLICACIONES
ABS (acrilonitrilo butadieno estireno)	Facilidad de impresión media. Baja flexibilidad y resistencia alta.	Prototipos funcionales y estéticos. Modelos conceptuales. Fabricación de herramientas.
PLA (ácido L-láctico)	Mayor facilidad de impresión. Alta rigidez y resistencia media. Biodegradable.	Prototipos funcionales y estéticos. Modelos conceptuales. Fabricación de herramientas.
PETG (tereftalato de polietileno glicolizado)	Facilidad de impresión alta. Flexibilidad y resistencia medias. Temperaturas de impresión bajas.	Piezas impermeables y componentes de fijación mediante presilla.
Nailon	Muy difícil de imprimir. Flexibilidad media y resistencia muy alta.	Prototipos funcionales y piezas resistentes al desgaste.
TPU (poliuretano termoplástico)	Facilidad de impresión baja. Flexibilidad muy alta y resistencia media. Muy buena amortiguación.	Prototipos flexibles. Modelos conceptuales. Recubrimiento de piezas.
PVA (alcohol polivinílico)	Facilidad de impresión media. Soluble en agua.	Material de soporte y moldes.
HIPS (poliestireno de alto impacto)	Facilidad de impresión media. Soluble en agua.	Material de soporte.
Materiales compuestos (fibra de carbono, kevlar, fibra de vidrio)	Compatibilidad limitada con algunas impresoras. Baja flexibilidad y alta resistencia.	Prototipos funcionales y guías, fijaciones y herramientas.

Tras valorar las propiedades y aplicaciones de cada material, así como las características de la impresora, se realiza una primera selección para la impresión de las distintas partes del violín:

ABS: se fabrica a partir del petróleo, al igual que otros muchos plásticos, pero es reciclable. Este polímero termoplástico se sintetiza a partir de tres monómeros: acrilonitrilo (25%), butadieno (25%) y estireno (50%). La variación en las proporciones de cada uno de los monómeros puede

modificar sus propiedades, rigidez, brillo, resistencia al impacto, propiedades a bajas temperaturas... Es uno de los materiales más utilizados en la impresión 3D por FFF, junto al PLA, pero también se puede encontrar en forma de resina, permitiendo su uso en métodos de fotopolimeración. El ABS tiene una temperatura de fusión de unos 200 °C, por lo que la temperatura de extrusión ronda entre los 230 °C y 260 °C (más alta que la del PLA). Debido a que se contrae al entrar en contacto con el aire, es necesario utilizar una bandeja de impresión precalentada, entre 80 °C y 130 °C [66].

PLA: se fabrica a partir de fuentes orgánicas, como el maíz o la caña de azúcar, en un proceso de fermentación que da como resultado la producción de ácido L-láctico, que es el componente básico del PLA. Se trata, por tanto, de un material ecológico y renovable que, en determinadas condiciones de humedad y temperatura, puede ser biodegradable, especialmente si se somete a un proceso de compostaje industrial. Lo desarrolló el químico Wallace Carothers en 1930, al igual que el nailon y el neopreno, y se ha convertido en uno de los termoplásticos más sostenibles. Se suele utilizar en forma de filamento, pero también se puede encontrar en forma de gránulos o pellets. El PLA tiene una temperatura de fusión de 170-180 °C. A diferencia del ABS, no necesita una bandeja calefactada o una cámara de impresión cerrada [67].

PVA: es un polvo blanquecino e inodoro que se produce por hidrólisis del acetato de polivinilo, siendo un polímero sintético biodegradable. Este material es, por tanto, respetuoso con el medio ambiente. Es soluble en agua, pero, dependiendo del grado de humedad, puede volverse flexible y elástico. El PVA es muy apreciado como material de soporte en impresión 3D, ya que es fácil de eliminar con agua, por lo que se evita utilizar disolventes que puedan dañar la pieza. Para su mantenimiento, el material debe almacenarse en un lugar fresco, a 15-25 °C, protegido de la luz y del polvo. Su temperatura de impresión está en torno a los 180 °C, por debajo de su temperatura de fusión (230 °C) y evitando llegar a su temperatura de degeneración (200 °C). Combina bien con materiales con un punto de fusión similar, como el PLA [68].






Figura 46. Bobinas de filamento PLA para impresora 3D [69]

Los datos de tolerancia y de mínimo grosor se pared de ABS y PLA son los mismos, 0.5 mm y 1-2 mm, respectivamente, adecuados para la creación de prototipos.

Los tres materiales seleccionados cumplen los requisitos necesarios para nuestro proyecto. Para tomar la decisión de cuál o cuáles de ellos emplear, se procede a comparar los pros y los contras de cada uno de ellos [69], revisando, a su vez, las especificaciones de las bobinas de filamento que utiliza la impresora Raise3D [70]. La siguiente tabla incluye un breve resumen del análisis de las propiedades técnicas y mecánicas de cada material (resistencia, flexibilidad o comportamiento ante cambios de humedad y temperatura), así como otros aspectos prácticos como el peso, el precio de las bobinas compatibles, la sostenibilidad o la facilidad de impresión:

Tabla 12. ABS, PLA y PVA: Ventajas y desventajas

MATERIAL	VENTAJAS	DESVENTAJAS
 <p>ABS 1.75 mm / 1 000 g / 31.34 €</p>	<p>Estable a altas temperaturas, entre 80 °C y 90 °C.</p> <p>Conserva tenacidad a diferentes temperaturas.</p> <p>Alta capacidad de mecanizado.</p> <p>Resistente a ataques químicos y a impactos.</p>	<p>Necesaria cierta experiencia en impresión 3D.</p> <p>Mayor dificultad de impresión.</p> <p>Contracción entre capas más rápida, puede causar resquebrajamiento.</p> <p>Puede producirse el efecto <i>warping</i>.</p> <p>Emite vapores nocivos.</p>
 <p>PLA 1.75 mm / 1 000 g / 31.34 €</p>	<p>Mayor facilidad de impresión.</p> <p>No necesita cama caliente.</p> <p>Muy estable.</p> <p>Mayor velocidad de impresión.</p> <p>Origen orgánico, reciclable y biodegradable.</p> <p>Variedad de colores y acabados brillantes.</p>	<p>Baja resistencia térmica a partir de los 60 °C.</p> <p>Más frágil, poca resistencia mecánica.</p> <p>Sensible a la humedad.</p>
 <p>PVA 1.75 mm / 750 g / 94.90 €</p>	<p>Soluble en agua.</p> <p>Ideal para soportes complejos.</p> <p>Material biodegradable no tóxico.</p> <p>Incoloro e inodoro.</p> <p>Trabaja muy bien con el PLA.</p>	<p>Absorbe fácilmente la humedad.</p> <p>Requiere de un almacenamiento especial.</p> <p>Necesita una impresora con doble extrusor.</p> <p>Es cuatro veces más caro que el ABS y el PLA.</p>

Tanto ABS como PLA son opciones válidas para este proyecto, pero las ventajas que presenta el segundo sobre el primero decanta la balanza sobre el PLA: es mucho más fácil de imprimir, no requiere cama caliente, es menos propenso a las deformaciones, no emite vapores nocivos, es más sostenible y tiene mayor variedad de colores y acabados brillantes.

Respecto al PVA, que se había seleccionado como material de soporte, se descarta inicialmente debido a su alto coste, 4 veces superior a los otros dos materiales; y si bien es una buena opción utilizarlo junto al PLA porque facilita la construcción de piezas con cavidades internas y voladizos, también puede dificultar la impresión y aumentar el tiempo de fabricación. Por todo ello, se toma la decisión de iniciar el proceso de fabricación con un único material de impresión, el PLA, y, tras observar el resultado, valorar la necesidad de incorporar o no un material de soporte adicional.

6.3. Impresiones

6.3.1. Caja de resonancia

Tapa y base

El proceso de fabricación se inicia con la impresión del primer diseño de las piezas tapa y base. Se considera, en un primer lugar, la altura de capa más adecuada, teniendo en cuenta que una altura de capa menor proporciona un mejor acabado superficial, pero, también, un considerable aumento del tiempo de impresión; mientras que una altura de capa mayor reduce el tiempo de fabricación y el consumo de material, pero pierde calidad superficial.

Tras comparar las opciones disponibles en el programa ideaMaker, se opta por imprimir ambas piezas con una altura de capa de 0.3 mm y a una velocidad de 40 mm/s, una configuración adecuada al tamaño de las piezas, con unos tiempos de impresión y un consumo de material razonables, pero que no comprometen el acabado final. Esta altura de capa permite reducir significativamente el tiempo de fabricación al disminuir el número total de capas necesarias. Por otro lado, la velocidad seleccionada garantiza la correcta adhesión entre capas, evitando los defectos debidos a los movimientos excesivamente rápidos.

Tabla 13. Parámetros de impresión para el primer diseño de las piezas tapa y base

ALTURA DE CAPA	PIEZA	TIEMPO	CONSUMO DE MATERIAL
0.1 mm	Tapa	4 h 20 min 0 s	41.2 g
	Base	21 h 10 min 42 s	140.0 g
0.2 mm	Tapa	2 h 54 min 18 s	41.5 g
	Base	10 h 30 min 5 s	137.8 g
0.3 mm	Tapa	1 h 38 min 44 s	40.9 g
	Base	6 h 16 min 45 s	127.5 g

La tapa superior se orienta de modo que las espigas quedan hacia arriba, evitando así la necesidad de material de soporte. La base, por su parte, aunque se coloca en la posición más favorable posible, requiere de una pequeña cantidad de material de soporte en la zona del botón que garantiza su correcta impresión.

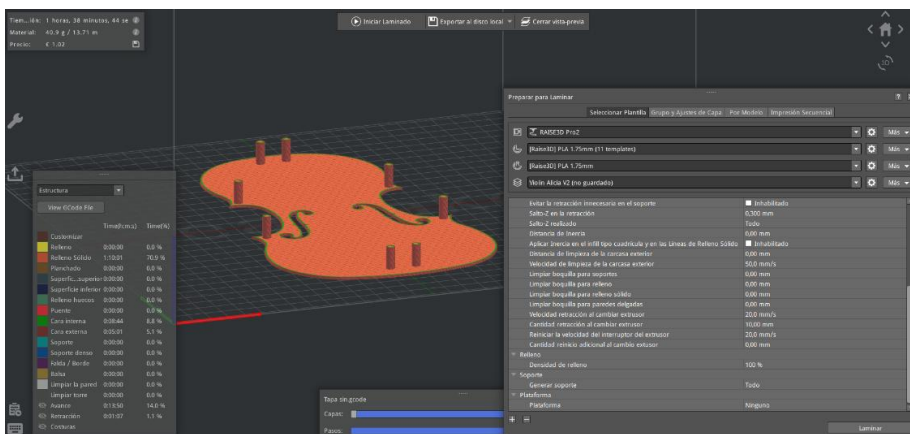


Figura 47. Impresión primer diseño de la pieza tapa

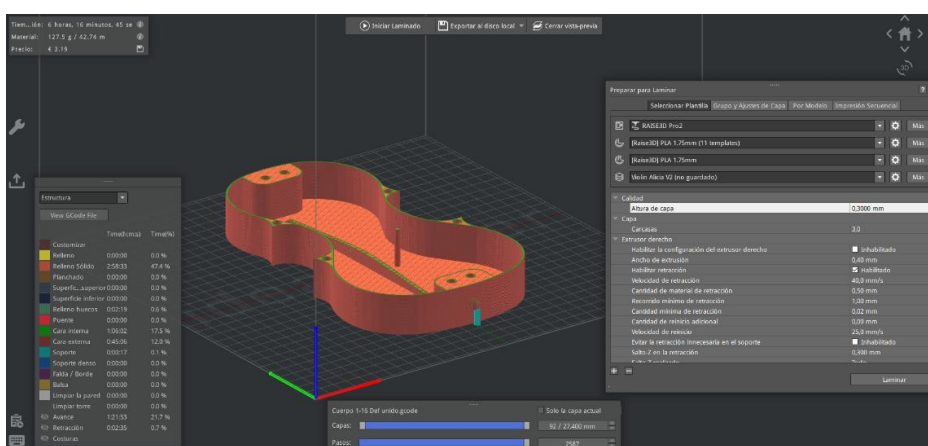


Figura 48. Impresión primer diseño de la pieza base

Como resultado de estas primeras impresiones se obtienen piezas con un buen acabado superficial, pero con un grosor de pared insuficiente para los requisitos del proyecto, a simple vista son piezas demasiado ligeras y poco resistentes. Por ello, se inicia la impresión del segundo diseño de las piezas tapa y base, cuyos cambios más significativos son el grosor de ambas tablas, que pasan de 1.62 mm a 4 mm, y el grosor del aro, que pasa de 1.62 mm a 3.5 mm.

Para imprimir la tapa se consideran dos opciones: en la primera (A), se coloca de manera que las espigas están orientadas hacia arriba, evitando el uso de material de soporte; en la segunda opción (B), las espigas están orientadas hacia abajo y requiere mucho material de soporte.

Los parámetros de impresión de estas dos piezas se muestran a continuación:

Tabla 14. Parámetros de impresión para el segundo diseño de las piezas tapa y base

ALTURA DE CAPA	PIEZA	OPCIÓN	TIEMPO	CONSUMO DE MATERIAL
0.1 mm	Tapa	A	9 h 49 min 14 s	102.6 g
		B	17 h 6 min 26 s	161.6 g
	Base	31 h 36 min 41 s	221.9 g	
0.2 mm	Tapa	A	6 h 8 min 27 s	104.9 g
		B	9 h 47 min 7 s	161.1 g
	Base	17 h 45 min 16 s	223.8 g	
0.3 mm	Tapa	A	3 h 18 min 11 s	101.1 g
		B	5 h 23 min 56 s	155.1 g
	Base	10 h 22 min 0 s	213.8 g	

Se opta por imprimir ambas piezas con una altura de capa de 0.3 mm y una velocidad de 40 m/s, una configuración que, en las pruebas del primer diseño, resulta ser la adecuada en cuanto a tiempos y consumo de material de impresión, sin perjuicio del acabado superficial. Respecto a las dos opciones para la orientación de la tapa, se selecciona inicialmente la opción A, claramente más favorable, con el objetivo de comprobar si el resultado es funcional y evitar así a la opción B, que presenta más inconvenientes.

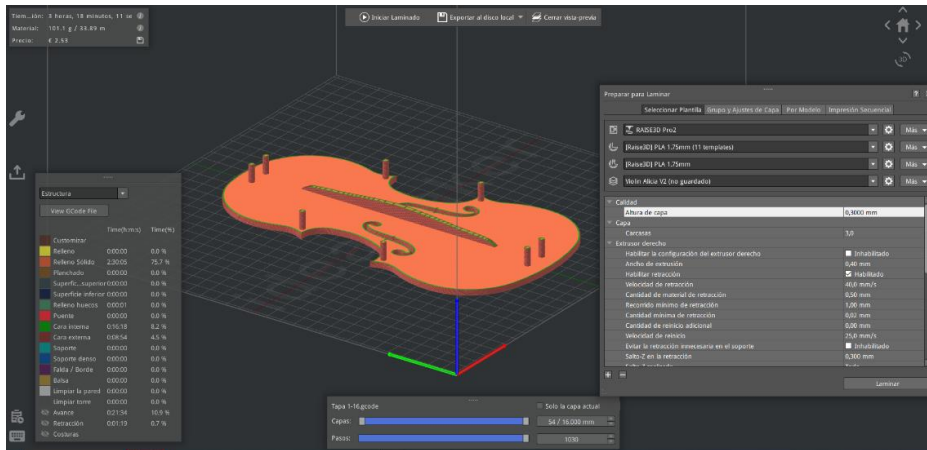


Figura 49. Impresión segundo diseño de la pieza tapa (Opción A)

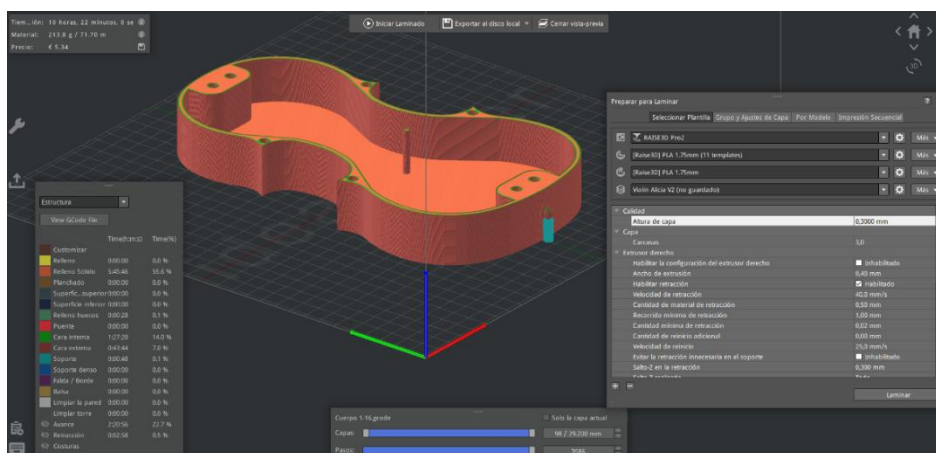


Figura 50. Impresión segundo diseño de base

Ambas piezas presentan una notable mejora respecto al primer diseño, ganando robustez y funcionalidad. Por otro lado, la impresión de la tapa siguiendo la opción A ofrece un resultado óptimo, tanto en el acabado superficial como en el desempeño funcional, lo que permite descartar la opción B. En la siguiente imagen se aprecia, en color azul, el material de soporte que hubiese sido necesario con esta opción.

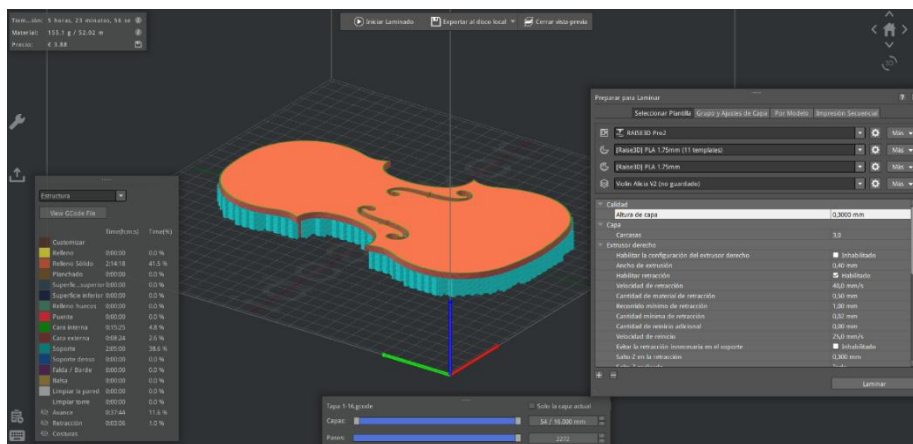


Figura 51. Impresión alternativa del segundo diseño de la pieza tapa (Opción B)

Puente

Para la impresión del puente se consideran dos posibles orientaciones: una horizontal (A) y otra vertical (B). Al tratarse de una pieza pequeña, se prioriza el acabado, ya que las diferencias en el tiempo de impresión y el consumo de material es mínima. Por ello, se opta por imprimir el puente con una altura de capa de 0.1 mm y una velocidad de 40 m/s. Esta altura de capa permite obtener una pieza más resistente y con un acabado superficial más detallado, lo cual resulta fundamental en una pieza pequeña con un diseño ornamental que va a estar sometida a la tensión de las cuerdas.

Tabla 15. Parámetros de impresión para la pieza puente

ALTURA DE CAPA	PIEZA	OPCIÓN	TIEMPO	CONSUMO DE MATERIAL
0.1 mm	Puente	A	0 h 30 min 28 s	2.3 g
		B	1 h 16 min 0 s	2.5 g
0.2 mm	Puente	A	0 h 15 min 51 s	2.4 g
		B	0 h 40 min 44 s	2.5 g
0.3 mm	Puente	A	0 h 8 min 0 s	1.7 g
		B	0 h 29 min 0 s	2.6 g

Respecto a la orientación de la pieza, la opción elegida es la A, dado el incremento en el tiempo de impresión de la opción B.

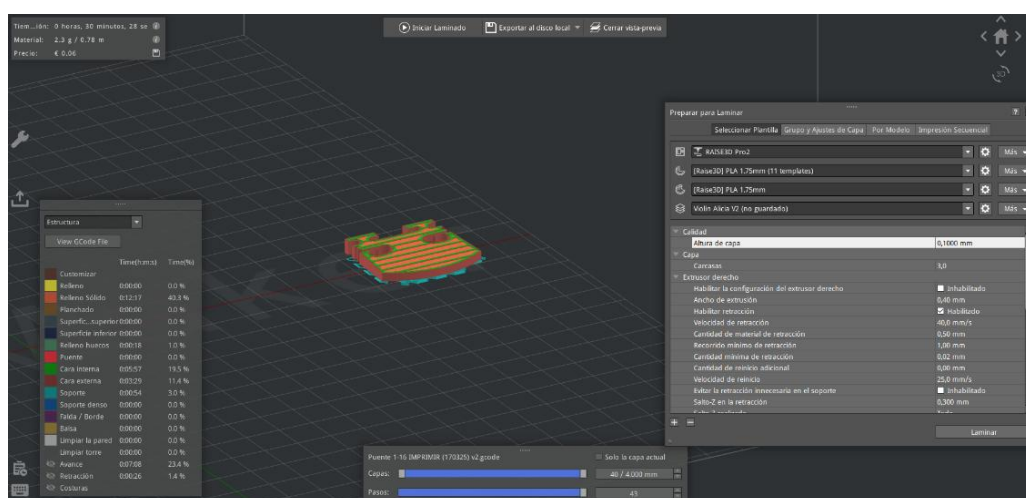


Figura 52. Impresión del puente (Opción A)

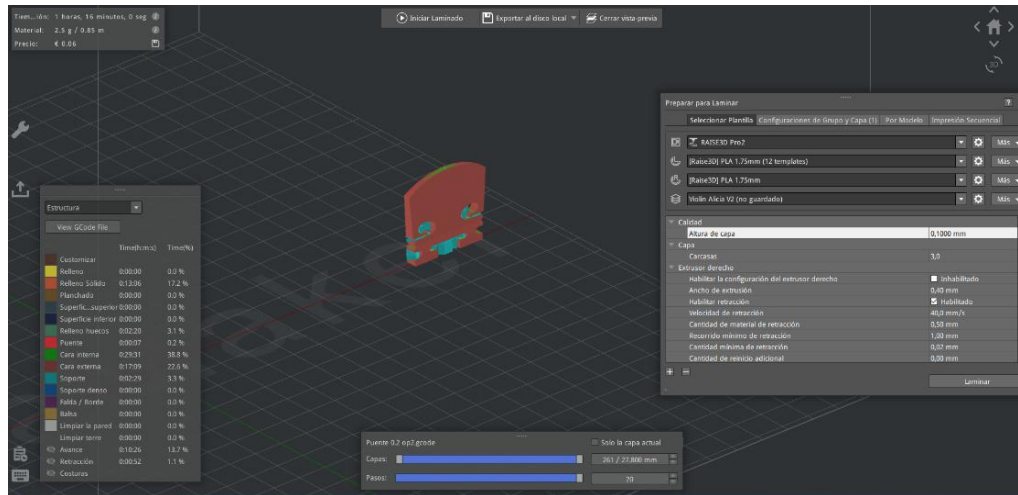


Figura 53. Impresión del puente (Opción B)

6.3.2. Mástil

Mango y diapasón

Las piezas mango y diapasón se imprimen simultáneamente. Al igual que con el puente, se opta por elegir una altura de capa de 0.1 mm, la mayor calidad posible, ya que son elementos clave en la ejecución del violín.

Tabla 16. Parámetros de impresión para las piezas mango y diapasón

ALTURA DE CAPA	PIEZAS	TIEMPO	CONSUMO DE MATERIAL
0.1 mm	Mango y diapasón	6 h 39 min 54 s	68.3 g
0.2 mm	Mango y diapasón	5 h 1 min 42 s	70.1 g
0.3 mm	Mango y diapasón	4h 21 min 12 s	70.1 g

Para evitar el uso de material de soporte, el mango se orienta con la zona de los orificios apoyada en el plano horizontal, mientras que el diapasón se coloca con la superficie de las cuerdas hacia abajo y las espigas orientadas hacia arriba.

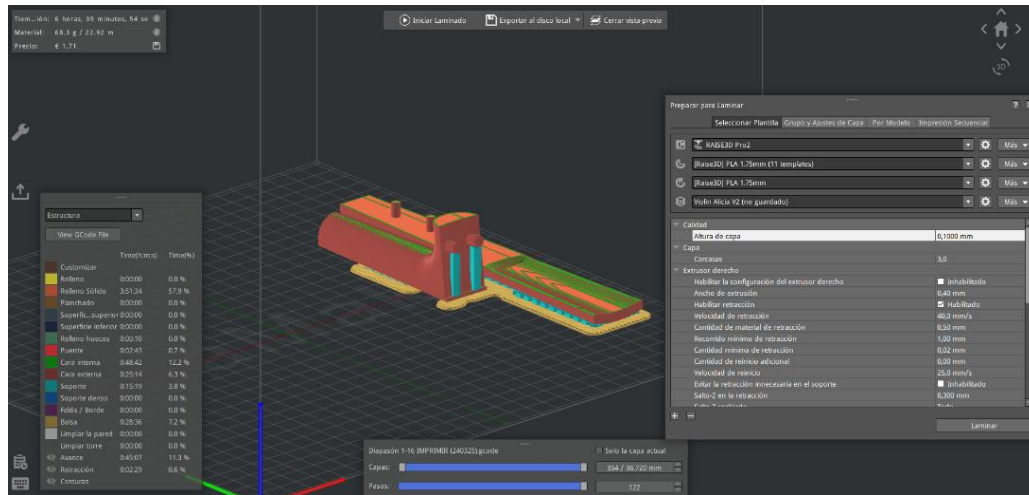


Figura 54. Impresión del mango y el diapason

Clavijero y voluta

Para la impresión del clavijero y la voluta se contemplan dos posibles orientaciones. Si bien los parámetros de impresión apenas varían entre ambas, se selecciona la opción que facilita un mejor acabado tanto en la voluta como en los orificios de las clavijas. Respecto a la altura de capa, se opta por la mayor, 0.3 mm, y se mantiene la velocidad de impresión de 40 m/s, como en el resto de las piezas.

Tabla 17. Parámetros de impresión para las piezas del clavijero y la voluta

ALTURA DE CAPA	PIEZA	OPCIÓN	TIEMPO	CONSUMO DE MATERIAL
0.1 mm	Clavijero/ Voluta	A	5 h 35 min 28 s	36.3 g
		B	5 h 53 min 20 s	34.8 g
0.2 mm	Clavijero/ Voluta	A	3 h 4 min 11 s	36.3 g
		B	3 h 5 min 57 s	34.8 g
0.3 mm	Clavijero /Voluta	A	1 h 52 min 36 s	35.2 g
		B	2 h 3 min 33 s	35.7 g

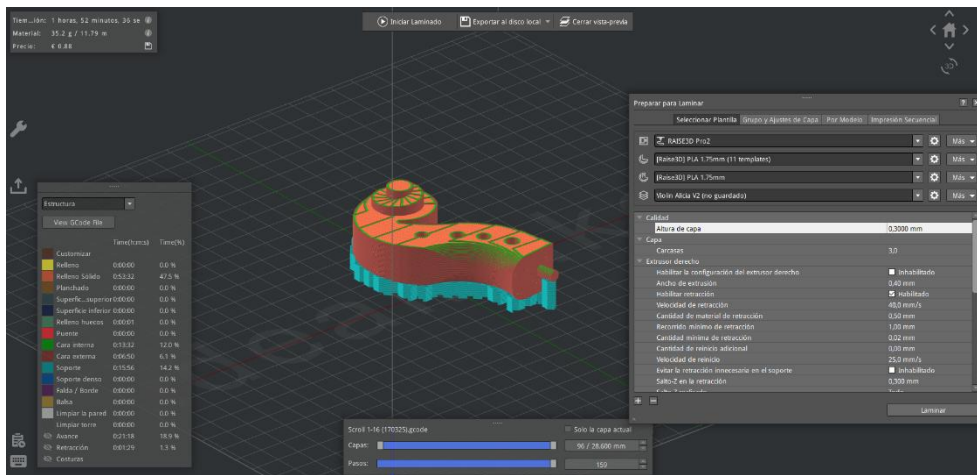


Figura 55. Impresión del clavijero y la voluta (Opción A)

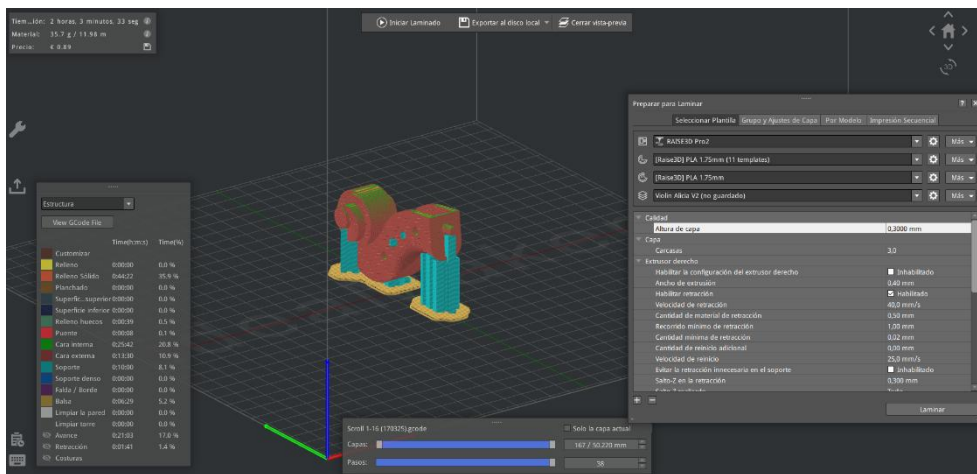


Figura 56. Impresión del clavijero y la voluta (Opción B)

Clavijas

Nuevamente, se valoran dos posibles orientaciones para la impresión de las clavijas: una vertical (A) y otra horizontal (B). Tampoco en esta ocasión los parámetros de impresión varían significativamente entre las dos opciones, por lo que se escoge la opción A, que requiere menos material de soporte, ocupa menos superficie en la cama de impresión y minimiza la necesidad de posprocesado.

Las clavijas se imprimen en tres tandas: dos, individualmente y las otras dos, de manera conjunta. A la vista de los parámetros de impresión, en este caso, se opta por una altura de capa de 0.2 mm, y la velocidad es, como siempre, de 40 m/s.

Tabla 18. Parámetros de impresión para las clavijas (por unidad)

ALTURA DE CAPA	PIEZAS	OPCIÓN	TIEMPO	CONSUMO DE MATERIAL
0.1 mm	Clavijas	A	1 h 7 min 25 s	2.0 g
		B	0 h 20 min 34 s	1.9 g
0.2 mm	Clavijas	A	0 h 36 min 24 s	2.0 g
		B	0 h 13 min 53 s	1.9 g
0.3 mm	Clavijas	A	0 h 25 min 54 s	2.0 g
		B	0 h 12 min 3 s	1.9 g

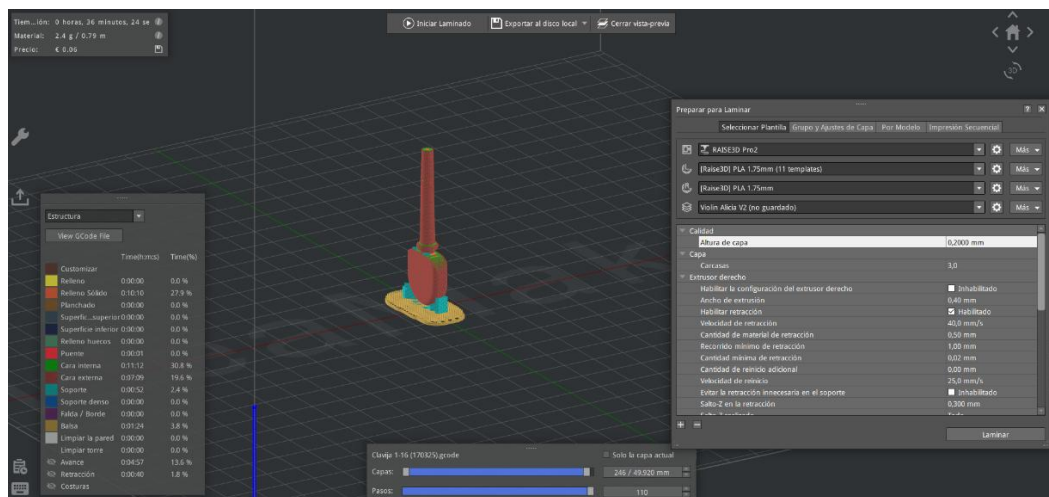


Figura 57. Parámetros de impresión de las clavijas (Opción A)

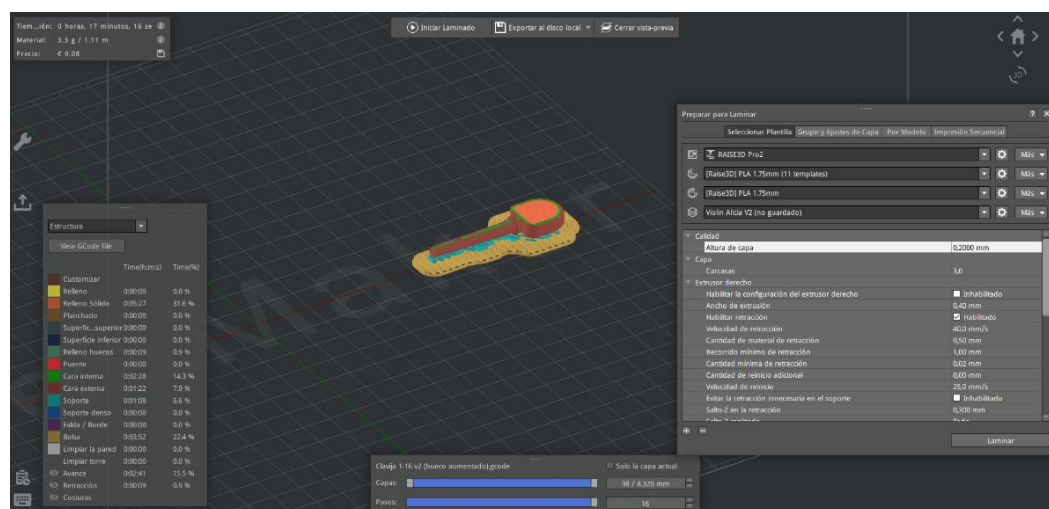


Figura 58. Parámetros de impresión de las clavijas (Opción B)

6.3.3. Cordal

Para la impresión del cordal también se consideran dos posibles orientaciones: con la superficie convexa hacia abajo (A) y con la superficie convexa hacia arriba (B). Al no haber mucha diferencia en cuanto al tiempo y material utilizado, se opta en un primer momento por imprimir la primera opción, con el material de soporte sobre la superficie convexa. Dado que el cordal es una pieza pequeña, que está sometida a mucha tensión al sujetar las cuerdas, se decide imprimirla con una altura de capa de 0.1 mm, para conseguir una pieza más compacta y resistente. La velocidad de impresión es de 40 m/s.

Tabla 19. Parámetros de impresión para el cordal

ALTURA DE CAPA	PIEZA	OPCIÓN	TIEMPO	CONSUMO DE MATERIAL
0.1 mm	Cordal	A	2 h 7 min 56 s	15.7 g
		B	2 h 6 min 14 s	14.9 g
0.2 mm	Cordal	A	1 h 20 min 13 s	12.1 g
		B	1 h 19 min 57 s	11.8 g
0.3 mm	Cordal	A	1 h 10 min 10 s	12.1 g
		B	1 h 10 min 15 s	11.8 g

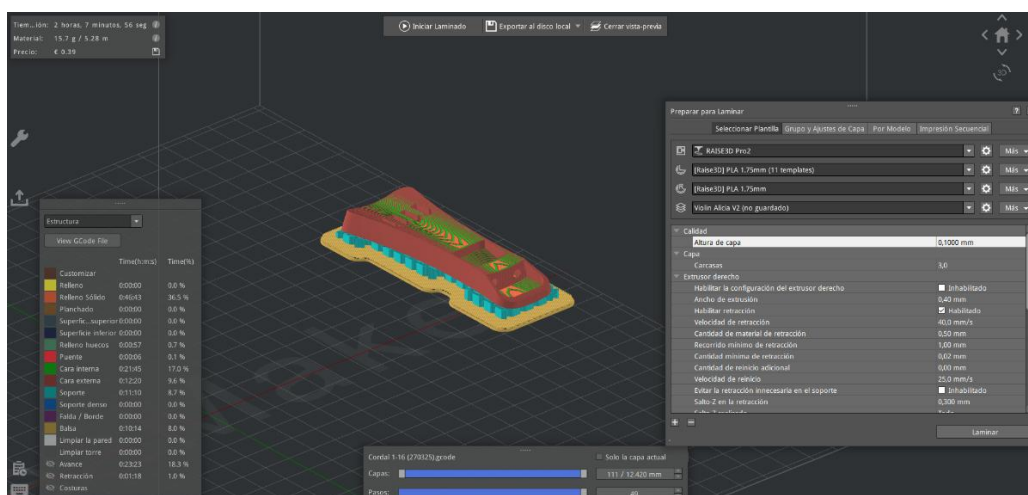


Figura 59. Parámetros de impresión del cordal (Opción A)

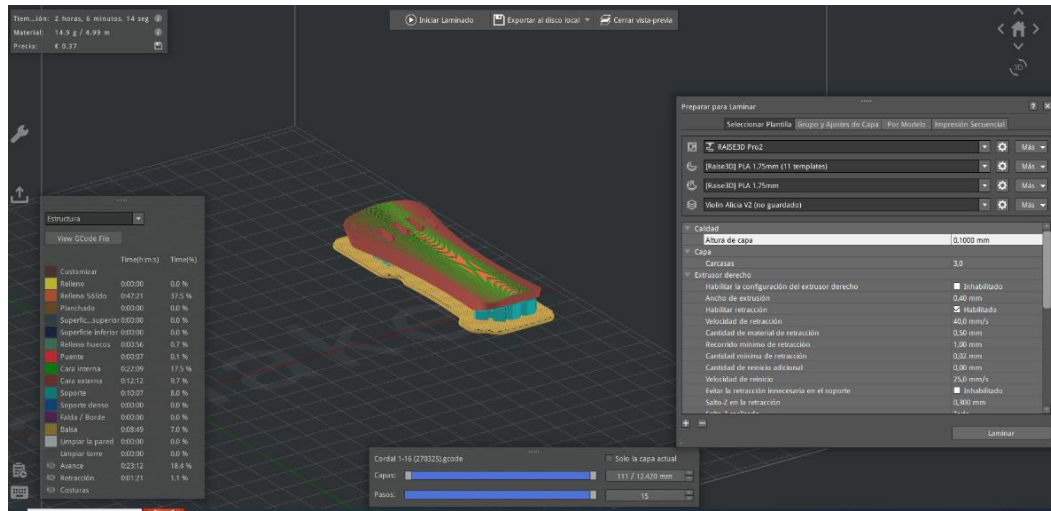


Figura 60. Parámetros de impresión del cordal (Opción B)

6.3.4. Ayudas

Finalmente, se imprimen simultáneamente las dos ayudas diseñadas, la del agarre del arco y la de la guía del arco. Se decide imprimir el agarre con una altura de capa de 0.3 mm y la guía, con una altura de capa de 0.2 mm y a una velocidad de 40 m/s. El tiempo de impresión del agarre es de 42 min y 13 s, consumiendo 3.4 g de material, mientras que el tiempo de la guía es 3 h, 4 min y 26 s y consume 24.6 g de material.

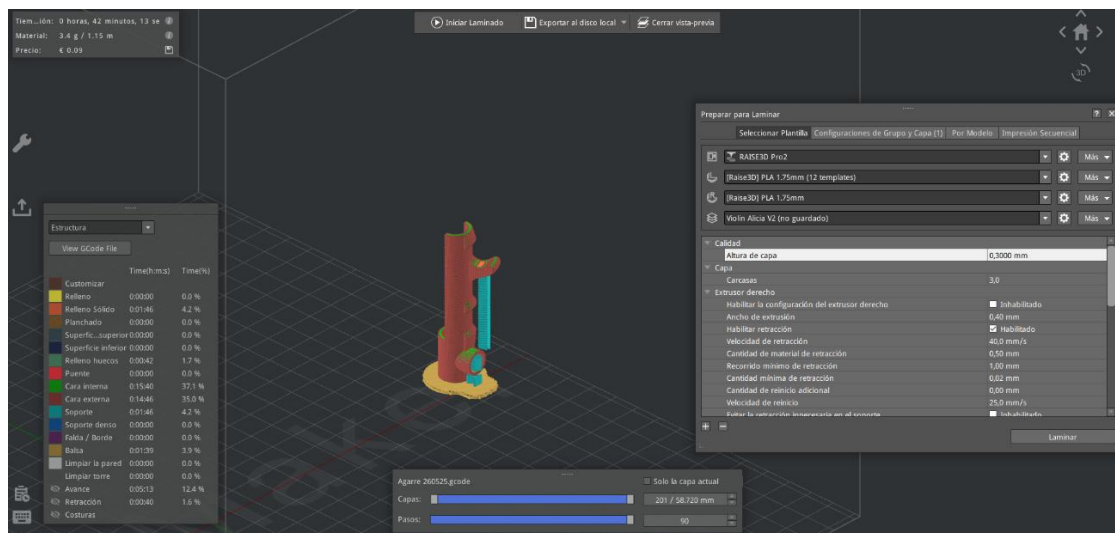


Figura 61. Parámetros de impresión del agarre del arco

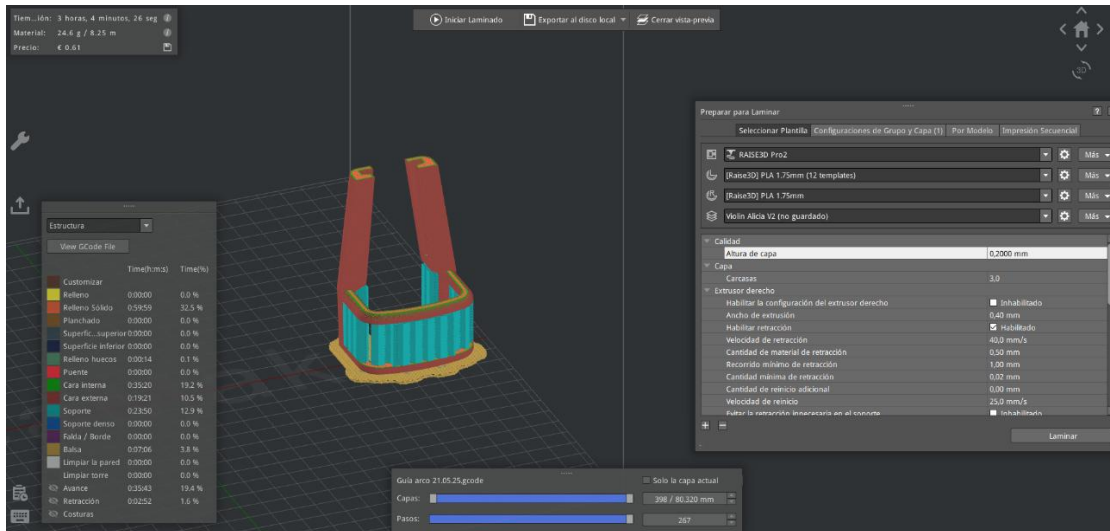


Figura 62. Parámetros de impresión de la guía del arco

6.3.5. Reimpresiones

Tras concluir con la impresión de todas las piezas diseñadas, se muestran al lutier para su revisión y, como ya se ha comentado, sugiere modificar algunos detalles del diseño, lo que hace necesario realizar una nueva impresión de las piezas adaptadas.

Tapa

Se modifica la longitud de la barra armónica y se desplazan las espigas superiores e inferiores hacia los extremos. Para la nueva impresión se selecciona la misma altura de capa, 0.3 mm, y velocidad de impresión, 40 m/s. El tiempo de impresión es de 4 h, 52 min y 48 s y consume 103.4 g de material.

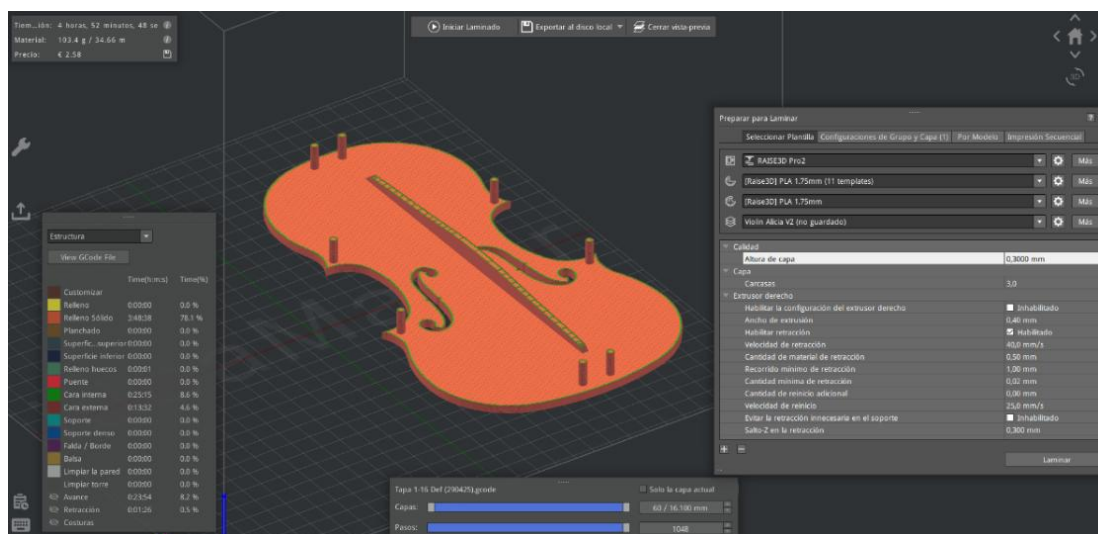


Figura 63. Parámetros para la reimpresión de la tapa

Base

Se modifica el ancho de los bloques de ensamblaje superior e inferior y se desplazan hacia los extremos los orificios para las espigas. Para la nueva impresión se selecciona la misma altura de capa, 0.3 mm, y velocidad de impresión, 40 m/s. El tiempo de impresión es de 12 h, 17 min y 4 s y consume 201.2 g de material.

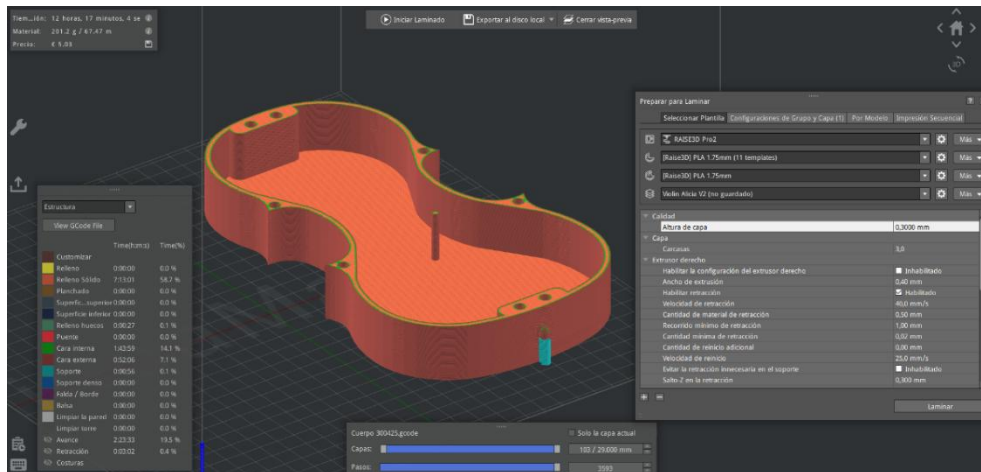


Figura 64. Parámetros para la reimpresión de la base

Diapasón

El diseño del diapason sufre dos pequeñas modificaciones: disminución progresiva del grosor en la superficie externa a partir del mango y ligero aumento de la altura de la cejuela. Para la nueva impresión se selecciona la misma altura de capa, 0.1 mm, y velocidad de impresión, 40 m/s. Para mejorar el acabado externo, la pieza se imprime con la superficie convexa hacia arriba. El tiempo de impresión es de 3 h, 37 min y 7 s y consume 41.2 g de material.

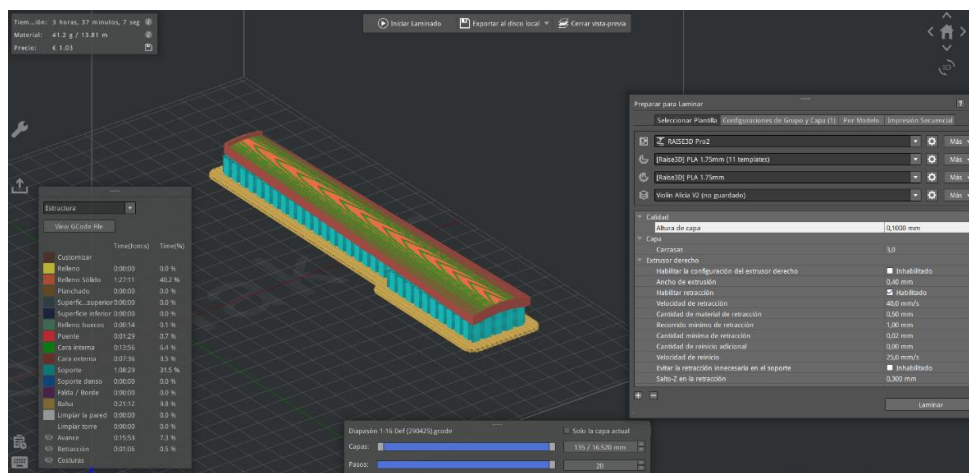


Figura 65. Parámetros para la reimpresión del diapason

Cordal

En el cordal se incorpora una cejuela por encima de las ranuras para las cuerdas y se acorta su longitud. Para la nueva impresión se selecciona la misma altura de capa, 0.1 mm, y velocidad de impresión, 40 m/s. Para mejorar el acabado de la superficie externa, se decide imprimir la segunda opción (superficie convexa hacia arriba). El tiempo de impresión es de 1 h, 54 min y 53 s y consume 13.9 g de material.

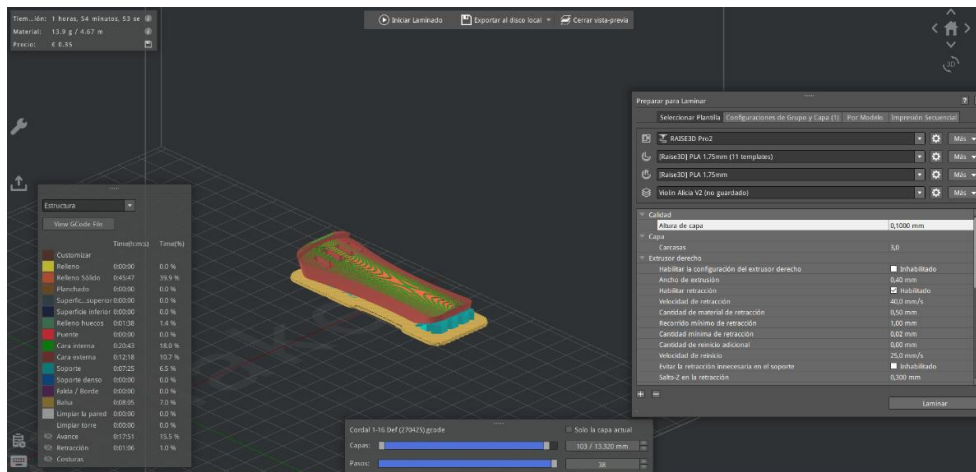


Figura 66. Parámetros para la reimpresión del cordal

6.4. Ensamblaje y tratamientos

Una vez impresas todas las piezas finales del violín, se procede a retirar cuidadosamente el material de soporte y a lijar cada una de ellas para obtener un acabado más suave y agradable al tacto. Para este proceso se utilizan dos tipos de papel de lija, P80 y P180, y varias lijas metálicas de diverso calibre. Al lijar, se eliminan imperfecciones y se afina la superficie progresivamente.

Tras finalizar el lijado, se inicia el ensamblaje de las piezas utilizando un pegamento universal (Imedio, UHU) adecuado para materiales plásticos. Los tiempos de secado del adhesivo en cada una de las fases son muy cortos, de apenas unos minutos.

El proceso comienza uniendo la tapa y la base del violín, aplicando el adhesivo de manera uniforme por toda la superficie de contacto. Durante el secado, se coloca un peso encima de las piezas para asegurar una unión firme y homogénea.

A continuación, se ensamblan el mango y el diapason utilizando el mismo adhesivo y empleando, durante el secado, pinzas para mantener una presión constante y uniforme a lo largo de la superficie pegada. Tras secar, se procede a fijar el clavijero y la voluta al extremo del mango.

Montados la caja de resonancia y el mástil se procede a unirlos, asegurando la correcta alineación de todas las piezas para garantizar la estabilidad y funcionalidad del instrumento.

Finalmente, tras concluir la unión de todas las piezas que van ensambladas, se realiza el montaje del resto de los elementos, indispensables para la producción sonora del violín: se colocan las cuerdas, el cordal y el puente con la ayuda del lutier, quien ajusta y verifica el resultado final.

Antes de colocar las cuerdas se realizan con una lima cuatro marcas tanto en el puente como en la cejilla del diapasón. Para el puente se utiliza una herramienta especializada que permite marcar las posiciones correctas de las cuerdas en función del tamaño del violín.



Figura 67. Herramienta para la posición de las cuerdas en el puente

Para el diapasón se aplica el teorema de Tales, se colocan cuatro capas de cinta de carroceros en la zona más distal, quedando a la altura de la cejilla, y sobre ella se marcan las posiciones exactas y equidistantes de las cuerdas, como se muestra en la imagen.

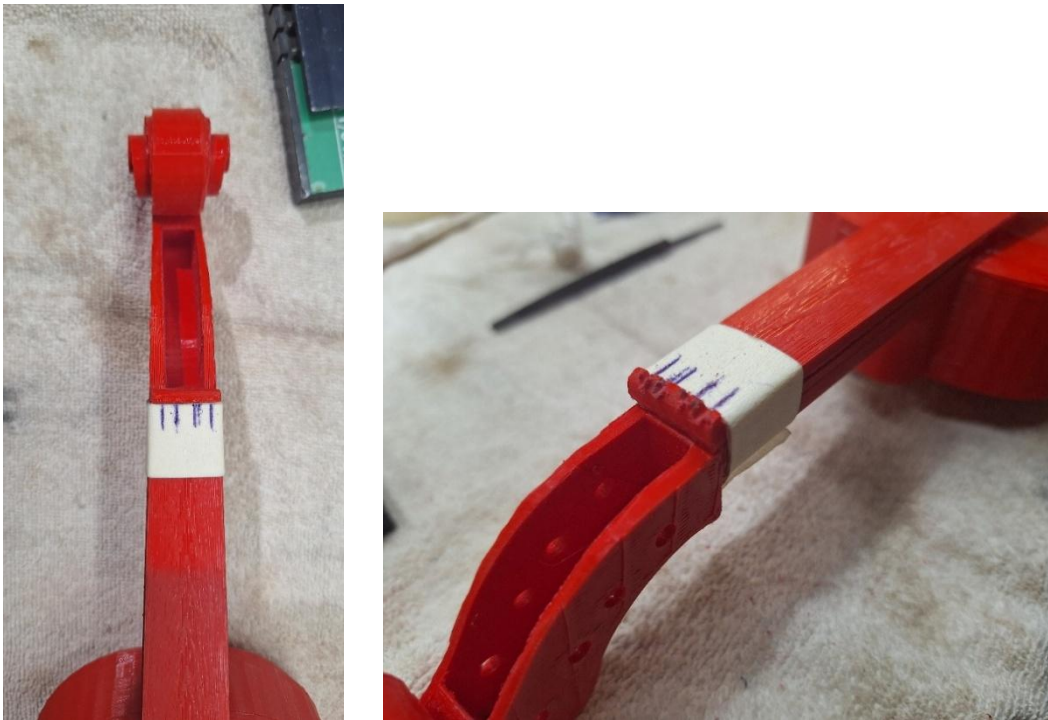


Figura 68. Marcas para la posición de las cuerdas en la cejilla

Posteriormente, se fija un cordón de sisal al cordal, para unirlo al botón, y se colocan las cuerdas en el orden correcto, desde la más aguda a la más grave, asegurando así la disposición adecuada para el funcionamiento y afinación del instrumento.



Figura 69. Colocación del cordal

Por último, se anclan las cuerdas a las clavijas, enrollándolas correctamente para evitar deslizamientos y facilitar el ajuste de la tensión. A continuación, se ubica el puente en la tapa armónica, alineándolo con cuidado sobre el alma y la barra armónica para

garantizar la máxima calidad sonora. Colocado el puente, se procede a tensar las cuerdas una a una y progresivamente, para evitar tensiones excesivas que puedan desplazar el puente, hasta conseguir la afinación correspondiente en cada cuerda.



Figura 70. Colocación de las clavijas

7. Validación del modelo

Tras diseñar y fabricar el violín mediante tecnología por deposición de filamento fundido (FFF) se evalúa el resultado del modelo desde el punto de vista funcional y acústico.

7.1. Análisis de resultados del modelo impreso

El modelo se ha diseñado respetando, en la medida de lo posible, las dimensiones y la forma de un violín tradicional de tamaño 1/16.

Las piezas impresas se han medido con un pie de rey para comprobar que se respetan las **medidas** del diseño original.

Tabla 20. Análisis de las medidas de las piezas impresas

PIEZA	VARIABLES	MEDIDA DISEÑO DIGITAL	MEDIDA PIEZAS IMPRESAS
Tapa	Largo	230.00 mm	230.00 mm
	Cintura	65.01 mm	65.30 mm
	Ancho superior	103.24 mm	102.90 mm
	Ancho inferior	129.05 mm	128.90 mm
	Grosor	4.00 mm	4.20 mm
Base	Largo	230.00 mm	230.00 mm
	Cintura	65.01 mm	65.30 mm
	Ancho superior	103.24 mm	102.90 mm
	Ancho inferior	129.05 mm	128.90 mm
	Altura exterior	29.07 mm	29.40 mm
Puente	Altura máxima	27.70 mm	27.90 mm
	Anchura máxima	30.30 mm	30.30 mm
	Anchura mínima	26.50 mm	26.90 mm

Mango	Longitud	92.00 mm	92.60 mm
	Base mayor	24.20 mm	24.20 mm
	Base menor	18.00 mm	18.50 mm
Diapasón	Longitud	180.10 mm	180.00 mm
	Base mayor	29.82 mm	29.30 mm
	Base menor	17.82 mm	18.50 mm
Clavijero y voluta	Longitud hasta el centro de la voluta	66.10 mm	67.00 mm
Clavijas (4)	Longitud total	49.00 mm	49.00 mm
	Diámetro		4.40 mm
Cordal	Longitud	73.82 mm	74.00 mm
	Anchura máxima	28.40 mm	28.50 mm
	Anchura mínima	17.12 mm	19.40 mm

Como se puede observar, las piezas impresas presentan ligeras variaciones en sus dimensiones con respecto a las medidas de los diseños; sin embargo, estas diferencias no afectan al resultado final del violín, respetando la geometría deseada.

Por otro lado, el **peso** del violín montado es de 398.00 gramos, un peso significativamente superior al de los violines tradicionales del mismo tamaño, cuyo peso suele oscilar entre 200.00 y 250.00 gramos, es decir, la mitad de lo que pesa un violín 4/4.

Además, la **superficie** impresa de las piezas presenta algunas imperfecciones, como hilos que pueden retirarse fácilmente en el proceso de lijado. Asimismo, la base muestra irregularidades superficiales que afectan al tacto y que se han intentado minimizar mediante el posprocesado. Aunque el resto de las piezas no presenta una superficie completamente lisa, el acabado es lo suficientemente uniforme como para no comprometer la estética ni el tacto del instrumento. Cabe señalar que algunas de las espigas impresas en orientación horizontal muestran ciertas irregularidades que pueden corregirse con facilidad.

La impresión de las **ayudas** es de buena calidad. El agarre del arco no requiere ningún tipo de posprocesado, salvo retirar el escaso material de soporte necesario. Por su parte, la guía del arco, además de la retirada de material de soporte, necesita del lijado

de las caras interiores de las “semicircunferencias”. Ambas piezas encajan sin problema en el violín diseñado.

El proceso de **montaje** no presenta mayores dificultades, tan solo hay que lijar levemente los orificios de la base para las espigas de la tapa, permitiendo que encajen de forma más fluida. El resto de las piezas encajan correctamente y pueden adherirse sin dificultad, aunque se observan irregularidades en las uniones de algunas de ellas.

Finalmente, durante el montaje de las cuerdas se comprueba el buen funcionamiento de las clavijas, así como la funcionalidad general del violín, además de comprobar que el instrumento soporta la tensión de las cuerdas.

A continuación, se muestran las imágenes de las piezas impresas y del violín tras su ensamblaje:

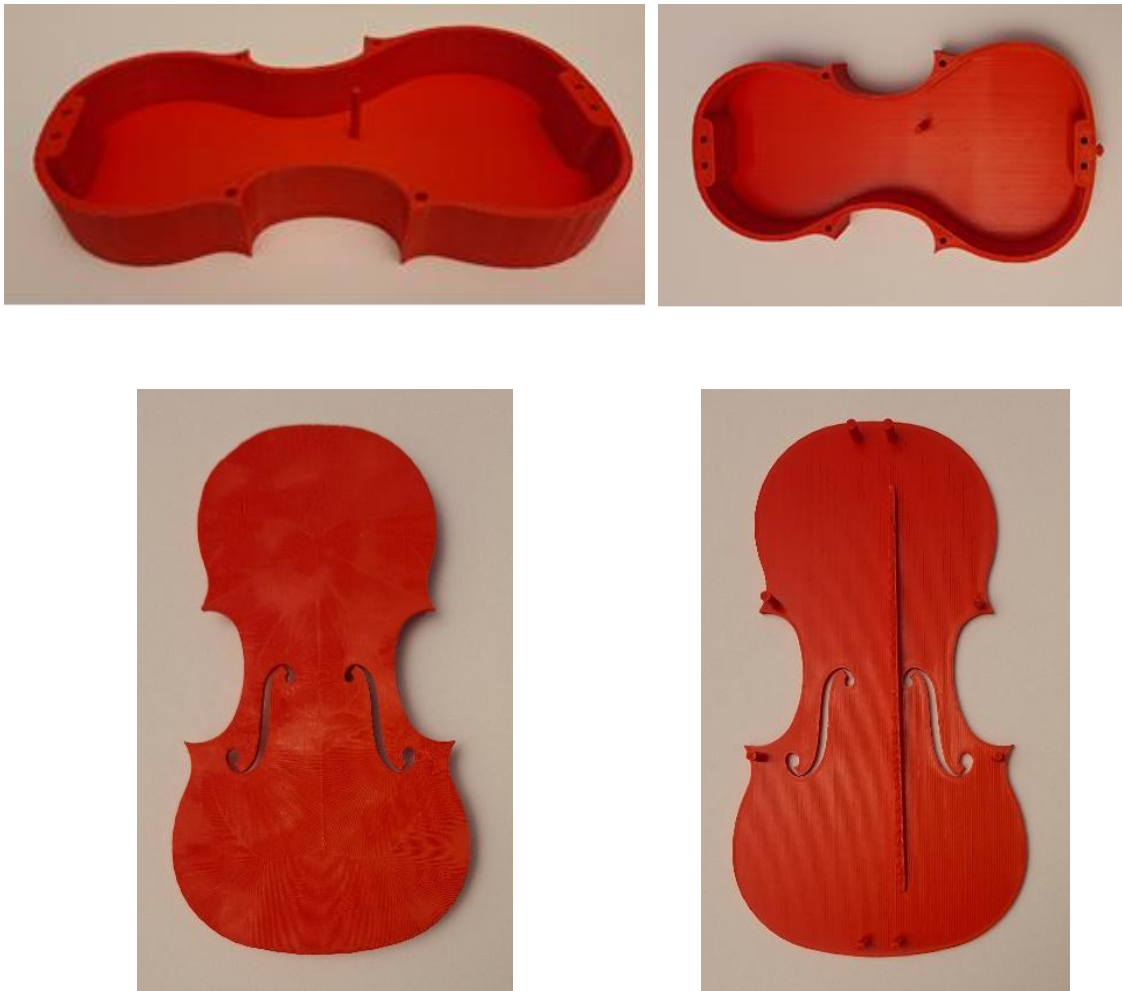


Figura 71. Base y tapa

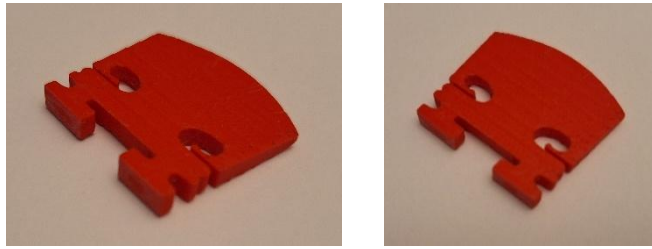


Figura 72. Puente

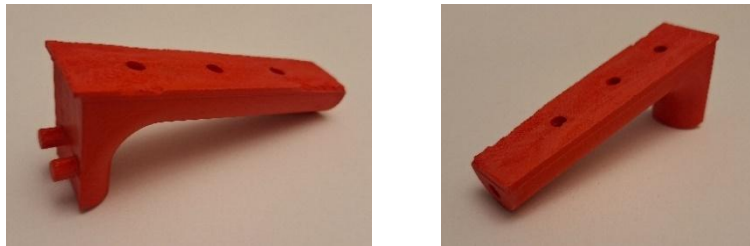


Figura 73. Mango



Figura 74. Diapasón



Figura 75. Cordal

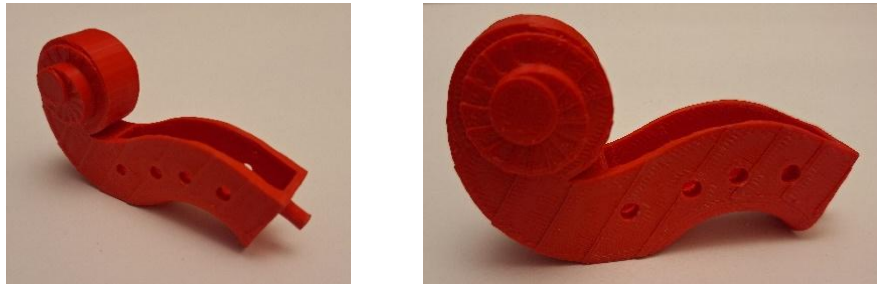


Figura 76. Clavijero y voluta

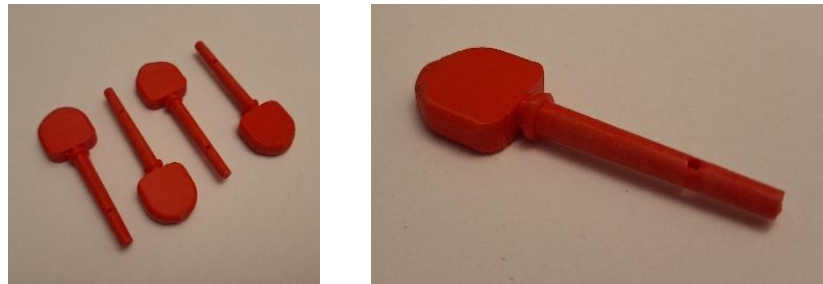


Figura 77. Clavijas

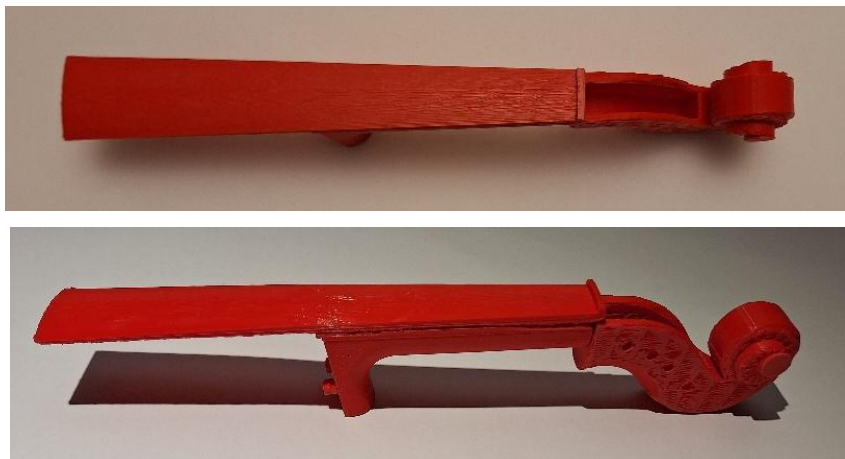


Figura 78. Mástil montado

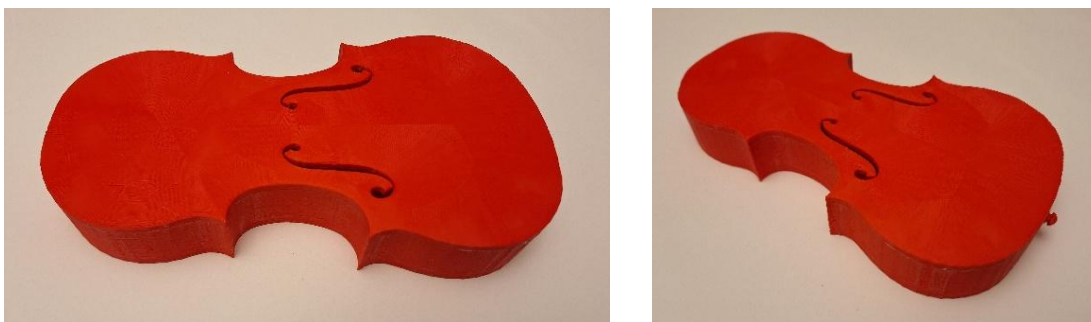


Figura 79. Caja de resonancia montada



Figura 80. Caja de resonancia y mástil montados



Figura 81. Montaje final del violín



Figura 82. Agarre del arco

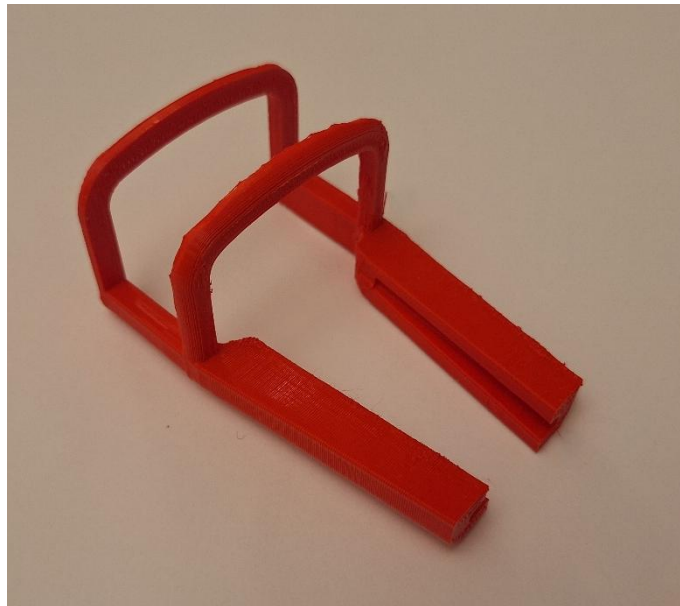


Figura 83. Guía del arco

7.2. Prueba de sonido

Una vez montado el violín, se procede a realizar el afinado de las cuerdas y una serie de pruebas de sonido destinadas a evaluar el comportamiento sonoro y funcional:

- **Afinación:** Una vez tensadas las cuerdas por el luter, se procede a realizar su afinación utilizando un afinador digital, con el objetivo de alcanzar la nota correspondiente para cada cuerda del violín: Mi (E), La (A), Re (D) y Sol (G). Como resultado, se consigue afinar cada cuerda, logrando valores muy próximos a la frecuencia estándar de referencia de cada una de ellas [71], lo que indica que el instrumento responde adecuadamente en términos de afinación y que puede utilizarse para la interpretación musical, habiendo obtenido desde este punto de vista un violín funcional:

Tabla 21. Afinación del violín impreso en 3D

NOTA	AFINACIÓN ESTÁNDAR	AFINACIÓN OBTENIDA
Mi (E)	658.3 Hz	649.4 Hz
La (A)	440.0 Hz	430.7 Hz
Re (D)	293.7 Hz	306.5 Hz
Sol (G)	190.8 Hz	189.8 Hz

- Calidad tonal: Se tocan algunos acordes para comprobar el comportamiento conjunto de las cuerdas y evaluar la riqueza armónica y la calidad tonal del instrumento. Durante las pruebas, se observa que se produce una armonía que recuerda a la de un violín tradicional y que se analiza en el siguiente apartado.
- Proyección del sonido: Se interpretan diversas notas a lo largo de todo el rango del violín para observar el comportamiento del sonido y se comprueba que es fuerte y claro en todas las notas, lo que indica una buena proyección sonora.
- Resonancia: Se golpea suavemente la tapa superior con los nudillos y se observa que la caja de resonancia responde con un sonido claro y definido, indicando una adecuada transmisión y amplificación de las vibraciones, lo que contribuye a la calidad acústica del violín.
- Uniformidad entre las cuerdas: Se verifica que las cuerdas presentan un comportamiento homogéneo en cuanto a respuesta y volumen. Al tocar las cuerdas simultáneamente es posible distinguir claramente cada una de ellas, confirmando una diferenciación tonal.
- Prueba interpretativa: Para evaluar la respuesta acústica del violín se cuenta con la inestimable ayuda de una intérprete nobel, que interpreta pequeños fragmentos musicales y dos melodías, una de ellas es “Estrellita dónde estás” (anónima, 1761), en la que los primeros acordes y notas se ejecutan sin dificultad, resultando fácilmente reconocible, si bien, en un momento de la interpretación, una de las notas sobresale ligeramente sobre las demás, aunque en general mantiene una armonía adecuada. La segunda melodía interpretada es “We will rock you” (Brian May, Queen, 1977), en la que se percibe una mayor claridad en la ejecución de las notas y una armonía musical más equilibrada en comparación con la anterior. Estos resultados indican que el violín es capaz de

interpretar partituras con diferentes tesituras, tanto en notas graves como agudas, demostrando su respuesta tonal y su versatilidad en la práctica instrumental.

- Opinión de un experto: El lutier aprecia que el sonido del violín es claramente diferente al que produce un violín tradicional de madera, con un timbre que recuerda en cierta medida a los instrumentos orientales. Esta diferencia tonal se puede atribuir a las propiedades acústicas del PLA y a la estructura interna de la caja de resonancia, carente de bóvedas. A pesar de las diferencias, valora positivamente la claridad del sonido producido, señalando que las notas se perciben con nitidez y considerándolo adecuado para la interpretación musical.

7.3. Análisis del sonido

Se procede a analizar el sonido generado por el violín impreso en 3D para compararlo con el de un violín tradicional, centrándose en las ondas sonoras que producen. Para ello, se realizan grabaciones de las notas emitidas por el violín impreso, tanto al pulsar las cuerdas como al frotarlas con el arco. Posteriormente, se analizan las ondas correspondientes a cada nota mediante representaciones gráficas. Para su análisis se emplea el programa Audacity, que permite visualizar y comparar el espectro de las ondas sonoras y evaluar las características acústicas.

También se utiliza la transformada de Fourier para descomponer la señal sonora generada por el violín e identificar las frecuencias fundamentales, los armónicos, la intensidad relativa y los tonos, facilitando la comparación cuantitativa entre el violín impreso en 3D y el tradicional [72].

$$F(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-i \cdot w \cdot t} dt$$

Siendo:

t : tiempo (s)

w : frecuencia angular (Hz)

$e^{-i \cdot w \cdot t}$: número complejo que representa una onda senoidal

$f(t)$: señal original

$F(w)$: contenido de frecuencia de la señal

Al tocar las cuerdas y analizar el espectro mediante la transformada de Fourier se observan diversos picos que corresponden, el primero, a la frecuencia fundamental, que es la nota principal emitida, y los sucesivos picos, a otros armónicos, que son frecuencias en múltiplos enteros de la fundamental [73].

Se detectan armónicos en las cuatro cuerdas del violín, tanto en sonido pulsado como en sonido frotado con arco. En el violín tradicional, generalmente, el pico más alto corresponde al armónico fundamental, pero se observan varios casos en los que el 2º armónico muestra mayor amplitud que el fundamental, esto se debe a que la caja de resonancia es la que determina qué armónicos se escuchan con mayor intensidad y cuáles quedan en segundo plano, es decir, varían de un violín a otro en función de diversos factores como, entre otros, el tipo de madera, el grosor o la geometría.

El armónico fundamental es la frecuencia más baja a la que vibra una cuerda y determina la altura tonal. La combinación de todos los armónicos confiere al instrumento su sonido característico, el timbre, por lo que la presencia de frecuencias atípicas no implica errores de ejecución, sino peculiaridades propias del diseño y de los materiales del instrumento, que, en este caso, una vez más, serían atribuibles a las propiedades acústicas del PLA y a la geometría de la caja de resonancia.

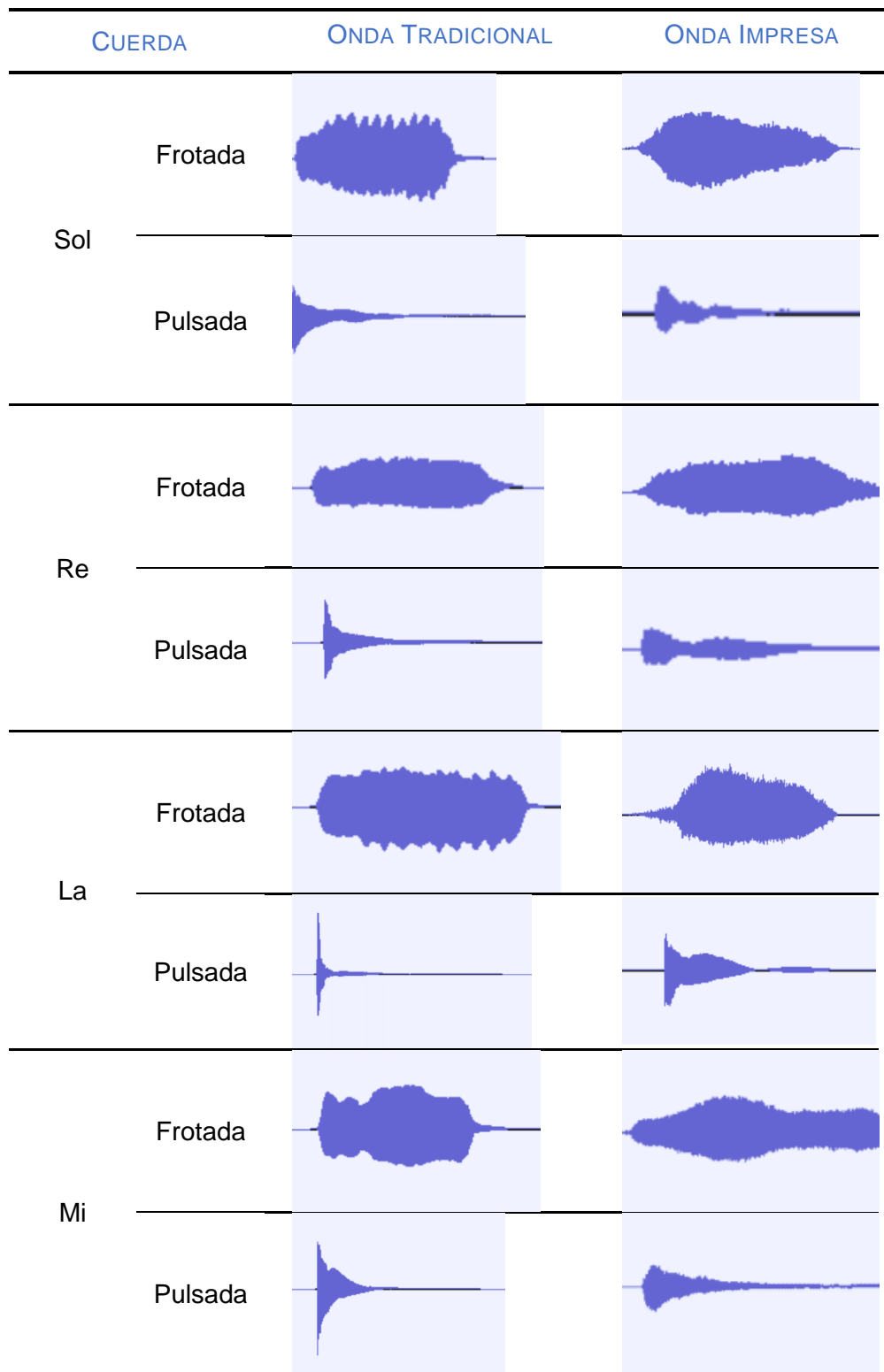
Como se ha indicado, para analizar el comportamiento sonoro de las cuerdas del violín se utiliza Audacity, una herramienta que permite realizar el estudio visual y espectral de las ondas sonoras a partir del análisis de una grabación [74].

Se consulta con Lorenzo Tardón, Catedrático del Departamento de Ingeniería de Comunicaciones, quien, amablemente, nos explica cómo realizar el estudio y nos facilita las grabaciones de los sonidos producidos por las cuerdas pulsadas y frotadas de un violín tradicional (manufacturado por J. F. Presenda), grabaciones tomadas de la base de datos RWC Music Data Base.

Posteriormente, se realizan las grabaciones de las cuerdas frotadas y pulsadas del violín impreso en 3D utilizando el micrófono de un móvil, para a continuación transferir los archivos a Audacity. Este programa muestra la forma de la onda en la pista, lo que permite observar cómo evoluciona la amplitud del sonido a lo largo del tiempo.

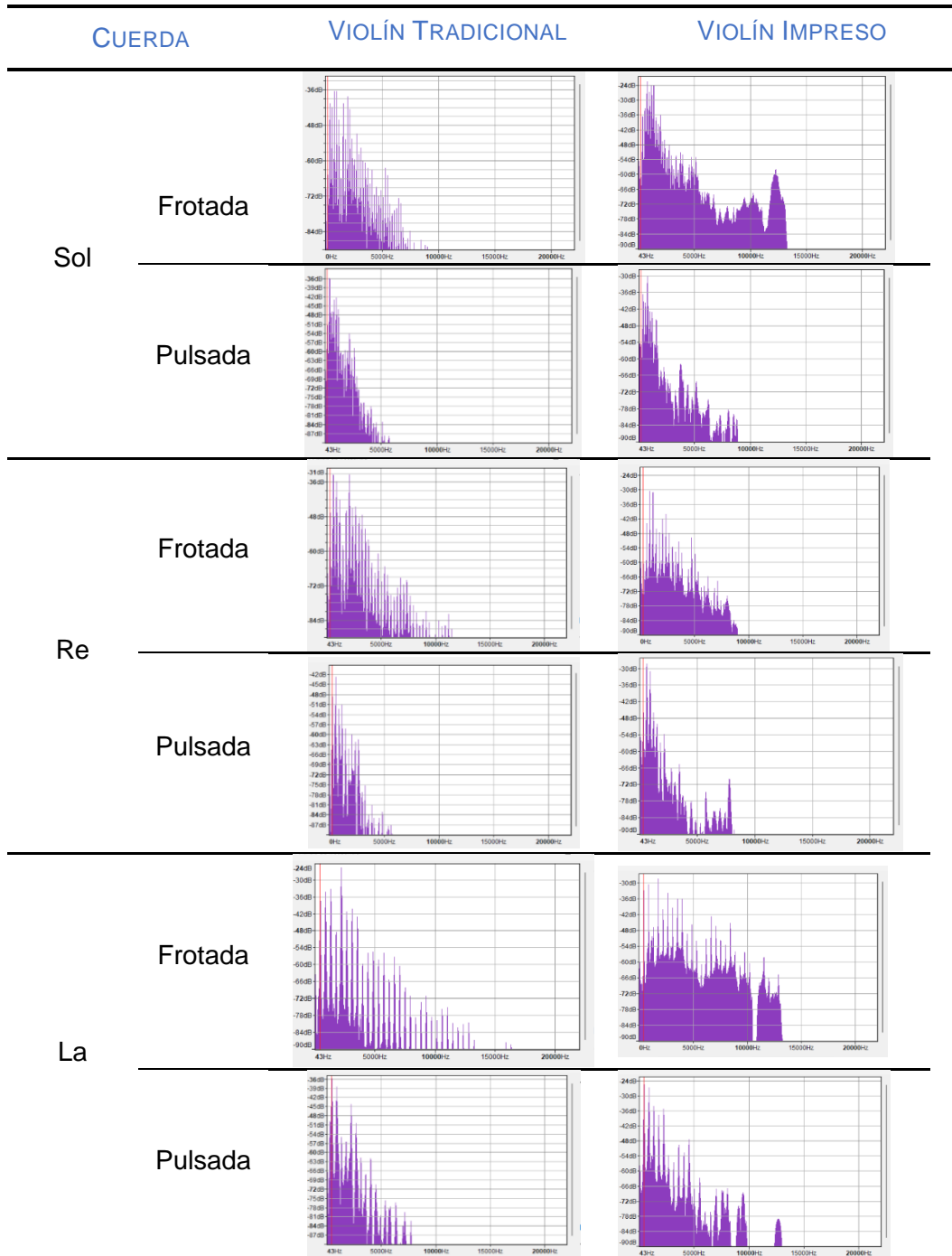
En la siguiente tabla se comparan las ondas del violín tradicional con las de las grabaciones realizadas con el violín impreso en 3D.

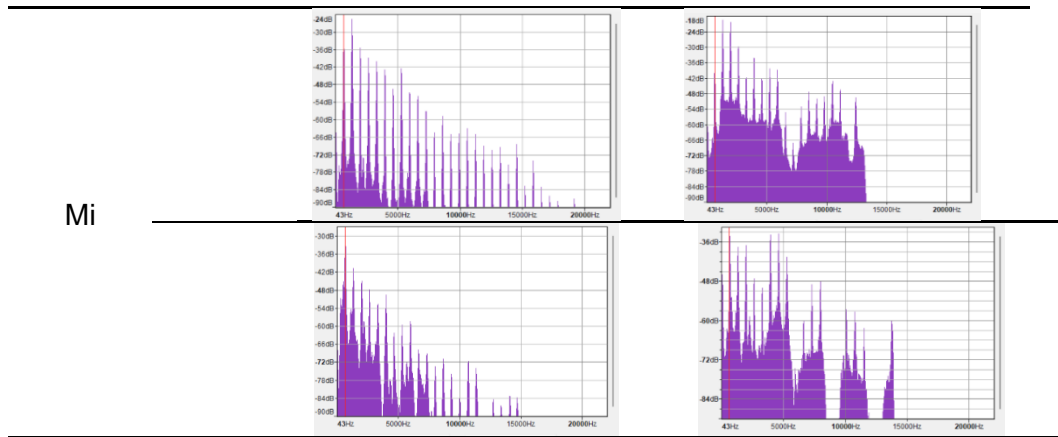
Tabla 22. Comparación de las ondas sonoras



A partir de las imágenes de las ondas, se seleccionan fragmentos de audio, correspondientes a cada una de las cuerdas sometidas a estudio, para realizar el análisis de espectro. Audacity genera un gráfico lineal que representa en el eje horizontal las frecuencias en Hz y en el eje vertical su amplitud en dB [75].

Tabla 23. Análisis del espectro de las ondas





El análisis del espectro permite identificar los armónicos y la riqueza espectral de la cuerda, así como comparar las frecuencias fundamentales y parciales.

Para facilitar el análisis del comportamiento sonoro de las cuerdas de ambos instrumentos se elaboran sendas tablas en las que se recogen, a partir de las gráficas, los valores de las frecuencias registradas hasta el cuarto armónico, resaltando en negrita frecuencia a la que la cuerda registra la mayor amplitud, el mayor pico, permitiendo la comparación rápida entre frecuencias teóricas y prácticas y entre los dos instrumentos. No aparecen en las tablas los picos que se registran en el quinto armónico o superior.

Tabla 24. Frecuencia obtenida de un violín tradicional

CUERDA	ARMÓNICO	NOTA	FRECUENCIA TEÓRICA	SONIDO	FRECUENCIA PRÁCTICA
Sol (G)	Fund.	G3	196 Hz	Frotado	199 Hz
				Pulsado	197 Hz
	2º	G4	392 Hz	Frotado	394 Hz
				Pulsado	394 Hz
	3º	D5	588 Hz	Frotado	590 Hz
				Pulsado	590 Hz
	4º	G5	784 Hz	Frotado	786 Hz
				Pulsado	789 Hz

Re (D)	Fund.	D4	294 Hz	Frotado	295 Hz
				Pulsado	292 Hz
	2º	D5	588 Hz	Frotado	587 Hz
				Pulsado	588 Hz
	3º	A5	880 Hz	Frotado	883 Hz
				Pulsado	888 Hz
	4º	D6	1175 Hz	Frotado	1178 Hz
				Pulsado	1180 Hz
La (A)	Fund.	A4	440 Hz	Frotado	444 Hz
				Pulsado	449 Hz
	2º	A5	880 Hz	Frotado	882 Hz
				Pulsado	883 Hz
	3º	E6	1320 Hz	Frotado	1324 Hz
				Pulsado	1324 Hz
	4º	A6	1760 Hz	Frotado	1772 Hz
				Pulsado	1759 Hz
Mi (E)	Fund.	E5	660 Hz	Frotado	662 Hz
				Pulsado	662 Hz
	2º	E6	1319 Hz	Frotado	1319 Hz
				Pulsado	1320 Hz
	3º	B6	1978 Hz	Frotado	1990 Hz
				Pulsado	1988 Hz
	4º	E7	2637 Hz	Frotado	2644 Hz
				Pulsado	2642 Hz

Tabla 25. Frecuencia obtenida del violín impreso 3D

CUERDA	ARMÓNICO	NOTA	FRECUENCIA TEÓRICA	SONIDO	FRECUENCIA PRÁCTICA
Sol (G)	Fund.	G3	196 Hz	Frotado	194 Hz
				Pulsado	195 Hz
	2º	G4	392 Hz	Frotado	397 Hz
				Pulsado	386 Hz
	3º	D5	588 Hz	Frotado	587 Hz
				Pulsado	581 Hz
	4º	G5	784 Hz	Frotado	791 Hz
				Pulsado	785 Hz
Re (D)	Fund.	D4	294 Hz	Frotado	295 Hz
				Pulsado	291 Hz
	2º	D5	588 Hz	Frotado	592 Hz
				Pulsado	591 Hz
	3º	A5	880 Hz	Frotado	890 Hz
				Pulsado	886 Hz
	4º	D6	1175 Hz	Frotado	1190 Hz
				Pulsado	1184 Hz
La (A)	Fund.	A4	440 Hz	Frotado	446 Hz
				Pulsado	444 Hz
	2º	A5	880 Hz	Frotado	886 Hz
				Pulsado	883 Hz
	3º	E6	1320 Hz	Frotado	1329 Hz
				Pulsado	1330 Hz
	4º	A6	1760 Hz	Frotado	1778 Hz
				Pulsado	1778 Hz

Mi (E)	Fund.	E5	660 Hz	Frotado	657 Hz
				Pulsado	653 Hz
	2º	E6	1319 Hz	Frotado	1309 Hz
				Pulsado	1300 Hz
	3º	B6	1978 Hz	Frotado	1959 Hz
				Pulsado	1959 Hz
	4º	E7	2637 Hz	Frotado	2610 Hz
				Pulsado	2611 Hz

Antes de interpretar los datos obtenidos mediante Audacity, es importante destacar las múltiples variables que inciden en las grabaciones, más allá de las atribuibles a cada instrumento analizado. Entre ellas, la presión y el ángulo del arco al tocar, la técnica de ejecución o las propias condiciones de grabación, como la calidad del micrófono o la acústica del espacio. En este estudio, al emplear fuentes de grabación distintas y diferentes condiciones de ejecución, las conclusiones que pueden sacarse comparando ambas grabaciones son generales.

Las frecuencias prácticas obtenidas para ambos violines en comparación con la frecuencia teórica de las cuerdas no muestran desviaciones significativas, son próximas al valor esperado. Esto sugiere que la acústica estructural de ambos instrumentos es adecuada, pues logran la afinación de las cuerdas dentro de los márgenes aceptables, demostrando una correcta transmisión y resonancia de las vibraciones.

Las principales diferencias entre los valores prácticos obtenidos en ambos instrumentos no se deben, por tanto, al comportamiento de las cuerdas, que son las que generan los armónicos, sino al cuerpo del violín, que es el que amplifica y modifica la amplitud y el timbre del sonido resultante, característico de cada instrumento [76].

En todas las ondas analizadas se ha identificado la nota principal correspondiente a la frecuencia fundamental, aunque no siempre aparece como el pico más alto en el espectro. En el violín tradicional, en la mayoría de los casos, el segundo armónico presenta la mayor amplitud, mientras que en el violín impreso en 3D se observan algunas excepciones en las que el tercer o cuarto armónico predominan. Otra diferencia destacable es que en el violín tradicional se aprecia una caída progresiva en la intensidad de los armónicos superiores, demostrando una distribución armónica

equilibrada y una buena respuesta acústica; sin embargo, en el violín impreso en 3D no siempre presenta esta caída gradual, lo que puede indicar irregularidades en la transmisión y resonancia del sonido o defectos estructurales. Estas anomalías pueden afectar negativamente al timbre, generando un sonido menos claro.

En definitiva, si bien existen diferencias entre ambos violines, el de este proyecto puede alcanzar una respuesta sonora adecuada y cumplir con los parámetros de afinación y resonancia, con una correcta transmisión de las vibraciones y una estructura acústica funcional.

7.4. Análisis económico

El mercado de violines es muy variado, con una amplia oferta de modelos artesanales y sintéticos y con precios que oscilan desde los más económicos, de algo menos de 100 €, hasta los de alta gama, de casi 18 000 €. No obstante, si se pretende adquirir un violín de tamaño pequeño, ideal para el aprendizaje infantil de la práctica instrumental, la oferta es mucho menos variada.

En la siguiente tabla se recogen algunos ejemplos de modelos 1/16 que se pueden adquirir actualmente. Incluye violines de madera y un violín de fibra de carbono acústico, pero no figura ningún violín electroacústico, por no ser un tamaño habitual entre este tipo de violines [77-79]:

Tabla 26. Comparativa de violines acústicos 1/16 y 1/8 disponibles en el mercado

LUTIER/MODELO	CARACTERÍSTICAS	PRECIO €
Stentor SR1500 Violin Student II 1/16	Tapa de abeto macizo, fondo y aro de arce macizo, diapasón de madera dura, cuerdas de acero aleado.	204
Fidelio Student Violin 1/16	Tapa píceca maciza, fondo y aro de arce laminado, diapasón y clavijero de arce, cuerdas de acero.	66
Gear4music Violín de estudiante Plus 1/16	Maderas tonales de alta calidad, arce y abeto, suave diapasón, clavijas de precisión.	57.50

Yamaha V5SC 1/16	Tapa píceca tallada a mano, fondo de arce, lacado de aceite, diapasón y barbada de ébano, cordal Wittner, cuerdas Daddario Prelude.	399
Glasser Carbon Composite Violín 1/16	Composite de fibra de carbono, resistente, ligero, de sonido potente	1200-1400

Como se puede observar, hay violines de madera 1/16 asequibles, pues están destinados al aprendizaje y práctica de niños muy pequeños, en torno a 5 años. No ocurre lo mismo con el de fibra de carbono, que es especialmente caro.

Cabe destacar que no se ha encontrado en el mercado ningún violín 1/16 impreso por fabricación aditiva. Sin embargo, existen algunas propuestas similares a la de este proyecto que están orientadas a la práctica instrumental en entornos educativos y que ofrecen la posibilidad de imprimir un violín acústico en impresoras 3D domésticas. En estos casos, el gasto de producción de cada unidad viene determinado por el consumo del material necesario para su producción:

Tabla 27. Fabricación de violines acústicos por impresión 3D

MODELO	MATERIAL	CARACTERÍSTICAS	GASTO €
Hovalin [5]	PLA, ABS, FDM	Diseño de código abierto, funcional, con sonido resonante.	65-70
AVIVA 3D Printed Violin [80]	Polímero de plástico y ABS	Cuerpo impreso en polímero plástico y mástil y diapasón en ABS. Sonido más oscuro y suave que la madera, resistente.	>32

Los costes de producción asociados a la fabricación del violín desarrollado en este proyecto si estuviera enfocado a su comercialización se determinarían principalmente por el material PLA empleado, los materiales accesorios necesarios para el correcto funcionamiento del instrumento (como cuerdas y arco), los costes de mano de obra y los gastos indirectos derivados del uso del taller y de sus recursos materiales.

No obstante, este modelo solo resulta comparable con otros proyectos experimentales y educativos similares, como los recogidos en la Tabla 21. Dichos proyectos comparten sus diseños de forma gratuita para que cualquier interesado pueda imprimirlos con el material recomendado en impresoras domésticas y únicamente indican el coste aproximado del material de impresión necesario, sin incluir los costes de los elementos accesorios, los gastos indirectos ni la mano de obra.

El material necesario para fabricar nuestro violín es la suma del empleado en la impresión de cada una sus piezas:

Tabla 28. Consumo de material en la fabricación del violín

PIEZA	CONSUMO DE MATERIAL
Tapa	103.4 g
Base	201.2 g
Puente	2.3 g
Mango	27.1 g
Diapasón	41.2 g
Clavijero y voluta	35.2 g
Clavijas (4)	8.0 g
Cordal	13.9 g
Agarre del arco	3.4 g
Guía del arco	24.6 g
TOTAL	460.3 g

La bobina de PLA utilizada es de 1 000 g y tiene un coste de 31.34 €. El gasto en material de impresión que requiere el modelo, por tanto, es de 14.43 €. Un valor muy competitivo en relación a los otros dos proyectos:

Tabla 29. Comparativa del coste de material de violines FFF

MODELO DE VIOLÍN FFF	COSTE DEL DE MATERIAL DE IMPRESIÓN
Hoalin 4/4	65-70 €
AVIVA 3D 4/4	32.00 €
Violín TFG 1/16	14.43 €

Es importante destacar que la diferencia en el importe del material de impresión consumido sería menor si el violín fabricado se hubiese hecho a tamaño 4/4, pero no se encuentran otros modelos de tamaño 1/16 que sirvan de referencia. Decir, también, que este modelo incorpora unas ayudas para el aprendizaje que los otros dos no incluyen, lo que podría ser un ahorro para quien decida imprimirlo y necesite contar con dichas ayudas.

Finalmente, y como ya se ha indicado, para calcular el coste final del prototipo que se presenta hay que añadir los accesorios necesarios para su funcionamiento:

Tabla 30. Coste final del violín

CONCEPTOS	VALOR
Material de impresión	14.43 €
Cuerdas [81]	3.59 €
Arco [82]	4.99 €
TOTAL	23.01 €

Nuevamente, se excluyen los costes indirectos asociados al uso de los recursos materiales utilizados en el proceso de fabricación, así como la mano de obra (no remunerada al estar enmarcada en un contexto experimental y educativo). Sin embargo, en el apartado siguiente se incluye una estimación de los tiempos de fabricación, abarcando tanto el proceso de impresión como las fases de posproducción y ensamblaje.

7.5. Análisis de tiempo

Selección y preparación del material

En la fabricación artesanal de un violín, la preparación y el tratamiento de la madera son fundamentales. Es imprescindible seleccionar maderas de alta calidad que estén bien curadas y secas, ya que esto influye directamente en la calidad sonora. Tradicionalmente, el proceso de curación de la madera es largo y meticuloso, pero actualmente existen empresas especializadas que suministran maderas ya preparadas, lo que permite al lutier centrarse en la construcción y elegir el proveedor que mejor se adapte a sus necesidades.

En contraste, para la fabricación aditiva, no se requiere ningún tratamiento previo del material, ya que los filamentos plásticos, como el PLA que se utiliza en este proyecto, están listos para su uso directo en la impresora 3D. Esto simplifica notablemente la preparación, ya que el usuario solo debe seleccionar al proveedor adecuado y gestionar el pedido del filamento.

Impresión de piezas

La construcción artesanal de las piezas de un violín requiere considerablemente más tiempo que la fabricación mediante impresión 3D, ya que el lutier debe dar forma manualmente a cada componente, utilizando herramientas y técnicas especializadas. Este proceso es muy laborioso y su duración varía de un lutier a otro, en función de su destreza y experiencia. Además, entre cada etapa del proceso es necesario respetar ciertos tiempos mínimos para que los materiales se asienten correctamente y se garantice el acabado óptimo de las piezas.

En cambio, en la fabricación aditiva el tiempo de producción de las piezas lo determinan los parámetros de la impresora 3D, como la altura de capa o la velocidad de impresión. Este tiempo es predecible y se mantiene prácticamente constante entre un violín y otro, siempre que se utilicen los mismos ajustes y diseño digital, lo que aporta una mayor uniformidad y eficiencia al proceso.

Tabla 31. Tiempos de impresión de las piezas del violín

PIEZA	TIEMPO DE IMPRESIÓN
Tapa	4 h 52 min 48 s
Base	12 h 17 min 4 s
Puente	0 h 30 min 28 s
Mango	3 h 2 min 47 s
Diapasón	3 h 37 min 7 s
Clavijero y voluta	1 h 52 min 36 s
Clavijas (4)	2 h 48 min 43 s
Cordal	1 h 54 min 53 s
Agarre del arco	0 h 42 min 13 s
Guía del arco	3 h 4 min 26 s
TOTAL	34 h 43 min 5 s

Posprocesado

Para las piezas elaboradas artesanalmente por un lutier es fundamental un acabado minucioso. Como ya se ha dicho, en primer lugar, se lija y limpia cuidadosamente la superficie del instrumento para garantizar una aplicación uniforme del barniz, aplicando varias capas finas y dejando que cada una de ellas se seque y cure completamente antes de aplicar la siguiente para que cumplan su función de protección y mejora estética del instrumento. Este proceso puede durar aproximadamente una o dos horas, pero el secado puede extenderse entre 7 y 14 días.

En el caso de las piezas realizadas por fabricación aditiva, se realiza un lijado exhaustivo de todas ellas para eliminar posibles imperfecciones y lograr una superficie más agradable al tacto. Es posible realizar el acabado de todas las piezas en menos de dos horas.

Montaje y ajustes

Para el montaje de las piezas de madera es necesario utilizar cola animal, lo que implica esperar a que el adhesivo seque completamente antes de poder continuar con el

ensamblaje. Este proceso puede requerir varias horas e incluso días, dependiendo de la pieza que se esté pegando.

En el caso de las piezas impresas mediante tecnología FFF, se utiliza pegamento universal para unir las superficies correspondientes. Para reforzar la unión, como se ha detallado a lo largo del proyecto, se realizan espigas y sus respectivos orificios de ensamble. Gracias al secado rápido del pegamento universal, no es necesario esperar mucho tiempo para continuar con el montaje; aunque se recomienda dejar pasar al menos 15 minutos para asegurar una correcta adhesión. El proceso de ensamble de las piezas es en este caso inferior a la hora.

Finalmente, en ambos tipos de violín deben colocarse las cuerdas, el puente y el cordal, realizando los ajustes necesarios para que el violín funcione correctamente. Esta parte del montaje es similar en los dos modelos y apenas lleva unos 30 minutos.

Tiempo de fabricación del violín

El tiempo total empleado en la fabricación del violín es el resultado de sumar los tiempos invertidos en cada una de las distintas fases descritas anteriormente y que se resume en la siguiente tabla.

Tabla 32. Tiempo de fabricación del violín

FASE DE FABRICACIÓN	TIEMPO INVERTIDO
Selección y preparación del material	0 h 15 min 0 s
Impresión de piezas	34 h 43 min 5 s
Procesos de posfabricación	2 h 0 min 0 s
Montaje y ajustes	1 h 30 min 0 s
TOTAL	38 h 3 min 45 s

La construcción del violín mediante impresión 3D puede completarse en poco más de 38 horas; sin embargo, es importante destacar que el nivel de dedicación y supervisión requerido durante el proceso de impresión es mínimo. El trabajo efectivo se estima aproximadamente en 4 horas, el tiempo necesario para lanzar las piezas a la impresora, lijarlas, montarlas y realizar los ajustes.

Por el contrario, como se mencionó en el apartado 3.6, la fabricación artesanal de un violín requiere más de 200 horas de trabajo, un proceso minucioso con tiempos de

espera largos, que puede extenderse a varias semanas o incluso meses, debido a la complejidad y el nivel de detalle que exige la construcción manual del instrumento.

8. Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo es diseñar, fabricar y evaluar un violín acústico mediante fabricación aditiva FFF como alternativa económica y funcional al violín tradicional, orientado al uso en entornos experimentales y educativos.

A la vista de los resultados, se constata que el violín fabricado reproduce fielmente el diseño de un violín artesanal, con unos procesos de impresión y montaje sencillos y con un resultado estético agradable, si bien, requiere realizar algunos ajustes para minimizar el posprocesado y reducir el peso final del instrumento para que se adapte bien a los usuarios a los que va destinado.

Estos resultados ponen de manifiesto que la fabricación aditiva es una opción interesante para la democratización de la educación musical, especialmente en entornos donde el acceso a instrumentos tradicionales es limitado.

Entre las principales limitaciones de este trabajo se encuentra la dependencia de la calidad de la impresora 3D, la mejora de las propiedades acústicas del instrumento, alejadas de los violines tradicionales, o la falta de pruebas a largo plazo sobre la durabilidad del violín impreso.

Para futuros trabajos sería de interés optimizar el diseño digital para mejorar las tolerancias, estudiar los parámetros de impresión de las piezas para disminuir su peso y tiempo de impresión, adaptarlo a diferentes tamaños, para usuarios de otras edades, y tratar de incorporar al diseño de la caja de resonancia las características y funcionales bóvedas del violín tradicional. Asimismo, se podrían utilizar otros materiales, como ABS, para mejorar el acabado superficial y diseñar otras ayudas, como la mentonera.

En conclusión, aunque el violín impreso en 3D no iguala a los tradicionales en calidad sonora, representa una alternativa accesible económica y funcional para la iniciación en la práctica instrumental.

9. Bibliografía y webgrafía

- [1] B. Moreno Castro, «Educación Musical en Infantil y Primaria», Revista Digital Docente de Campus educación. Accedido: 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.campuseducacion.com/blog/revista-digital-docente/educacion-musical-en-infantil-y-primaria/>
- [2] L. Gómez, «Instrumentos para escuelas», Unión Musical. Accedido: 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://blog.unionmusical.es/instrumentos-para-escuelas/>
- [3] I. Martínez Gutiérrez, «Innovaciones en la Enseñanza Musical y Creatividad en el Aula», Oller2Colegio. Accedido: 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://oller2colegio.es/explorando-nuevas-formas-de-ensenar-musica-y-fomentar-la-creatividad-en-el-aula/?expand_article=1
- [4] C. Cavdir, «Digital manufacturing for musical applications; a survey of current status and future Outlook"», CCRMA, Stanford University, 2019.
- [5] «Hovalin - Violín acústico imprimible en 3D», HOVA Labs. Accedido: 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.hovalabs.com/hovalin>
- [6] «Modular Fiddle - Violín acústico modular impreso en 3D», OpenFab PDX. Accedido: 11 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://openfabpdx.com/modular-fiddle/>
- [7] María José R., «¡Los violines impresos en 3D son accesibles para todos!», 3Dnatives. Accedido: 11 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/violin-impreso-3d-121220222/#!>
- [8] A. Kantaros y O. Diegel, «3D printing technology in musical instrument research: reviewing the potential», *Rapid Prototyp J*, vol. 24, n.º 9, pp. 1511-1523, 2018.
- [9] «La historia del violín: su origen y evolución a lo largo de los años», Arthaus Escuela de Música. Accedido: 11 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://arthausmusica.com/aprender-a-tocar-violin/la-historia-del-violin/>
- [10] E. T., «Breve historia del violín. ¿Cómo surgió este fantástico instrumento?», Academia Música Proyecta. Accedido: 11 de febrero de 2025. [En línea].

- Disponible en: <https://academiamusicaprojecta.com.mx/breve-historia-del-violin-como-surgio-este-fantastico-instrumento/>
- [11] «Messiah violín, by Stradivari», Ashmolean. Accedido: 11 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.ashmolean.org/messiah-violin-stradivari#listing_157231_0
- [12] «Inicio», Baroque Instruments. Accedido: 12 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://www.baroque-instruments.com/inicio/>
- [13] «Los luthiers de la familia Amati y la invención del violín», Corilon violins. Accedido: 20 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.corilon.com/es/biblioteca/retratos-de-maestros/los-luthiers-de-la-familia-amati-y-la-invencion-del-violin>
- [14] J. Cervelló Garriga, «Los Amati», Jordi Cervelló Garriga. Accedido: 20 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://jordicervellogarriga.wordpress.com/2018/12/10/los-amati/>
- [15] «Violín, de Andrea Amati», The Met. Accedido: 20 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.metmuseum.org/es/art/collection/search/503517>
- [16] F. S., «Una historia de la luthería (I Parte)», Deviolines. Accedido: 20 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.deviolines.com/una-historia-de-la-lutheria-i-parte/>
- [17] «Tipos de violines», Sonido de Cuerdas. Accedido: 20 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://sonidodecuerdas.com/tipos-de-violines/>
- [18] «¿Qué tipos de violines hay? Guía completa», Cashconverters. Accedido: 26 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.cashconverters.es/es/es/oportunidades/producto/que-tipos-de-violin-hay/>
- [19] «Violín francés antiguo, siglo XIX», Corilon violins. Accedido: 26 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.corilon.com/es/violines/violines-franceses/violin-frances-antiguo-sigloxix>
- [20] «Spur Violins SA251-string semi-acoustic electric violin», Electric violin shop. Accedido: 28 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://electricviolinshop.com/es/products/spur-violins-sa251-semi-acoustic-electric-4-string-violin>

- [21] «Violín eléctrico Yamaha YSV-104 BR», Musical las palmas. Accedido: 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://musicallaspalmas.es/productos/cuerda-clasica/1369-violin-electrico-yamaha-ysv-104-br.html>
- [22] «Las partes del violín», Tutoriales de violín. Accedido: 7 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://tutorialesdeviolin.com/practica/partes-del-violin/>
- [23] «Partes del violín», Vael de Ginés. Accedido: 7 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://vaeldeginés.com/partes-del-violin>
- [24] «Materiales y componentes», Thomann. Accedido: 12 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.thomann.de/es/onlineexpert_page_violines_materiales_y_componentes.html
- [25] «Partes del violín», Futuro Musical. Accedido: 14 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://futuromusical.com/partes-del-violin/>
- [26] Yamaha Design Lab, «Disassembly of the Violin Artida», 18 de julio de 2024, *Instagram*. Accedido: 24 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.instagram.com>
- [27] «Barbada Violín sobre cordal de ébano», Musitekton. Accedido: 24 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://musitekton.es/es/barbadas/774-barbada-viol%C3%ADn-sobrecordal-%C3%A9bano.html>
- [28] «Arco violín OVB25 3/4», OQAN music. Accedido: 24 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://oqanmusic.com/es/product/arco-violin-ovb25-3-4/>
- [29] «¿Cómo sostener el arco? - Ejercicios para la mano derecha», Todo Violín. Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://violin.es/2021/08/29/como-sostener-arco-violin/>
- [30] S., «¿Cómo desarrollar una buena técnica de arco en el violín?», Musiquina. Accedido: 21 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://musiquina.com/como-desarrollar-una-buena-tecnica-de-arco-en-el-violin/>
- [31] RANRAO, «Agarre de silicona para arco de violín». Accedido: 24 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.amazon.es>
- [32] «Bowcorrect corrector arco violín 1/4-1/8», Autana Strings. Accedido: 24 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://autanastrings.com/tienda/ayudas-didacticas/bowcorrect-corrector-arco-violin-1-4-1-8/>
- [33] J. F., «Las maderas de un violín», Musiquina. Accedido: 21 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.deviolines.com/las-maderas-de-un-violin/>

- [34] «Materiales para la fabricación de violines y tratamientos de la superficie de la madera», Kremer pigmente. Accedido: 25 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.kremer-pigmente.com/es/>
- [35] S., «¿Qué tipos de madera se usan para construir un violín?», Musiquina. Accedido: 25 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://musiquina.com/que-tipos-de-madera-se-usan-para-construir-un-violin/>
- [36] A. González Obeso, «Las colas de animales, un material indispensable en restauración», Patrimonio global. Accedido: 29 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.patrimonioglobal.es/las-colas-de-animales-un-material-indispensable-en-restauracion/>
- [37] «La estructura básica de un violín, ¿cuáles son sus componentes?», Yijang Piano Workshop. Accedido: 29 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.xytiqin.com/es/1703.html>
- [38] Eugenio Monesma - Documentales, «Violín artesanal por un experto Luthier. Fabricación paso a paso de este instrumento musical», 2 de diciembre de 2020, *San Juan de las Abadesas*. Accedido: 29 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=_fqnJByq0dQ
- [39] «Cómo se hace un violín acústico artesanal, paso a paso», Comprar violín. Accedido: 29 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.comprarviolin.es/como-se-hace-un-violin-acustico-artesanal-paso-a-paso-video/>
- [40] «El secado de madera y su importancia en los procesos secundarios», Maquinaria y maderas. Accedido: 29 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://maquinariaymaderas.com/el-secado-de-madera-y-su-importancia-en-la-transformacion/>
- [41] P. Ruiz del Árbol, «Como conseguir el mejor sonido en tu instrumento: el cordal», 12 de marzo de 2021, *Moralzarzal*. Accedido: 29 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=ZtAq5Q5KFZY&t=357s>
- [42] P. Ruiz del Árbol, «Como restaurar las grietas de un violín, viola o violonchelo», Taller de Luthier Pedro Ruiz del Árbol. Accedido: 24 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.tallerdeluthier.com/post/como-restaurar-las-grietas-de-un-viol%C3%ADn-viola-o-violonchelo>
- [43] J. F., «Reconocer un buen violín», Deviolines. Accedido: 30 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.deviolines.com/reconocer-un-buen-violin/>

- [44] J. F., «Cómo mejorar tu violín», Deviolines. Accedido: 30 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.deviolines.com/como-mejorar-tu-violin/>
- [45] J. Wolfe, «How does a violin work?», UNSW. Accedido: 30 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://newt.phys.unsw.edu.au/jw/violintro.html>
- [46] «Las cuerdas frotadas del violín», Cultura científica. Accedido: 30 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://culturacientifica.com/2022/10/23/las-cuerdas-frotadas-del-violin/>
- [47] «Tema 24. Procesos y tecnologías de fabricación aditiva. Apuntes de la asignatura de Procesos Industriales, curso 2021/22».
- [48] «Impresión 3D por FFF: cómo funciona, ventajas e inconvenientes y aplicaciones», Republic of printers. Accedido: 3 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://republicofprinters.com/fabricacion-por-filamento-fundido-fff-impresion-3d/>
- [49] «FDM-FFF o modelado por deposición fundida», todo-3D. Accedido: 3 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://todo-3d.com/fdm-fff-modelado-deposicion-fundida/?v=7ee12bda8e7f>
- [50] «Fused Filament Fabrication», aitiip 3D. Accedido: 3 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://aitiip3d.com/tecnologias/fused-filament-fabrication/>
- [51] «Introducción a la tecnología FFF y sus parámetros más importantes», 3Dprint.pe. Accedido: 3 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://3dprint.pe/introduccion-a-la-tecnologia-fff-y-sus-parametros-mas-importantes/>
- [52] Dream Music Escuela, «Como hacer un violin - Capítulo 1 - Construcción de plantillas», 25 de septiembre de 2023. Accedido: 12 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=nRyoldmXuAA>
- [53] «Measurements», The violin-making manual. Accedido: 26 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.makingtheviolin.com/Measurements>
- [54] H. A. Strobel, *Useful Measurements For Violin Makers: a reference for shop use*, 3.^a ed. Aumsville, 1989. Accedido: 26 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/685232208/Useful-Measurements-for-Violin-Makers-Hstrobel>

- [55] C. Johnson y R. Courtnall, *The Art of Violin Making*, Robert Hale. 2006. Accedido: 26 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/591932644/The-Art-of-Violin-Making>
- [56] «The “Four Circles” system of violin maling», *The Strad*, ene. 2019, Accedido: 26 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.thestrad.com/lutherie/the-four-circles-system-of-violin-making/8545.article>
- [57] Eshka, «The “Four Circles” of the Violin: Generalising the System», Medium. Accedido: 26 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://eu-u6.medium.com/the-four-circles-of-the-violin-generalising-the-system-576e64426537>
- [58] «Soporte de arco de violín». Accedido: 16 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.aliexpress.com/i/1005003456628198.html>
- [59] ABC arm bow corrector, «ABC Bow Corrector Violin 4/4-1/2». Accedido: 16 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.thomann.es/abc_arm_bow_corrector
- [60] «Afforable Dual Extruder 3D printer», Raise3D. Accedido: 6 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.raise3d.com/pro2-series/>
- [61] «La solución de software ideaMaker», 3D Market. Accedido: 6 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dmarket.mx/escaneres-y-software-3d/la-solucion-de-software-para-su-flujo-de-trabajo-fluido>
- [62] A. M., «ideaMaler, el slicer gratuito de Raise3D», 3Dnatives. Accedido: 6 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/ideamaker-slicer-gratuito-raise3d-040720222/#!>
- [63] «Altura de capas y resolución en la impresión 3D», 3DWorks. Accedido: 7 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dworks.cl/post/altura-de-capas>
- [64] «Guía de materiales de impresión 3D: Tipos, aplicaciones y propiedades», formlabs. Accedido: 7 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/es/blog/materiales-impresion-3d/>
- [65] «Guía de materiales para impresión 3D FFF». Accedido: 7 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://sicnova3d.com/wp-content/uploads/sicnova-proyecto-materiales-guia.pdf>

- [66] L. C., «Guía completa: el filamento de ABS en la impresión 3D», 3Dnatives. Accedido: 8 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/filamento-de-abs-impresion-3d-06062019/>
- [67] L. C., «Guía completa: El filamento de PLA en la impresión 3D», 3Dnatives. Accedido: 8 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/guia-filamento-pla-en-la-impresion-3d-190820192/>
- [68] A. M., «El PVA en la impresión 3D, ¡todo lo que debes saber de este filamento soluble!», 3Dnatives. Accedido: 8 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/pva-impresion-3d-filamento-soluble-230520222/#!>
- [69] «Guía definitiva sobre tipos de filamentos 3D», Imresoras3D.com. Accedido: 8 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.impresoras3d.com/la-guia-definitiva-sobre-los-distintos-filamentos-para-impresoras-3d/>
- [70] «Filamentos para impresión 3D», Raise3D. Accedido: 12 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.raise3d.com/filaments/>
- [71] «Note Frequencies», Seventh String. Accedido: 8 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.seventhstring.com/resources/notefrequencies.html>
- [72] M. Á. Muriel, «Signals and Systems: Introduction», 2016.
- [73] S. Brinson, «What's that sound?», Medium. Accedido: 8 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://smbrinson.medium.com/whats-that-sound-2aa00440dddc>
- [74] «AUDACITY: software de edición de audio», Audacity. Accedido: 8 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://audacity.es/como-usar-audacia/>
- [75] X. Baca García, «Manual de Audacity», Universitat Oberta de Catalunya. Accedido: 8 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://manual-audacity.recursos.uoc.edu/es/5-2-analisis-de-espectro/>
- [76] «The Acoustics of the Violin Body», Benning Violins. Accedido: 8 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.benningviolins.com/reference/the-acoustics-of-the-violin-body.html>
- [77] «Violín 1/16». Accedido: 16 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.thomann.es>
- [78] «1/16 Violín». Accedido: 16 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.muzikkon.com/es-es/collections/1-violin-de-16>

- [79] «Violines de menor tamaño». Accedido: 16 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gear4music.es/es/>
- [80] S. Romero, «¿Violines impresos en 3D? Más baratos y originales», muy interesante. Accedido: 20 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.muyinteresante.com/tecnologia/59103.html>
- [81] D'Addario, «Cuerdas D'Addario Prelude». Accedido: 16 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.amazon.es/>
- [82] Kreutzer, «Arco violín Kreutzer». Accedido: 16 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.amazon.es/>