

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

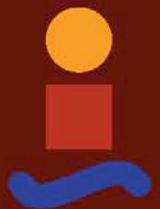
Reproducción de maquinaria de orfebrería mediante  
CATIA V5 a partir de datos del Museo de Artes y  
Costumbres Populares y del taller de Fernando  
Marmolejo

Autor: Laura de la Iglesia Lérica

Tutor: José Sauco Zaldívar

Dep. Ingeniería Gráfica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**Reproducción de maquinaria de orfebrería  
mediante CATIA V5 a partir de datos del Museo de  
Artes y Costumbres Populares y del taller de  
Fernando Marmolejo**

Autor:

Laura de la Iglesia Lérica

Tutor:

José Sauco Zaldívar

Dep. Ingeniería Gráfica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Grado: Reproducción de maquinaria de orfebrería mediante CATIA V5 a partir de datos del Museo de Artes y Costumbres Populares y del taller de Fernando Marmolejo

Autor: Laura de la Iglesia Lérica

Tutor: José Sauco Zaldívar

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal



*A mi madre*



# Agradecimientos

---

A Juan José y Alejandro Marmolejo, por su generosidad y confianza. Por abrirme las puertas de su taller, transmitirme su pasión por la orfebrería y mostrar tanto interés e ilusión por este proyecto.

Al Museo de Artes y Costumbres Populares de Sevilla, por permitirme el acceso a sus instalaciones para poder tomar las medidas necesarias para el desarrollo del proyecto.

A mi tutor, José Sauco Zaldívar, no sólo por la ayuda y consejo para la realización de este proyecto, sino, también, por su paciencia y su comprensión en un momento difícil.

Por último, a mis familiares y amigos. Por su apoyo y por no dejar nunca de confiar en mí.



# Resumen

---

Este proyecto tiene como objetivo realizar el modelado 3D en CATIA V5 de tres máquinas que pertenecían al antiguo taller de orfebrería de Fernando Marmolejo Camargo. Estas tres máquinas son una laminadora de chapa, expuesta actualmente en el Museo de Artes y Costumbres Populares de Sevilla, una laminadora de hilo, conservada en el actual taller Marmolejo Orfebres y, por último, una bordonadora, aún en uso en el taller antes mencionado.

Se realizará, además, un recorrido a lo largo de la historia de la orfebrería en Sevilla y de su repercusión en la ciudad, así como un acercamiento a la obra y al taller de uno de los más insignes orfebres de Sevilla, Fernando Marmolejo Camargo. Es, por tanto, una puesta en valor del patrimonio histórico-artístico de la ciudad de Sevilla y del oficio de la orfebrería.



# Abstract

---

Goldsmithing, precious metalwork, represents one of Seville's cultural singularities. Here, three goldsmithing machines are modelled using CATIA V5, all three belonging to Fernando Marmolejo Camargo workshop: a sheet rolling mill, currently displayed at the Museo de Artes y Costumbres Populares de Sevilla, and a wire rolling mill and a beading machine, both from Marmolejo Orfebres workshop, being the least still in use.

A review of the goldsmith work in Seville between s. XIX and s. XX along with its implications on the cultural wealth of the city is presented too. Both, goldsmith work and workshop of the sevillian notable Fernando Marmolejo Camargo are studied. The present work reinforces the value and richness of the historical and artistically patrimony of Seville and the goldsmith work.



<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xvii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xix</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Orfebrería</i>	1
1.1.1 Proceso de diseño y fabricación	1
1.1.2 Orfebrería sevillana	1
1.2 <i>Fernando Marmolejo y su taller</i>	4
1.2.1 El taller	5
1.2.2 La obra	6
1.2.3 Técnicas	7
<b>2 Maquinaria principal en orfebrería</b>	<b>9</b>
1.1 <i>Laminadora de chapa.</i>	11
2.1.1 Elementos principales.	11
2.1.2 Proceso de laminación de chapa.	12
2.1.3 Cinemática de la laminadora.	12
2.1.4 Laminadora de chapa del taller de Fernando Marmolejo Camargo	14
1.2 <i>Laminadora de hilo.</i>	16
1.2.1 Elementos principales.	16
1.2.2 Cinemática de la laminadora de hilo.	17
1.2.3 Proceso de trefilado.	17
1.2.4 Laminadora de hilo del taller de Fernando Marmolejo Camargo	19
1.3 <i>Bordonadora</i>	21
1.3.1 Elementos principales.	21
1.3.2 Bordonadora del taller de Fernando Marmolejo Camargo	22
<b>3 Evolución Histórica</b>	<b>25</b>
<b>4 Diseño asistido por ordenador</b>	<b>27</b>
4.1 <i>CATIA V5</i>	28
4.1.1 Entornos de CATIA V5	28
4.1.1.1 Mechanical Design	28
4.1.1.2 Digital Mockup	28
4.1.2 Justificación del uso de CATIA V5 en el proyecto	29
<b>5 Modelado en CATIA</b>	<b>31</b>
5.1 <i>Laminadora de chapa</i>	31
5.1.1 Toma de medidas	31
5.1.2 Modelado en CATIA V5	31

5.1.3	Cinemática de la laminadora mediante DMU Kinematics	50
5.2	<i>Laminadora de hilo</i>	52
5.2.1	Toma de medidas	52
5.2.2	Modelado en CATIA V5	54
5.2.3	Cinemática de la laminadora mediante DMU Kinematics	65
5.3	<i>Bordonadora</i>	66
5.3.1	Toma de medidas	66
5.3.2	Modelado en CATIA V5	67
5.3.3	Cinemática de la bordonadora mediante DMU Kinematics	79
<b>6</b>	<b>Conclusión</b>	<b>81</b>
<b>7</b>	<b>Referencias</b>	<b>83</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Valores normalizados de rosca Whitworth.

35



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. Tesoro del Carambolo	2
Figura 2. Candelabros de Lebrija	2
Figura 3. Corona de Recesvinto del Tesoro de Guarrazar	3
Figura 4. Espada de Boabdil	3
Figura 5. Señor de las Penas de San Vicente	4
Figura 6. Fernando Marmolejo	5
Figura 7. Taller de Fernando Marmolejo donado al Museo de Artes y Costumbres Populares de Sevilla	6
Figuras 8 y 9. Trofeo “Torre del Oro” (izquierda) y Trofeo “Ciudad de Sevilla” (derecha).	6
Figuras 10 y 11. Belén de la Cartuja (izquierda) y Belén de la Antigua Sevilla (derecha).	7
Figura 12. Camarín de la Virgen de la Esperanza Macarena.	7
Figura 13. Taladro vertical perteneciente al taller actual de Marmolejo Orfebres.	9
Figura 14. Pulidora de metal perteneciente al actual taller de Marmolejo Orfebres.	10
Figura 15. Colección de cinceles del actual taller de Marmolejo Orfebres.	11
Figura 16. Proceso de laminación mediante rodillos.	11
Figura 17. Componentes principales de la laminadora. [11]	12
Figura 18. Relación de transmisión entre engranajes.	13
Figura 19. Laminadora manual de acción directa mediante manivela en el eje superior.	13
Figura 20. Laminadora de acción indirecta mediante juego piñón-corona en ambos ejes, superior e inferior [11].	13
Figuras 21 y 22. Combinación engranaje-tornillo para transformar el movimiento giratorio de la llave o rueda superior en la traslación vertical del eje del rodillo superior.	14
Figura 23. Laminadora manual perteneciente al taller de Fernando Marmolejo y expuesta en Museo de Artes y Costumbres Populares de Sevilla.	15
Figuras 24 y 25. Eje de rotación accionado a través de dos manivelas y transmisión de dicho movimiento giratorio al eje inferior de trabajo de la laminadora.	15
Figura 26. Sistemas de engranaje para la transmisión de movimiento rotatorio de un eje de trabajo a otro y para desplazamiento vertical del rodillo superior.	16
Figura 27. Perfil del rodillo para la trefiladora.	17
Figuras 28 y 29. Lingotes de metal en el proceso de laminado [12] [13].	17
Figura 30. Hilera de orificios circulares.	18
Figura 31. Proceso de trefilado.	18
Figura 32. Tenazas de estirar.	18
Figura 33. Banco de estirado.	18
Figura 34. Estirado de hilo a través de hilera circular en banco de estirado.	19
Figura 35. Laminadora de hilo perteneciente al taller Marmolejo Orfebres.	19
Figura 36. Vista frontal de ejes de laminación y juego de engranajes para la transmisión del movimiento	

giratorio.	20
Figura 37. Vista lateral de los engranajes para la transmisión de movimiento giratorio entre ejes.	20
Figura 38. Juego de engranajes con manija.	20
Figura 39. Engranaje lateral con eje roscado en el cuerpo.	20
Figura 40. Componentes principales de la bordonadora [11].	21
Figura 41. Bordonadora perteneciente al taller Marmolejo Orfebres.	22
Figura 42. Bordonadora anclada mediante tornillo de banco en el taller Marmolejo Orfebres.	23
Figuras 43 y 44. Palanca y juego de cabezales o discos operadores para la bordonadora del taller de Marmolejo Orfebres.	23
Figura 45. Laminadoras de chapa e hilo motorizadas.	25
Figura 46. Bordonadora motorizada.	25
Figura 47. Laminadoras de hilo y chapa motorizadas del actual taller Marmolejo Orfebres.	26
Figura 48. Diseño en CATIA de motor de aviación tipo turbofan	27
Figura 49. Proceso de diseño tradicional y proceso de diseño iterativo usando herramienta CAD/CAM/CAE [17]	27
Figura 50. Diagrama de los conjuntos principales que conforman la laminadora de chapa.	31
Figura 51. Estructura principal de la laminadora y sus subconjuntos.	32
Figuras 52 y 53. Vistas de la estructura principal de la laminadora.	32
Figura 54. Cuerpo de la laminadora.	33
Figuras 55. Descomposición del cuerpo de la laminadora.	33
Figura 56. Descomposición de elementos de la base del cuerpo de la máquina.	34
Figura 57. Descomposición de elementos verticales del cuerpo.	34
Figura 58. Tapa superior del cuerpo y tuercas cuadradas.	35
Figura 59. Selección de rosca Whitworth (BSW) añadida manualmente a la librería.	36
Figura 60. Soportes del eje de manivelas.	36
Figura 61. Descomposición de los elementos que conforman el soporte del eje de manivelas.	36
Figura 62. Bancada de madera.	37
Figura 63. Vista de agujeros pasantes para fijación.	37
Figuras 64 y 65. Vistas de elementos de fijación a la bancada.	37
Figura 66. Vista de perfil de elementos de fijación del cuerpo y soporte a bancada.	37
Figuras 67 y 68. Vistas de biela de fijación de eje inferior.	38
Figura 69. Vista frontal del eje de manivelas.	38
Figura 70. Descomposición del eje.	38
Figura 71. Descomposición de elementos relativos a la manivela izquierda.	39
Figura 72. Descomposición de elementos relativos a la manivela derecha.	39
Figura 73. Descomposición del engranaje, chaveta y eje.	39
Figura 74. Definición de parámetros para modelado de engranajes.	40
Figura 75. Trazado de la evolvente del diente del engranaje.	40
Figuras 76 y 77. Definición de la geometría del diente de engranaje.	40
Figura 78. Patrón circular de los dientes del engranaje.	41

Figura 79. Resultado final del modelado del engranaje.	41
Figuras 80 y 81. Vistas de los embellecedores y separadores del eje de manivelas.	42
Figura 82. Eje inferior de laminación.	42
Figura 83. Descomposición de elementos del eje inferior.	42
Figura 84. Engranaje y sus elementos de fijación al eje.	43
Figura 85. Descomposición del eje, rigidizador y chaveta.	43
Figura 86. Vista del engranaje-corona del eje inferior.	43
Figura 87. Descomposición del engranaje y elementos de fijación al eje.	43
Figuras 88 y 89. Vistas del eje superior de laminación.	44
Figura 90. Descomposición de los elementos del eje superior de laminación.	44
Figura 91. Diagrama de elementos pertenecientes al mecanismo de traslación vertical.	45
Figuras 92 y 93. Vistas del mecanismo de traslación vertical del eje superior.	45
Figura 94. Manija con engranaje central.	46
Figura 95. Descomposición de elementos que conforman la manija central.	46
Figura 96. Engranaje lateral con eje roscado.	46
Figura 97. Descomposición de elementos del engranaje lateral.	46
Figura 98. Engranaje con eje roscado a la guía y piezas de apoyo para el empuje al eje superior de laminación.	47
Figuras 99 y 100. Vistas del soporte y bielas de unión entre juegos de engranajes y eje superior de laminación.	47
Figura 101. Descomposición de elementos de soporte y bielas.	48
Figura 102. Mecanismo completo para el desplazamiento vertical del rodillo superior de laminación.	48
Figuras 103 y 104. Vistas de la máquina laminadora de chapa completa.	48
Figura 105. Perspectiva del frontal de la máquina.	49
Figura 106. Perspectiva de la zona posterior de la máquina.	49
Figura 107. Sección normal a X del eje de manivelas y sus soportes.	49
Figura 108. Sección normal a X del cuerpo de la laminadora.	49
Figuras 109 y 110. Secciones normales a Y de la laminadora de chapa.	50
Figura 111. Diagrama de las uniones necesarias para la simulación de rotación de ejes y laminación.	51
Figura 112. Diagrama de las uniones necesarias para el desplazamiento vertical del eje superior de laminación.	52
Figura 113. Perfil del cilindro de laminación de hilo a medir.	52
Figura 114. Escáner del cilindro de laminación.	53
Figuras 115 y 116. Moldes de escayola del cilindro de laminación.	53
Figura 117. Escáner del molde de escayola del cilindro de laminación.	53
Figura 118. Diagrama de los conjuntos principales que componen la laminadora de hilo.	54
Figura 119. Estructura principal de la laminadora de hilo.	54
Figura 120. Cuerpo de la laminadora y elementos de apoyo del eje inferior de laminación.	55
Figura 121. Descomposición de los elementos del cuerpo de la laminadora de hilo.	55
Figura 122. Bancada de madera para la laminadora de hilo.	55

Figura 123. Agujeros en tabla de bancada para la fijación del cuerpo.	55
Figura 124. Agujero en la base del cuerpo para tornillo prisionero.	56
Figura 125. Tornillo con prisionero.	56
Figura 126. Vista de perfil de los elementos de fijación.	56
Figura 127. Tuercas y arandelas.	56
Figura 128. Eje inferior de laminación.	57
Figura 129. Descomposición de elementos del eje inferior.	57
Figura 130. Escalado del escáner del eje usando como referencia papel milimetrado.	57
Figura 131. Toma de medida en CATIA V5 del ancho de las crestas del perfil del eje.	57
Figura 132. Toma de medidas de los huecos intersticiales entre crestas del perfil.	58
Figura 133. Esquema de la geometría cilíndrica exterior y cónica interior.	58
Figura 134. Toma de medidas sobre el escáner del molde de escayola.	58
Figura 135. Trazado del perfil del rodillo de laminación de hilo.	58
Figura 136. Eje inferior de laminación con rodillo de laminación central y chaveteros.	59
Figura 137. Descomposición de los elementos que componen la manivela.	59
Figura 138. Descomposición del engranaje y sus elementos de fijación al eje.	59
Figura 139. Eje superior de laminación.	60
Figura 140. Descomposición del eje superior de laminación.	60
Figuras 141 y 142. Vistas del mecanismo para la traslación vertical del eje superior de laminación.	60
Figura 143. Diagrama de elementos principales que componen el mecanismo de traslación.	60
Figura 144. Manija central con engranaje.	61
Figura 145. Sección central de la manija.	61
Figura 146. Engranaje con eje vertical roscado.	61
Figura 147. Descomposición de elementos engranaje-eje roscado.	61
Figura 148. Eje roscado en cuerpo fijo y elemento de apoyo para el empuje.	62
Figura 149. Soporte para el juego de engranajes y el eje superior de laminación.	62
Figura 150. Descomposición de los elementos que componen el soporte.	62
Figura 151. Mecanismo completo para el desplazamiento vertical del rodillo superior de laminación.	63
Figuras 152 y 153. Vistas de la laminadora de hilo sobre bancada.	63
Figuras 154 y 155. Vistas de la laminadora de hilo.	64
Figuras 156 y 157. Secciones normales al eje X de la laminadora de hilo.	64
Figuras 158 y 159. Secciones normales al eje Y de la laminadora de hilo.	65
Figura 160. Diagrama de las uniones necesarias para la simulación de rotación de ejes y laminación.	65
Figura 161. Diagrama de las uniones necesarias para el desplazamiento vertical del eje superior de laminación.	66
Figura 162. Diagrama de conjuntos que componen la bordonadora.	67
Figura 163. Diagrama de subconjuntos que conforman la estructura principal.	67
Figura 164. Estructura principal de la bordonadora.	68
Figuras 165 y 166. Vistas del cuerpo de la bordonadora.	68

Figura 167. Sección del cuerpo de la bordonadora.	69
Figura 168. Bancada de la bordonadora.	69
Figura 169. Tabla con orificios para la fijación.	69
Figura 170. Elementos de fijación del cuerpo a la bancada.	70
Figura 171. Descomposición de elementos de fijación a la bancada.	70
Figura 172. Elementos principales del eje superior de la bordonadora.	70
Figura 173. Eje superior de la bordonadora.	70
Figura 174. Descomposición de los elementos que conforman el eje superior de la bordonadora.	71
Figura 175. Descomposición de cabezal y tuerca.	71
Figura 176. Llave o palanca para la tuerca de los cabezales.	71
Figura 177. Descomposición del engranaje, manivela y sus elementos de fijación al eje.	72
Figura 178. Agujeros para pasadores de unión del engranaje (izquierda) y manivela (derecha).	72
Figura 179. Engranaje y manivela fijadas al eje mediante pasadores de fijación.	72
Figuras 180 y 181. Vistas del bloque soporte del eje superior de la bordonadora.	73
Figura 182. Sujeción mediante tornillos del bloque soporte del eje superior.	73
Figura 183. Sección de la sujeción mediante tornillos del bloque.	73
Figura 184. Bloque con chapa-muelle atornillada a su base.	73
Figura 185. Manija roscada al cuerpo para el empuje del bloque soporte.	74
Figura 186. Eje inferior de la bordonadora.	74
Figura 187. Descomposición de los elementos que componen el eje inferior de la bordonadora.	74
Figura 188. Palanca con surco helicoidal.	75
Figura 189. Tornillo solidario al surco helicoidal.	75
Figura 190. Vista de tornillo fijo al cuerpo y solidario a la hendidura o surco helicoidal.	75
Figura 191. Tornillo con manija para fijar la posición de la palanca.	75
Figura 192. Sección normal a Y de tornillo y elemento de fijación de la palanca.	75
Figura 193. Extrusión de los perfiles.	76
Figura 194. Intersección entre los dos perfiles tras la extrusión.	76
Figura 195. Rango de giro de la palanca.	76
Figura 196. Rango de desplazamiento de la palanca.	76
Figura 197. Guía de la bordonadora.	77
Figura 198. Sección de elementos de fijación de la guía.	77
Figuras 199 y 200. Vistas del conjunto completo de bordonadora y bancada.	77
Figura 201 y 202. Vistas de la máquina bordonadora con chapa de oro.	78
Figura 203. Sección normal al eje X de la bordonadora.	78
Figura 204. Sección normal al eje Y de la bordonadora.	78
Figura 205. Sección normal al eje Z de la bordonadora.	78
Figura 206. Diagrama de las uniones necesarias para la simulación de rotación de ejes.	79
Figura 207. Diagrama de las uniones necesarias para el desplazamiento vertical del eje superior.	80
Figura 208. Diagrama de las uniones necesarias para el desplazamiento horizontal del eje inferior.	80



# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 Orfebrería

La orfebrería, procedente del latín *auri* (oro) y *faber* (fabricador) es el trabajo artístico de metales nobles, principalmente del oro y la plata.

El ser humano ha demostrado gran fascinación y respeto por estos metales, dotándolos de gran valor simbólico para muchas culturas. Así, el oro se ha relacionado siempre con el sol, la divinidad y la vida eterna, y su perdurabilidad en el tiempo ha contribuido a su valor ornamental. [1] Por esta razón, este trabajo artístico ha sido desde la antigüedad una de las habilidades más apreciadas del ser humano.

Sus orígenes se pierden en los principios de la civilización, en el momento en el que refinamiento y avance técnico se unieron en la manipulación de ciertos minerales, comenzando de esta forma a usar los metales [2]. La pureza del oro y la plata facilitaron su extracción de la naturaleza, y sus características mecánicas permitieron su transformación en finas láminas e hilos. De este modo, lo que hasta aquel momento era fabricado con huesos y piedras más o menos pulidas pasa a ser un trabajo minucioso de metales nobles, convirtiéndose en los primeros vehículos de expresión artística del hombre antiguo.

### 1.1.1 Proceso de diseño y fabricación

En pocos lugares dedicados al trabajo artesanal se mezclan tantos materiales como en el caso de la orfebrería: agua, barro, madera, metales, baños químicos...Este tan elevado y variado número de materia prima responde a la realidad que hace que el trabajo del taller no sea producto de un solo oficio.

En el método de trabajo del orfebre intervienen en cadena varias especialidades que son oficios por sí mismas. En términos generales, una obra de orfebrería sigue unos determinados patrones de desarrollo, en el que el punto de partida es el dibujo de la pieza. El maestro orfebre debe tener conocimientos de dibujo artístico, que le sirven para diseñar y presentar el proyecto. El dibujo de la pieza vendrá descompuesto en múltiples dibujos de detalle que son los que utiliza el oficial mediante calco o lámina de plata para transferirlo al material deseado. Posteriormente, se le proporciona el volumen a la lámina mediante cinceles gruesos o finos en función del acabado requerido. Tras la realización de todas las piezas, éstas se sueldan entre sí hasta conseguir el conjunto final. Finalmente, se realiza el pulido y el plateado mediante electrolisis para aportar brillo al material. [3]

### 1.1.2 Orfebrería sevillana

La orfebrería sevillana cuenta con un importante pasado y con un rico presente, en gran medida gracias a que en Andalucía abundaron minas de oro y plata que han sido explotadas a lo largo de la historia por los diferentes pueblos que en ella habitaron, entre los que destacan los fenicios, tartesios y romanos.

En época tartesia, Sevilla era una provincia rica y fértil y el poder político de su pueblo se basaba en el comercio de objetos de orfebrería, cuya fama se extendería por todo el Mediterráneo. De esta época han quedado ejemplos como el tesoro del Carambolo (Figura 1), el cual forma el primer conjunto importante de orfebrería de la historia del arte de Sevilla. En él aparecen técnicas muy evolucionadas y perfeccionadas como la laminar, el troquel, la filigrana o el granulado, de lo que se deduce que su artífice fue un experimentado maestro orfebre que trabajaría en un complejo y modernizado taller.



Figura 1. Tesoro del Carambolo.

El sucesor más directo del pueblo tartesio fue el pueblo turdetano, el cual también dejó restos de orfebrería entre los que destacan los candelabros de Lebrija (Figura 2). Estos objetos reflejan un elevado nivel de vida y un lujoso refinamiento en las costumbres de su época.



Figura 2. Candelabros de Lebrija.

Tras la victoria sobre los cartagineses, Roma emprendió un ambicioso plan de conquista en España. Sin embargo, bajo dominación romana, la cultura ibero-turdetana se mantuvo sin cambios sustanciales durante dos siglos y apenas quedan restos de la orfebrería hispano-romana en Sevilla. Sabemos, sin embargo, que las técnicas más usadas eran la del granulado y el repujado y que los metales preciosos procedente de las minas andaluzas eran llevados a Roma para ser empleados allí en joyas y objetos diversos que harían que la orfebrería andaluza fuese altamente apreciada [4].

Aunque en Sevilla han quedado también, como sucedió con la hispano-romana, pocos restos de la orfebrería visigoda, sabemos que ésta fue muy rica y de esta forma queda demostrado en el Tesoro de Guarrazar (Figura 3), Toledo. Su orfebrería se caracterizaba por el uso del oro y del adorno con piedras de colores. Su técnica principal era el repujado con aplicaciones de piedras pulimentadas con forma convexa para aprovechar así joyas romanas.



Figura 3. Corona de Recesvinto del Tesoro de Guarrazar.

Años más tarde, el pueblo musulmán acabaría con el poder de visigodos y, a pesar de la prohibición del uso de adornos de oro, es conocida la cantidad de piedras preciosas que guardaban los tesoros de los califas, que seguramente se emplearían en joyas de adorno personal y en la decoración de otras obras de orfebrería. Entre sus técnicas encontramos el repujado, la filigrana y el grabado sobre la plata. Una de las obras más destacadas de este período es la espada adornada en marfil del rey islámico Boabdil (Figura 4).



Figura 4. Espada de Boabdil.

Aunque la dominación islámica no termina en la península ibérica hasta 1492, el dominio musulmán en Sevilla acaba en 1248 con la reconquista de Fernando III. En este momento se restablecen los cultos cristianos y los gremios se organizan atendiendo a las normas de funcionamiento según sus respectivas ordenanzas. Las noticias más antiguas sobre los orfebres que aparecen en los ordenamientos a la ciudad de Sevilla tras la conquista son de 1344 [4]. Obra clave de la época medieval cristiana es la espada del rey Fernando III, el Santo, conservada en la catedral de Sevilla, así como las dos llaves entregadas al rey San Fernando tras la reconquista de Sevilla por los cristianos.

Durante el Renacimiento la orfebrería sevillana experimentó un gran auge gracias a las obras de culto de iglesias y conventos. Sevilla era una ciudad cosmopolita, “Puerta y puerto de Indias”, a la que llegaban barcos cargados con la plata y el oro procedente de las colonias de ultramar y desde la que salían otros para comerciar obras de orfebrería hispalense. A principio del siglo XVI, gracias a los traslados de orfebres extranjeros que van dejando su propio estilo, se producen en Sevilla obras de orfebrería que mezclan el estilo gótico con el renacentista y, posteriormente, con una ornamentación italianizante. Una obra de incalculable valor, dentro de la orfebrería renacentista, es el tabernáculo del Altar Mayor de la catedral de Sevilla, del orfebre Francisco de Alfaro.

A la etapa renacentista le sigue la manierista, jugando un papel mediador entre el Renacimiento y el Barroco.

Una de las muestras de este estilo purista en Sevilla podría ser la diadema de la Santa titular del Convento de “Las Teresas”.

Durante el siglo XVII y XVIII, ya en época barroca y a pesar de la devastación sufrida por las epidemias de peste en la ciudad, se produjeron obras de gran envergadura. Muestra de la orfebrería de estos siglos que se conservan en Sevilla son las labores de plata de dos cruces procesionales. Una de ellas es la del Señor de la cofradía sevillana de la O y otra es la Cruz del Señor de las Penas de San Vicente (Figura 5).



Figura 5. Señor de las Penas de San Vicente

Con el avance del siglo XVIII llegamos al estilo Rococó, iniciado en 1754 cuando Blas de Amat dio al gremio de plateros de Sevilla un nuevo libro de dibujo donde figuraba como motivo de decoración la rocalla, inspirado en el arte chino, que imita contornos de piedras y conchas. De este período se conservan dos ostensorios de gran valor, como son el de Doña Isabel Pérez Caro y el del cardenal Solís, por sus respectivos donantes.

Este movimiento se vio desplazado con la llegada del Neoclasicismo en el siglo XIX. Este estilo presenta como uno de sus motivos más corrientes las guirnaldas vegetales y no arraigó mucho en Sevilla, la que vivió un período de baja producción de orfebrería. Destacan de esta etapa dos cálices, uno de plata y otro de oro y esmaltes, regalo de la reina Isabel II, el cual presenta como motivos decorativos la hoja de laurel.

Durante el siglo XIX se revalorizaron otros estilos del pasado, desarrollándose así la orfebrería neogótica, neorenacentista, neobarroca... A partir de este momento, y durante el siglo XX, la orfebrería hispalense recobra su valor y su labor seguirá desarrollándose hasta la actualidad.

En este texto, se tratará de profundizar en la obra del ilustre orfebre sevillano Fernando Marmolejo Camargo.

## 1.2. Fernando Marmolejo y su taller

Fernando Marmolejo Camargo (Figura 6) fue uno de los más ilustres orfebres del siglo XX. Nacido en Sevilla el 10 de diciembre de 1915, demostró una temprana vocación por el arte y el trabajo de los metales, influenciado en gran parte por su padre, quien regentaba un taller de cerrajería artística. En 1930 ingresó en la Escuela de Artes Aplicadas y Oficios Artísticos y compaginó sus estudios con el trabajo en el taller de Cayetano González, el que será su principal maestro y del que recibió magníficas lecciones de dibujo y el aprendizaje práctico de artesano. Tras la Guerra Civil, Fernando Marmolejo continuó en la institución para la que sirvió durante la misma como Oficial Ajustador. No obstante, sus deseos de trabajar por su cuenta le llevaron a formar un taller junto a los hermanos Castillo, tallista uno y carpintero el otro, donde llevará a cabo sus primeras obras y encargos [5].

Fruto de su generosa imaginación, además de labores de forja, Fernando Marmolejo comienza a experimentar en el campo de la orfebrería. Concurriendo a diferentes exposiciones, comienza a recibir el reconocimiento público, y finalmente conseguirá su primer galardón en la Exposición provincial de 1943. En estos años,

Marmolejo se introduce también en otra faceta artística en la que cosechará grandes éxitos: la restauración y reproducción de obras de arte. De 1943 es la reproducción de la espada de San Fernando que hoy se conserva en el Museo del Ejército de Madrid.



Figura 6. Fernando Marmolejo

En el año 1947 es nombrado Ayudante Meritorio del taller de Metalistería Artística de la Escuela de Artes Aplicadas y Oficios Artísticos y durante esta década vivirá los años de mayor trascendencia para su obra, en los que consolida su oficio y ensaya nuevos métodos expresivos forjándose un nombre de solidez y prestigio en la orfebrería, avalado por los premios obtenidos en concursos provinciales y nacionales.

Posteriormente, en el año 1958, sus obras realizadas para la Hermandad de la Macarena son expuestas en el Pabellón Español de la Exposición Universal de Bruselas, proporcionándole un gran renombre internacional.

Durante la década de 1960, sus obras tuvieron un marcado carácter religioso, destacando entre ellas las coronas. Sin embargo, serían las reproducciones arqueológicas las que propusieran al artista mayores retos profesionales. Como muestra de ello cabe destacar la reproducción del Tesoro del Carambolo y la reproducción del Tesoro de Guarrazar, que le valieron para representar a España en la Exposición Mundial de Nueva York (1965).

A este reconocimiento le siguieron otros como el título de “Artesano Ejemplar de 1968”, nombramiento como Académico de Número de la Real Academia de Bellas Artes de Santa Isabel de Hungría, Académico Correspondiente de la Real Academia Provincial de Bellas Artes de Cádiz, Medalla de Andalucía o “Diplome de Médaille de Vermeil au Titre Etranger” en París. Además, desarrollará obras de gran envergadura entre las que encontramos los trofeos “Ciudad de Sevilla” y “Torre del Oro”, la Sustitución de los Ramos de Azucenas de las Jarras de la Giralda, la reparación de la Puerta del Perdón de la Catedral de Sevilla o el camarín de la Macarena, consolidando a Fernando Marmolejo como la gran figura e impulsor de la artesanía y arte sevillanos del siglo XX.

### 1.2.1. El taller

Fernando Marmolejo instaló su primer taller en 1939 en la calle Alhóndiga, donde trabajaba solo y enfocado especialmente en el trabajo de la forja. Con su posterior traslado de taller a la calle Ortiz de Zúñiga, y en consonancia con el volumen de pedidos que recibía, donde las labores de platería eran fundamentales, Marmolejo tomó aprendices a su cargo, que pasarían más tarde a componer el cuerpo principal del taller como Oficiales. Este taller será cedido a su hermano menor Antonio, y Fernando se traslada en 1949 a la calle Baños, lugar que abandonará en el año 78 debido a las malas condiciones del local, el cual sufrirá un derrumbamiento un año más tarde, destruyendo parte del material y objetos de valor que aún conservaban. Hasta 1991 el taller de Marmolejo estuvo repartido en dos locales, uno situado en la calle Eduardo Dato y otro en la Plaza de Molviedro, año en el cual tuvieron que abandonar el barrio de San Bernardo y ampliar el taller de la Plaza de Molviedro para configurarlo como taller único.

En este taller de trazado laberíntico se reunían bajo el magisterio de Fernando Marmolejo sus colaboradores, sus hijos y nietos mayores. Estos aprendieron de él el arte de la metalistería, así como la talla del marfil, el esmalte, etc., contribuyendo en la formación de un taller armonioso y acogedor.

Mantendrá su actividad artística hasta los 84 años y tras su fallecimiento en 2006, serán sus hijos Juan José y Alejandro quienes tomen el mando del taller, que permanece en la Plaza de Molviedro hasta junio de 2018, cuando se realiza el traslado del taller a Santiponce. La tienda y exposición de obras se trasladará, sin embargo, a la calle San Pedro Mártir, con el fin de mantener en el centro de la ciudad ese contacto cercano del que disfrutaban hoy en día con sus clientes.

Como ejemplo de su taller quedan expuestas en el Museo de Artes y Costumbres Populares de Sevilla (Figura 7) algunas de sus máquinas, mobiliario y herramientas de orfebrería. Estos objetos que componen la

exposición fueron donados al museo por el propio Fernando Marmolejo.



Figura 7. Taller de Fernando Marmolejo donado al Museo de Artes y Costumbres Populares de Sevilla

### 1.2.2. La obra

De la confluencia de estudios, experiencias e inspiraciones, Fernando Marmolejo desarrolló un estilo ecléctico barroquizante [6], con una marcada personalidad. Su optimismo, su personalidad activa y su amor por la naturaleza han marcado de manera significativa sus obras. Fernando Marmolejo defendía que *“El artista debe hacer tangible un sentimiento”*, y su obra refleja la realidad sevillana, sus tradiciones culturales y religiosas, sus monumentos y símbolos.

La obra de Fernando Marmolejo puede ser dividida en dos amplios grupos: obras civiles y obras religiosas.

#### Obras civiles:

Dentro de este grupo podemos encontrar diferentes tipos de obras como medallas, escudos, placas o bandejas, entre las que destaca la regalada a D. Eduardo León.

Además, varias de sus obras más reconocidas se enmarcan en el grupo de reproducciones y restauraciones, coronándose como obras maestras la reproducción del Tesoro del Carambolo (Museo Arqueológico de Sevilla), el Tesoro de Guarrazar (Museo Arqueológico de Madrid) o la espada de Boabdil (Armería Real de Madrid).



Figuras 8 y 9. Trofeo “Torre del Oro” (izquierda) y Trofeo “Ciudad de Sevilla” (derecha).

Sin embargo, las obras que mayor fama le proporcionaron fueron los trofeos que desarrolló durante años, tanto deportivos como no deportivos. Ejemplo de ello son los Trofeos “Torre del Oro” (Figura 8) y “Ciudad de Sevilla” (Figura 9) en el marco temporal de 1972 a 1983, en los que combinó los tópicos deportivos, la simbología sevillana y una rica ornamentación.

### Obras religiosas:

El otro gran grupo en el que se dividen las obras realizadas por Fernando Marmolejo es el de obras religiosas.

Dentro de este grupo encontramos sus prestigiosos belenes, obras de minucioso virtuosismo y gran riqueza imaginativa, los cuales le proporcionaron numerosos galardones. Entre ellos podemos destacar el belén de la Cartuja (Figura 10), que tiene como fondo el Monasterio sevillano con una base de plata (1992) o el belén de la Antigua Sevilla (Figura 11) en bronce, oro y plata [7].



Figuras 10 y 11. Belén de la Cartuja (izquierda) y Belén de la Antigua Sevilla (derecha).

Además, Fernando Marmolejo realizó múltiples piezas de culto (coronas, relicarios, lámparas), piezas de procesión (custodias) así como piezas de pontifical (cálices) o restauraciones. Destacan entre ellas las dieciocho lámparas de plata que flanquean el presbiterio del altar mayor de la Basílica de la Macarena y la corona en plata dorada de la Virgen de la Salud de la hermandad de San Gonzalo [8].



Figura 12. Camarín de la Virgen de la Esperanza Macarena.

Debe ser destacada una de sus más importantes obras de carácter religioso, el Camarín de la Esperanza Macarena (Figura 12). De ella Fernando Marmolejo dijo *“Mi mejor obra es el Camarín de la Macarena. Porque, siendo algo grandioso, con la envergadura propia de una obra arquitectónica, no ha perdido la preciosidad típica de la orfebrería”*.

### 1.2.3. Técnicas

De todos los procedimientos empleados en sus labores de orfebrería, se han de destacar los siguientes:

**Cincelado:** con esta técnica se consigue el labrado del metal, reducido a láminas de diverso grosor mediante la laminación previa. Se consigue así dar relieve a esa lámina representando en ella diferentes motivos por su parte anterior.

**Repujado:** con esta técnica se logra el mismo resultado pero, a diferencia del cincelado, en esta técnica se trabaja sobre la cara posterior de la lámina.

**Aplicación:** consiste en la ornamentación de piezas metálicas mediante la adición de piedras preciosas, piedras duras, marfil, etc.

**Chapado y dorado:** recubrimiento con oro de diferentes metales.

**Plateado:** técnica mediante la cual se recubre de plata el metal base, actualmente mediante baño electrolítico.

**Engaste:** Técnica consistente en el montaje de piedras preciosas en los rebordes metálicos.

**Esmaltado:** con esta técnica se consigue la obtención de pastas vítreas coloreadas sobre bases metálicas.

**Filigrana:** decoración a base de hilos de oro y plata previamente trefilados.

**Forja:** con esta técnica los metales obtienen la forma deseada mediante golpes, ya sea en frío o en caliente.

**Fundición:** proceso de fabricación consistente en fundir y verter un material en un molde con la forma deseada donde se solidifica.

**Bordonado:** con esta técnica se lamina una huella curva en el metal.

**Granulado:** decoración de metal a base de granos y bolitas de oro mediante soldadura.

## 2 MAQUINARIA PRINCIPAL EN ORFEBRERÍA

Gran parte del utillaje que se emplea en un taller de orfebrería es fabricado por los oficiales de ese mismo taller. Esto se debe, por un lado, a que estos talleres poseen todas las herramientas necesarias para poder llevar a cabo esta fabricación y, por otro, a la singularidad propia de cada proyecto desarrollado en un taller de orfebrería [2]. Esta singularidad y originalidad de cada proyecto crea la necesidad de contar con unas herramientas específicas y especializadas para cada tipo de operación y función a llevar a cabo, con unas medidas y formas concretas.

Sin embargo, todos los talleres de orfebrería y, en concreto, el taller de Marmolejo, cuentan con unas herramientas y útiles comunes, necesarios para llevar a cabo todos los procedimientos requeridos para la realización de estas obras de arte. Cada taller cuenta con un amplio abanico de utensilios para cortar, dar forma, unir y pulir los objetos de metal [9]. Estas son las herramientas básicas y comunes a la mayor parte de talleres de orfebrería actuales:

**Crisol:** En la mayor parte de trabajos, la primera operación que hay que ejecutar es la fusión de los metales con los que se va a trabajar, materia prima de la obra a realizar. Para ello, se hace uso del crisol, una cavidad fabricada, normalmente, en grafito con cierto contenido de arcilla y que puede soportar elementos a gran temperatura.

**Prensa:** esta herramienta es utilizada para darle forma al metal por el método de estampación. En función del resultado que se quiera conseguir, será necesaria una prensa de un tamaño y un peso determinado. Los troqueles, encargados de dar la forma deseada, podrán ser fabricados en el propio taller, si son sencillos, o encargados a un grabador, los más complicados. Ofrece una gran durabilidad y precisión, y es útil en la producción de piezas idénticas [10].

**Cizalla:** útil en el proceso de corte. Puede ser maniobrada a mano o por fuerza motriz.

**Taladro:** una de las operaciones más efectuadas en el taller es la de taladrado. Comunes son las máquinas de taladrar verticales, como la que aparece en la figura 13.



Figura 13. Taladro vertical perteneciente al taller actual de Marmolejo Orfebres.

**Soldadores:** la soldadura permite la unión rígida de dos o más piezas para constituir el conjunto final. Esta tarea puede llevarse a cabo mediante soldadores eléctricos por medio de clavija bifilar o mediante boquilla cónica que dirige la llama a la zona a soldar, desarrollando la temperatura necesaria para fundir la materia soldante de aportación sin dañar la pieza original a soldar.

**Torno:** el más extendido consiste en una barra cilíndrica de acero que gira gracias a la acción de un motor. En esta barra se coloca una horma de madera y un trozo de chapa del material deseado, la cual irá adoptando poco a poco la forma del molde de madera [11].

**Pulidora:** existen diferentes métodos para pulir la pieza con la que se está trabajando. Una de ellos se compone de dos discos de acero revestidos que giran para producir el pulido del metal (Figura 14).



Figura 14. Pulidora de metal perteneciente al actual taller de Marmolejo Orfebres.

Otro tipo de pulido se obtiene gracias a un chorro de arena o micro esferas de vidrio que salen propulsados hacia la superficie a pulir. Este método proporciona un acabado alternativo al pulido brillante con el que normalmente se terminan los metales preciosos.

**Plegadora:** otra de los procesos principales dentro de la orfebrería es el plegado de chapa. Maquinaria sencilla accionada a mano, ya que el material a plegar en el caso de la orfebrería no requiere de gran esfuerzo.

**Baños electrolíticos:** para dar uniformidad a la obra, ésta se introduce en un baño junto a una barra de plata, rodio u oro en una solución química que reacciona con el paso de la corriente eléctrica, recubriendo la pieza por igual con partículas de metal puro, otorgándole el brillo y acabado propio de los metales preciosos.

**Tornillo de banco:** su uso principal es la sujeción de las herramientas en los procesos de conformado y de forja. Este tornillo de banco se fija a la mesa, ya sea con tornillos o con una pinza integrada en la propia máquina.

**Cinceles:** para llevar a cabo el cincelado, la pieza se dispone sobre una gruesa capa de pez y se le va dando la forma deseada mediante el uso de una forja, yunque, servicio de tenaza, martillos y diferentes limas. Es importante una buena colección de cinceles, de diferentes tamaños para conseguir resultados diferentes, como la que aparece en la figura 15. Junto con los cinceles, debemos disponer de distintas herramientas de abultado con diferente forma según el resultado que se quiera obtener. Ejemplo de ellos son el punto, la bola, la almendra o el planete, denominados así según la impronta que dejan en la pieza. Para ser golpeados se hará uso del mazo o martillo.



Figura 15. Colección de cinceles del actual taller de Marmolejo Orfebres.

En todos los talleres de orfebrería se encuentran, además, máquinas a camino entre útiles y máquinas-herramienta y que son las encargadas de procesos tan importantes como la laminación, el trefilado y el bordeado. Estas máquinas serán el objetivo de estudio de este texto, y serán descritas a continuación más profundamente.

## 1.1. Laminadora de chapa.

El grueso de las planchas de los diferentes metales con los que se va a trabajar para la realización de la obra de orfebrería debe ser, en la mayoría de casos, reducido mediante laminación (figura 16), lo que se traducirá, además, en un aumento de dureza del metal.

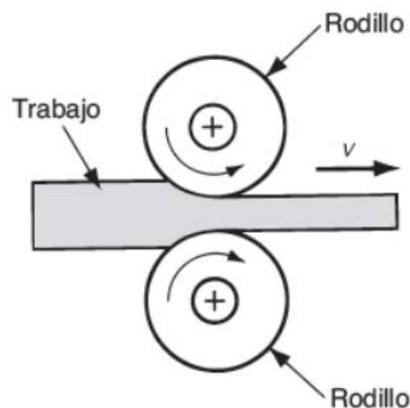


Figura 16. Proceso de laminación mediante rodillos.

Para llevar a cabo esta reducción de grosor de chapa se hace uso de la laminadora de chapa. El tamaño y estructura de las laminadoras pueden variar en función de la dureza del material a laminar, pero todas ellas tienen unas características comunes.

### 2.1.1 Elementos principales.

Las laminadoras de chapa están compuestas por dos rodillos cilíndricos paralelos. Entre estos dos rodillos, que desarrollan un movimiento giratorio, se hace pasar la lámina de metal a laminar.

Estos rodillos se alojan en una estructura fija que los sostiene y permite su movimiento giratorio (figura 17). Esta estructura se encuentra anclada a su bancada o a la mesa de trabajo correspondiente mediante tornillos.

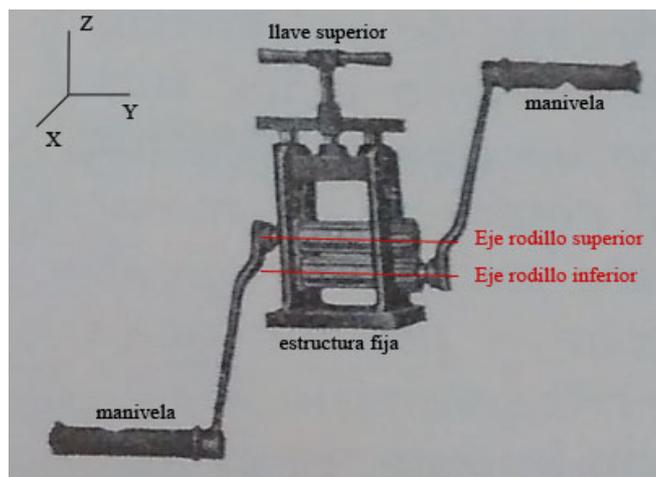


Figura 17. Componentes principales de la laminadora. [11]

El eje inferior de trabajo tendrá como único grado de libertad el giro alrededor del eje Y, y en los casos de laminadoras de mayor tamaño y esfuerzo a desarrollar, presentarán una biela de unión a la bancada para garantizar la estabilidad del eje y no permitir los desplazamientos del mismo en el eje Z.

El eje superior de trabajo, sin embargo, presenta dos grados de libertad. Uno de ellos corresponde al giro en eje Y, movimiento principal encargado del proceso de laminación. El otro corresponde a la traslación en eje Z. Esta traslación permite regular la distancia existente entre ambos cilindros y será reducida a medida que va desarrollándose el proceso de laminación, para conseguir de esta manera reducir el grosor de la lámina progresivamente tras cada pasada. Esta distancia es regulada mediante una rueda o manija dispuesta en la parte superior de la laminadora que se acciona de manera manual. El giro de dicha rueda o manija provoca el movimiento de traslación vertical del eje del cilindro superior gracias a una combinación de uniones de engranaje y tornillo.

### 2.1.2 Proceso de laminación de chapa.

El proceso de laminado puede ser descrito según los siguientes pasos [12]:

1. Se parte de un lingote de metal inicial, el cual es aconsejable compactar con un martillo pesado antes de laminar, golpeándolo en todas las direcciones, especialmente en las esquinas.
2. Girando la rosca superior de la laminadora se reduce la separación entre los dos cilindros y se reduce el grosor del lingote inicial.
3. Se comienza a laminar el lingote, reduciendo en cada pasada y progresivamente la distancia entre los cilindros, hasta lograr el grosor de lámina deseado. En ningún caso debe variarse el sentido de introducción de la lámina en la laminadora sin haber recocado antes la lámina, pues el metal se partiría en sucesivos laminados.
4. Al alcanzar una reducción aproximada de la mitad del lingote es necesario recocerlo. Una vez decapado y seco se puede volver a laminar.

### 2.1.3 Cinemática de la laminadora.

Las laminadoras presentan dos movimientos simples:

**Movimiento de rotación de los rodillos de laminación:** Es el movimiento principal de esta máquina y el responsable de producir la laminación del material con el que estamos trabajando.

Para producir este movimiento encontraremos diferentes configuraciones de la laminadora, en función del tamaño de la misma y del esfuerzo necesario que se deba transmitir para producir la laminación del material, pero en todos los casos este movimiento será desarrollado y transmitido a partir del juego de diferentes engranajes.

Las laminadoras de sobremesa, accionadas a mano y de mayor simpleza, presentan una manivela que imprime el movimiento giratorio a uno de los ejes (superior o inferior), como es el caso de la laminadora de la figura

19. Este eje presentará un engranaje conductor en su extremo opuesto, encargado de transmitir el movimiento al otro eje, en sentido inverso y relación de transmisión (ratio) igual a 1 (figura 18), para garantizar la homogeneidad en el trabajo desarrollado. Aquellas laminadoras que requieran más esfuerzo, incorporarán una segunda manivela en el otro eje.

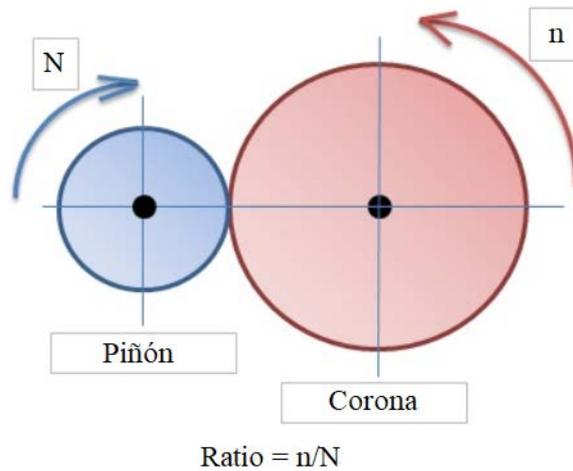


Figura 18. Relación de transmisión entre engranajes.

Las laminadoras de mayor tamaño (figura 20), habitualmente situadas sobre una bancada propia, y que requieran un mayor esfuerzo, incluirán un juego de engranajes extra con una relación de transmisión mayor de 1 (figura 18), facilitando al operario el trabajo en la misma, que transmitirá el movimiento de manera indirecta. Se imprimirá, por lo tanto, el movimiento manual sobre un eje con engranaje pequeño conductor (piñón), el cual conducirá su movimiento a uno de mayor tamaño (corona) unido al eje de trabajo de la máquina. La relación piñón-corona se traducirá, por tanto, en un menor esfuerzo por parte de quien lo acciona.



Figura 19. Laminadora manual de acción directa mediante manivela en el eje superior.



Figura 20. Laminadora de acción indirecta mediante juego piñón-corona en ambos ejes, superior e inferior [11].

**Traslación vertical del rodillo superior:** como se ha explicado anteriormente, el rodillo superior de todas las laminadoras debe presentar un grado de libertad relativo a la traslación vertical del mismo. Esto permitirá disminuir la distancia entre rodillos y reducir progresivamente el grosor de la lámina sobre la que se está trabajando.

Para ello se dispone de una rueda o manija en la parte superior de la laminadora, que engranará simétricamente con otros dos elementos laterales (figura 21). Estos elementos estarán formados por un engranaje y un eje roscado que funcionará como empujador.

Al provocar el giro de la manija o rueda, se transmitirá el giro a estos dos elementos laterales, que transformarán su movimiento giratorio en una traslación vertical gracias a la combinación de unión de engranaje y tornillo que se ha comentado anteriormente y que puede apreciarse en la figura 22. Así se controlará y se mantendrá estable la distancia entre los rodillos durante el trabajo de laminación.



Figuras 21 y 22. Combinación engranaje-tornillo para transformar el movimiento giratorio de la llave o rueda superior en la traslación vertical del eje del rodillo superior.

#### 2.1.4 Laminadora de chapa del taller de Fernando Marmolejo Camargo

La laminadora objeto de estudio en este texto se encuentra expuesta en el Museo de Artes y Costumbres Populares de Sevilla, en la sala destinada al oficio de la orfebrería (figura 23). Todos los elementos, máquinas y herramientas allí expuestas formaron parte de taller de Fernando Marmolejo Camargo y fueron donadas al museo en el año 1998.



Figura 23. Laminadora manual perteneciente al taller de Fernando Marmolejo y expuesta en Museo de Artes y Costumbres Populares de Sevilla.

Es una laminadora de gran tamaño anclada sobre bancada propia de madera y datada del año 1860. Presenta un eje con dos manivelas, las cuales eran accionadas por dos operarios (Figura 24). Este eje incorpora un engranaje a modo de piñón, que será el que imprimirá el movimiento al engranaje (corona) del cilindro inferior de la laminadora con un ratio 89/15 (Figura 25). El giro del cilindro inferior se transmitirá en sentido inverso y en un ratio igual al cilindro superior, produciendo así el movimiento de avance requerido para la laminación de la chapa de metal (Figura 26).



Figuras 24 y 25. Eje de rotación accionado a través de dos manivelas y transmisión de dicho movimiento giratorio al eje inferior de trabajo de la laminadora.

Puede apreciarse que el eje al que se acoplan las dos manivelas es independiente y no se encuentra unido de manera fija a la estructura de la laminadora. Además, se encuentra anclado a la bancada en uno solo de sus extremos, lo que invita a pensar que probablemente este eje sea fruto de la evolución en el tiempo de esta máquina en función de las necesidades que el trabajador haya encontrado. Posiblemente este elemento se

incorporase posteriormente al conjunto como solución a una dificultad a la hora de accionar la laminadora mediante una manivela simple en el eje inferior o bien esta bancada y las uniones de la máquina a la misma no sea la original.

En el caso de esta laminadora, la distancia entre ambos cilindros de laminación puede ser variada gracias a un engranaje superior con manija. Esta llave engrana con otros dos elementos que presentan una unión de tornillo con la estructura de la máquina. Su movimiento giratorio se traducirá, por tanto, en un movimiento de traslación que moverá, solidario a él, el cilindro superior (Figura 26).



Figura 26. Sistemas de engranaje para la transmisión de movimiento rotatorio de un eje de trabajo a otro y para desplazamiento vertical del rodillo superior.

En cuanto al material en el que está fabricada la máquina, no se conocen sus características con certeza. Sin embargo, aunque la composición del acero no homogénea y controlada hasta el desarrollo del proceso Bessemer en 1856, este material se fabrica desde hace siglos, con distintos grados de pureza. Por lo tanto y dado que la máquina data de mediados de siglo XIX, se puede suponer que sus elementos principales están fabricados en acero.

## 1.2. Laminadora de hilo.

Otro de los elementos más utilizados por los maestros orfebres para el adorno y la realización de obras de arte es el hilo de metal. Para obtener hilos de sección definida y constante es necesario llevar a cabo el proceso de trefilado, proceso mediante el cual se hacen pasar alambres de metal por los orificios de la hilera. Para conseguir alambres iniciales de sección suficientemente pequeña para ser pasados por el orificio mayor de la hilera, los lingotes de material de partida deben ser laminados en una laminadora de hilo.

### 1.2.1. Elementos principales.

La estructura de la laminadora de hilo es igual a la de la laminadora. Consta de dos ejes paralelos cuya distancia puede ser variada mediante una rueda o llave superior que transforma el movimiento giratorio en movimiento de traslación. Estos ejes se harán girar por fuerza motriz o manualmente mediante una manivela.

La diferencia entre ambas laminadoras reside en la forma de los rodillos entre los que se hace pasar el material. En el caso de la laminadora de chapa, consta de dos cilindros de superficies lisas mientras que la laminadora de hilo presenta dos rodillos con una geometría tal que genera rieles o canales de tamaño decreciente progresivamente (figura 27) por los que ir pasando el lingote y reducir así su diámetro a la vez que

aumentamos su longitud.



Figura 27. Perfil del rodillo para la trefiladora.

### 1.2.2. Cinemática de la laminadora de hilo.

Los mecanismos de la laminadora de hilo son los mismos que los de la de chapa, ya que la única diferencia entre ambas es el perfil de los rodillos de trabajo. Por lo tanto, presenta el movimiento giratorio de sus ejes mediante el juego de engranajes y el desplazamiento vertical del eje superior que permitirá la reducción del tamaño del lingote con el que se trabaja.

### 1.2.3. Proceso de trefilado.

El hilo que queremos obtener para la realización de la obra puede partir inicialmente o bien de un lingote de metal o bien del corte en tiras de una plancha de metal. Estas piezas iniciales se harán pasar por la laminadora de hilo para llevar a cabo la reducción de su sección, tal y como se muestra en las figuras 28 y 29.



Figuras 28 y 29. Lingotes de metal en el proceso de laminado [12] [13].

Dado que el paso de los lingotes por el perfil de los rodillos de la laminadora no proporciona una sección constante al hilo, una vez ha sido reducida la sección del hilo con la laminadora al mínimo posible, se procede a realizar el estirado del mismo en la hilera, proceso conocido como trefilado. La hilera es una placa que presenta una serie de orificios graduados, alineados y numerados según el tamaño de sus diámetros en sentido decreciente y escalonado de décima en décima de milímetro. El hilo se pasa con cierta fuerza a través de estos orificios, obteniendo así una sección definida y constante en toda su longitud.

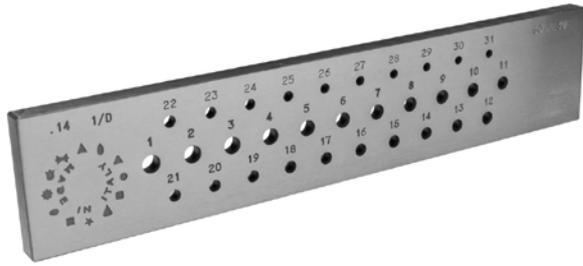


Figura 30. Hilera de orificios circulares.

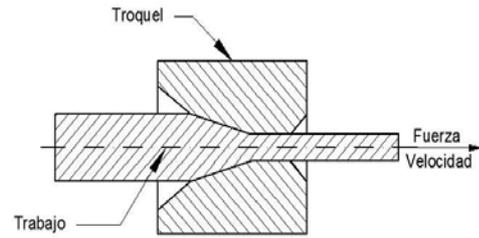


Figura 31. Proceso de trefilado.

Estas hileras pueden presentar orificios de distintos tipos, con formas circulares, de media caña, cuadradas, rectangulares o de estrella.

Para hacer pasar el hilo por la hilera es necesario el uso de tenazas de estirar (figura 32) y, por tanto, el uso de la fuerza. Esta fuerza puede ser aplicada manualmente tirando de la tenaza de estirar, o bien fijando esta tenaza a un banco de estirar, facilitando así la labor al operario. Estas tenazas tienen bocas aserradas y uno de los brazos curvado en el extremo en forma de gancho para sujetarlas a la cadena o correa del banco de estirar, o como apoyo para su empleo manual.

El banco de estirado está diseñado especialmente para el estirado de hilo y se usa en combinación con las hileras y las tenazas de estirar. La mayoría de los aparatos emplea un sistema de manivela para mover las correas que tiran del hilo que pasa por los orificios de la hilera (figura 33). Estos mecanismos pueden ser de correa o de cadena y algunos pueden estar motorizados.



Figura 32. Tenazas de estirar.



Figura 33. Banco de estirado.

El proceso de trefilado puede ser descrito en los siguientes pasos [12]:

1. Se parte de rieles o lingotes de metal fundidos con la intención de empezar a trefilar hilo.
2. Se reduce la sección del hilo cambiando progresivamente de canal en la laminadora de hilo. Se empieza por la mayor de las ranuras y se van intercambiando alternativamente las caras del hilo sobre su eje con el fin de evitar la aparición de escamas en el hilo. Al laminar se evitará la aparición de rebabas en los extremos del riel por exceso de presión. Si esto ocurre, se eliminarán con una lima gruesa antes de continuar con el trefilado.
3. Se procede a la reducción continua del hilo hasta lograr el resultado deseado. Se recuece el hilo cuando alcanza la mitad de su espesor inicial y, posteriormente, se decapa y enjuaga en agua antes de continuar laminando.

4. Una vez terminado el riel, se lima la punta del hilo con una lima gruesa para poder pasarla por el agujero de la hilera.
5. Después de recocer, se elige un perfil de hilera y se pasa la punta del hilo por el agujero cuyo diámetro se ajuste mejor al diámetro del hilo.
6. En la máquina de trefilar se empieza a estirar el hilo por su extremo (figura 34). Reduciendo progresivamente el tamaño de los agujeros se reducirá también el diámetro del hilo, siguiendo siempre la numeración indicada en la hilera.



Figura 34. Estirado de hilo a través de hilera circular en banco de estirado.

#### 1.2.4. Laminadora de hilo del taller de Fernando Marmolejo Camargo

La laminadora de hilo estudiada en este texto pertenece al taller actual de Marmolejo Orfebres, regentado por Juan José y Alejandro Marmolejo, hijos de Fernando Marmolejo Camargo (figura 35).

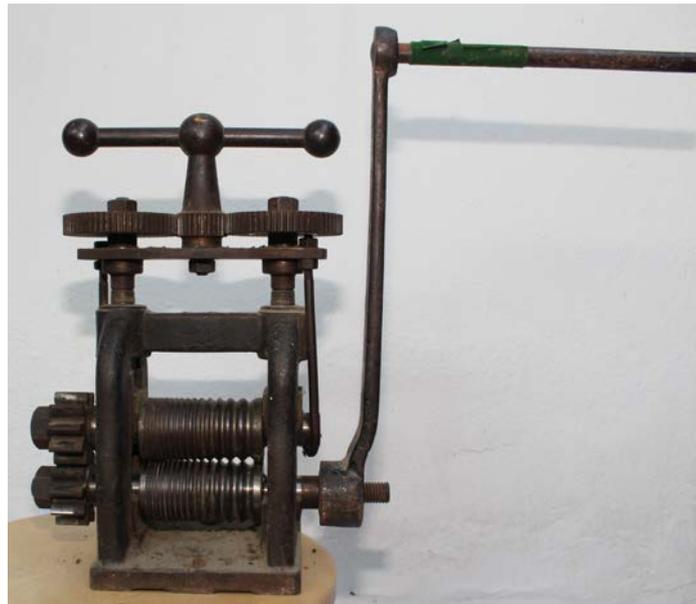


Figura 35. Laminadora de hilo perteneciente al taller Marmolejo Orfebres.

Es una laminadora de tamaño medio, accionada mediante una sola manivela que imprime el movimiento en el eje del rodillo inferior de trabajo (figura 36). Este eje conductor transmite el movimiento de rotación al eje superior mediante engranajes en sentido inverso y relación de transmisión igual a 1 (figura 36 y 37).

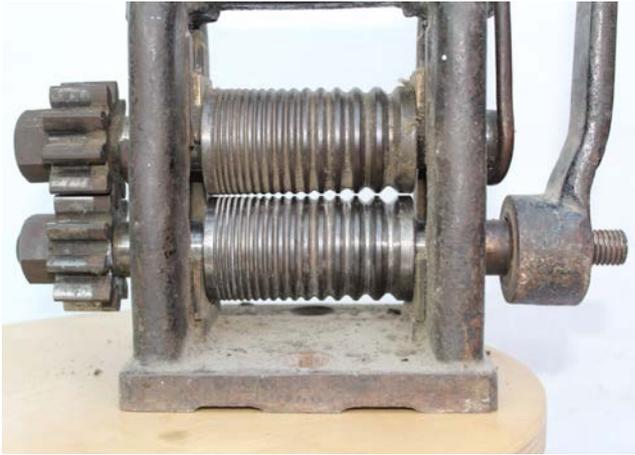


Figura 36. Vista frontal de ejes de laminación y juego de engranajes para la transmisión del movimiento giratorio.



Figura 37. Vista lateral de los engranajes para la transmisión de movimiento giratorio entre ejes.

Para el movimiento de traslación vertical del rodillo superior se dispone de un engranaje con manija en la parte superior, al igual que la laminadora descrita en el apartado anterior (figura 38). Este elemento engrana con otros dos engranajes laterales cuyo eje rosca en el cuerpo de la laminadora y transforma el movimiento giratorio en desplazamiento vertical, como puede apreciarse en la figura 39.



Figura 38. Juego de engranajes con manija.



Figura 39. Engranaje lateral con eje roscado en el cuerpo.

A pesar de que la máquina presenta dos orificios para poder ser anclada, hoy en día el taller Marmolejo Orfebres no hace uso de esta laminadora, por lo que no se encuentra anclada a ninguna bancada de manera permanente.

No se tiene certeza sobre el año de fabricación de esta máquina pero se estima que data de finales de siglo XIX o principios del XX. En este marco histórico, el acero ha alcanzado grandes producciones a nivel mundial, por lo que se supone fabricada en acero en su totalidad. Por la geometría compleja del cuerpo y el acabado superficial, este se supone fabricado mediante fundición y el resto de elementos mecanizados.

### 1.3. Bordonadora

Otra de las labores a llevar a cabo por parte de los maestros orfebres es el bordeado o la generación de un perfil, moldura, asentados, rebordes, achaflanados, pestañas, etc., sobre tiras de metal y chapas. Este trabajo puede realizarse de manera manual, mediante el cincelado de la chapa, o bien haciendo uso de la máquina bordonadora universal, la cual permitirá obtener un resultado más homogéneo de manera más eficaz y rápida.

#### 1.3.1. Elementos principales.

La bordonadora presenta un cuerpo fijo que se ancla a una bancada o tornillo de banco. En este cuerpo se alojan dos ejes de rotación en cuyos extremos se sitúan los elementos de trabajo, discos con perfiles macho-hembra que imprimirán la forma deseada en el metal por un proceso semejante al de laminación (figura 40). La forma de estos discos determinará el reborde o la moldura que imprimiremos en el metal. Así, cada taller dispone de distintos juegos de perfiles macho-hembra que le permitan obtener diferentes resultados.

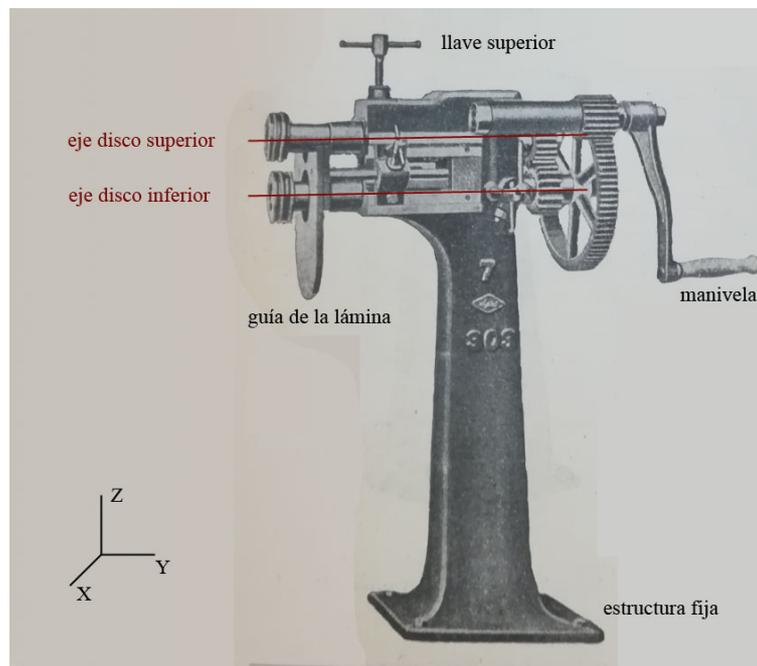


Figura 40. Componentes principales de la bordonadora [11].

El eje superior presenta dos grados de libertad. El primero es el relativo al giro del mismo alrededor del eje Y, el cual será provocado mediante el accionamiento de una manivela, y será transmitido al eje inferior mediante un juego de engranaje de ratio inverso e igual a 1. Además, cuenta con un segundo grado de libertad que permitirá modificar la distancia en eje Z del eje superior con respecto al inferior.

El eje inferior cuenta también con dos grados de libertad. Uno de ellos relativo al giro alrededor del eje Y. El otro grado de libertad le permite una traslación en el eje Y que ayuda a centrar y a determinar la posición relativa de los juegos de perfiles macho-hembra.

Además, para facilitar el guiado de la chapa a moldear, la bordonadora cuenta con un elemento guía cuya posición puede ser modificada en función del tamaño de cada chapa a trabajar.

Esta máquina, al igual que las laminadoras descritas anteriormente puede ser accionada a mano o por fuerza motriz, en función de los requerimientos propios de cada taller.

#### 2.1.5 Cinemática de la bordonadora.

La bordonadora presenta una serie de mecanismos simples encargados de producir tres movimientos principales:

**Movimiento de giro de los cabezales:** Es el movimiento principal de la máquina y el responsable de producir el modelado de la chapa o lámina que hacemos pasar entre los dos discos operadores.

Para producir este movimiento, y al igual que en las laminadoras previamente descritas, pueden aparecer diferentes configuraciones en función del tamaño de la máquina y el esfuerzo necesario que se deba transmitir para producir el grabado en la superficie del material, pero en todos los casos será desarrollado y transmitido a partir del juego de diferentes engranajes.

Las bordonadoras más simples serán accionadas a mano y presentan una manivela que imprime el movimiento giratorio a uno de los ejes, normalmente el superior. Este eje alojará, además, un engranaje encargado de transmitir este movimiento al otro eje, el inferior, en sentido inverso y ratio 1.

Para facilitar la labor al operario, algunas bordonadoras incluirán un segundo juego de engranaje, de modo que la manivela será la encargada de provocar el movimiento en un engranaje de menor tamaño (piñón) y este transmitirá el movimiento a un engranaje de mayor tamaño (corona), el cual formará parte del eje de trabajo de la máquina. De este modo se reduce el esfuerzo requerido para el movimiento de los ejes y, por tanto, para el trabajo sobre el metal. Este es el caso de la bordonadora que aparece en la figura 40.

**Traslación vertical del eje superior:** Al igual que encontrábamos en las laminadoras previamente descritas, las bordonadoras harán uso de una llave-tornillo con manija en su parte superior cuyo movimiento giratorio se traducirá, gracias a la unión de tornillo con el cuerpo fijo de la máquina, en un desplazamiento o traslación en el eje Z. La base de este tornillo apoya sobre el eje superior, realizando un empuje sobre él y haciéndole descender.

Este movimiento permite modificar la distancia existente entre ambos discos operadores en función del grosor de la lámina o chapa sobre la que vamos a realizar el trabajo.

**Traslación horizontal del eje inferior:** si bien en las dos laminadoras anteriores ambos rodillos, superior e inferior, presentaban un mismo perfil y trabajaban de manera simétrica, en el caso de la bordonadora, los discos operadores presentan un perfil macho-hembra que encajan entre sí, produciendo una muesca o moldura en la lámina, y cada juego de discos presenta un perfil diferente para obtener distintos resultados. Por lo tanto, en función del perfil que presenten estos discos será necesario centrarlos entre sí y, por lo tanto, tener la posibilidad de desplazar un eje con respecto a otro en la dirección Y.

Para ello, el eje inferior dispondrá de una pieza cuyo giro en el eje Y provoque el desplazamiento horizontal del eje. Esta pieza presenta una hendidura helicoidal en la cual se insertará un tornillo fijo al cuerpo de la máquina, que funcionará a modo de seguidor de leva. De esta forma, al girar la manivela de la pieza, provocamos el giro alrededor del eje Y de la misma. Gracias al mecanismo de seguidor-leva del tornillo fijo, este movimiento de giro se transformará en un movimiento de traslación en el eje Y. Esta pieza presenta un movimiento de traslación horizontal solidario al eje, pero girará de manera independiente alrededor del eje Y. Por lo tanto, una vez hemos centrado los dos discos operadores, con un tornillo de apriete impediremos el movimiento giratorio de la pieza para fijar la posición horizontal del eje inferior.

### 1.3.2. Bordonadora del taller de Fernando Marmolejo Camargo

La máquina objeto de estudio pertenece, al igual que la laminadora de hilo, al taller actual de Marmolejo Orfebres y es la que aparece en la figura 41.



Figura 41. Bordonadora perteneciente al taller Marmolejo Orfebres.

Es una bordonadora simple accionada a mano por una manivela, la cual transmite el movimiento de rotación de manera directa al eje superior. A través de un juego de engranajes de ratio inverso e igual a 1 se transmite el movimiento giratorio al eje inferior. Presenta tres orificios en su base que permiten su anclaje permanente a una bancada. Sin embargo, para reducir el espacio necesario para cada máquina y dado que el uso de la bordonadora no es diario en el taller de Marmolejo Orfebres, esta máquina no se encuentra anclada de manera permanente a ninguna bancada. Para su uso, los maestros y oficiales la fijan mediante un tornillo de banco tal y como se aprecia en la figura 42.



Figura 42. Bordonadora anclada mediante tornillo de banco en el taller Marmolejo Orfebres.

El taller dispone de diferentes cabezales o juegos de discos operadores en función del moldeado requerido en la pieza de trabajo (figuras 43 y 44). Los discos se colocan en los extremos de los ejes de giro y pueden ser fácilmente intercambiados por otro juego diferente con el uso de una pequeña palanca. La palanca ayuda a desatornillar los toques o tuercas que mantienen fijos los cabezales o los discos operadores.



Figuras 43 y 44. Palanca y juego de cabezales o discos operadores para la bordonadora del taller de Marmolejo Orfebres.

Si bien tampoco se tiene certeza del año de fabricación de la máquina, se estima que date de finales de siglo XIX o principios del XX, ya que esta máquina fue comprada a mediados de siglo XX por Fernando Marmolejo a otro antiguo maestro orfebre. Al igual que la laminadora de hilo, se supone fabricada en acero en su totalidad. Por la geometría compleja del cuerpo y el acabado superficial, este se supone fabricado mediante fundición y el resto de elementos mecanizados.



### 3 EVOLUCIÓN HISTÓRICA

El progreso de la civilización ha ido siempre de la mano del desarrollo de los útiles, herramientas y máquinas. Este desarrollo tuvo un claro y determinante punto de inflexión a mediados de siglo XVIII con la Primera Revolución Industrial, período durante el cual se vivió el mayor conjunto de transformaciones tecnológicas, económicas y sociales de la historia de la humanidad. Este progreso se verá reflejado en la maquinaria, traducéndose en una mejora de la calidad de los materiales y de la precisión del trabajo desarrollado, así como en la investigación y evolución de la fuerza motriz que accionaba dichas máquinas.

Hasta entonces las máquinas aprovechaban, principalmente, la energía humana, la del viento o el agua. Sin embargo, durante el siglo XVIII, el hombre dedicó todos sus esfuerzos a lograr la utilización de una fuente de energía alternativa, lo que desembocó en la creación de la máquina de vapor, la cual permitía transformar energía calórica en energía mecánica. A finales de siglo XIX presenciamos la aparición de los motores de combustión interna y los motores de energía eléctrica. Estos últimos convierten la energía eléctrica en energía mecánica por medio de la acción de los campos magnéticos generados en sus bobinas. Estos motores se utilizan hoy día en la mayoría de las máquinas modernas, siendo las industrias los principales consumidores de electricidad [14].

Otro de los cambios más significativos lo encontramos en el campo de los materiales gracias al desarrollo de la industria del acero. El acero, una aleación de hierro y carbono, es más duro y maleable que el hierro, por lo que se convierte en el material preferido para la fabricación de maquinaria, con el que se mejoran sus características. La producción de acero se vio revolucionada gracias a Henry Bessemer, quien en 1856 sienta las bases para la producción en masa de acero pudiendo controlar la homogeneidad, cantidad de carbono en la aleación y, por lo tanto, la calidad del acero [15].

Si bien todos estos avances tecnológicos tendrán su influencia en los talleres de orfebrería, es necesario hacer una distinción entre la artesanía, industria cuya particularidad es la escasa producción, y las industrias destinadas a la manufactura en grandes series. La orfebrería conserva a día de hoy ese carácter artístico, en el que cada pieza es una obra de arte única y diferente a las demás, con el trabajo realizado directamente de las manos del orfebre [11]. Por lo tanto, las máquinas que encontramos en el taller en el siglo XXI son esencialmente las mismas con las que trabajaban en el siglo XIX a diferencia del material y la fuerza motriz que las acciona. De esta manera, en la actualidad encontramos laminadoras de chapa, laminadoras de hilo (figura 45) y bordonadoras (figura 46) cuyo movimiento de giro de los ejes es producido por un motor eléctrico, facilitando el trabajo del orfebre.



Figura 45. Laminadoras de chapa e hilo motorizadas.



Figura 46. Bordonadora motorizada.

En el taller de Marmolejo Orfebres encontramos un conjunto de laminadoras de chapa e hilo motorizadas, las cuales han desplazado el uso de las laminadoras mostradas en el capítulo anterior. Estas laminadoras actuales mantienen exactamente los mismos elementos que las antiguas, con una estructura fija, dos ejes de rotación y una llave superior que permite desplazar el rodillo superior y reducir el grosor del material a laminar. La

diferencia reside en el accionamiento eléctrico del giro de los rodillos para la laminación, así como en el material de las mismas, de un acero de mejores características y mayor calidad fruto de la evolución de la industria del acero. Esto conlleva una compactación de la máquina, la cual no requerirá de un segundo juego de engranajes para facilitar su accionamiento manual.



Figura 47. Laminadoras de hilo y chapa motorizadas del actual taller Marmolejo Orfebres.

En cuanto a la bordonadora, el taller de Marmolejo Orfebres continúa haciendo uso de la máquina descrita en el anterior capítulo, accionada a mano mediante manivela. El motivo es que la cantidad de material a trabajar en la bordonera no es tan elevado y requiere un control del trabajo y precisión mayor, por lo que no encontraron necesario ni rentable sustituirla por una motorizada.

## 4 DISEÑO ASISTIDO POR ORDENADOR

El diseño asistido por ordenador, comúnmente conocido como CAD por sus siglas en inglés (Computer Aided Assisted), es una disciplina que estudia el uso de medios informáticos como herramienta soporte a ingenieros y diseñadores durante el proceso de diseño de un producto. Estos soportes informáticos pueden ser utilizados en muchas de las fases del diseño, siendo el dibujo el punto del proceso en el que encontramos un uso más extendido de los mismos [16].

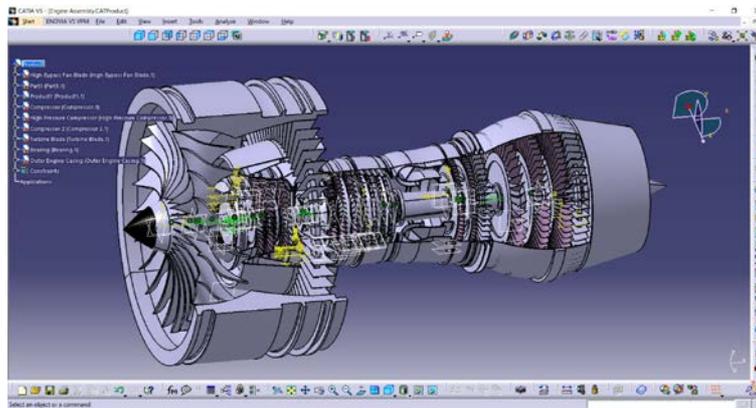


Figura 48. Diseño en CATIA de motor de aviación tipo turbofan

La gran evolución y el éxito de esta disciplina radican en la posibilidad de realizar modificaciones en el modelo con una respuesta inmediata de los cambios producidos en el diseño y el producto final, como puede apreciarse en el diagrama de la figura 49. Además, permite la generación computacional de un modelo que puede ser simulado como alternativa o complementación a ensayos físicos, lo que conlleva una clara reducción del tiempo de diseño y, por lo tanto, de los costes de los mismos [17].

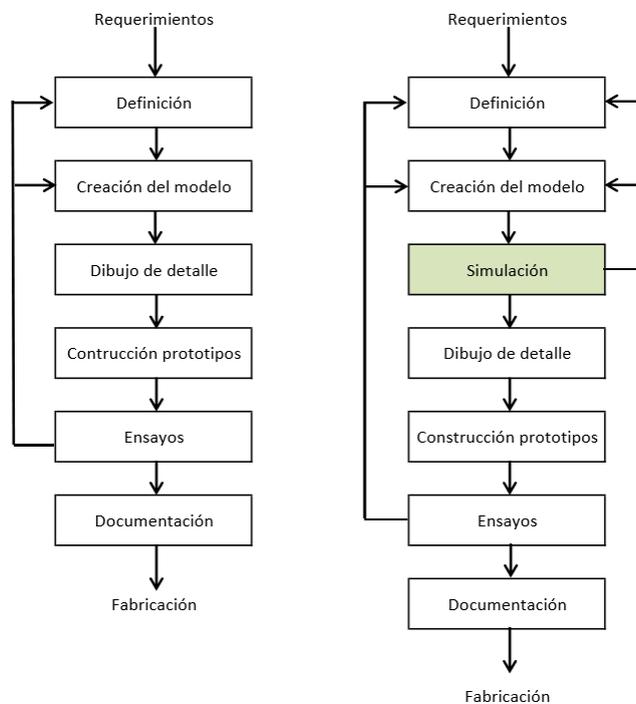


Figura 49. Proceso de diseño tradicional y proceso de diseño iterativo usando herramienta CAD/CAM/CAE [17]

Junto al CAD, y de manera complementaria, nace el CAM y el CAE.

La fabricación asistida por ordenador o CAM (Computer Aided Manufacturing) permitirá llevar a cabo un proceso de fabricación controlado por ordenador a través del control numérico (CN) de las máquinas-

herramienta, dándole a éstas instrucciones precisas como el posicionamiento de la broca, su recorrido y velocidad, activación de lubricante, etc.

El CAE (Computer Aided Engineering) o ingeniería asistida por ordenador estudia el uso de soportes informáticos para analizar el comportamiento del producto desde un punto de vista cinemático, dinámico, de esfuerzos y deformaciones entre otros, permitiendo el estudio y la simulación del producto sin la necesidad de ser fabricado. Esto influirá de manera determinante en la reducción de tiempo y coste de diseño y fabricación del producto.

## 4.1 CATIA V5

CATIA (Computer Aided Three Dimensional Interactive Application) es un programa de diseño, fabricación e ingeniería (CAD/CAM/CAE) comercializado por Dassault Systemes, Francia. Diseñado inicialmente para servir en el campo aeronáutico, este programa extiende su uso a multitud de campos industriales como la construcción y el automovilismo, siendo su función principal la de modelado avanzando de sólidos, superficies, ensamble, producción de dibujos, manufactura y análisis [16].

Está compuesto por una gran cantidad de módulos especializados a los que acudiremos en función de la necesidad propia de cada diseño, optimizando y facilitando el diseño de piezas y conjuntos. Caracterizado por una arquitectura abierta, es posible la personalización y desarrollo de aplicaciones a través de lenguajes de programación como C++ o Visual Basic.

### 4.1.1 Entornos de CATIA V5

Como se ha comentado anteriormente, la información en CATIA V5 está organizada en módulos de trabajo en función de la tarea que desarrolle. Estos módulos, a su vez, se agrupan en entornos en función de la utilidad conjunta. Los principales entornos en CATIA V5 de los que se hará uso en el desarrollo del proyecto son:

#### 4.1.1.1 Mechanical Design

Es la propuesta que ofrece CATIA para la conceptualización y diseño de piezas 3D, chapas metálicas, materiales compuestos, piezas mecanizadas y piezas fundidas. Abarca, también, diseño de mecanismos, ensambles y la generación de dibujos y planos de dichas piezas.

Módulos principales:

**Sketcher:** permite la generación de los bocetos 2D que servirán para generar posteriormente los sólidos 3D.

**Part Design:** módulo empleado para generar los sólidos 3D en base a los perfiles 2D generados en el módulo anterior.

**Assembly Design:** ofrece el ensamblaje de los componentes de un conjunto, con la posibilidad de limitar el movimiento y definir el grado de libertad de los mismos, obteniendo un conjunto ensamblado fiel al producto final.

**Wireframe & Surface Design:** permite la generación de superficies más complejas mediante modelos alámbricos y de superficie.

#### 4.1.1.2 Digital Mockup

Este entorno permite comprobar la validez del diseño mediante gran cantidad de simulaciones.

**DMU Kinematics Simulator:** Simula los mecanismos de los que se compone el diseño a través de la definición precisa de juntas, uniones y articulaciones, proporcionando el análisis de interferencias y distancias mínimas así como la creación de animaciones [18].

**DMU Fitting:** Este módulo hace posible la simulación del despiece de un ensamblaje o el recorrido visual siguiendo unas trayectorias previamente definidas.

#### 4.1.2 Justificación del uso de CATIA V5 en el proyecto

Creado inicialmente como programa de diseño CAD, CATIA ha evolucionado hasta conseguir aunar en un mismo software todas las herramientas necesarias para desarrollar el ciclo completo de un producto.

Todas sus funcionalidades se encuentran organizadas en entornos y módulos específicos para ofrecer al usuario el diseño, cálculo, análisis, simulación y generación de planos en un solo software.

Además, ofrece una extensa librería de materiales y la posibilidad de crear nuevos materiales para, no solo dotar de realismo físico a nuestro diseño, sino realizar cálculos y análisis fieles y preciosos. Por lo tanto, su versatilidad y potencia han motivado una gran extensión del uso de este software en el ámbito industrial actual.

Todas estas cualidades me despertaron un gran interés por aprender parte del manejo de este completo software y me impulsaron a elegir CATIA con respecto a otros softwares de diseño que pueden encontrarse actualmente en el mercado.



## 5 MODELADO EN CATIA

### 5.1 Laminadora de chapa

#### 5.1.1 Toma de medidas

Para realizar el modelado en CATIA V5 de esta máquina, y puesto que no se dispone de planos de la misma, fue necesario contactar con el Museo de Artes y Costumbres Populares de Sevilla, donde se encuentra expuesta. Ellos permitieron el acceso a la sala de exposición en dos jornadas diferentes para tomar las medidas, fotografías y bocetos oportunos para poder llevar a cabo el posterior modelado por ordenador.

Puesto que no se disponía de avanzados métodos de medida, se hizo uso de un pie de rey y regla. Así mismo y dado que el acceso a la máquina es restringido, se realizaron fotos de la misma tomando la regla como referencia para poder calcular por proporcionalidad alguna medida en el caso de ser necesario durante el modelado.

#### 5.1.2 Modelado en CATIA V5

Para abordar la descripción del modelado llevado a cabo en CATIA V5, la máquina será descompuesta en distintos conjuntos según la función que desempeñan (Figura 50). Estos conjuntos se descompondrán posteriormente en diferentes subconjuntos y estos, por último, en piezas o elementos individuales.

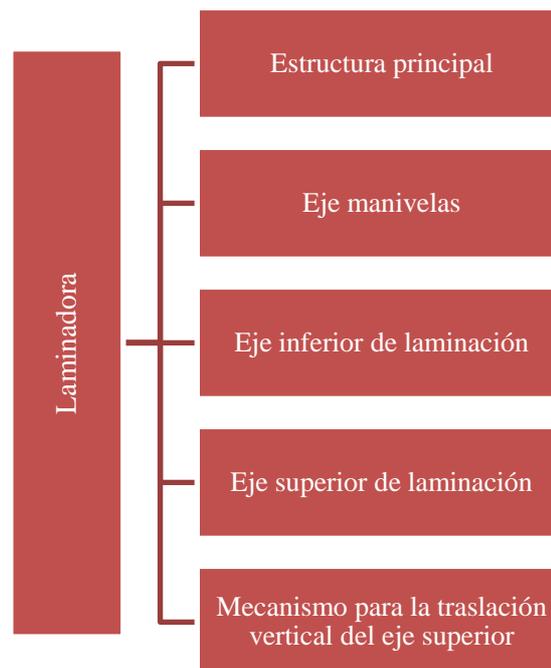


Figura 50. Diagrama de los conjuntos principales que conforman la laminadora de chapa.

#### **Estructura principal**

Es la estructura base de la laminadora, cuya función es dar soporte a los elementos móviles de la laminadora. Los subconjuntos en los que se descompone aparecen reflejados en la figura 51, y en las figuras 52 y 53 se muestran dos vistas generales de la estructura principal.

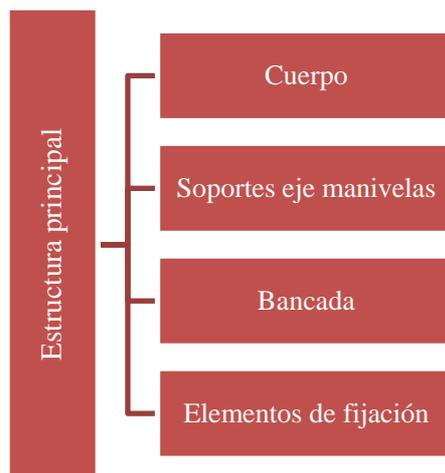
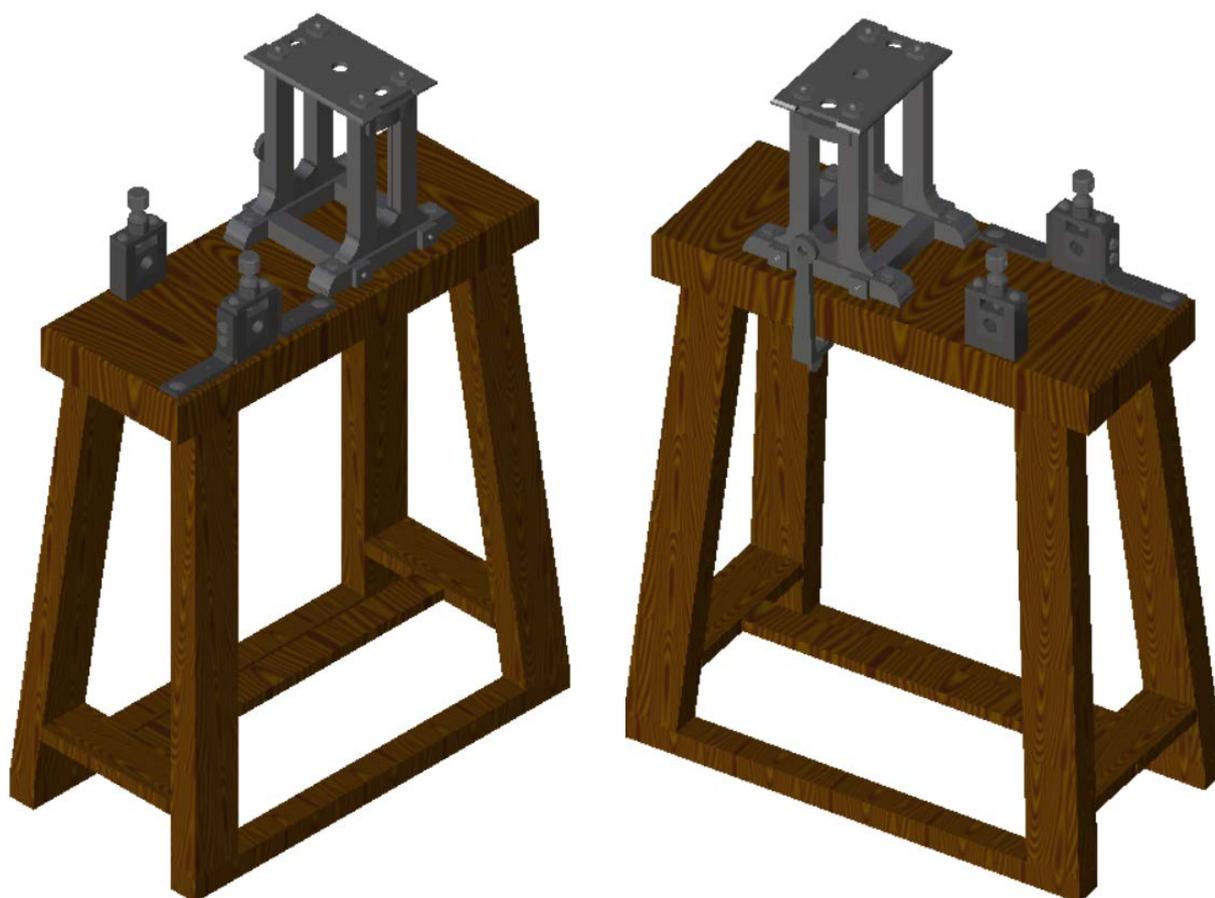


Figura 51. Estructura principal de la laminadora y sus subconjuntos.



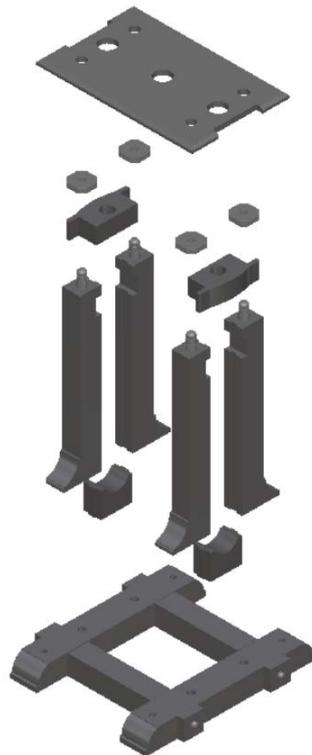
Figuras 52 y 53. Vistas de la estructura principal de la laminadora.

### Cuerpo

El cuerpo de la laminadora de chapa (figura 54) expuesta en el Museo de Artes y Costumbres Populares de Sevilla está formado por diferentes elementos (patas, base, tapa superior) unidos entre sí mediante ejes roscados en sus extremos (figura 55).



Figura 54. Cuerpo de la laminadora.



Figuras 55. Descomposición del cuerpo de la laminadora.

La base del cuerpo se compone por dos elementos base en el que se anclarán las patas, dos travesaños y dos ejes que los atraviesan aportándole unión y rigidez al conjunto. En sus extremos se encuentran tuercas de fijación (Figura 56).

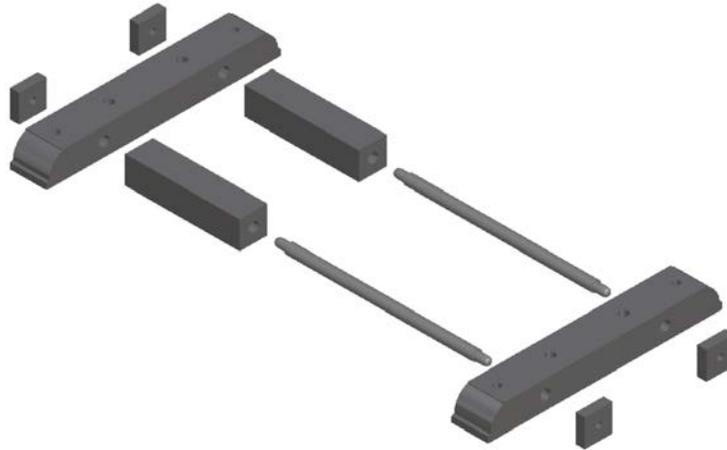


Figura 56. Descomposición de elementos de la base del cuerpo de la máquina.

El cuerpo dispone, además, de cuatro patas ancladas a la base a través de ejes roscados en su parte inferior. Estas patas dan soporte y fijación a dos elementos clave dentro del conjunto, que pueden ser apreciados en la figura 57. Por un lado, al elemento sobre el que descansa el eje inferior de laminación y, por otro, a la guía con agujero roscado que generará el movimiento de desplazamiento vertical del eje superior. Tanto las patas como las bases sobre las que se sustentan presentan motivos decorativos en sus extremos, y taladros que permiten ser atravesados por ejes que den unión y solidez a la estructura.

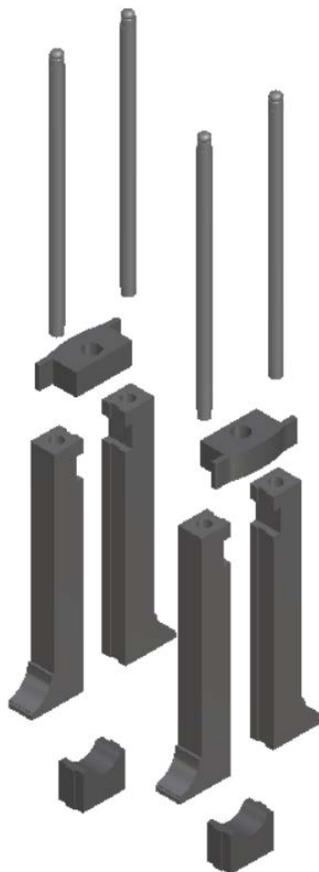


Figura 57. Descomposición de elementos verticales del cuerpo.

Por último, la máquina presenta una tapa superior que se fijará a las patas mediante una tuerca roscada al eje de las mismas (figura 58).

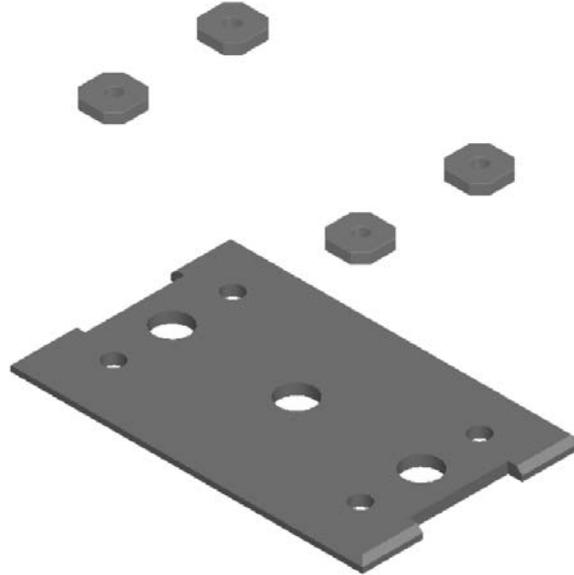


Figura 58. Tapa superior del cuerpo y tuercas cuadradas.

Las roscas que presenta la máquina en estudio no han podido ser medidas con galgas específicas, pero dado que data de 1860, éstas se han supuesto roscas de sistema Whitworth. CATIA V5 no incluye el sistema Whitworth en su librería, pero sí la posibilidad de crear un propio estilo de rosca.

Para ello es necesario crear un archivo tipo .txt donde vendrán definidos por columnas los diámetros nominales, el paso, diámetro menor y denominación de la rosca. Estos valores aparecen definidos en la siguiente tabla (tabla 1).

NominalDiam	Pitch	MinorDiam	BSW
3,17	0,635	2,60	1/8
4,76	1,058	3,70	3/16
6,350	1,270	4,724	1/4
7,938	1,411	6,131	5/16
9,525	1,588	7,492	3/8
11,113	1,814	8,789	7/16x
12,700	2,117	9,990	1/2
14,29	2,117	12	9/16
15,876	2,309	12,918	5/8
19,051	2,540	15,789	3/4
22,226	2,822	18,611	7/8

Tabla 1. Valores normalizados de rosca Whitworth.

De esta manera, cuando se realice una rosca se dispondrá de la relación entre el diámetro nominal, menor y paso, y el software aplicará los valores de manera automática obtenidos del archivo .txt creado, tal y como se aprecia en la figura 59.

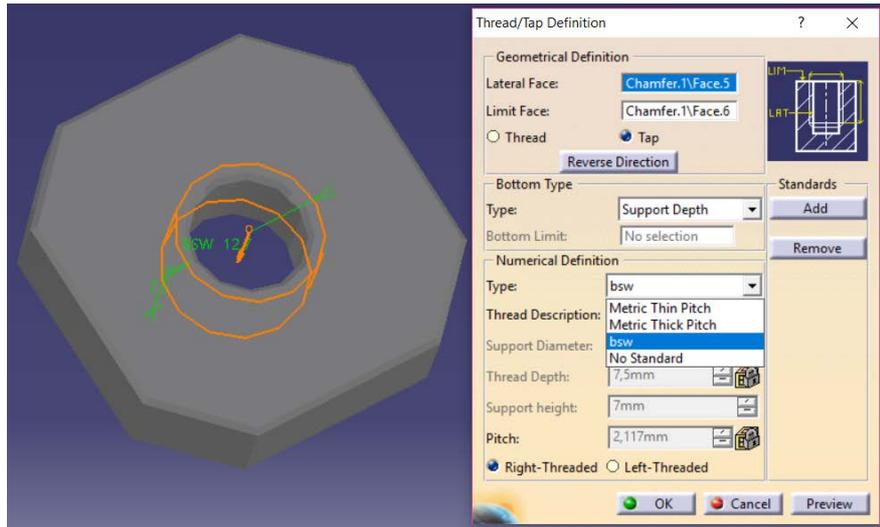


Figura 59. Selección de rosca Whitworth (BSW) añadida manualmente a la librería.

Todos los elementos descritos han sido modelados mediante la operación *pad*, salvo aquellos que presentan simetría axial que han sido modelados haciendo uso de la función *shaft* [19] [20].

#### Soporte eje de manivelas

Las manivelas que imprimen el movimiento de rotación a la máquina forman parte de un eje cuyo soporte y anclaje a la bancada es el que se muestra en la figura 60.

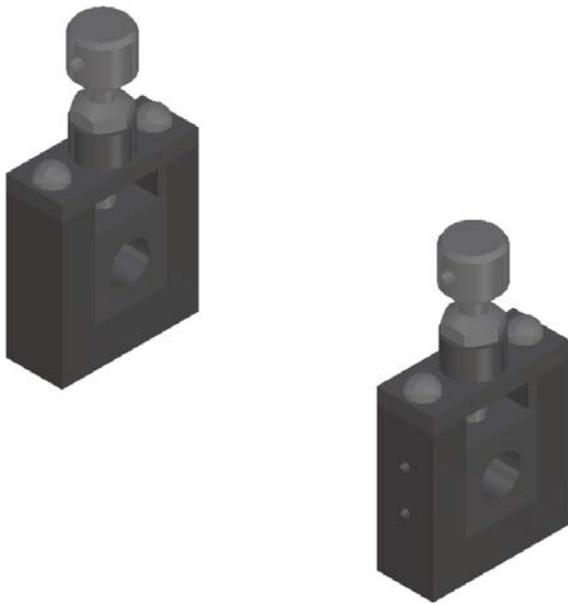


Figura 60. Soportes del eje de manivelas.

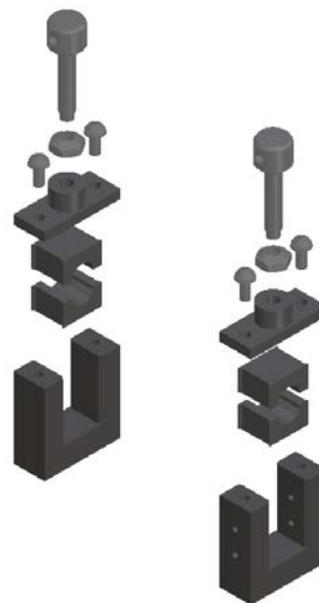


Figura 61. Descomposición de los elementos que conforman el soporte del eje de manivelas.

Estos soportes presentan una base en forma de U en el que se encajan dos elementos que acogen y dan apoyo al eje. Para evitar el movimiento de estos dos elementos, se dispone de una tapa superior y unos elementos de fijación por rosca (Figura 61).

#### Bancada

La bancada en la que se fija la laminadora (figura 62) es una bancada fabricada en madera y de una altura de 870 cm. En su zona inferior dispone de travesaños que le otorgan una mayor rigidez y estabilidad. La tabla superior presenta unos taladros para la fijación de la máquina a la bancada mediante tornillos pasantes (Figura 63). Para el modelado de las patas se ha hecho uso de la función *rib* [19] [20].



Figura 62. Bancada de madera.

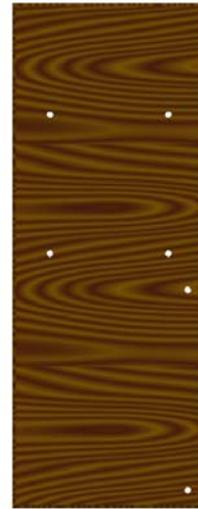


Figura 63. Vista de agujeros pasantes para fijación.

### Elementos de fijación

Tanto el cuerpo como los soportes para el eje de manivelas se fijan a la bancada mediante tornillos. En el caso del cuerpo, los tornillos conectan la base del cuerpo de forma directa con la bancada. En el caso de los soportes, sólo uno de ellos, el derecho, es unido a la bancada a través de unas escuadras atornilladas (figura 64). Estos tornillos serán fijados mediante tuerca y arandela por la parte inferior de la tabla de la bancada tal y como se observa en la figura 65 y 66.



Figuras 64 y 65. Vistas de elementos de fijación a la bancada.

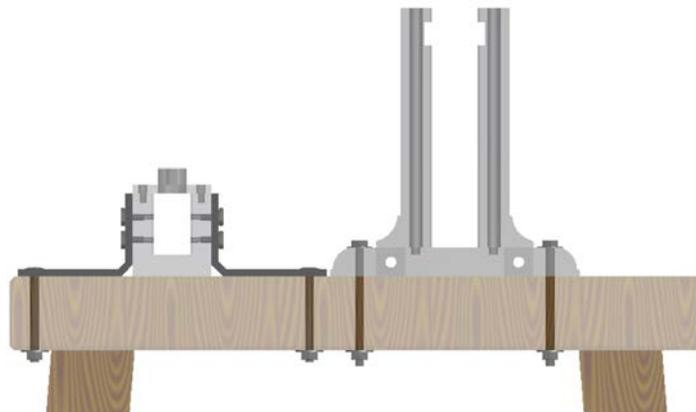
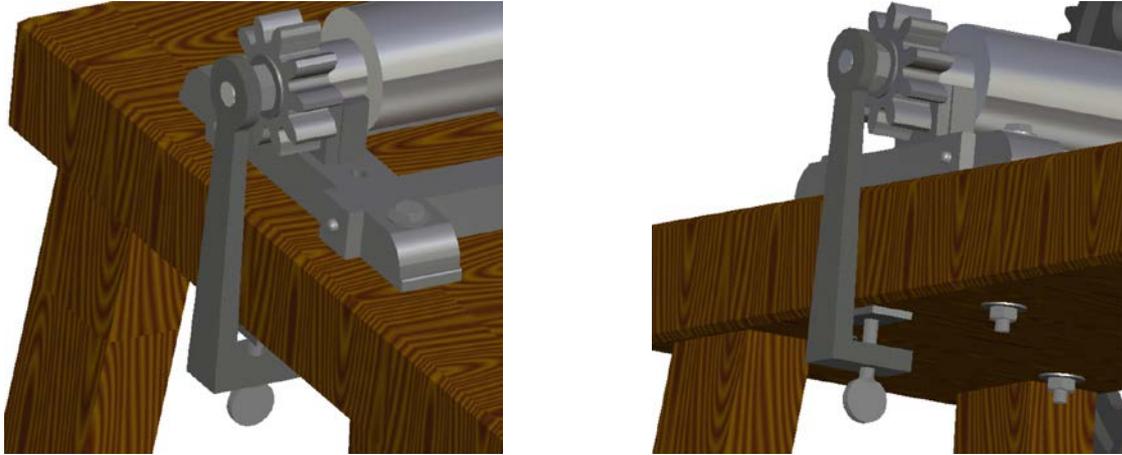


Figura 66. Vista de perfil de elementos de fijación del cuerpo y soporte a bancada.

Otro elemento de fijación del que dispone esta laminadora es una biela encargada de impedir el levantamiento de uno de los extremos del eje inferior durante la laminación (figura 67). Esta biela, modelada combinando dos sketches mediante la función *combine* [19] [20], presenta un agujero roscado en su parte inferior. En este agujero roscará un tornillo cuya superficie de apoyo será una placa metálica en la zona inferior de la bancada,

para evitar el deterioro de la madera tal y como puede apreciarse en la figura 68. Al roscar ese tornillo y hacer tope con la base de la bancada se producirá una tensión en la biela y, por lo tanto, en el extremo del eje inferior de laminación, impidiendo que pueda levantarse durante la laminación.



Figuras 67 y 68. Vistas de biela de fijación de eje inferior.

### Eje de manivelas

Este eje incorpora dos manivelas que, accionadas por dos trabajadores, provocan un movimiento de giro en el eje y, por lo tanto, en el piñón o engranaje conductor (figuras 69 y 70). Su fijación a la mesa, como se ha descrito en el apartado anterior, se produce a través de unos soportes atornillados que impiden todos los movimientos del eje salvo el de rotación en el eje Y.

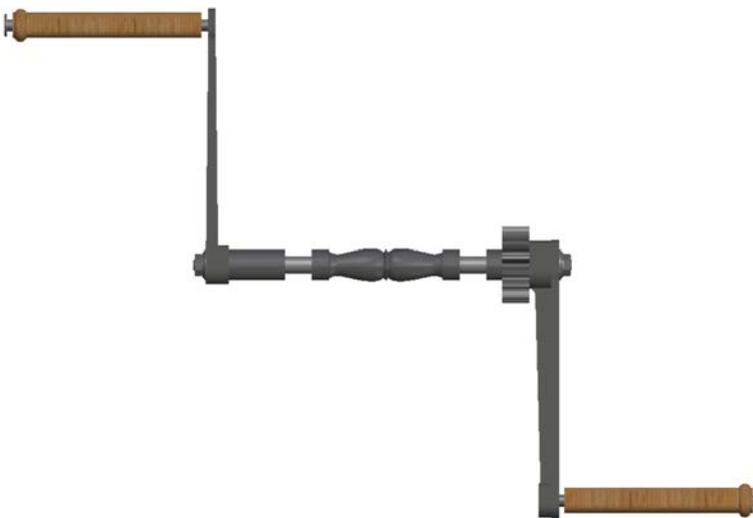


Figura 69. Vista frontal del eje de manivelas.

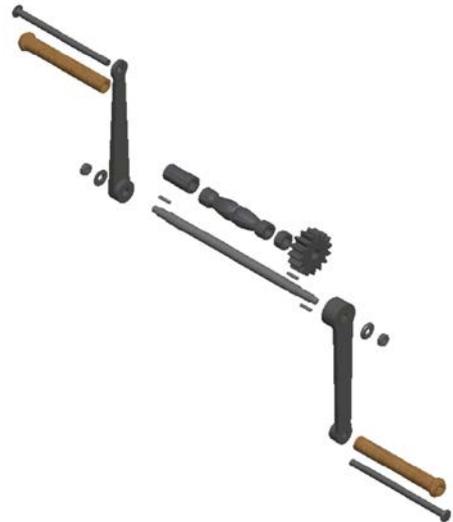


Figura 70. Descomposición del eje.

Las manivelas están compuestas por una biela, cuya longitud determina el par que se imprime en el eje, y un manillar de madera en su extremo, como puede apreciarse en las figuras 71 y 72. Las manivelas se acoplan al eje en los extremos del mismo y se fijan a él mediante tuercas y chavetas, estas últimas haciendo posible la transmisión del movimiento de rotación de las manivelas al eje.



Figura 71. Descomposición de elementos relativos a la manivela izquierda.



Figura 72. Descomposición de elementos relativos a la manivela derecha.

El engranaje o piñón se sitúa en el extremo derecho, inmediatamente después de la manivela. Este engranaje, que consta de 15 dientes, se une al eje mediante una chaveta, al igual que las manivelas (figura 73).

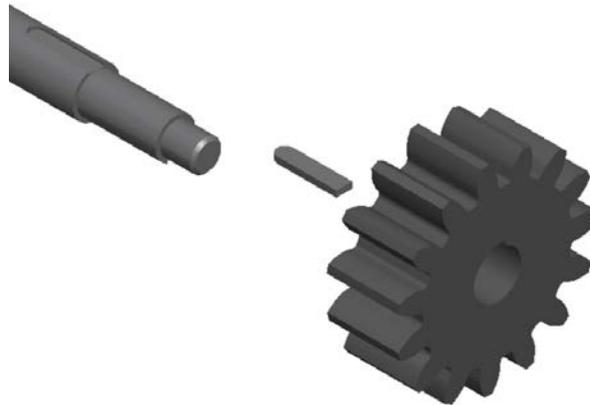


Figura 73. Descomposición del engranaje, chaveta y eje.

El engranaje, dada su geometría particular, será modelado a través de parámetros, lo que hará posible obtener un engranaje distinto de forma automática variando los parámetros correspondientes. Se definirán, por tanto, los siguientes parámetros (figura 74):

m: módulo, relación entre el diámetro primitivo y el número de dientes.

z: número de dientes del engranaje.

a: ángulo de presión.

Rp: radio de la circunferencia primitiva.  $Rp = \frac{m \times z}{2}$

Ro: radio de la circunferencia exterior o addendum.  $Ro = Rp + m$

Rb: radio de la circunferencia base.  $Rb = Rp \times \cos a$

Rr: radio de la circunferencia interior o dedendum.  $Rr = Rp - 1,25m$

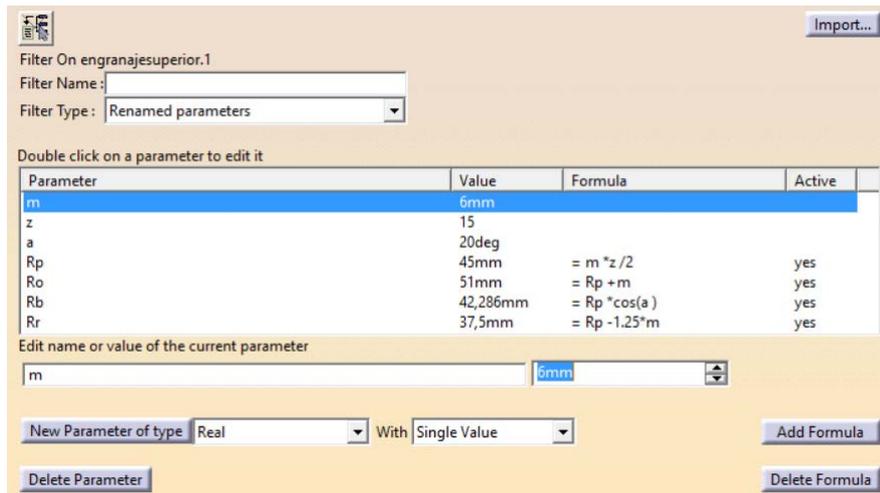


Figura 74. Definición de parámetros para modelado de engranajes.

Se comenzará con el trazado de la evolvente, geometría que presentan los dientes de los engranajes. Ésta es una curva plana de desarrollo cuyas normales son tangentes de la circunferencia. Es la curva que describe un hilo al ser desenrollado de una bobina circular (figura 75).

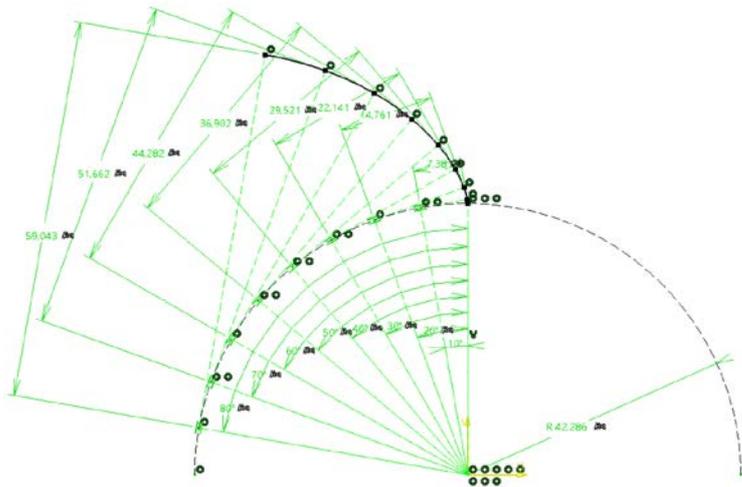
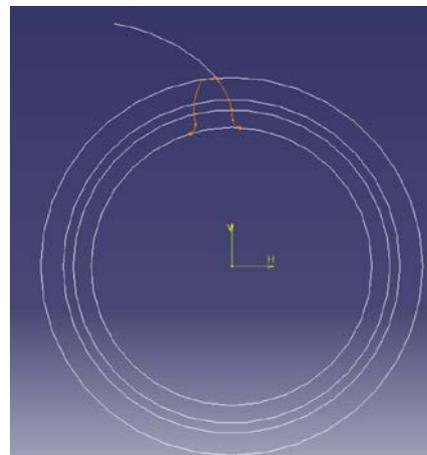
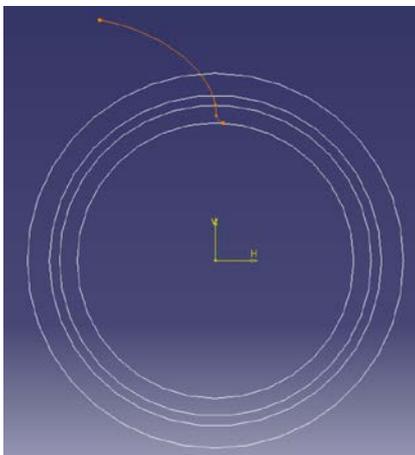


Figura 75. Trazado de la evolvente del diente del engranaje.

Una vez se ha trazado el desarrollo de la evolvente, se dibujarán las circunferencias clave en el diseño del engranaje (figura 76).



Figuras 76 y 77. Definición de la geometría del diente de engranaje.

Estas circunferencias definen el límite superior e inferior del diente. Una vez se obtiene la geometría del

diente, haciendo uso de la función *trim* (figura 77), será repetido siguiendo un patrón circular (*circular pattern*), en función del número de dientes 'z' particular del engranaje, tal y como se representa en la figura 78.

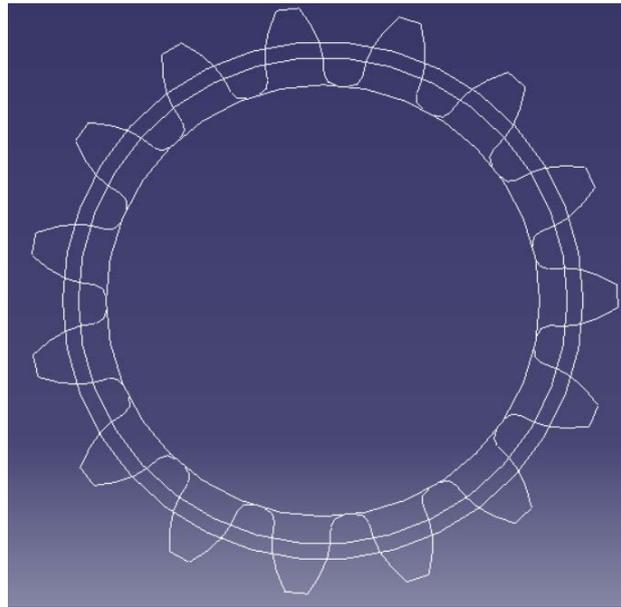


Figura 78. Patrón circular de los dientes del engranaje.

Esta geometría será extruida mediante la función *pad* y al elemento que obtenemos como resultado se le realizará posteriormente un agujero con la forma requerida mediante la operación *pocket* (figura 79).

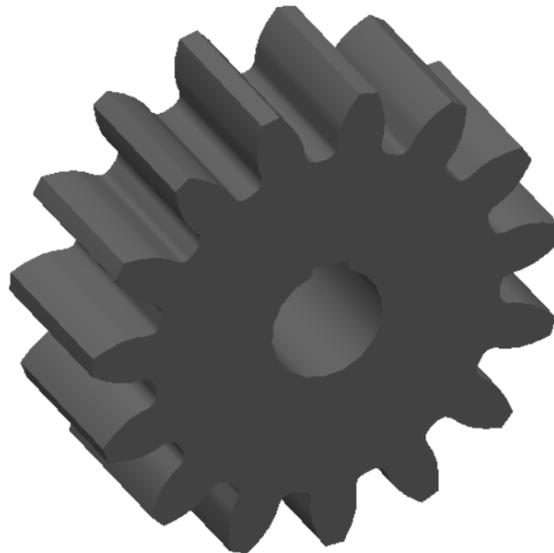
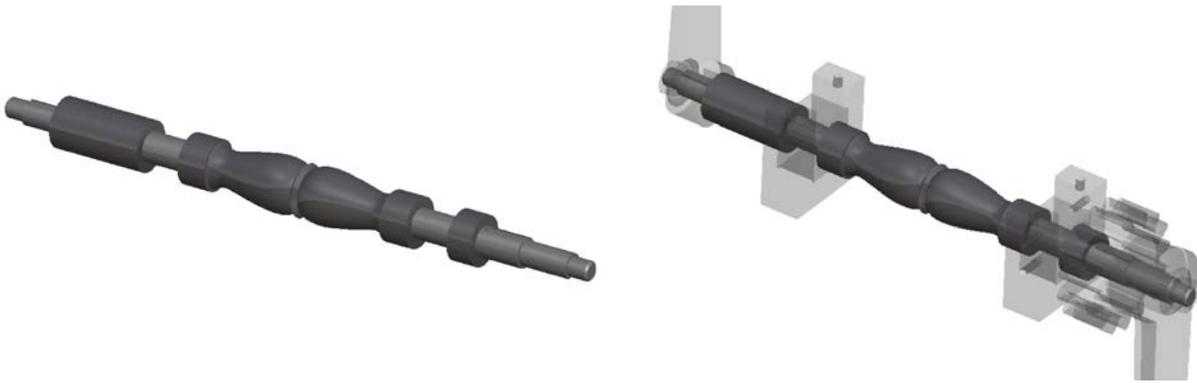


Figura 79. Resultado final del modelado del engranaje.

Los engranajes que se vayan a modelar en adelante tendrán como base este mismo diseño, en el que sólo habrá que modificar los valores de los parámetros necesarios (número de dientes, módulo y ángulo de presión).

Por último, al eje de manivelas se incorporan unos embellecedores que funcionan a la vez como separadores que dividen los distintos elementos del eje, como se puede apreciar en las figuras 80 y 81.



Figuras 80 y 81. Vistas de los embellecedores y separadores del eje de manivelas.

### Eje inferior de laminación

El eje inferior de laminación presenta como elementos principales; el rodillo o cilindro de laminación, dos engranajes y un rigidizador (figuras 82 y 83). El eje es una pieza continua mecanizada con variaciones de sección. De esta manera, la parte central tiene una sección de 77 mm y un ancho de 145 mm y es lo que denominamos rodillo o cilindro de laminación, ya que será la superficie de trabajo que estará en contacto con el metal a trabajar. El eje irá reduciendo su sección y a él se irán acoplando los elementos comentados previamente, como son el rigidizador y los engranajes en los extremos.



Figura 82. Eje inferior de laminación.



Figura 83. Descomposición de elementos del eje inferior.

El engranaje del extremo izquierdo se compone de 10 dientes y será el encargado de transmitir el movimiento de giro al eje superior de laminación con una relación de transmisión igual a 1 y sentido inverso. Sus grados de libertad se restringen mediante un juego de tuerca y arandela, los cuales impiden su movimiento de traslación en el eje Y, y una chaveta que fija el engranaje al eje y hace posible la transmisión del giro del eje al engranaje (figura 84).

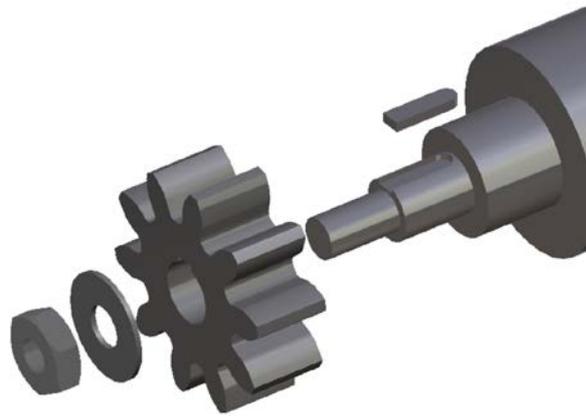


Figura 84. Engranaje y sus elementos de fijación al eje.

En el extremo contrario encontramos un rigidizador del eje que se une a él mediante chaveta (Figura 85).

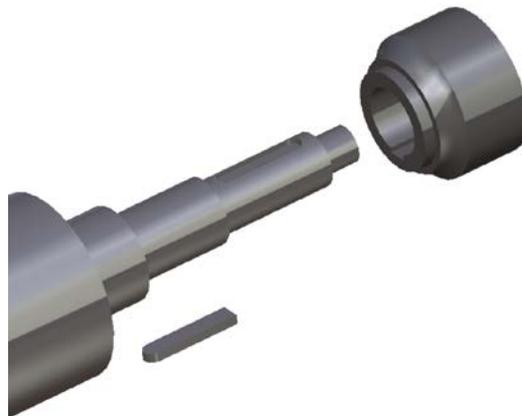


Figura 85. Descomposición del eje, rigidizador y chaveta.

Por último, encontramos la corona, el engranaje mayor de la laminadora (figuras 86 y 87). Este recibe el movimiento del piñón conductor situado en el eje de manivelas descrito en el apartado anterior. Es de gran tamaño, por lo que consta de un centro macizo y una circunferencia dentada exterior unida al centro mediante 5 radios, lo que genera vacíos de material que disminuyen el peso del engranaje.



Figura 86. Vista del engranaje-corona del eje inferior.

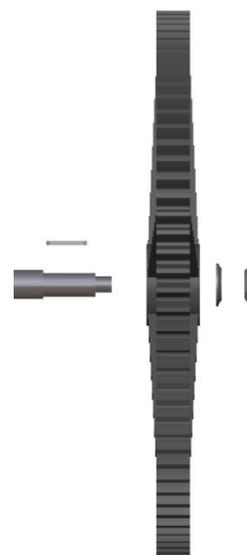


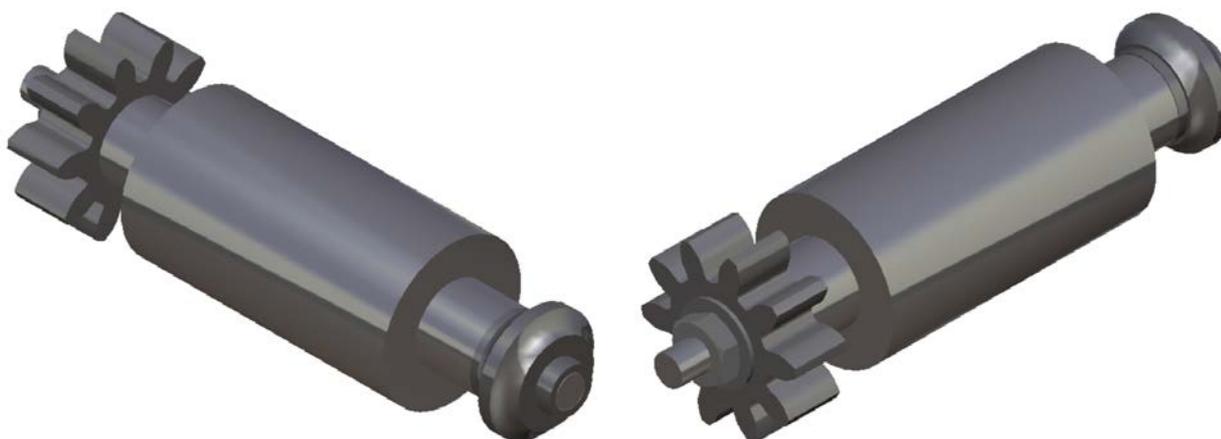
Figura 87. Descomposición del engranaje y elementos de fijación al eje.

Para generar los radios de la corona se ha hecho uso de la función *circular pattern*, creando el patrón circular

agujeros, y se le han añadido, posteriormente, los nervios rigidizadores mediante la operación *stiffener*.

### Eje superior de laminación

El eje superior está compuesto por un engranaje en su extremo izquierdo, rigidizador en el extremo derecho y el eje que, al igual que en el inferior, al variar su sección conforma el rodillo o cilindro de laminación superior (figuras 88 y 89).



Figuras 88 y 89. Vistas del eje superior de laminación.

El engranaje, situado en el extremo izquierdo, es de idéntica geometría que el engranaje que encontramos en el eje inferior, del cual recibe el movimiento de giro, y se encuentra fijado al eje mediante los mismos elementos de fijación, tuerca, arandela y chaveta. En el caso del rigidizador, su función es la misma pero su geometría es distinta ya que también es diferente la geometría del eje y los elementos que a él se acoplan. La descomposición de los elementos que componen el eje superior de laminación puede ser apreciado en la figura 90.

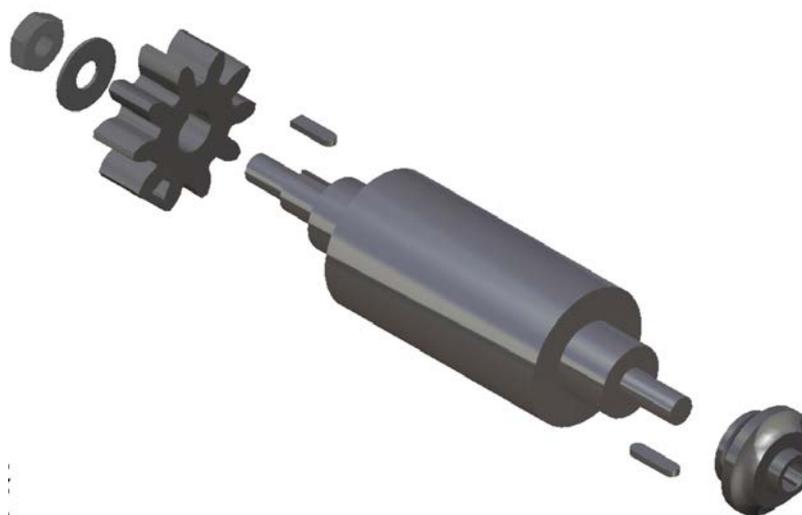


Figura 90. Descomposición de los elementos del eje superior de laminación.

### Mecanismo para la traslación vertical del eje superior

Como ya fue descrito anteriormente, las laminadoras disponen de un mecanismo encargado de desplazar verticalmente el eje superior de laminación, de manera que podemos ir reduciendo progresivamente el grosor de la chapa o lámina con la que se trabaja.

Para ello se dispone de un juego de engranajes adaptado a un soporte que está unido al eje superior, de tal forma que el eje superior se desplaza verticalmente de manera solidaria a este mecanismo. Los subconjuntos de los que se compone este mecanismo pueden ser apreciados en el diagrama de la figura 91. Las vistas del conjunto completo se muestran en las figuras 92 y 93.

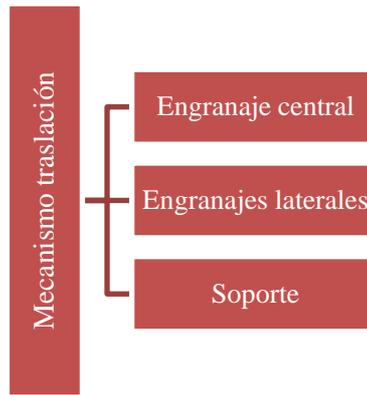
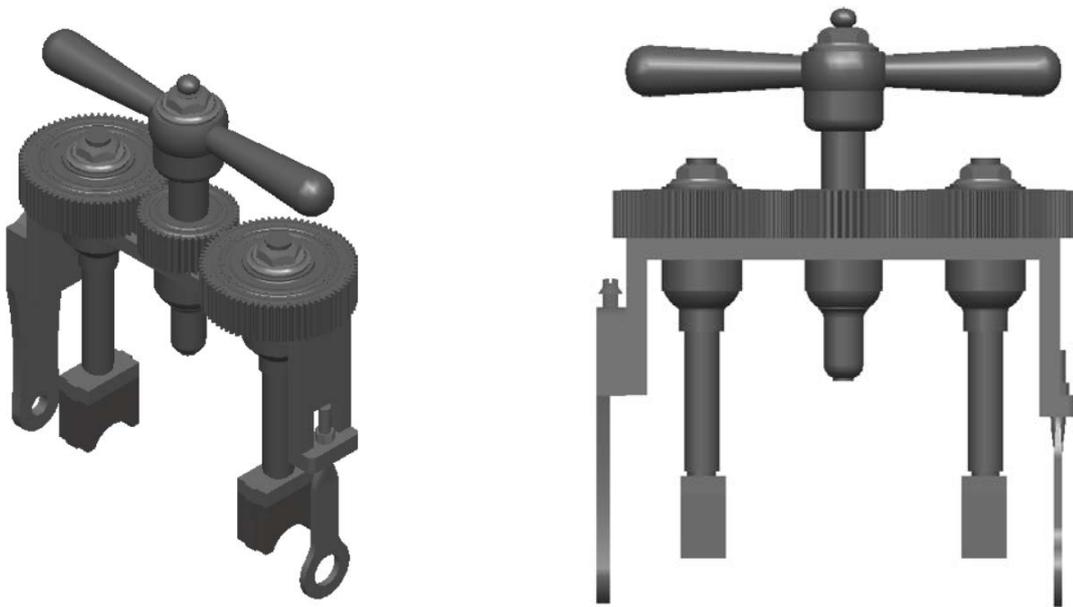


Figura 91. Diagrama de elementos pertenecientes al mecanismo de traslación vertical.



Figuras 92 y 93. Vistas del mecanismo de traslación vertical del eje superior.

El elemento motriz o conductor del mecanismo presenta una manija que se gira manualmente y un engranaje (figuras 94 y 95). Este engranaje, de 47 dientes, será el encargado de transmitir su movimiento de giro a los engranajes laterales.

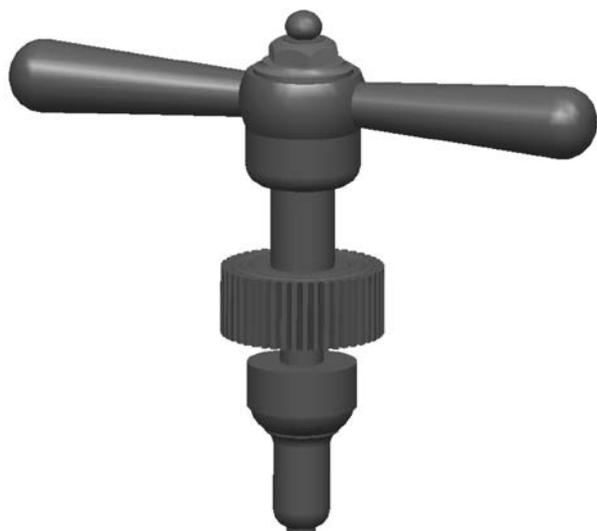


Figura 94. Manija con engranaje central.



Figura 95. Descomposición de elementos que conforman la manija central.

Estos engranajes laterales que cuentan con 75 dientes, son solidarios a un eje vertical a través de una claveta, como puede observarse en las figuras 96 y 97 y que cuentan con un cuerpo roscado.



Figura 96. Engranaje lateral con eje roscado.



Figura 97. Descomposición de elementos del engranaje lateral.

El eje vertical solidario al engranaje roscará con una guía fija a la estructura de la máquina, tal y como se muestra en la figura 98, por lo que el movimiento de giro del engranaje se verá traducido en un movimiento de traslación vertical. Este movimiento de traslación se transmite al eje superior de laminación a través de los dos elementos (figura 98); uno de ellos con forma semicircular en su base que acoge la geometría del eje de laminación y otro elemento intermedio.

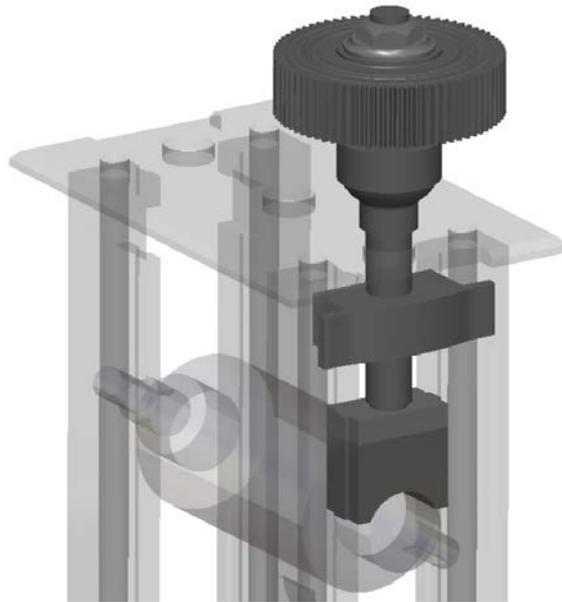
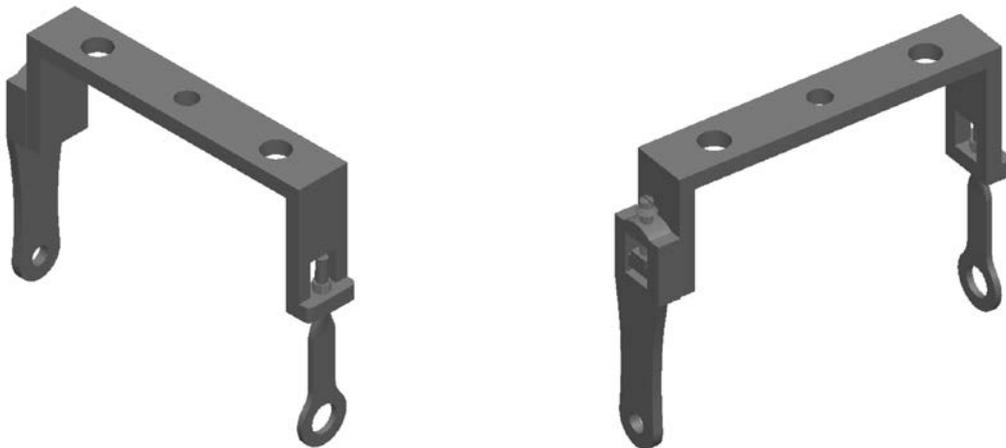


Figura 98. Engranaje con eje roscado a la guía y piezas de apoyo para el empuje al eje superior de laminación.

El juego de engranajes debe estar unido al eje superior de laminación para sostenerlo y provocar en él el desplazamiento vertical deseado. Esta fijación se realiza a través de dos bielas que se unirán a los extremos del eje superior, gracias a las cuales se conseguirá el movimiento de desplazamiento vertical en sentido ascendente (Figuras 99 y 100).

La descomposición de los elementos que conforman dicho soporte así como el conjunto final ensamblado pueden observarse en las figuras 101 y 102.



Figuras 99 y 100. Vistas del soporte y bielas de unión entre juegos de engranajes y eje superior de laminación.



Figura 101. Descomposición de elementos de soporte y bielas.

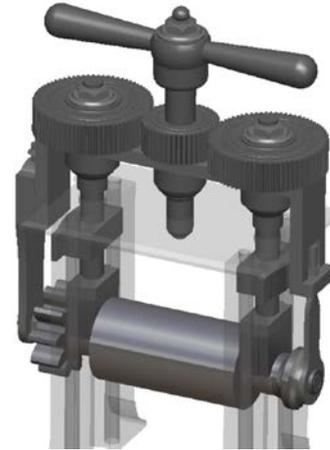
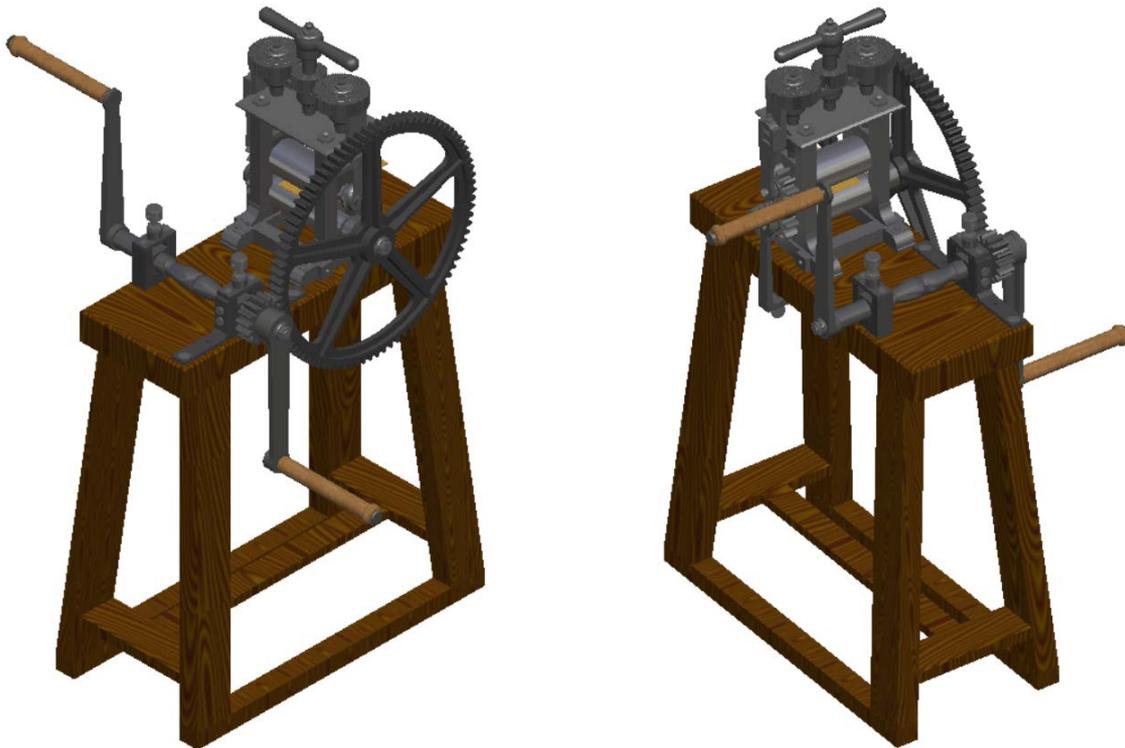


Figura 102. Mecanismo completo para el desplazamiento vertical del rodillo superior de laminación.

Una vez modelados y ensamblados los subconjuntos en el módulo de Assembly Design, se realizó el ensamblaje de todos ellos, obteniendo como resultado el conjunto completo. Este conjunto completo de la máquina laminadora de chapa expuesta en el Museo de Artes y Costumbres Populares de Sevilla y su bancada puede ser apreciado en las figuras 103 y 104. En las figuras 105 y 106 se muestra una imagen más cercana de la laminadora con una perspectiva de la zona frontal y otra de la parte posterior de la máquina.



Figuras 103 y 104. Vistas de la máquina laminadora de chapa completa.

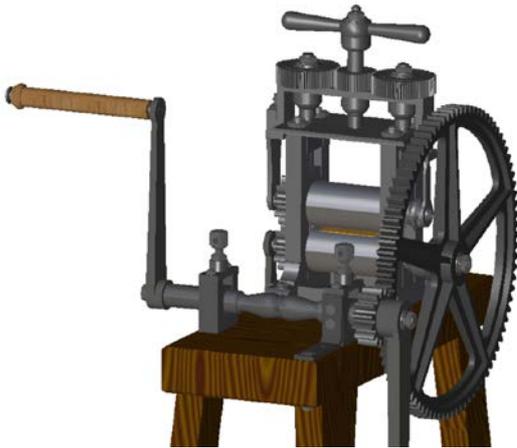


Figura 105. Perspectiva del frontal de la máquina.

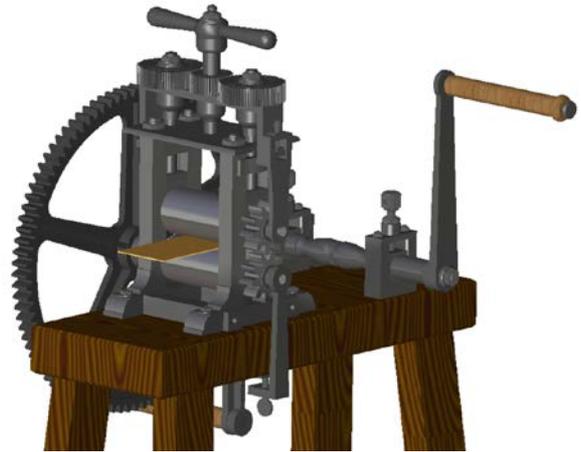


Figura 106. Perspectiva de la zona posterior de la máquina.

En las siguientes figuras se pueden ver distintas secciones que pueden ayudar a comprender el diseño y funcionamiento de la máquina. En las figuras 107 y 108 se muestran dos secciones normales al eje X, una primera relativa al eje de manivelas y la segunda correspondiente al plano central de la máquina. En las figuras 109 y 110, sin embargo, se muestran las secciones normales al eje Y. En la primera puede apreciarse la sección de los elementos de fijación del cuerpo a la bancada así como del plano central de los ejes empujadores encargados de transformar el movimiento de giro en traslación vertical.

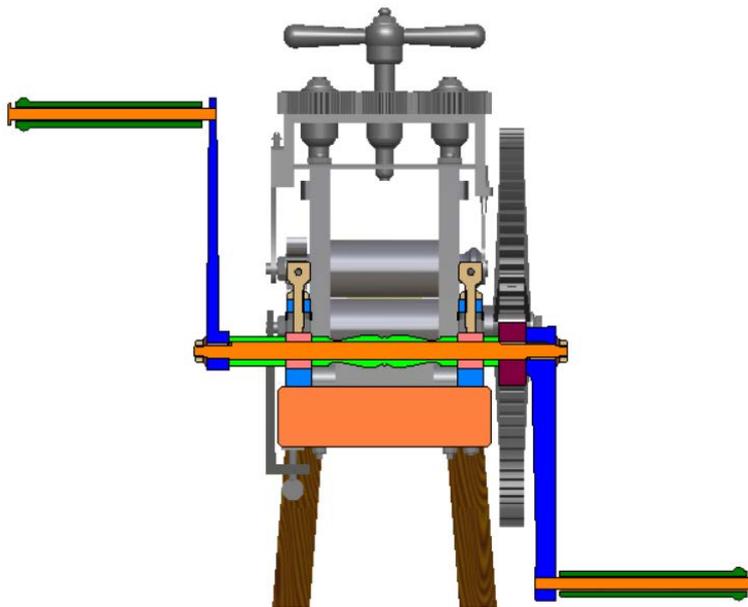


Figura 107. Sección normal a X del eje de manivelas y sus soportes.

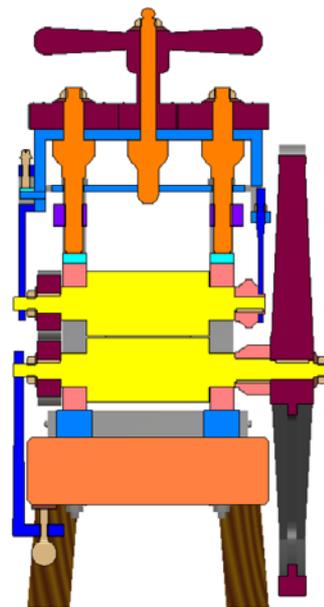
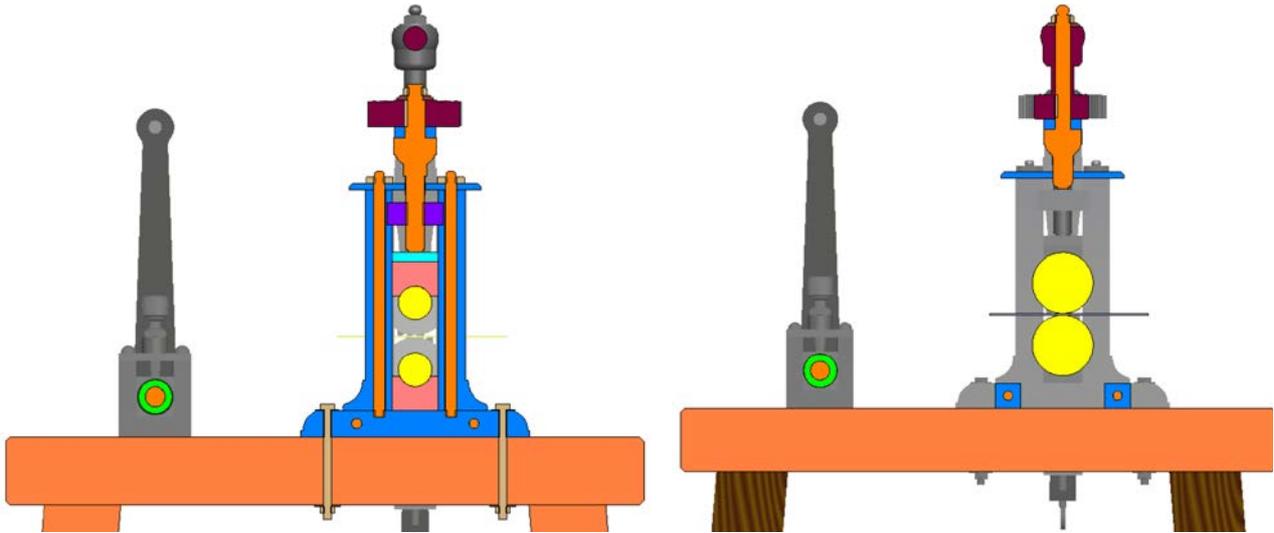


Figura 108. Sección normal a X del cuerpo de la laminadora.



Figuras 109 y 110. Secciones normales a Y de la laminadora de chapa.

### 5.1.3 Cinemática de la laminadora mediante DMU Kinematics

A través del módulo de DMU Kinematics, que pertenece al entorno de Digital Mockup, se trabajará para conseguir simular los diferentes movimientos o la cinemática que presenta la laminadora de chapa.

Para ello se crean dos mecanismos; el de giro de los ejes, responsable del proceso propio de laminación, y el de desplazamiento o traslación vertical del eje superior de laminación.

#### **Giro de los rodillos de laminación**

Para realizar la simulación de los giros de los ejes se crearán las siguientes uniones:

- *Gear joint.1*: engrane del piñón conductor del eje de manivelas con la corona del eje inferior de laminación.
- *Gear joint.2*: engrane de los engranajes de los ejes inferior y superior de laminación.

Además, se simulará el movimiento de la chapa de metal al ser laminada por la máquina. Para ello es necesario crear las siguientes uniones:

- *Prismatic joint*: unión prismática que permitirá sólo el movimiento de la lámina en la dirección del eje X.
- *Roll Curve joint*: genera el movimiento simultáneo de dos curvas que ruedan sin deslizar, en nuestro caso la circunferencia del rodillo superior de laminación y una línea longitudinal de la lámina de metal.

Estas uniones aparecen definidas en el diagrama de la figura 111.

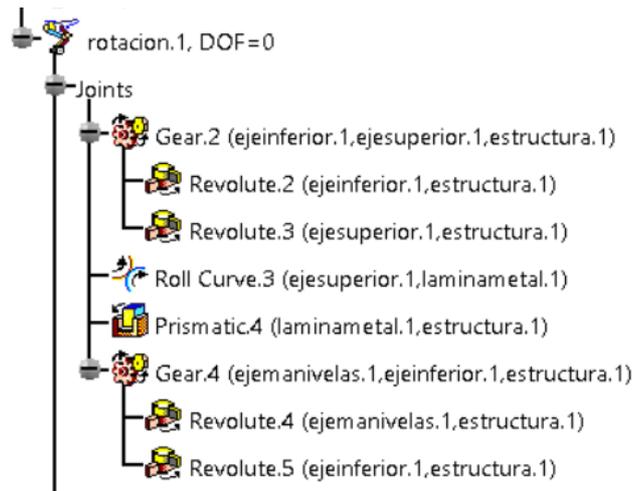


Figura 111. Diagrama de las uniones necesarias para la simulación de rotación de ejes y laminación.

### Desplazamiento vertical del eje superior de laminación:

Para lograr la simulación de este movimiento se llevarán a cabo las siguientes uniones:

- *Gear joint.1*: engrane del engranaje superior central con el engranaje lateral derecho.
- *Gear joint.2*: engrane del engranaje superior central con el engranaje lateral izquierdo.
- *Screw joint*: unión roscada entre el eje del engranaje lateral derecho con la guía fija a la estructura.
- *Rigid joint.1*: unión rígida entre el soporte de los engranajes del mecanismo y el eje superior de laminación.
- *Planar joint.1*: Unión que genera el movimiento de desplazamiento vertical de manera solidaria entre los engranajes y el soporte, forzando a que ambos planos estén siempre en contacto.
- *Planar joint.2*: Unión que define el movimiento del soporte de los engranajes en el plano vertical con respecto a la estructura fija de la máquina.
- *Point Surface Joint*: Unión que obliga a estar en contacto al centro de la base del eje empujador del engranaje lateral derecho y al plano con el que está en contacto. Al girar y desplazarse verticalmente el eje roscado, se desplazará a su vez la base sobre la que apoya.
- *Rigid joint.2*: Unión rígida entre los dos elementos que se sitúan entre la base del eje roscado lateral derecho y el eje superior de laminación.
- *Rigid joint.3*: Unión rígida entre los dos elementos que se sitúan entre la base del eje roscado lateral izquierdo y el eje superior de laminación.
- *Point Surface joint.2*: Unión que obliga a estar en contacto al centro de la base del eje empujador del engranaje lateral derecho y al plano con el que está en contacto. Al girar y desplazarse verticalmente el eje roscado, se desplazará a su vez la base sobre la que apoya.
- *Prismatic joint.1*: Unión que limita el movimiento del conjunto intermedio entre el eje roscado derecho y el eje superior de laminación a un desplazamiento vertical.
- *Prismatic joint.2*: Unión que limita el movimiento del conjunto intermedio entre el eje roscado izquierdo y el eje superior de laminación a un desplazamiento vertical.

Estas uniones se muestran en el diagrama de la figura 112.

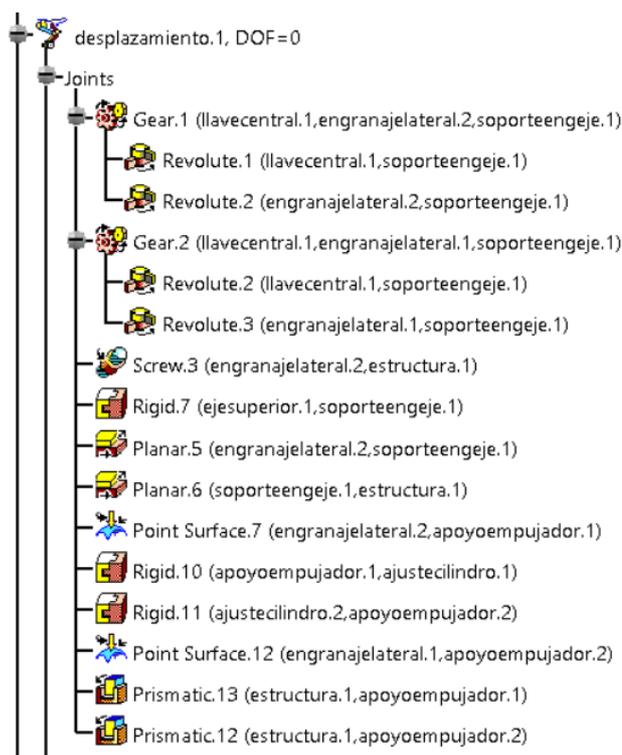


Figura 112. Diagrama de las uniones necesarias para el desplazamiento vertical del eje superior de laminación.

## 5.2 Laminadora de hilo

### 5.2.1 Toma de medidas

Para llevar a cabo el modelado en CATIA V5 de esta laminadora, y puesto que no se dispone de planos de la misma, se contactó con el taller Marmolejo Orfebres, donde Juan José y Alejandro Marmolejo permitieron el acceso a sus instalaciones. Allí se nos mostraron las diferentes maquinarias de las que hacen uso diariamente para la elaboración de su obra, así como aquellas máquinas que hoy en día están en desuso, como la laminadora de hilo de estudio en este texto, las cuales han sido sustituidas por máquinas más modernas y motorizadas.

Gracias a la generosidad de los hermanos Marmolejo, la laminadora de hilo fue trasladada del taller al domicilio de la autora de este texto para poder tomar todas las medidas y fotografías que fueran necesarias.

Para la toma de medida se hizo uso, al igual que en el caso de la laminadora de chapa, de un pie de rey y regla. Durante la toma de medida se encontró una mayor dificultad para la toma de medidas del perfil del cilindro de laminación, el cual describe una geometría que no puede ser medida de manera fiable con un pie de rey (figura 113).



Figura 113. Perfil del cilindro de laminación de hilo a medir.

Al no disponer de avanzados métodos de medida, la idea inicial fue realizar una fotografía del rodillo para escalarlo y medirlo, posteriormente, en CATIA V5 mediante la función Shape > Sketch Tracer > Create an Immersive Sketch. Sin embargo, al tomar la fotografía se producían grandes deformaciones no asumibles en los extremos del cilindro.

Por lo tanto, para evitar estas deformaciones se procedió al escaneado de la pieza. De esta manera, y apoyándonos en un papel milimetrado para su posterior escalado en CATIA V5, se obtuvo una imagen real sin deformaciones de la geometría superficial del cilindro (Figura 114). Para poder obtener las medidas de las zonas interiores del perfil, se realizó un molde del mismo con escayola (Figuras 115 y 116). Este molde podía ahora ser escaneado de la misma manera que se procedió con el exterior del cilindro, obteniendo todas las medidas necesarias para el modelado del mismo (Figura 117).

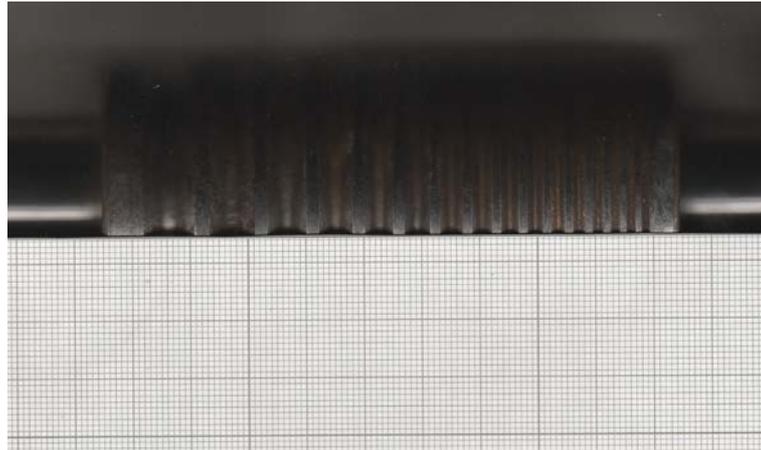


Figura 114. Escáner del cilindro de laminación.



Figuras 115 y 116. Moldes de escayola del cilindro de laminación.

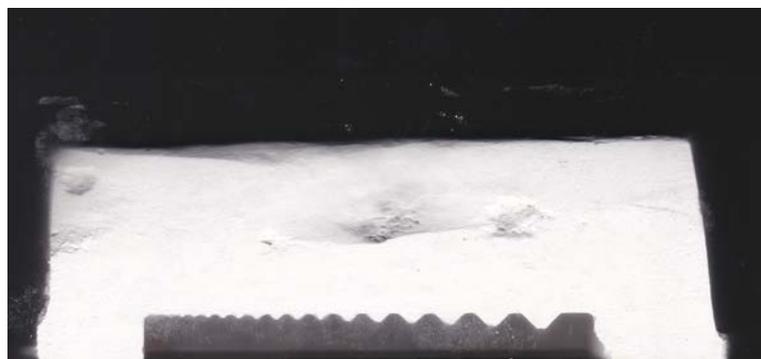


Figura 117. Escáner del molde de escayola del cilindro de laminación.

Al tomar la medida del ancho total del cilindro con pie de rey obtenemos una longitud de 100 mm, mientras que la longitud del modelo en CATIA V5 que obtenemos tras el uso de estos escáneres es de 99,605 mm, un error que se decide asumir.

### 5.2.2 Modelado en CATIA V5

Para abordar la descripción del modelado llevado a cabo en CATIA V5, la máquina será descompuesta, al igual que en el caso de la laminadora anterior, en distintos conjuntos según la función que desempeñan (Figura 118). Estos conjuntos se descompondrán posteriormente en diferentes subconjuntos y estos, por último, en piezas o elementos individuales.

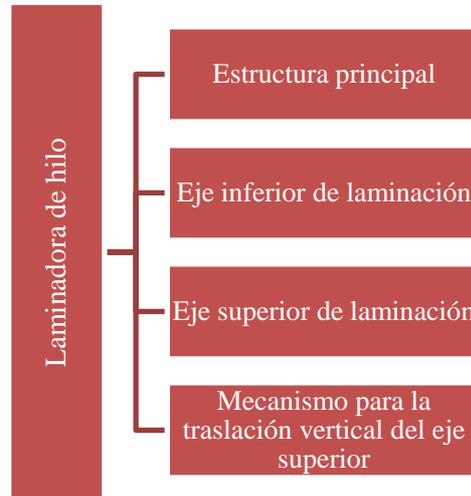


Figura 118. Diagrama de los conjuntos principales que componen la laminadora de hilo.

#### **Estructura principal**

Es la estructura base y fija que acoge a los demás conjuntos móviles de la laminadora de hilo.

Dentro de esta estructura principal encontramos el cuerpo, la bancada y los elementos de fijación cuerpo-bancada, tal y como puede observarse en la figura 119.



Figura 119. Estructura principal de la laminadora de hilo.

El cuerpo de esta laminadora reúne todos los componentes de los que disponía el cuerpo de la laminadora de chapa simplificados en un solo elemento (figura 120). Presenta, por tanto, una base con dos agujeros para poder ser fijada a la bancada y dos taladros verticales roscados que harán de guía para la traslación vertical del

eje superior de laminación. Además, a él se acoplan dos elementos con geometría semicircular donde descansa el eje inferior de laminación, de manera que puedan ser sustituidos si sufren desgaste, y que, probablemente, estén fabricados con un material de mejor calidad con más resistencia al desgaste (figura 121). Para modelar el perfil de las patas o elementos verticales se ha hecho uso de la función *multisection* [19] [20].



Figura 120. Cuerpo de la laminadora y elementos de apoyo del eje inferior de laminación.



Figura 121. Descomposición de los elementos del cuerpo de la laminadora de hilo.

Este cuerpo se fija a una bancada de madera, de altura de 860 mm, con travesaños en su zona inferior para dar estabilidad y rigidez a la misma (figura 122). La tabla horizontal presenta dos taladros para la posterior fijación del la máquina a la misma, tal y como se muestra en la figura 123.



Figura 122. Bancada de madera para la laminadora de hilo.

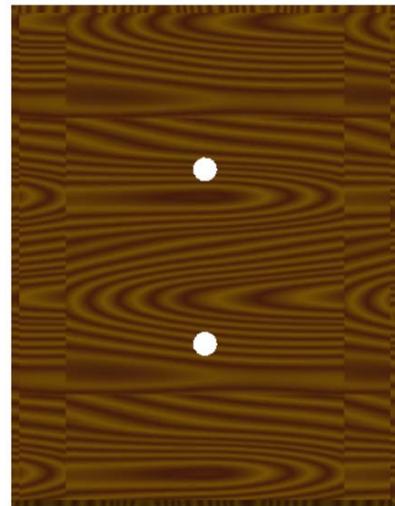


Figura 123. Agujeros en tabla de bancada para la fijación del cuerpo.

Para fijar el cuerpo a la bancada se hace uso de dos tornillos con prisioneros [21] que facilitan su instalación, encajando con la geometría que describe el agujero de la base de la laminadora (figuras 124 y 125).

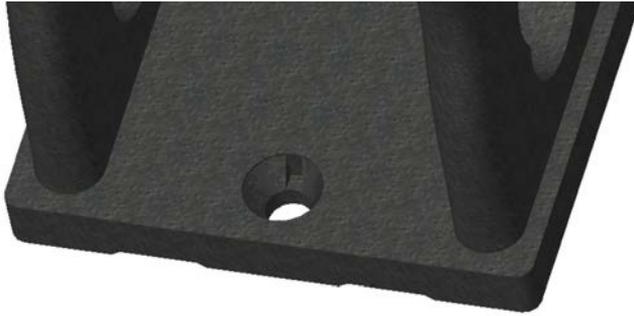


Figura 124. Agujero en la base del cuerpo para tornillo prisionero.



Figura 125. Tornillo con prisionero.

Estos tornillos se fijarán a la bancada mediante tuerca y arandela, tal y como se puede apreciar en las figuras 126 y 127.

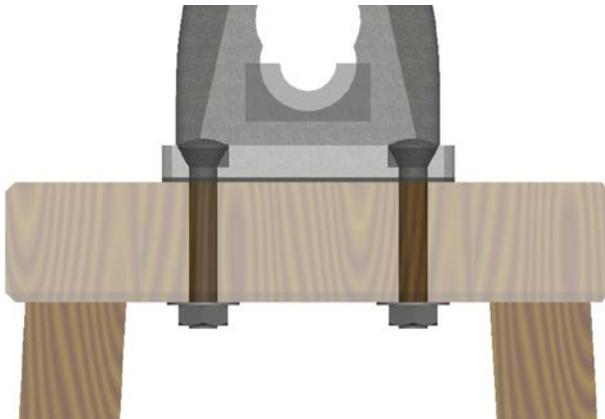


Figura 126. Vista de perfil de los elementos de fijación.

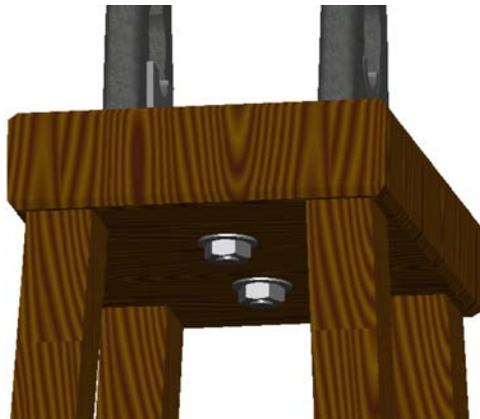


Figura 127. Tuercas y arandelas.

### Eje inferior de laminación

El eje inferior de laminación presenta como elementos principales el eje, cuya geometría describirá el perfil del rodillo de laminación, la manivela con la que accionar manualmente el movimiento de giro del eje y el engranaje, en el extremo opuesto, el cual transmitirá su movimiento de giro al eje superior de laminación, con relación de transmisión igual a 1 y sentido inverso (figuras 128 y 129).



Figura 128. Eje inferior de laminación.



Figura 129. Descomposición de elementos del eje inferior.

Para el modelado del eje fue necesario, como se detalló en el apartado anterior, realizar el escáner del eje y de su molde de escayola.

Una vez se obtuvieron los escáneres, se hizo uso del módulo Shape > Generative Shape Design. Los escáneres fueron escalados tomando como referencia un papel milimetrado, como puede observarse en la figura 130.

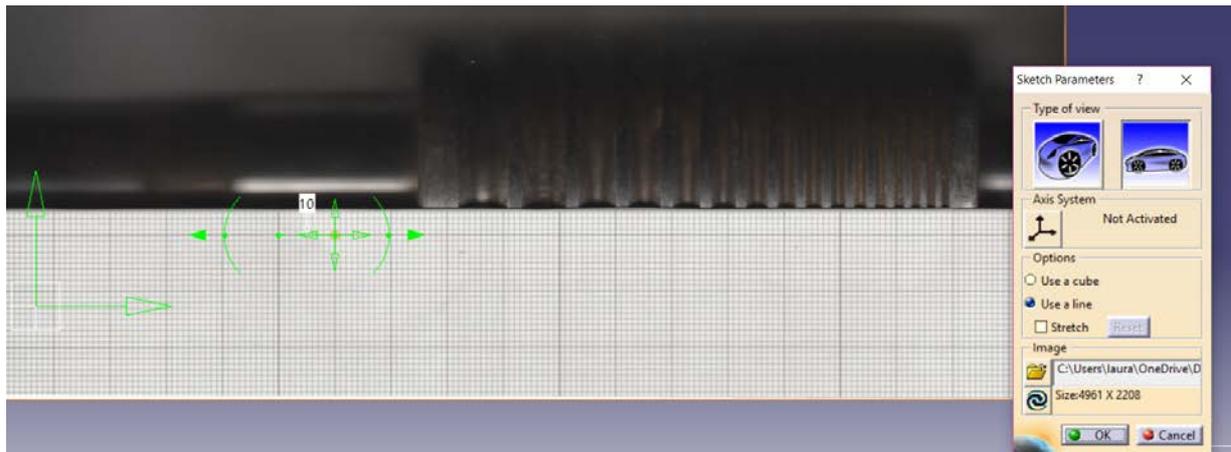


Figura 130. Escalado del escáner del eje usando como referencia papel milimetrado.

El perfil de este rodillo genera crestas de tamaño decreciente de forma proporcional, por lo que el objetivo es encontrar la constante de proporcionalidad. Una vez la imagen del escáner estuvo escalada, se tomaron medidas del ancho de las primeras ocho crestas del perfil de laminación, en primer lugar (figura 131), y de los nueve primeros huecos que entre estas crestas se crean, en segundo lugar (figura 132). No se toman las medidas de todas las crestas y huecos, ya que los de menor tamaño nos introducirían un error mayor.



Figura 131. Toma de medida en CATIA V5 del ancho de las crestas del perfil del eje.

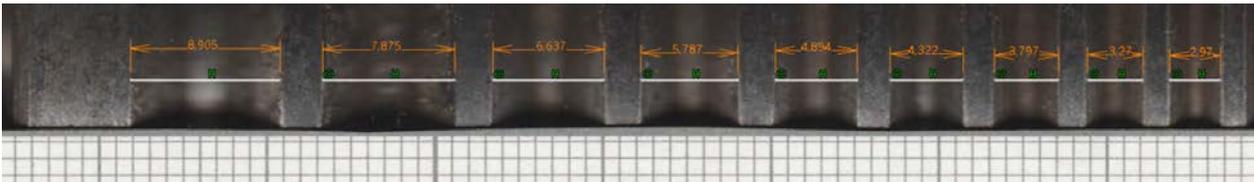


Figura 132. Toma de medidas de los huecos intersticiales entre crestas del perfil.

Una vez tomadas esas medidas, de ellas se obtienen una constante de proporcionalidad. En el caso del ancho de las crestas, esta constante es  $m=1,0593$  y, en el caso del ancho de los huecos,  $m=1,1474$ .

Haciendo uso de estas constantes de proporcionalidad y tomando como medida de partida aquella que corresponde a la cresta y hueco de mayor tamaño, la cual nos introducirá menor error, obtendremos el resto de medidas.

A continuación se lleva a cabo el mismo procedimiento con la imagen escaneada del molde de escayola. Esta imagen es escalada en CATIA V5. Con ella queremos obtener el ángulo de las laderas de las crestas y la profundidad de los huecos intersticiales, teniendo en cuenta que, mientras la geometría exterior del rodillo es cilíndrica, la interior es cónica, tal y como se muestra en el esquema de la figura 133.

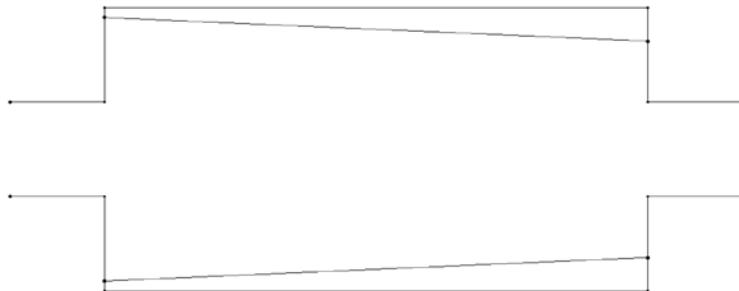


Figura 133. Esquema de la geometría cilíndrica exterior y cónica interior.

Se toman, por tanto, la altura de los dos primeros huecos y con ellas se traza la línea que describirá el perfil cónico, tal y como se muestra en la figura 134. Además, sabiendo que los ángulos que forman las laderas de las crestas son de  $45^\circ$ , queda definido completamente el perfil del rodillo de laminación de hilo (figuras 135 y 136).

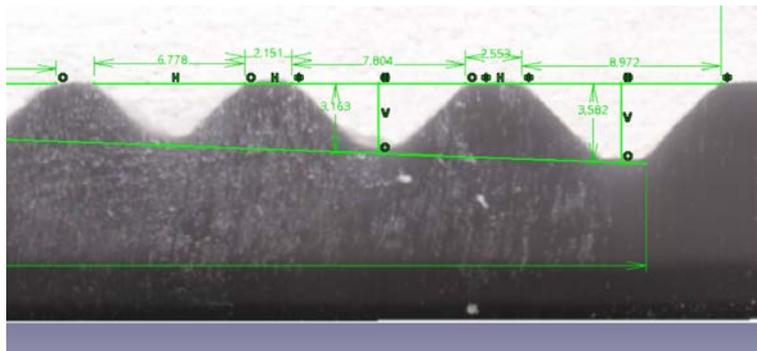


Figura 134. Toma de medidas sobre el escáner del molde de escayola.

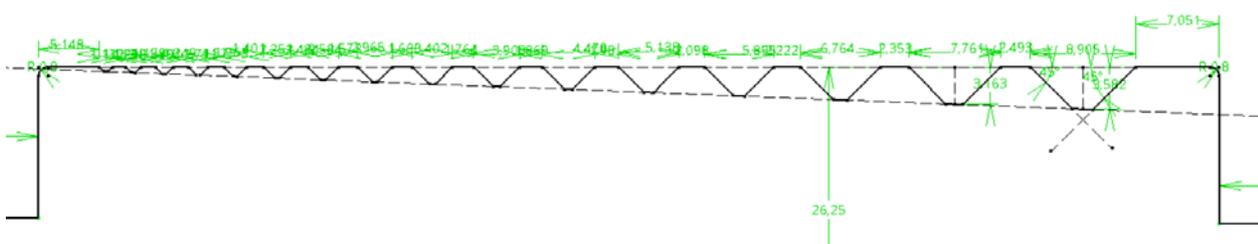


Figura 135. Trazado del perfil del rodillo de laminación de hilo.



Figura 136. Eje inferior de laminación con rodillo de laminación central y chaveteros.

En el extremo derecho se sitúa la manivela, que consta de una biela con un manillar de madera en su extremo, a través del cual el trabajador imprime el movimiento de giro de forma manual. Esta manivela se fija al eje mediante tuerca y una chaveta que garantiza que giren de manera solidaria (Figura 137).

En el extremo izquierdo se encuentra el engranaje encargado de transmitir el movimiento giratorio al eje superior de laminación. Al igual que la manivela, se fija al eje mediante tuerca para impedir su traslación en el eje, y chaveta para garantizar el giro solidario de ambos elementos (Figura 138)



Figura 137. Descomposición de los elementos que componen la manivela.



Figura 138. Descomposición del engranaje y sus elementos de fijación al eje.

### **Eje superior de laminación**

El eje superior de laminación se compone por el propio eje, cuyas variaciones de sección y su perfil generan en la zona central el rodillo de laminación, como fue descrito en el eje inferior, y por un engranaje en su extremo izquierdo, que recibe el movimiento de giro del eje inferior. Este eje y la descomposición de los elementos de los que se componen se muestran en las figuras 139 y 140.

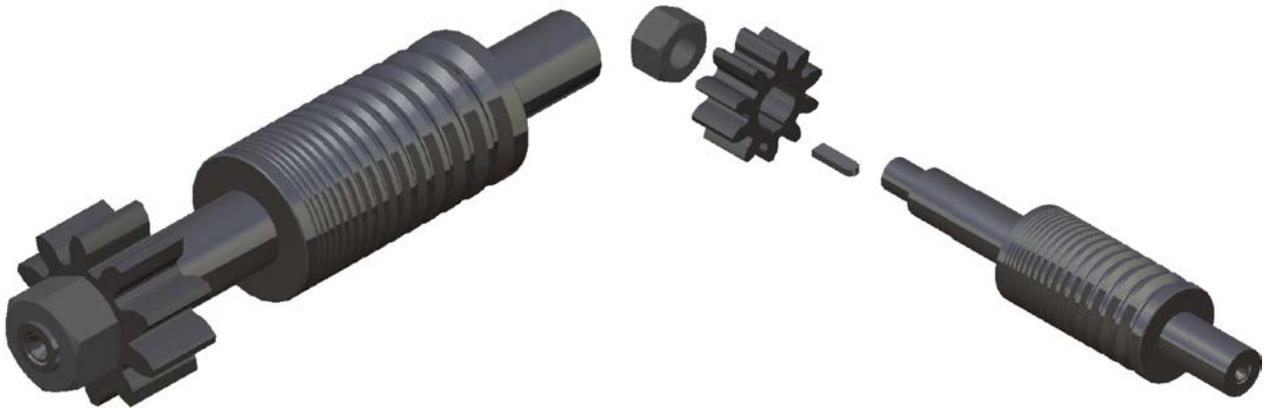
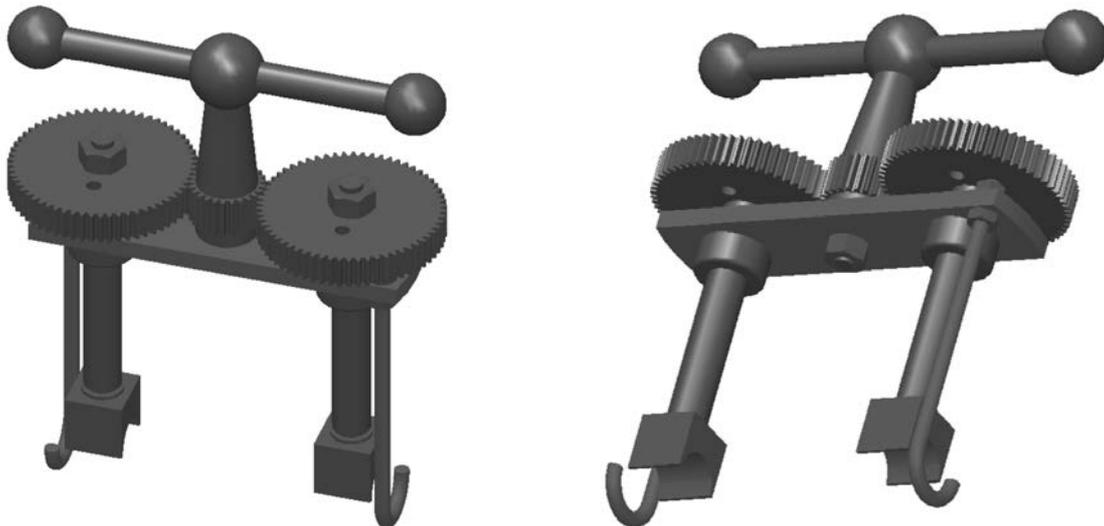


Figura 139. Eje superior de laminación.

Figura 140. Descomposición del eje superior de laminación.

### Mecanismo para la traslación vertical del eje superior

Al igual que en el caso de la laminadora de chapa, esta máquina presenta un mecanismo a través del cual podemos desplazar verticalmente el eje superior de laminación, para así poder ir reduciendo progresivamente la sección del hilo que se está trabajando (figuras 141 y 142).



Figuras 141 y 142. Vistas del mecanismo para la traslación vertical del eje superior de laminación.

Este mecanismo se compone de los elementos que aparecen en el diagrama de la figura 143.

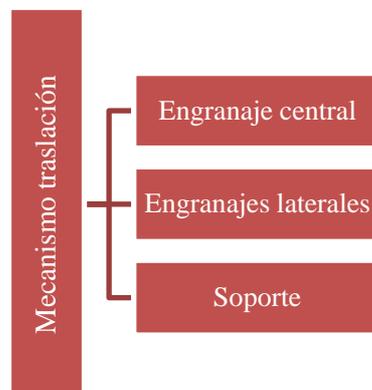


Figura 143. Diagrama de elementos principales que componen el mecanismo de traslación.

El movimiento se inicia con el giro manual de un elemento que se compone por una manija y un engranaje de 26 dientes, cuya geometría puede observarse en las figuras 144 y 145.

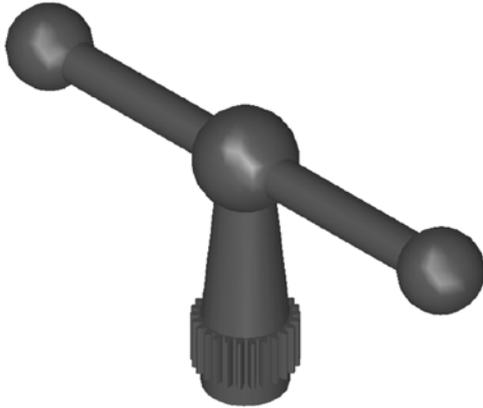


Figura 144. Manija central con engranaje.

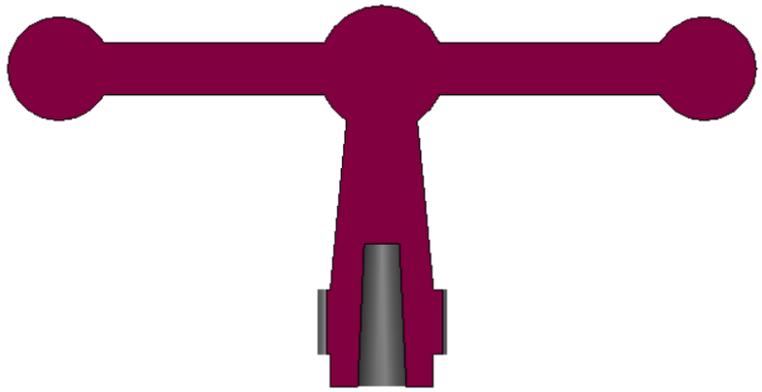


Figura 145. Sección central de la manija.

Este elemento tiene una posición central y engrana con dos elementos iguales, compuestos por un engranaje de 62 dientes y un eje roscado (figura 146). Este eje, roscado al cuerpo fijo de la máquina, transformará el movimiento de giro en movimiento de traslación vertical, y se une al engranaje mediante chaveta y tuerca (figura 147).



Figura 146. Engranaje con eje vertical roscado.



Figura 147. Descomposición de elementos engranaje-eje roscado.

El eje roscado apoya en su base sobre un elemento cuya geometría es tal que abraza y acoge al eje superior de laminación. De esta manera, cuando el eje gira y desciende verticalmente, realiza un empuje sobre este elemento y, por consiguiente, sobre el eje de laminación, que desciende de manera solidaria (figura 148).



Figura 148. Eje roscado en cuerpo fijo y elemento de apoyo para el empuje.

El juego de engranaje (uno central y dos laterales) se asientan en un soporte solidario a ellos, el cual presenta dos bielas que sostendrán el eje de laminación en sus extremos, gracias a las cuales se conseguirá el movimiento de desplazamiento vertical en sentido ascendente (Figuras 149 y 150).



Figura 149. Soporte para el juego de engranajes y el eje superior de laminación.



Figura 150. Descomposición de los elementos que componen el soporte.

En la siguiente figura (figura 151) se muestra el conjunto del mecanismo completo para la traslación vertical del eje superior de laminación.

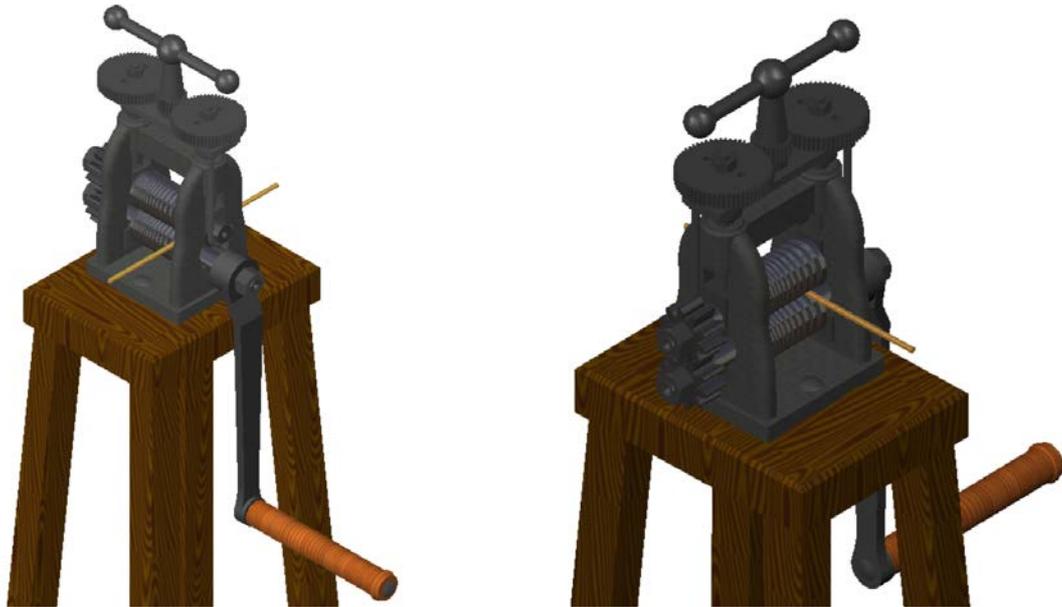


Figura 151. Mecanismo completo para el desplazamiento vertical del rodillo superior de laminación.

En las siguientes figuras podemos ver el conjunto completo de la máquina laminadora de hilo sobre la bancada (figuras 152 y 153), así como vistas más cercanas de la máquina (figuras 154 y 155).

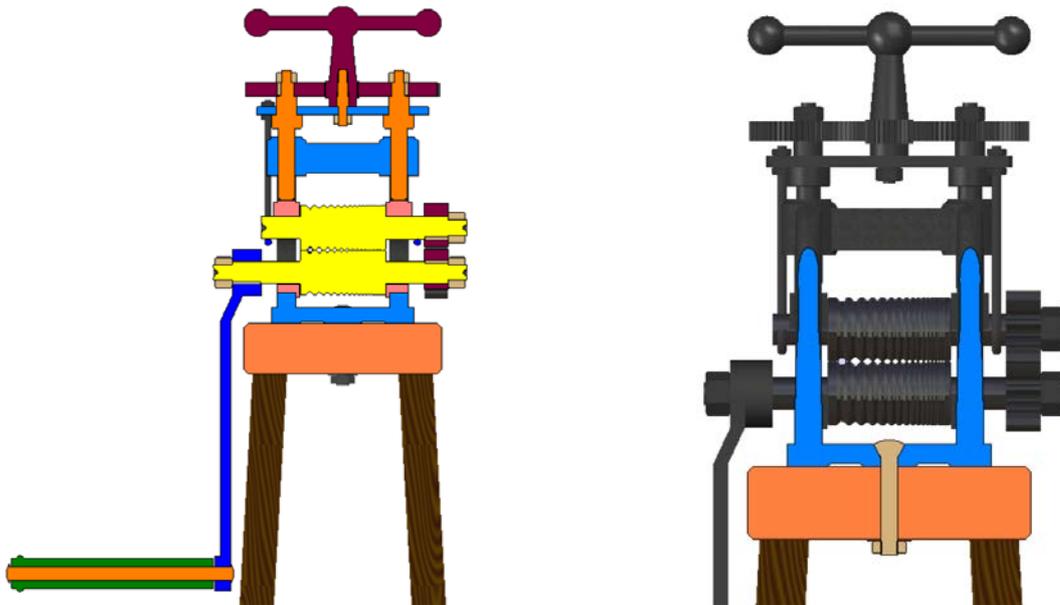


Figuras 152 y 153. Vistas de la laminadora de hilo sobre bancada.

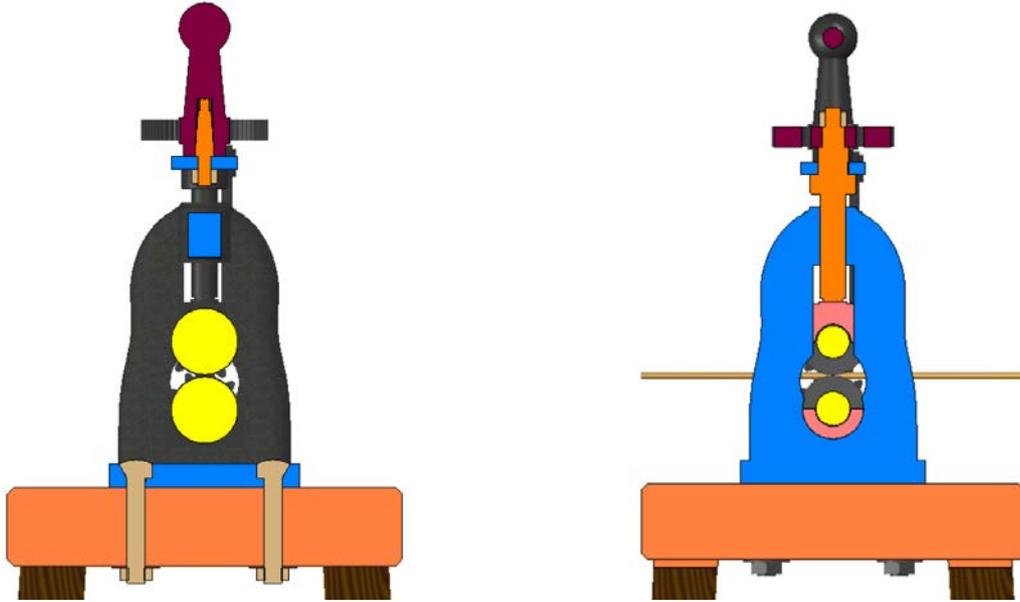


Figuras 154 y 155. Vistas de la laminadora de hilo.

En las siguientes figuras se pueden apreciar diferentes secciones de la máquina que pueden ayudar a entender el diseño de la misma. En las dos primeras (figuras 156 y 157) se muestran secciones normales al eje X y en las dos siguientes (figuras 158 y 159), secciones normales al eje Y.



Figuras 156 y 157. Secciones normales al eje X de la laminadora de hilo.



Figuras 158 y 159. Secciones normales al eje Y de la laminadora de hilo.

### 5.2.3 Cinemática de la laminadora mediante DMU Kinematics

A través del módulo de DMU Kinematics, que pertenece al entorno de Digital Mockup, se trabajó para conseguir simular los diferentes movimientos o la cinemática que presenta la laminadora de hilo.

Para ello, al igual que en el caso de la laminadora de chapa, se crearon dos mecanismos; el de giro de los ejes, responsable del proceso propio de laminación, y el de desplazamiento o traslación vertical del eje superior de laminación.

#### Giro de los rodillos de laminación

Para realizar la simulación de los giros de los ejes se crearon las siguientes uniones:

- *Gear joint*: Engrane de los engranajes pertenecientes al eje superior e inferior de laminación.

Además, se simulará el movimiento del hilo de metal al ser laminado por la máquina. Para ello es necesario crear las siguientes uniones:

- *Prismatic joint*: Unión prismática, que permitirá sólo el movimiento del hilo en la dirección del eje X.
- *Roll Curve joint*: genera el movimiento simultáneo de dos curvas que ruedan sin deslizar, en nuestro caso la circunferencia de uno de los rodillos de laminación y una línea longitudinal del hilo de metal.

Estas uniones se muestran en el diagrama de la figura 160.

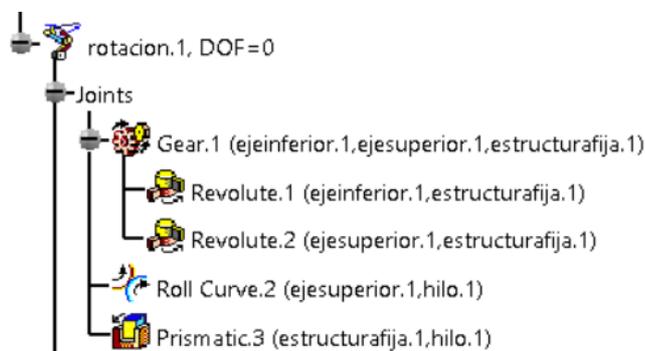


Figura 160. Diagrama de las uniones necesarias para la simulación de rotación de ejes y laminación.

#### Desplazamiento vertical del eje superior de laminación:

Para lograr la simulación de este movimiento se llevarán a cabo las siguientes uniones:

- *Gear joint.1*: Engrane del engranaje superior central con el engranaje lateral derecho.
- *Gear joint.2*: Engrane del engranaje superior central con el engranaje lateral izquierdo.
- *Screw joint*: Unión roscada entre el eje del engranaje lateral derecho y el cuerpo de la máquina.
- *Rigid joint.1*: Unión rígida entre el soporte de los engranajes del mecanismo y el eje superior de laminación.
- *Planar joint.1*: Unión que mantiene en contacto el plano base del engranaje y el del soporte, definiendo así el movimiento solidario vertical entre los engranajes y el soporte.
- *Planar joint.2*: Unión que describe el movimiento en el plano vertical del soporte con respecto a la estructura fija de la máquina.
- *Point Surface Joint*: Unión que mantiene en contacto el centro de la base del eje empujador del engranaje lateral derecho y el elemento sobre el que apoya. Al girar y desplazarse verticalmente el eje roscado, se desplazará a su vez la base sobre la que apoya.
- *Point Surface joint.2*: Unión que mantiene en contacto el centro de la base del eje empujador del engranaje lateral izquierdo y el plano con el que está en contacto.
- *Prismatic joint.1*: Unión que limita el movimiento del conjunto intermedio entre el eje roscado derecho y el eje superior de laminación a un desplazamiento vertical.
- *Prismatic joint.2*: Unión que limita el movimiento del apoyo del eje roscado a un desplazamiento vertical.

Estas uniones se muestran en el diagrama de la figura 161.

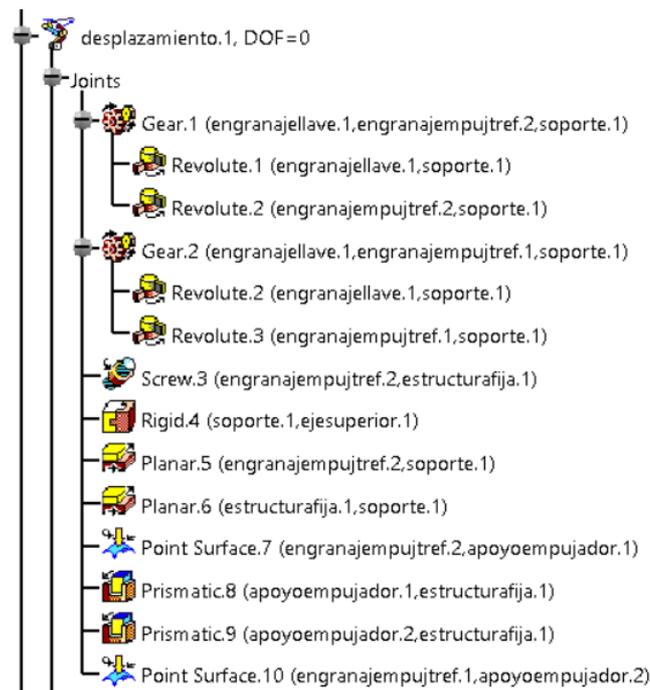


Figura 161. Diagrama de las uniones necesarias para el desplazamiento vertical del eje superior de laminación.

## 5.3 Bordonadora

### 5.3.1 Toma de medidas

Para realizar el modelado en CATIA V5 de esta máquina, y puesto que, tal y como sucedía con las máquinas anteriormente descritas, no se dispone de planos de la misma, se contactó, al igual que en el caso de la laminadora de hilo, con el taller Marmolejo Orfebres. Dado que, como fue explicado en el capítulo 3, esta máquina está actualmente en uso, las medidas se tomaron en el taller en dos jornadas diferentes. Durante la

toma de las medidas se disfrutó de la ayuda de Alejandro y Juan José Marmolejo, los cuales permitieron el desmontaje de las piezas para facilitar la toma de medidas. Para ello se hizo uso de pie de rey, regla y galga de rosca Whitworth, esta última facilitada por el taller Marmolejo.

### 5.3.2 Modelado en CATIA V5

Para poder abordar la descripción del modelado de las piezas de una manera intuitiva, la máquina se ha descompuesto en conjuntos según la función que desempeñen, como puede apreciarse en el diagrama de la figura 162. Estos conjuntos se descompondrán posteriormente en diferentes subconjuntos y estos, por último, en piezas o elementos individuales.

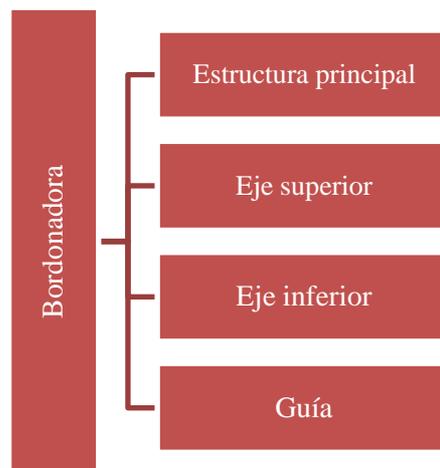


Figura 162. Diagrama de conjuntos que componen la bordonadora.

#### **Estructura principal**

Dentro de este grupo encontramos todos aquellos elementos fijos de la máquina, como son el cuerpo de la máquina, la tornillería y las arandelas, como bien muestra el diagrama de la figura 163. Este conjunto puede observarse en la figura 164.

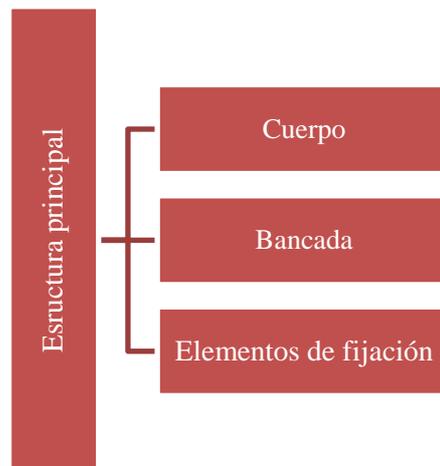
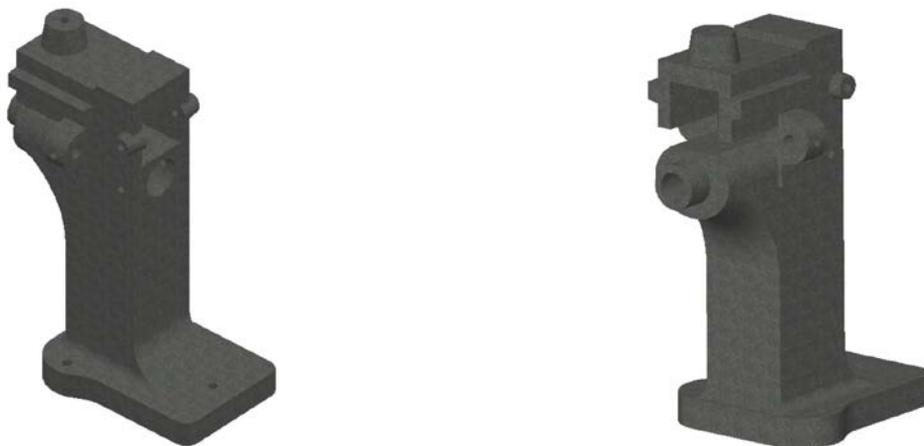


Figura 163. Diagrama de subconjuntos que conforman la estructura principal.



Figura 164. Estructura principal de la bordonadora.

La bordonadora presenta un cuerpo hueco fabricado por fundición, el cual presenta tres agujeros en la base para ser fijado a la bancada. Además cuenta con dos huecos en los que se acoplarán los dos ejes de trabajo (figuras 165 y 166).



Figuras 165 y 166. Vistas del cuerpo de la bordonadora.

El vaciado del cuerpo se realizó mediante la función *shell* y *pocket* [19] [20] y pueden ser apreciados en la sección del cuerpo de la figura 167.

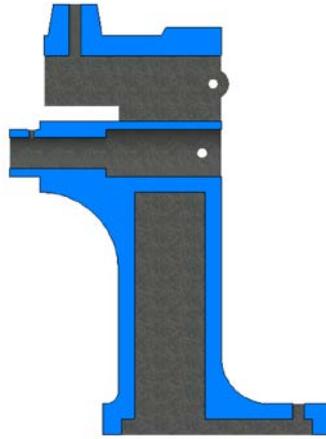


Figura 167. Sección del cuerpo de la bordonadora.

Este cuerpo se fija a una bancada de madera (figura 168), como en el caso de las anteriores laminadoras. La bancada tiene una altura de 750 mm, unos travesaños en la zona inferior para dar rigidez y agujeros pasantes para poder fijar el cuerpo a la misma (figura 169).



Figura 168. Bancada de la bordonadora.

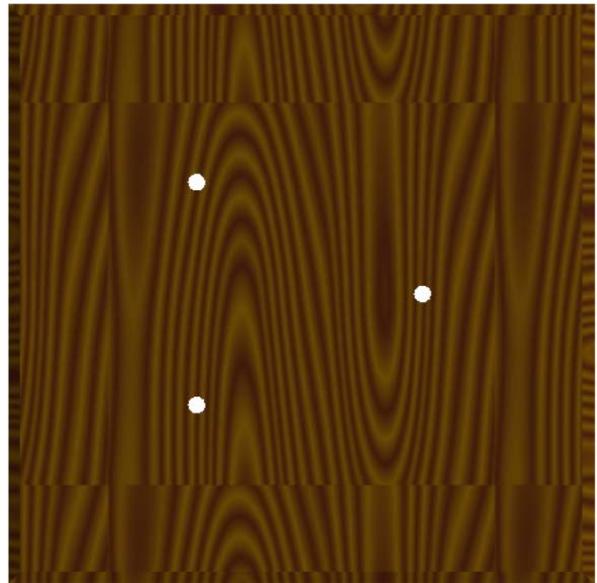


Figura 169. Tabla con orificios para la fijación.

Los elementos de fijación están formados por tres tornillos que fijan el cuerpo de la bordonadora a la bancada de madera. Estos presentan una cabeza hexagonal y una caña de longitud tal que atravesará la bancada de madera para ser fijado por debajo por medio de una tuerca y arandela (figuras 170 y 171).

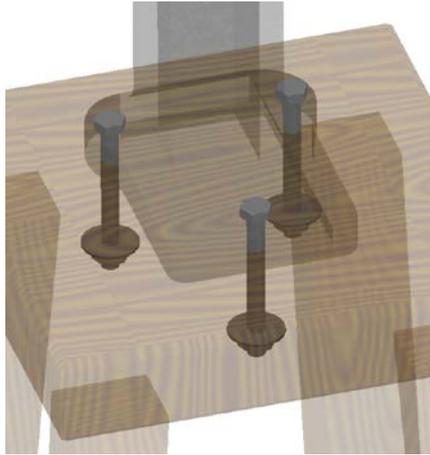


Figura 170. Elementos de fijación del cuerpo a la bancada.



Figura 171. Descomposición de elementos de fijación a la bancada.

### Eje superior

Este conjunto se compone por los elementos principales que aparecen en el diagrama de la figura 172 y cuya geometría puede ser apreciada en la figura 173. La descomposición de los elementos que componen el eje se muestra en la figura 174.

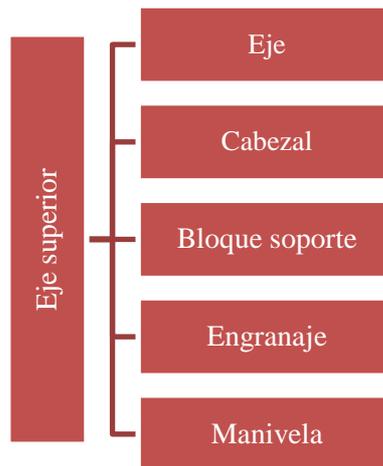


Figura 172. Elementos principales del eje superior de la bordonadora.



Figura 173. Eje superior de la bordonadora.



Figura 174. Descomposición de los elementos que conforman el eje superior de la bordonadora.

En el extremo izquierdo del eje se sitúa el cabezal o disco operador. Se inserta en el eje y se mueve solidario a él gracias a una chaveta y una tuerca que impide que pueda salirse del eje (figura 175). Este disco es intercambiable según las necesidades y el surco que queramos imprimir en la lámina de metal con la que estamos trabajando, por lo que la tuerca presenta dos hendiduras en su perímetro exterior que hacen más fácil aflojarlas, con ayuda de una llave auxiliar que se muestra en la figura 176.

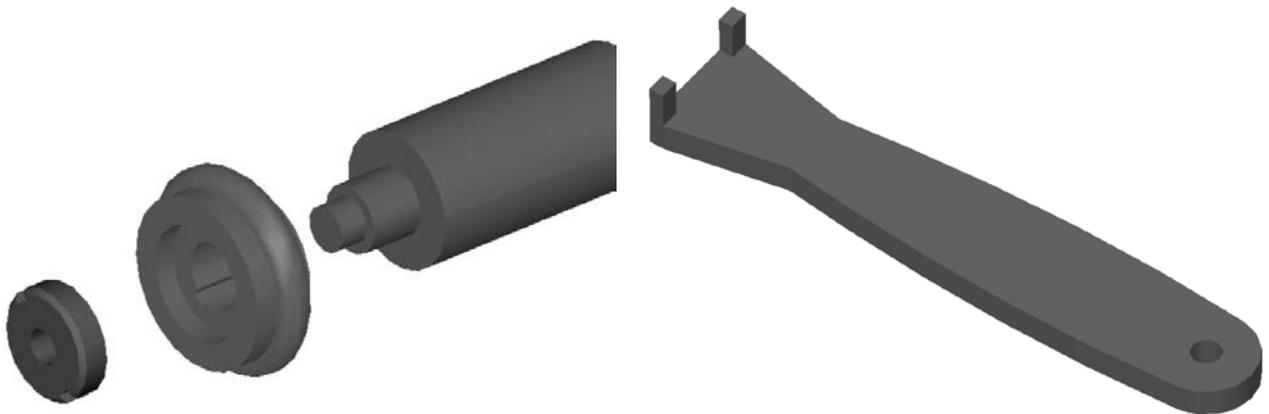


Figura 175. Descomposición de cabezal y tuerca.

Figura 176. Llave o palanca para la tuerca de los cabezales.

En el extremo derecho encontramos el engranaje motriz encargado de transmitir el movimiento de giro al eje inferior. Es un engranaje que consta de 14 dientes y se fija al eje mediante un pasador, tal y como puede observarse en la figura 177.

Junto a él se sitúa la manivela, la cual consta de una biela y un manillar de madera, gracias al cual el trabajador imprimirá el movimiento de giro al eje superior. Esta manivela, al igual que el engranaje, presenta un agujero en el cual se introduce un pasador para ser fijado al eje (figura 178). Por lo tanto, el eje superior presentará dos agujeros en los cuales insertar el pasador y fijar a él los elementos deseados. Estos agujeros se muestran en la figura 179.



Figura 177. Descomposición del engranaje, manivela y sus elementos de fijación al eje.

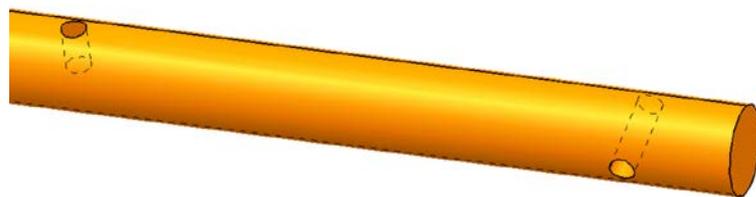


Figura 178. Agujeros para pasadores de unión del engranaje (izquierda) y manivela (derecha).

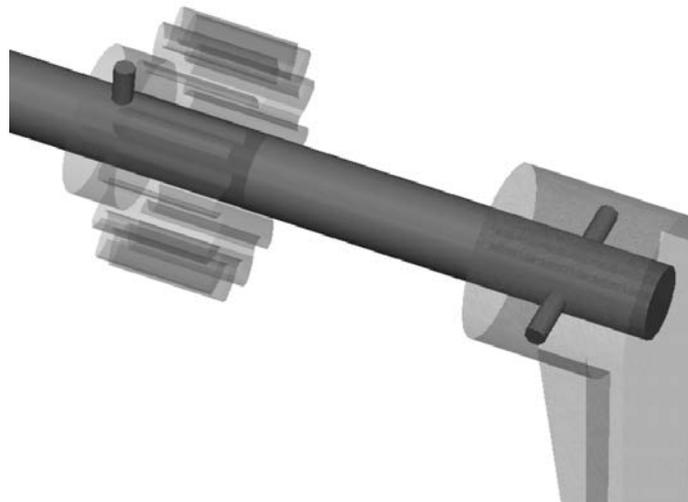
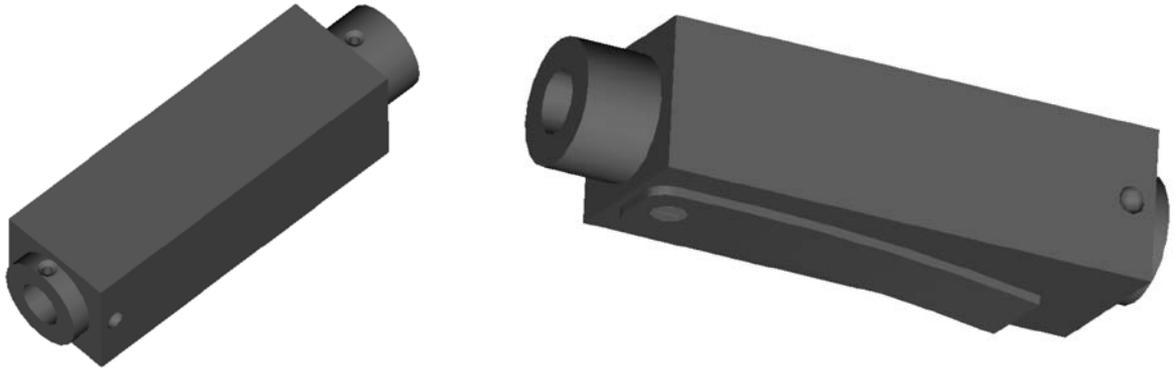


Figura 179. Engranaje y manivela fijados al eje mediante pasadores de fijación.

Por último se describirá el elemento que, no sólo da soporte al eje superior, sino que hace posible el movimiento del mismo en el plano vertical, lo que permite alejar y acercar el disco o cabezal superior al inferior, en función de la necesidad. Este elemento tiene forma de prisma con un agujero que lo atraviesa longitudinalmente, donde se alojará el eje, además de dos taladros para el engrase del eje que gira en su interior (figuras 180 y 181).



Figuras 180 y 181. Vistas del bloque soporte del eje superior de la bordonadora.

Este bloque se encuentra unido al cuerpo mediante dos tornillos, los cuales forman un eje alrededor del cual le está permitido el giro al bloque (figuras 182 y 183). A la base del bloque se atornilla una chapa que apoya en el cuerpo de la bordonadora y que funciona como muelle (figura 184). Al presionar el bloque verticalmente, éste gira alrededor de los tornillos y la chapa flexiona, de manera que el cabezal gira y se desplaza verticalmente.

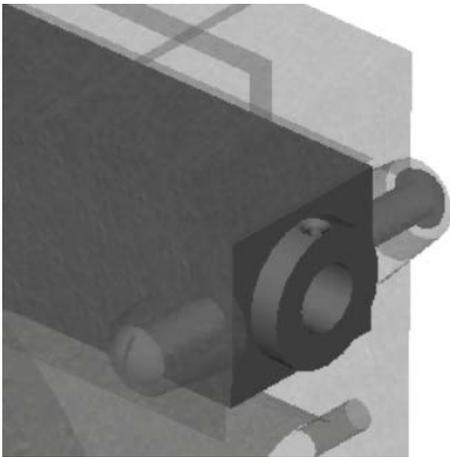


Figura 182. Sujeción mediante tornillos del bloque soporte del eje superior.

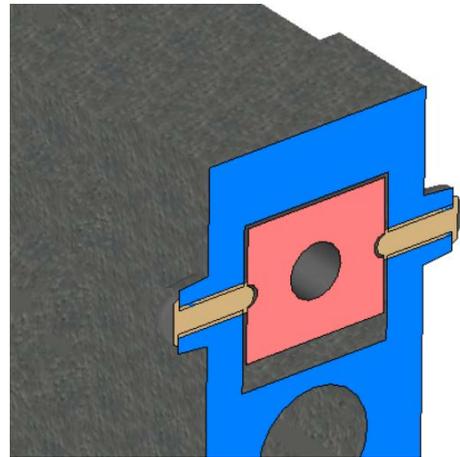


Figura 183. Sección de la sujeción mediante tornillos del bloque.

Para realizar esa presión vertical en el bloque, se dispone de una manija o mando en forma de tornillo que rosca en el cuerpo y apoya en el plano superior del bloque (figura 185). Al desenroscar este elemento, el eje se devuelve a su posición gracias a la chapa-muelle que recupera su estado inicial.



Figura 184. Bloque con chapa-muelle atornillada a su base.

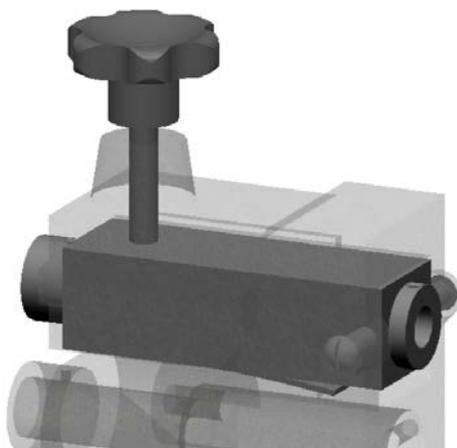


Figura 185. Manija roscada al cuerpo para el empuje del bloque soporte.

### Eje inferior

Este conjunto se compone por un engranaje, una palanca para la traslación en el eje Y y el cabezal o disco operador (figura 186). La descomposición de los elementos que componen el eje así como de los elementos de unión al mismo se muestra en la figura 187.



Figura 186. Eje inferior de la bordonadora.



Figura 187. Descomposición de los elementos que componen el eje inferior de la bordonadora.

En el extremo izquierdo se sitúa el cabezal o disco operador, que se fija al eje de la misma forma que el cabezal del eje superior y, en el extremo derecho, el engranaje que recibirá el movimiento de giro del engranaje conductor situado en el eje superior.

Además, el eje cuenta con otro elemento encargado de producir la traslación o desplazamiento del eje inferior en la dirección Y (figura 188). De esta manera será posible ajustar y centrar el cabezal inferior con respecto al superior.

Para generar este desplazamiento, la palanca presenta una hendidura helicoidal en su cuerpo. En esta hendidura se inserta el extremo de un tornillo fijo al cuerpo de la bordonadora (figuras 189 y 190), de manera que al girar la palanca, se produzca un desplazamiento en la dirección Y.



Figura 188. Palanca con surco helicoidal.



Figura 189. Tornillo solidario al surco helicoidal.

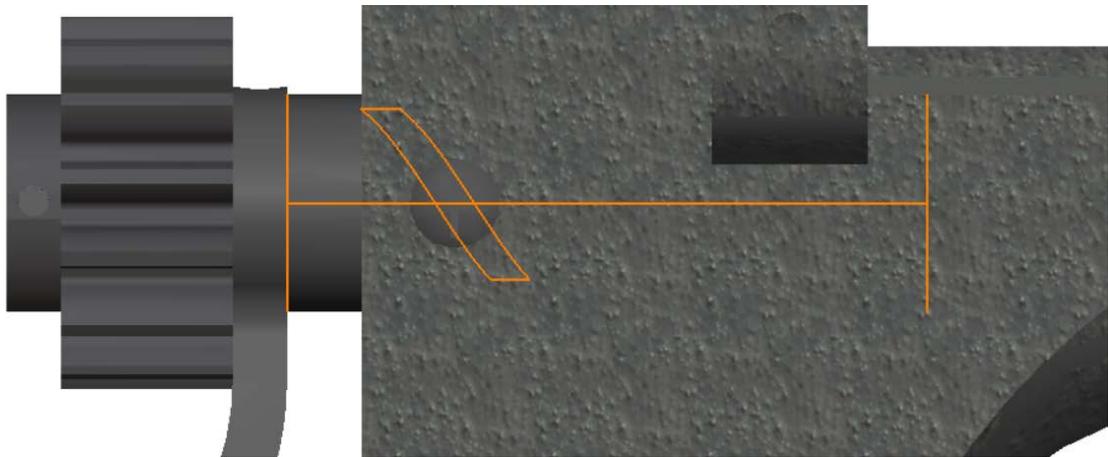


Figura 190. Vista de tornillo fijo al cuerpo y solidario a la hendidura o surco helicoidal.

Una vez el eje tome la posición que el trabajador desea, esta palanca se fijará mediante el apriete de otro tornillo con mango o manija y roscado al cuerpo principal de la bordonadora (figura 191). Este tornillo con manija se sitúa en el lado opuesto al tornillo que se inserta en la hendidura helicoidal, como puede apreciarse en la sección de la figura 192. Una vez se fija la posición de la palanca, ésta se mantiene inmóvil y permite el giro del eje inferior.



Figura 191. Tornillo con manija para fijar la posición de la palanca.

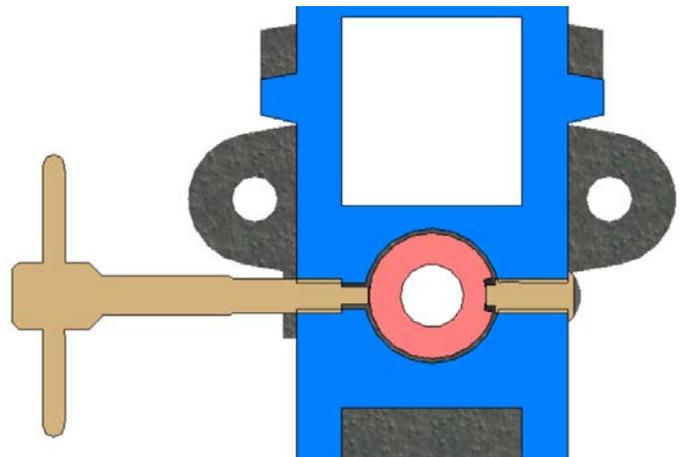


Figura 192. Sección normal a Y de tornillo y elemento de fijación de la palanca.

Para modelar la palanca de este elemento, fue necesario usar el módulo Shape > Generative Shape Design. En él se llevó a cabo la extrusión de dos perfiles y obtuvimos su intersección mediante la función *extrude* [19]

[20], como puede observarse en las figuras 193 y 194. Esta intersección es la que, posteriormente, se extruyó para conseguir el sólido deseado.

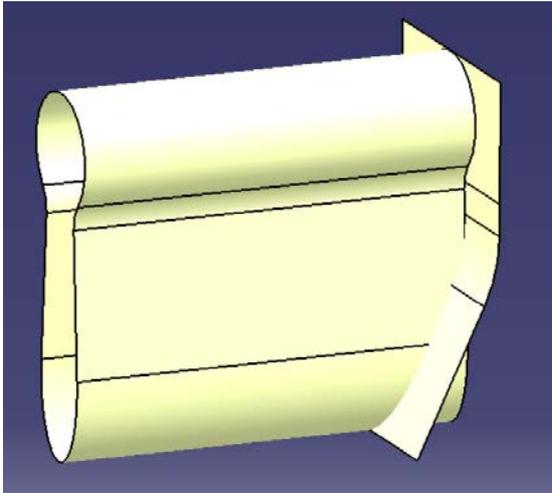


Figura 193. Extrusión de los perfiles.

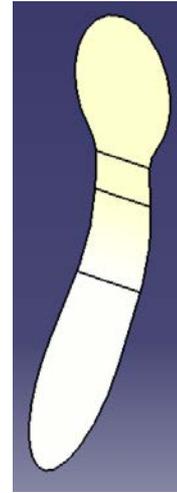


Figura 194. Intersección entre los dos perfiles tras la extrusión.

Para el modelado del raíl helicoidal de la palanca se ha tenido en cuenta que la palanca gira un rango de  $90^\circ$  entre posiciones extremas,  $45^\circ$  hacia cada lado desde la posición central de la palanca, como puede apreciarse en la figura 195. Además, con este giro de  $90^\circ$  se produce un desplazamiento horizontal del eje de 15 mm (Figura 196). Para conseguir el desplazamiento de 15 mm con un giro de  $90^\circ$  se trazará una hélice de paso 60mm y tomando su trayectoria se realizará un vaciado de material mediante la función *slot*.

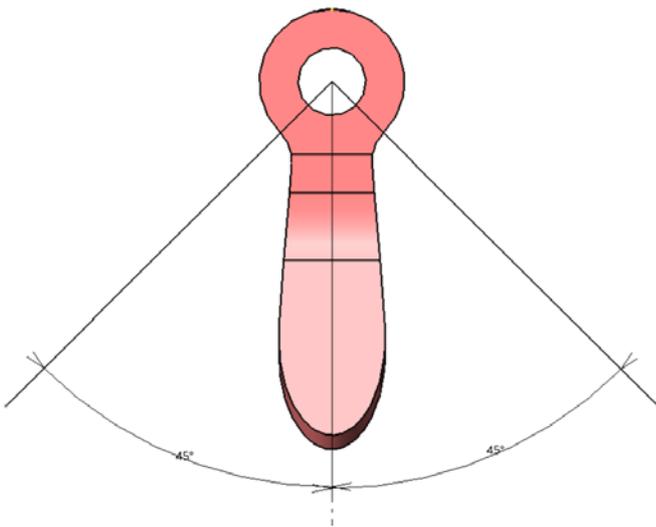


Figura 195. Rango de giro de la palanca.

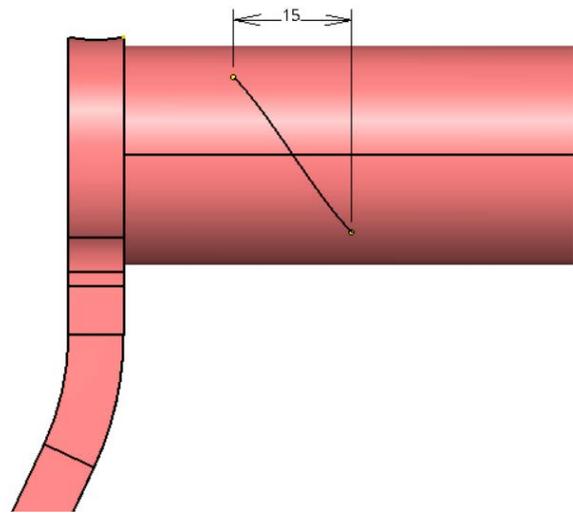


Figura 196. Rango de desplazamiento de la palanca.

Por último, la bordonadora dispone de un elemento que sirve como guía y tope durante el trabajo de la lámina de metal. Esta guía se inserta en los taladros de dos orejas de la bordonadora (figura 197) y su posición en el eje Y se fija gracias a dos elementos igual geometría y menor tamaño que el elemento de fijación de la palanca del eje inferior descrita anteriormente, como se muestra en la sección de la figura 198.

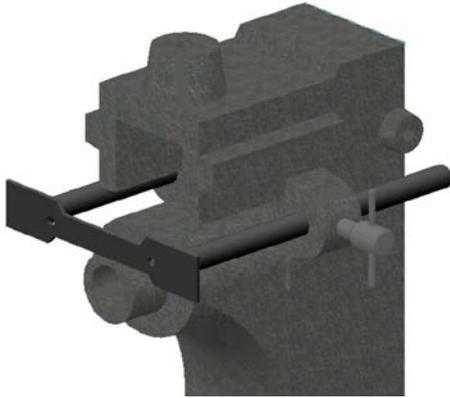


Figura 197. Guía de la bordonadora.

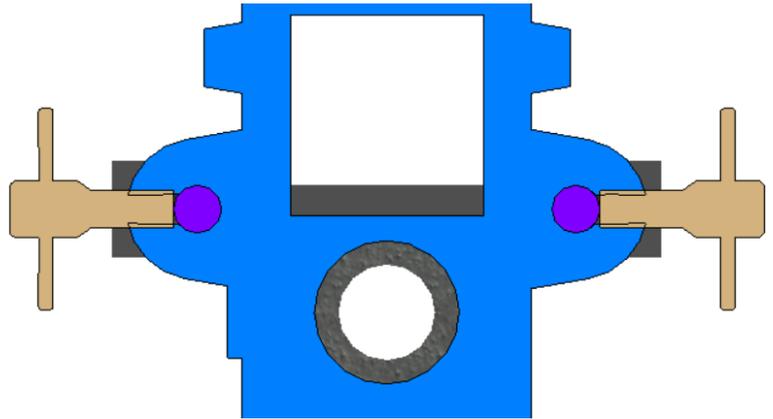


Figura 198. Sección de elementos de fijación de la guía.

En las figuras 199 y 200 se muestran vistas del conjunto completo de bordonadora y bancada. En las figuras 201 y 202 pueden observarse perspectivas de la máquina bordonadora.

Además, para ayudar a comprender mejor el diseño y el montaje de la máquina, se muestran distintas secciones de la misma. En la figura 203 se puede observar la sección normal al eje X, realizando un corte por el plano medio de la máquina. En la figura 204 esta sección es normal al eje Y y en la 205, normal al eje Z.



Figuras 199 y 200. Vistas del conjunto completo de bordonadora y bancada.

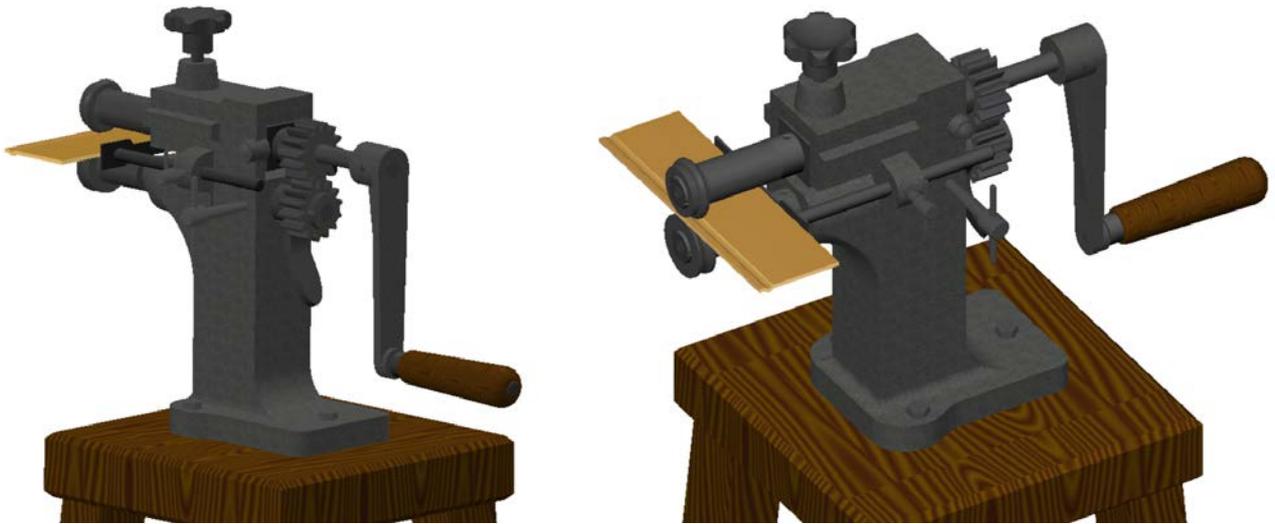


Figura 201 y 202. Vistas de la máquina bordonadora con chapa de oro.

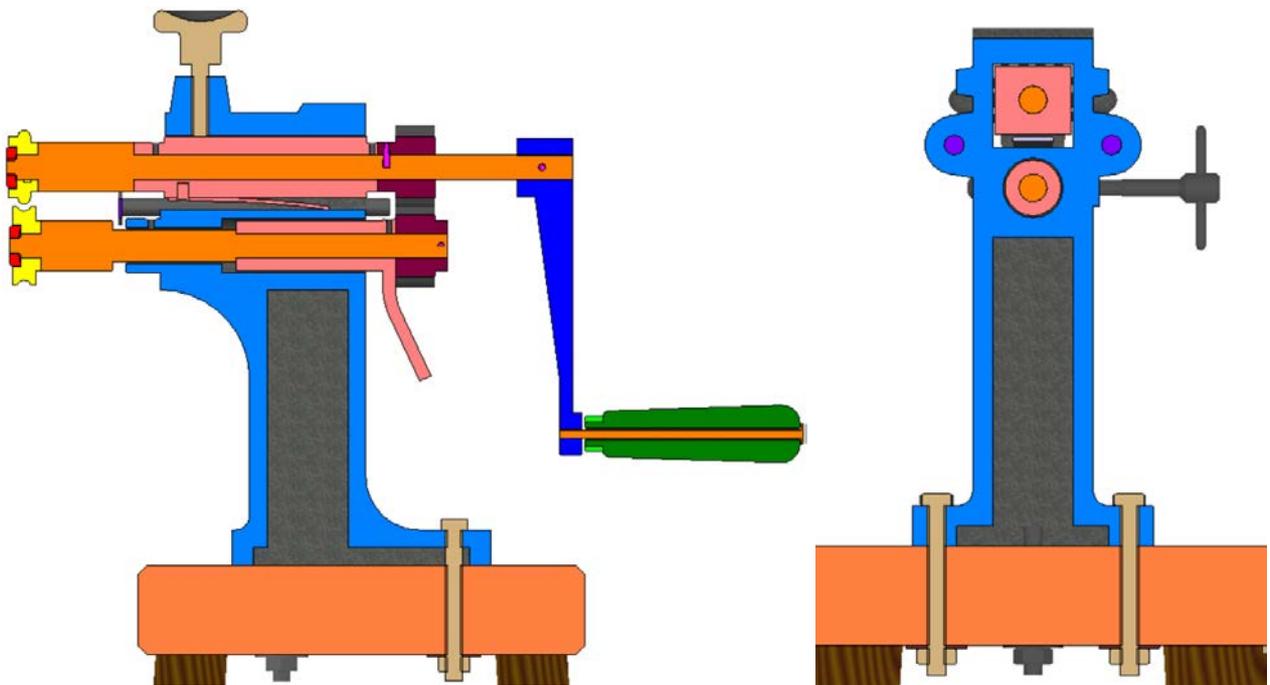


Figura 203. Sección normal al eje X de la bordonadora.

Figura 204. Sección normal al eje Y de la bordonadora.

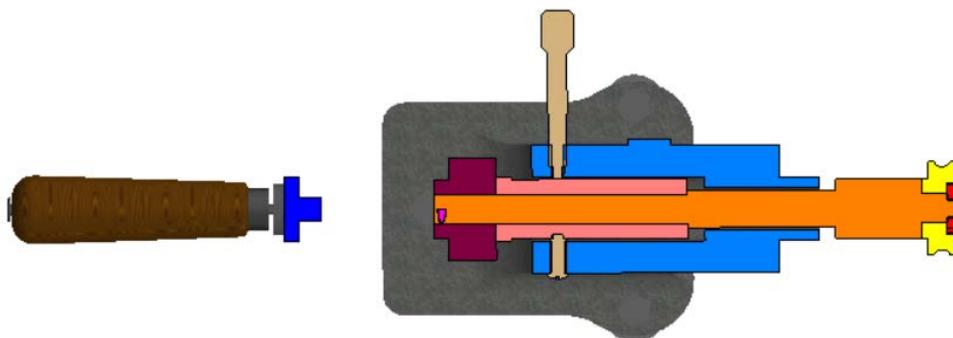


Figura 205. Sección normal al eje Z de la bordonadora.

### 5.3.3 Cinemática de la bordonadora mediante DMU Kinematics

Para poder simular la cinemática de la bordonadora, se crearon los tres mecanismos diferentes de los que dispone la máquina a través del módulo de DMU Kinematics, que pertenece al entorno de Digital Mockup. Estos mecanismos son el de giro de los ejes, el movimiento vertical del eje superior y la traslación en la dirección Y del eje inferior.

#### Giro de los ejes

Para realizar la simulación de los giros de los ejes se crearon las siguientes uniones:

- *Gear joint*: engrane de los engranajes del eje superior e inferior de la bordonadora.

Además, se simulará el movimiento de la lámina de metal al ser trabajada por la máquina. Para ello es necesario crear las siguientes uniones:

- *Prismatic joint*: unión prismática que permitirá sólo el movimiento de la lámina en la dirección del eje X, en contacto con la guía.
- *Roll Curve joint*: genera el movimiento simultáneo de dos curvas que ruedan una sobre otra sin deslizar, en nuestro caso estas curvas son la circunferencia del perfil del cabezal superior (macho) y una línea longitudinal de la lámina de metal.
- *Rigid joint*: unión rígida entre el cuerpo y la guía en contacto con la lámina.

En la figura 206 se muestra el diagrama de las uniones necesarias para simular el movimiento.

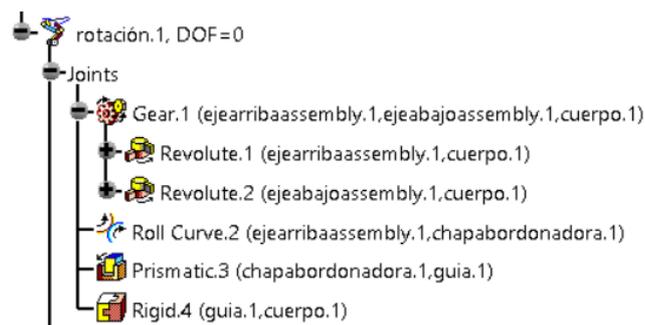


Figura 206. Diagrama de las uniones necesarias para la simulación de rotación de ejes.

#### Desplazamiento vertical del eje superior:

Para lograr la simulación de este movimiento se llevarán a cabo las siguientes uniones:

- *Screw joint*: unión roscada entre el tornillo con manija superior y el cuerpo de la bordonadora.
- *Rigid joint.1*: unión rígida entre el bloque soporte del eje superior y el mismo eje, que se moverán de manera solidaria.
- *Point Surface Joint*: unión que mantiene en contacto continuo el centro de la base del tornillo empujador y la superficie del bloque soporte sobre el que apoya. Al girar y desplazarse verticalmente el tornillo, se desplazará a su vez el bloque sobre el que apoya.
- *Revolute joint*: unión que permite el giro del conjunto de bloque soporte y eje alrededor del eje que forman los tornillos de unión al cuerpo fijo de la máquina.

Estas uniones se pueden ver representadas en el diagrama de la figura 207.

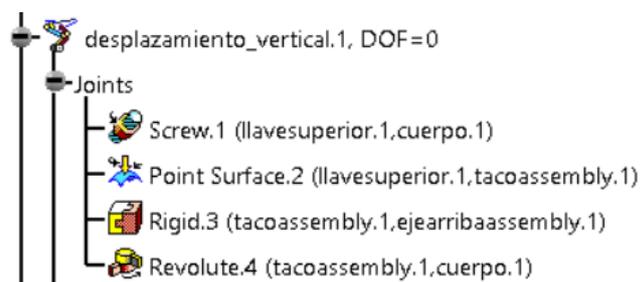


Figura 207. Diagrama de las uniones necesarias para el desplazamiento vertical del eje superior.

### Traslación horizontal del eje inferior

Para la simulación del movimiento horizontal del eje inferior se definieron las siguientes uniones:

- *Point Curve joint*: unión que define el recorrido de un punto a lo largo de una curva. En nuestro caso, el punto es el centro de la base del tornillo fijado al cuerpo y la curva es la trayectoria helicoidal del raíl.
- *Rigid joint.1*: unión rígida entre la palanca y el eje inferior.
- *Cylindrical joint*: genera la unión cilíndrica entre la palanca y el cuerpo de la máquina.
- *Rigid joint.2*: unión rígida entre el tornillo y el cuerpo de la bordonadora.

Estas uniones pueden ser apreciadas en el diagrama de la figura 208.

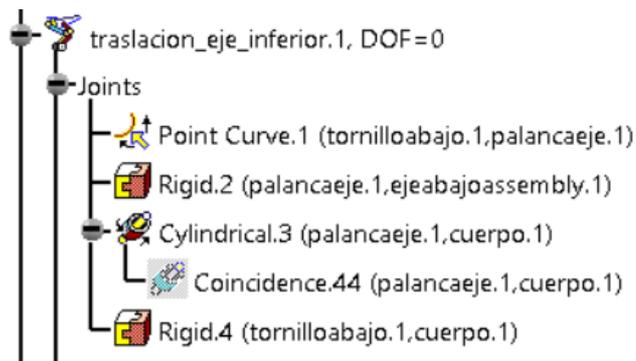


Figura 208. Diagrama de las uniones necesarias para el desplazamiento horizontal del eje inferior.

## 6 CONCLUSIÓN

---

A lo largo del desarrollo de este texto se ha hecho un recorrido sobre la evolución de la maquinaria industrial, la cual es consecuencia del estudio de los materiales así como de las fuentes de energía disponibles. De esta forma, somos testigos de la evolución que han sufrido los talleres y fábricas hasta la actualidad, con maquinarias que hoy en día son fabricadas en materiales de excelente calidad y caracterizadas por una gran precisión. Esta precisión se debe a que la gran mayoría de las máquinas disponen de control numérico y sus trayectorias son guiadas y controladas por ordenador. Estas máquinas, conocidas como máquinas-herramienta, son diseñadas apoyándose en las ventajas que aporta el CAD/CAM/CAE, es decir, el diseño, fabricación e ingeniería asistida por ordenador, que permite optimizar la geometría de la máquina, analizar su comportamiento desde un punto de vista cinemático, dinámico, de esfuerzos y deformaciones, entre otros, así como obtener las instrucciones precisas para el proceso de fabricación.

La maquinaria estudiada y modelada en este proyecto data de un intervalo entre mediados de siglo XIX y principios de siglo XX, momento en el que aún no se disponía de estas herramientas para el diseño de productos. Por lo tanto, nos encontramos ante máquinas cuyo diseño y material no es el óptimo, motivo por el cual podemos detectar en ellas zonas deformadas, ejes que han flectado, desgastes parciales no homogéneos en los engranajes o un mal aprovechamiento del material.

Sin embargo, la evolución de la maquinaria en el campo de la orfebrería no es tan acusada como en otros campos de la ingeniería. El carácter manual del trabajo de orfebrería, de labor minuciosa, y la fabricación de obras de arte únicas mediante el trabajo de metales nobles se aleja del concepto de la fabricación en serie que se produce en las grandes fábricas y, por tanto, las necesidades en cuanto a maquinaria son muy diferentes. La evolución, por tanto, que puede apreciarse en la maquinaria del taller de orfebrería reside en una mejor calidad del material con el que ha sido fabricada y en la fuente de energía necesaria para trabajar con ella. Mientras en las maquinarias estudiadas y modeladas en este texto era necesario imprimir el movimiento de laminación de manera manual mediante manivelas, las máquinas que se encuentran hoy en día en la mayoría de los talleres y, concretamente, en el de Marmolejo Orfebres, están motorizadas, facilitando la labor a la persona que con ella opera. La excepción en el taller Marmolejo Orfebres la encontramos en el caso de la bordonadora, cuyo trabajo delicado y de precisión no obtiene grandes beneficios de su motorización.



## 7 REFERENCIAS

---

- [1] C. Codina, Orfebrería: la técnica y el arte de trabajar los metales y tallar las gemas explicados con rigor y claridad, Barcelona: Parramon, D.L., 2003.
- [2] M. V. G. Olloqui, Orfebrería I, Sevilla: El Correo de Andalucía, 2000.
- [3] <http://www.orfebresmarmolejo.es/marmolejo/index2.html>.
- [4] M. V. G. Olloqui, Orfebrería II, Sevilla: El Correo de Andalucía, 2000.
- [5] A. M. Espinar Cappa, Fernando Marmolejo Camargo, Sevilla: Guadalquivir Ediciones, 2003.
- [6] *Marmolejo, el orfebre de Sevilla: [exposición]*, Sevilla: Ayuntamiento de Santiponce, 2004.
- [7] *Revista Ars Sacra 1996-2008*, vol. 39, pp. 102-103, 2006.
- [8] *El académico y orfebre Fernando Marmolejo: [exposición]*, Sevilla: Caja San Fernando de Sevilla y Jerez, 1994.
- [9] «Sevicor "Taller orfebrería",» <http://tallerorfebreria.com/materiales-herramientas-usan-orfebreria/>.
- [10] F. Loyen, Manual de platería, Madrid: Hermann Blume, 1989.
- [11] A. Marco, Manual de orfebrería, platería y joyería, Barcelona: Serrahima y Urpí, 1957.
- [12] C. Codina, Técnicas básicas, Barcelona: Parramón, 2009.
- [13] J. Mcgrath, Nueva enciclopedia de técnicas de joyería, Barcelona: Acanto, 2011.
- [14] «Interempresas,» <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/1435-Evolucion-tecnica-de-la-maquina-herramienta-Resena-historica.html>.
- [15] «Arkiplus,» <http://www.arkiplus.com/historia-del-acero>.
- [16] «3D CAD Portal,» <http://www.3dcadportal.com/catia.html>.
- [17] J. Torres. <http://lsi.ugr.es/~cad/teoria/Tema1/RESUMENTEMA1.PDF>.
- [18] «Dassault Systems,» <https://www.3ds.com/products-services/catia/products/v5/portfolio/>.
- [19] E. Torrecilla Insagurbe, El gran libro de CATIA, Bilbao: Marcombo, 2012.
- [20] J. Lambás Pérez, Diseño gráfico con CATIA: curso práctico con los módulos Sketcher y Part Design., Madrid: Rama, 2006.
- [21] H. Bawa, Procesos de manufactura, México: McGraw-Hill, 2007.