



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación

Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación

TRABAJO FIN DE GRADO

Recreación virtual de catapultas y su contextualización histórica.

Una visión al pasado.

Grado en Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo del Producto

Autor: Pablo Martín Basallote

Tutor: Jesús Javier Jiménez Galea

MÁLAGA, junio de 2025



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Recreación virtual de catapultas y su contextualización
histórica. Una visión al pasado.



[PÁGINA EN BLANCO]



AGRADECIMIENTOS

Este Trabajo de Fin de Grado marca el final de un recorrido en el que muchas personas han sido parte esencial, no solo por su ayuda directa, sino por acompañar, sostener y dar sentido a cada etapa del camino, en los buenos momentos y, especialmente, en los más difíciles.

En primer lugar, quiero agradecer profundamente a mis padres, cuyo esfuerzo incansable y sacrificio me han ofrecido la oportunidad de estudiar y crecer. Gracias por cada renuncia silenciosa, por vuestro ejemplo diario y por el amor y cariño que siempre me ha acompañado y fortalecido.

A mi hermano Antonio y a mi hermana Celia, gracias por estar ahí en cada paso, por el aliento en los momentos difíciles y por hacer que nunca me sintiera solo en este proceso. Vuestro amor y comprensión han sido un pilar fundamental.

A Elena, por su amor incondicional, por ser una brújula cuando más lo necesitaba, por su paciencia, su fe en mí y por recordarme siempre hacia dónde debía mirar incluso cuando perdía el rumbo.

Y por supuesto, a mi tutor Jesús, no solo por su guía académica, sino por su humanidad. Gracias por recordarme en los momentos menos buenos del camino, que había un potencial que debía ser mostrado al mundo, y por confiar en mis capacidades incluso cuando yo no lo hacía.

También a los amigos que me ha regalado esta etapa universitaria, y a mis compañeros de piso, por compartir días de esfuerzo, risas y fantásticos planes que sin duda quedarán para siempre en el recuerdo.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Recreación virtual de catapultas y su contextualización
histórica. Una visión al pasado.



[PÁGINA EN BLANCO]



ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
3. CONCEPTOS PREVIOS.....	3
3.1. HISTORIA DE LAS CATAPULTAS.....	3
3.2. ARMAS DE ASEDIO EN LA HISTORIA MILITAR.....	4
3.3. FUNCIONAMIENTO DE LA CATAPULTA.....	5
3.4. TIPOS DE CATAPULTA.....	7
3.4.1 Catapultas de tensión.....	7
3.4.2. Catapultas de torsión.....	9
3.4.3. Catapultas de contrapeso.....	10
3.5. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.....	12
3.5.1. Madera: Material esencial y variado según la región.....	12
3.5.2. Cuerdas y tendones: Mecanismos de torsión y tensión.....	12
3.5.3. Piedra y metal: Refuerzos estructurales.....	13
3.5.4. Contrapesos: Variedad según el entorno.....	14
3.5.5. proyectiles: Disponibilidad local y el propósito de asedio.....	15
3.5.6. Diseño y adaptación a la geografía.....	16
3.5.7. Innovaciones locales: Diferentes diseños por región.....	16
4. ELECCIÓN DE LOS MODELOS.....	17
4.1. SELECCIÓN DE MODELOS Y CONTEXTO HISTÓRICO.....	17
4.2. PATRIMONIO INDUSTRIAL Y DIVULGACIÓN TÉCNICA.....	28
5. SOFTWARE DE MODELADO 3D.....	29
5.1. ELECCIÓN DEL SOFTWARE.....	29
5.2. CONOCIENDO LA INTERFAZ DEL PROGRAMA.....	31
6. USO DEL SOFTWARE EN LA ELABORACIÓN DE PIEZAS.....	38
6.1. METODOLOGÍA DE DISEÑO.....	38
6.2. OPERACIONES PARA ELABORAR UNA PIEZA.....	39
6.2.1. Operaciones de adición.....	39
6.2.2. Operaciones de sustracción.....	41
6.2.3. Operaciones de detalle.....	43
6.2.4. Operaciones de reutilización.....	45
7. ELABORACIÓN DEL MODELO.....	48
7.1. DEFINICIÓN DEL MODELO TIPO TREBUCHET.....	48
7.2. MODELADO DE PIEZAS DE LA CATAPULTA TIPO TREBUCHET.....	53



7.3. ENSAMBLAJE DEL MODELO TIPO TREBUCHET.....	86
7.4. ELABORACIÓN DEL MODELO DE DA VINCI.....	91
7.5. ELABORACIÓN DEL MODELO HÍBRIDO.....	98
7.6. REPRESENTACIÓN DEL MODELO Y HERRAMIENTAS DE RENDERIZADO.....	103
7.6.1. Interfaz del programa y uso de las herramientas de representación..	103
7.6.2. Representación de renders producidos.....	110
CONCLUSIONES.....	120
ANEXO I: EXPLOSIONADO DE MODELOS CON NUMERACIONES DE PIEZAS.....	121
ANEXO II: PLANOS.....	130
REFERENCIAS.....	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Pintura de una catapulta tipo trebuchet asediando una fortaleza. Fuente: istockphoto.com.....	3
Figura 2: Cañones de pólvora defendiendo una fortaleza. Fuente: depositphotos.com.....	5
Figura 3: Catapulta de torsión tipo onagro. Fuente: shutterstock.com.....	6
Figura 4: Honda. Fuente: facebook.com.....	7
Figura 5: Catapulta o Balista Romana. Fuente: arqueologiaenmijardin.blogspot.com.....	8
Figura 6: Catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia.....	10
Figura 7: Catapulta tipo trebuchet. Fuente: Elaboración propia.....	11
Figura 8: Tambor de la catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia.....	13
Figura 9: Catapulta medieval con refuerzos metálicos. Fuente: depositphotos.com.....	14
Figura 10: Proyectiles de piedra. Fuente: commons.wikimedia.org.....	15
Figura 11: Estructura base catapulta tipo trebuchet. Fuente: Elaboración propia.....	18
Figura 12: Ensamblaje brazo lanzador catapulta tipo trebuchet. Fuente: Elaboración propia... 19	
Figura 13: Ensamblaje principal catapulta tipo trebuchet. Fuente: Elaboración propia.....	20
Figura 14: Estructura catapulta de Da Vinci. Fuente propia.....	21
Figura 15: Tambor y brazo lanzador catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia.....	22
Figura 16: Ensamblaje final catapulta de Da Vinci. Elaboración propia.....	23
Figura 17: Estructura base de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.....	24
Figura 18: Tambor con cuerdas de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.....	25
Figura 19: Ensamblaje del brazo lanzador de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.....	26
Figura 20: Ensamblaje principal de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.....	27
Figura 21: Logotipo SolidWorks. Fuente: 1000marcas.net.....	29
Figura 22: Ventana de inicio del programa SolidWorks. Fuente: Elaboración propia.....	31
Figura 23: Área de trabajo de un ensamblaje de Solidworks. Fuente: Elaboración propia... 32	
Figura 24: Ventana de trabajo de SolidWorks. Fuente: Elaboración propia.....	33
Figura 25: Presentación del Gestor de diseño de una pieza y un ensamblaje. Fuente: Elaboración propia.....	34
Figura 26: Administrador de comandos. Entorno de croquis y operaciones. Fuente: Elaboración propia.....	35
Figura 27: Administrador de comandos. Entorno de ensamblaje. Fuente: Elaboración propia. 35	
Figura 28: Administrador de comandos. Entorno de cálculo. Fuente: Elaboración propia....	35
Figura 29: Administrador de comandos. Entorno de complementos. Fuente: Elaboración propia.....	36
Figura 30: Cuadro de diseño. Fuente: Elaboración propia.....	36

Figura 31: Pieza objetivo explicación orden de operaciones. Fuente: Elaboración propia.....	39
Figura 32: Ejemplo de Extrusión de una pieza. Fuente: Elaboración Propia.....	40
Figura 33: Ejemplo de Corte por extrusión de una pieza. Fuente: Elaboración Propia.....	42
Figura 34: Ejemplo de redondeo en una pieza. Fuente: Elaboración Propia.....	44
Figura 35: Ejemplo de simetría en una pieza. Fuente: Elaboración Propia.....	46
Figura 36: Orden de operaciones en el Gestor de diseño. Fuente: Elaboración propia.....	47
Figura 37: Orden de operaciones en el modelado de piezas. Fuente: Elaboración propia...	47
Figura 38: Dimensiones generales catapulta tipo trebuchet. Fuente: Elaboración propia.....	48
Figura 39: Boceto de la unión de los listones laterales y el listón vertical. Fuente: Elaboración Propia.....	50
Figura 40: Boceto de la estructura del marco superior. Fuente: Elaboración propia.....	51
Figura 41: Boceto del brazo lanzador. Fuente: Elaboración Propia.....	52
Figura 42: Relaciones entre elementos de un croquis. Fuente: Elaboración propia.....	53
Figura 43: Croquis del listón lateral. Fuente: Elaboración propia.....	54
Figura 44: Operación de Extrusión del listón lateral. Fuente: Elaboración propia.....	54
Figura 45: Primer croquis de agujero en el modelo. Fuente: Elaboración propia.....	55
Figura 46: Primera simetría en croquis del modelo. Fuente: Elaboración propia.....	56
Figura 47: Croquis de corte del listón lateral. Fuente: Elaboración propia.....	56
Figura 48: Operación de corte del listón frontal de la base. Fuente: Elaboración propia.....	57
Figura 49: Operación de realización de un plano. Fuente: Elaboración propia.....	58
Figura 50: Operación de simetría en listón frontal de la base. Fuente: Elaboración propia..	59
Figura 51: Parte inferior del croquis del listón vertical. Fuente: Elaboración propia.....	60
Figura 52: Croquis de la operación de corte de la placa lateral.Fuente: Elaboración propia.	61
Figura 53: Secciones del croquis de corte del listón del brazo. Fuente: Elaboración propia....	61
Figura 54: Matriz lineal del croquis del brazo lanzador. Fuente: Elaboración propia.....	62
Figura 55: Operación Cúpula para la cabeza del perno. Elaboración propia.....	63
Figura 56: Operación “Chaflán” del perno. Fuente: Elaboración propia.....	64
Figura 57: Elaboración de Hélice para el trayecto de una rosca. Fuente: Elaboración propia..	64
Figura 58: Elaboración del perfil de corte en roscas. Fuente: Elaboración propia.....	65
Figura 59: Operación Cortar-barrer para rosca de pernos. Fuente: Elaboración propia.....	65
Figura 60: Operación chaflán de la tuerca. Fuente: Elaboración propia.....	66
Figura 61: Croquis para perfil de la rosca de la tuerca. Fuente: Elaboración propia.....	66
Figura 62: Croquis del perfil de las cuerdas. Fuente: Elaboración propia.....	67
Figura 63: Operación de barrido con torsión para cuerdas. Fuente: Elaboración propia.....	68
Figura 64: Selección de comenzar Croquis. Fuente: Elaboración Propia.....	69
Figura 65: Selección de plano generar para realizar croquis. Fuente: Elaboración Propia..	70
Figura 66: Selección de Línea constructiva. Fuente: Elaboración Propia.....	70

Figura 67: Selección de relación de posición Vertical. Fuente: Elaboración Propia.....	71
Figura 68: Ubicación de la operación Línea de croquis. Fuente: Elaboración Propia.....	72
Figura 69: Primeros trazos del croquis. Fuente: Elaboración Propia.....	72
Figura 70: Ubicación de la operación Simetría de entidades. Fuente: Elaboración Propia...	73
Figura 71: Operación Simetría de entidades en un croquis. Fuente: Elaboración Propia.....	73
Figura 72: Operación Simetría de entidades en un croquis. Fuente: Elaboración Propia.....	74
Figura 73: Introducción manual de dimensiones en Cota inteligente. Fuente: Elaboración Propia.....	74
Figura 74: Croquis definido y acotado. Fuente: Elaboración Propia.....	75
Figura 75: Ubicación de la operación Extruir saliente/base. Fuente: Elaboración Propia.....	75
Figura 76: Representación de la operación Extruir saliente/base. Fuente: Elaboración Propia.....	76
Figura 77: Resultado de la operación Extruir saliente/base. Fuente: Elaboración Propia.....	76
Figura 78: Ubicación de la operación Extruir corte. Fuente: Elaboración Propia.....	77
Figura 79: Inicio del croquis Extruir corte. Fuente: Elaboración Propia.....	77
Figura 80: Ubicación de la operación Equidistar entidades. Fuente: Elaboración Propia.....	78
Figura 81: Representación de la operación Equidistar entidades. Fuente: Elaboración Propia.....	78
Figura 82: Resultado de la operación Equidistar entidades. Fuente: Elaboración Propia.....	79
Figura 83: Ubicación de la operación Recortar entidades. Fuente: Elaboración Propia.....	79
Figura 84: Representación de la operación Recortar entidades. Fuente: Elaboración Propia..	80
Figura 85: Ubicación del comando Círculo. Fuente: Elaboración Propia.....	80
Figura 86: Uso del comando Círculo en un croquis. Fuente: Elaboración Propia.....	81
Figura 87: Agregar relaciones a trazos en un croquis. Fuente: Elaboración Propia.....	81
Figura 88: Resultado tras acotar un croquis. Fuente: Elaboración Propia.....	82
Figura 89: Simetría de círculos del croquis. Fuente: Elaboración Propia.....	83
Figura 90: Representación de la operación Extruir corte. Fuente: Elaboración Propia.....	83
Figura 91: Volumen resultante de las diferentes operaciones. Fuente: Elaboración Propia..	84
Figura 92: Apariencias del Cuadro de diseño. Fuente: Elaboración propia.....	84
Figura 93: Elemento con apariencia modificada y Cuadro de diseño abierto con apariencias. Fuente: Elaboración propia.....	85
Figura 94: Función de ensamblaje Mover con sistema de referencia. Fuente: Elaboración propia.....	86
Figura 95: Relación de posición entre listones de la base. Fuente: Elaboración propia.....	87
Figura 96: Relación de posición Concéntrica de un perno y un listón. Fuente: Elaboración propia.....	88
Figura 97: Relación de posición coincidente entre perno y placa lateral. Fuente: Elaboración propia.....	88

Figura 98: Relación de posición coincidente entre tuerca y arandela. Fuente: Elaboración propia.....	89
Figura 99: Relación de posición Distancia de los ejes. Fuente: Elaboración propia.....	90
Figura 100: Relación de posición Paralela del contrapeso. Fuente: Elaboración propia.....	90
Figura 101: Relación de posición Ángulo límite del brazo. Fuente: Elaboración propia.....	91
Figura 102: Base de la catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia.....	92
Figura 103: Ensamblaje de estructura catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia...	93
Figura 104: Ensamblaje de topes de la catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia.	94
Figura 105: Ensamblaje del freno y el eje de la catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia.....	95
Figura 106: Ensamblaje del tambor de la catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia..	95
Figura 107: Ensamblaje del brazo lanzador de la catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia.....	96
Figura 108: Ensamblaje de cuerdas de la catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia.	97
Figura 109: Representación de la base de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia....	98
Figura 110: Base con listones verticales y soportes de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.....	99
Figura 111: Estructura de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.....	99
Figura 112: Ensamblaje del brazo de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.....	100
Figura 113: Ensamblaje del eje tambor de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia....	101
Figura 114: Ensamblaje de elementos de fijación de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.....	101
Figura 115: representación de ensamblaje de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.....	102
Figura 116: Ubicación de la configuración de luces y cámaras. Fuente: Elaboración propia....	103
Figura 117: Inserción de luz direccional. Fuente: Elaboración propia.....	104
Figura 118: Entorno de Exportación a Visualize. Fuente: Elaboración propia.....	105
Figura 119: Interfaz de Solidworks Visualize. Fuente: Elaboración propia.....	106
Figura 120: Panel de apariencias de Solidworks Visualize. Fuente: Elaboración propia....	107
Figura 121: Panel de entorno de Solidworks Visualize. Fuente: Elaboración propia.....	108
Figura 122: Panel de entorno de Solidworks Visualize. Fuente: Elaboración propia.....	109
Figura 123: Detalles del eje de la catapulta tipo trebuchet. Fuente: Elaboración propia.....	110
Figura 124: Detalle del marco superior de la catapulta tipo trebuchet. Fuente: Elaboración propia.....	111
Figura 125: Detalle de las cuerdas de la catapulta tipo trebuchet. Fuente: Elaboración	

propia.....	112
Figura 126: Detalles del brazo lanzador de la catapulta tipo trebuchet. Fuente: Elaboración propia.....	113
Figura 127: Detalles de la catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia.....	114
Figura 128: Detalles del tambor de la catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia.	115
Figura 129: Vista superior de la catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia.....	116
Figura 130: Vista inferior de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.....	117
Figura 131: Vista superior de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.....	118
Figura 132: Detalle del tambor de cuerdas de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.....	119
Figura 133: Explosionado numerado de la estructura de la catapulta tipo trebuchet. Fuente: Elaboración propia.....	122
Figura 134: Explosionado numerado del brazo de la catapulta tipo trebuchet. Fuente: Elaboración propia.....	123
Figura 135: Explosionado numerado de elementos de fijación de la catapulta tipo trebuchet. Fuente: Elaboración propia.....	124
Figura 136: Explosionado numerado de la catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia.....	126
Figura 137: Explosionado numerado de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia..	128



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla de elementos de la catapulta tipo trebuchet.....	125
Tabla de elementos de la catapulta de Da Vinci.....	127
Tabla de elementos de la catapulta híbrida.....	129



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

CAD: Computer Aided Design

mm: Milímetro

3D: 3 dimensiones

2D: 2 dimensiones

PDM: Product Data Management

HDRI: High Dynamic Range Image

GPU: Graphics Procesing unit



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Recreación virtual de catapultas y su contextualización
histórica. Una visión al pasado.



[PÁGINA EN BLANCO]



RESUMEN

En el presente Trabajo de Fin de Grado se realizará un estudio y diseño de diversos tipos de catapultas con el objetivo de elaborar una recreación virtual detallada de estas históricas máquinas de asedio. Además, se analizarán los diferentes contextos históricos en los que estas catapultas fueron utilizadas para comprender mejor sus necesidades, capacidades y métodos de fabricación.

Para llevar a cabo una comparación de las catapultas, resulta esencial comprender su origen y contexto histórico. Esto implica investigar y comprender los períodos y culturas en los que cada tipo de catapulta tuvo su aparición y desarrollo. Por ejemplo, se explorarán las catapultas utilizadas por antiguas civilizaciones como Grecia y Roma, así como las variantes medievales y renacentistas. Se prestará especial atención a los materiales empleados en la fabricación de cada tipo de catapulta, ya que estos variaban significativamente según la disponibilidad y las tecnologías de la época. Desde la madera y el cuero utilizados en las catapultas griegas y romanas, hasta los metales y las estructuras más complejas de las catapultas medievales, cada material influyó en el diseño y funcionamiento de las máquinas de asedio.

Además, se analizarán los tiempos de producción y la finalidad de uso de cada tipo de catapulta. Algunas catapultas estaban diseñadas para lanzar piedras y proyectiles pesados a largas distancias durante los asedios de fortalezas, mientras que otras tenían la capacidad de lanzar proyectiles incendiarios o incluso cadáveres en descomposición para propagar enfermedades entre los defensores enemigos.

El estudio detallado de estos aspectos permitirá realizar una comparación significativa entre las diferentes catapultas, destacando las similitudes y diferencias en su diseño, funcionamiento y aplicación militar a lo largo de la historia. Además, proporcionará una base sólida para el diseño preciso de las recreaciones virtuales de las catapultas, asegurando su precisión histórica y su utilidad como herramientas educativas y de divulgación.



ABSTRACT

In this final project, a study and design of various types of catapults will be carried out with the aim of creating a detailed virtual recreation of these historic siege machines. In addition, the different historical contexts in which these catapults were used will be analysed in order to better understand their needs, capabilities and manufacturing methods.

In order to carry out a comparison of catapults, it is essential to understand their origin and historical context. This involves researching and understanding the periods and cultures in which each type of catapult emerged and developed. For example, catapults used by ancient civilisations such as Greece and Rome will be explored, as well as medieval and Renaissance variants. Particular attention will be paid to the materials used in the manufacture of each type of catapult, as these varied significantly according to the availability and technologies of the time. From the wood and leather used in Greek and Roman catapults, to the metals and more complex structures of medieval catapults, each material influenced the design and operation of siege machines.

In addition, the production times and purpose of use of each type of catapult will be discussed. Some catapults were designed to launch stones and heavy projectiles over long distances during sieges of fortresses, while others were capable of launching incendiary projectiles or even rotting corpses to spread disease among enemy defenders.

Detailed study of these aspects will allow a meaningful comparison between the different catapults, highlighting similarities and differences in their design, operation and military application throughout history. It will also provide a solid basis for the accurate design of virtual recreations of catapults, ensuring their historical accuracy and usefulness as educational and outreach tools.

1. INTRODUCCIÓN

Las catapultas han sido dispositivos clave en la historia de la ingeniería militar, empleadas en múltiples culturas y periodos históricos con el propósito de superar defensas fortificadas. Estas máquinas de asedio han destacado por su capacidad de lanzar proyectiles pesados a larga distancia, lo cual resultó decisivo en numerosos enfrentamientos bélicos desde la Antigüedad hasta la Edad Media.

El presente proyecto se centra en el estudio y modelado virtual de varios tipos de catapultas históricas. Para ello, se ha realizado una investigación previa sobre los contextos históricos en los que fueron desarrolladas, prestando atención tanto a las civilizaciones que las utilizaron como a las particularidades tecnológicas de cada época. Se han estudiado catapultas pertenecientes al mundo grecorromano, así como modelos empleados en la Europa medieval y el Renacimiento, lo que facilita establecer el análisis comparativo entre distintas soluciones constructivas y su evolución a lo largo del tiempo.

Las catapultas son mecanismos diseñados para lanzar distintos tipos de proyectiles a distancias considerables. Su estructura habitual se compone de una base fija sobre la que se monta un brazo articulado, junto con un sistema capaz de almacenar energía, ya sea mediante torsión de cuerdas o madera, el uso de elementos elásticos como resortes o también contrapesos. El proyectil, generalmente una piedra u objeto de gran peso, se sitúa en uno de los extremos del brazo, y, al liberar el mecanismo, se genera un movimiento rápido que permite su lanzamiento. Estos dispositivos fueron fundamentales en los enfrentamientos bélicos previos al desarrollo de la artillería con pólvora, y se emplearon de forma destacada en situaciones de asedio. Entre los tipos más representativos se encuentran el modelo de contrapeso, que basa su funcionamiento en una masa suspendida, y el onagro, que opera mediante la tensión acumulada en cuerdas o tendones.

El objetivo principal de este trabajo es recrear virtualmente estas máquinas de asedio mediante el uso del software SolidWorks 2023, aplicando técnicas de diseño CAD en tres dimensiones para reflejar con exactitud tanto su diseño como su funcionamiento. Para alcanzar este fin, se ha llevado a cabo un estudio detallado de los materiales utilizados históricamente en su fabricación, entre ellos la madera, el cuero, el metal o las cuerdas vegetales y tendones animales, considerando su disponibilidad según la región y periodo histórico.

El proyecto aborda aspectos como la finalidad táctica de cada tipo de catapultas, los materiales empleados, los tiempos de construcción y los métodos de fabricación. También se examina su uso en escenarios específicos, desde el lanzamiento de proyectiles pesados contra murallas hasta el empleo de cargas incendiarias o biológicas con fines psicológicos y estratégicos. Estos elementos permiten contextualizar las decisiones de diseño de cada máquina y comprender su aplicación en el marco de la guerra antigua y medieval.

En resumen, este proyecto tiene por finalidad ofrecer una visión integral de las catapultas como máquinas de asedio, combinando el análisis histórico con la recreación virtual de sus componentes. De este modo, el objetivo es contribuir tanto a la divulgación técnica como al conocimiento histórico de una de las tecnologías militares más representativas del pasado.

2. OBJETIVOS

El presente proyecto plantea los siguientes objetivos:

1. **Investigación de la evolución de las armas de guerra:** Realizar una investigación detallada sobre la evolución de las armas de guerra. Elaborar un estudio de los diferentes tipos de armas utilizadas en diferentes períodos y culturas.
2. **Investigación de los tipos de catapultas y su funcionamiento:** Llevar a cabo un estudio sobre los diferentes tipos de catapultas que existieron. Analizar el funcionamiento de cada tipo de catapulta, incluidos los mecanismos de lanzamiento y los materiales utilizados en su construcción.
3. **Análisis detallado de los modelos seleccionados:** Centrar la investigación en las catapultas específicas que son objeto de estudio en el proyecto. Analizar en profundidad su funcionamiento, los materiales utilizados en su fabricación, los procesos de construcción y su uso en el campo de batalla.
4. **Recreación virtual en 3D:** Uso del software Solidworks para elaborar una recreación virtual en 3D de los modelos de catapultas estudiados. Visualizar con precisión mediante las recreaciones cómo se construían y operaban estas armas, lo que ayudará a comprender mejor sus características y diferencias.
5. **Contribuir con la divulgación del Patrimonio Industrial:** Los diferentes modelos que se realizan podrían ser incluidos en el museo virtual impulsado por la Universidad de Málaga. Las catapultas son ejemplos de avances que han influido significativamente en la evolución de la tecnología, ya que se aplican principios físicos y estructurales de la ingeniería mecánica; y es interesante conectar estos principios con representaciones tridimensionales.

Este enfoque metodológico permite obtener una comprensión completa de las catapultas y su papel en la historia militar, así como generar conocimientos prácticos sobre su diseño y funcionamiento mediante la recreación virtual en 3D.

3. CONCEPTOS PREVIOS

3.1. HISTORIA DE LAS CATAPULTAS

El origen de las catapultas se ubica en las antiguas civilizaciones mediterráneas, donde comenzaron a emplearse como instrumentos clave dentro de las estrategias de asedio. Fueron los griegos quienes desarrollaron los primeros dispositivos de este tipo, basándose en principios de palanca y energía acumulada mediante torsión. Posteriormente, los romanos adoptaron estos diseños y los optimizaron para incrementar tanto el alcance como la precisión del disparo. Un ejemplo destacado es el onagro, también denominado mangonel, una máquina que funcionaba mediante la liberación de energía acumulada en cuerdas o tendones retorcidos, permitiendo el lanzamiento de proyectiles pesados con una considerable potencia de impacto.

Durante la Edad Media, otras culturas como la bizantina y la persa también integraron las catapultas en sus tácticas militares. Estas civilizaciones no sólo adoptaron los diseños previos, sino que los perfeccionaron, incorporando mejoras mecánicas y adaptaciones según sus necesidades logísticas y defensivas. El resultado fue el surgimiento de una amplia variedad de modelos, entre los que destacan la catapulta tipo trebuchet (o catapulta de contrapeso), cuya eficacia se basaba en un gran peso suspendido que facilitaba la aceleración del brazo lanzador (*Figura 1*).



Figura 1: Pintura de una catapulta tipo trebuchet asediando una fortaleza. Fuente: istockphoto.com

Estos avances reflejan cómo el conocimiento técnico fue evolucionando y adaptándose a lo largo del tiempo en función del contexto bélico de cada región. Además, la diversidad de catapultas desarrolladas entre los siglos V y XV evidencia una clara progresión en la comprensión de principios físicos como la cinemática, la conservación de la energía y la transferencia de fuerza. Cada variante presentaba modificaciones estructurales que respondían a objetivos concretos: mayor alcance, mayor capacidad destructiva o facilidad de montaje. Esta evolución no solo demuestra el ingenio de los ingenieros militares de la época, sino que también ofrece una base valiosa para el estudio contemporáneo de sistemas mecánicos antiguos desde una perspectiva técnica e histórica.

3.2. ARMAS DE ASEDIO EN LA HISTORIA MILITAR

Las armas de asedio han desempeñado un papel fundamental en la historia militar, tanto en la conquista de ciudades y fortalezas como en la defensa de las mismas. Su importancia radica en su capacidad para superar las defensas enemigas y abrir brechas en las murallas, lo que permitía a los ejércitos atacantes ganar terreno y avanzar hacia la victoria. A lo largo de los siglos, las armas de asedio han evolucionado significativamente en términos de diseño, tecnología y eficacia, adaptándose a los avances en la ingeniería y las tácticas militares.

La importancia del uso de las armas de asedio en las guerras se hizo evidente por varios aspectos:

- **Conquista de fortalezas.** Las fortificaciones, como castillos y murallas, eran elementos clave en la defensa de ciudades y territorios. Las armas de asedio proporcionaban a los ejércitos atacantes los medios para superar estas defensas y tomar el control de las fortalezas enemigas. Esto era crucial para el avance territorial y la expansión de los imperios.
- **Equilibrio de poder.** El dominio en el campo de batalla no solo dependía de la fuerza militar, sino también de la capacidad para asediar y defender fortificaciones. Las armas de asedio permitían a los ejércitos igualar o superar la ventaja defensiva de los enemigos, lo que influía en el resultado de las batallas y las campañas militares.
- **Innovación tecnológica.** La necesidad de superar las defensas enemigas impulsó la innovación en el diseño y la construcción de armas de asedio. A lo largo de la historia, se desarrollaron nuevas tecnologías y técnicas para mejorar la eficacia y el alcance de estas armas, desde catapultas y arietes hasta cañones y morteros.
- **Tácticas militares.** El uso de armas de asedio influyó en las tácticas militares empleadas en el campo de batalla. La planificación de asedios y la estrategia de ataque se basaban en

gran medida en el despliegue y la utilización efectiva de estas armas, así como en la protección de las tropas durante los asaltos a fortificaciones enemigas.

La evolución de las armas de asedio ha sido marcada por avances significativos en la ingeniería, la metalurgia y la fabricación. Desde las simples máquinas de asedio utilizadas en la antigüedad hasta los complejos cañones y bombardas de la era moderna (*Figura 2*), estas armas han experimentado una transformación notable en términos de tamaño, potencia y precisión. Además, el uso de la pólvora y otras tecnologías explosivas revolucionaron el campo de la artillería, dando lugar a novedosas armas de guerra mucho más destructoras.



Figura 2: Cañones de pólvora defendiendo una fortaleza. Fuente: depositphotos.com

En resumen, las armas de asedio han sido elementos clave en la historia militar, influyendo en el resultado de las batallas y las campañas militares, así como en el desarrollo de la tecnología y las tácticas militares a lo largo de los siglos. Su importancia y evolución reflejan la constante búsqueda de ventaja estratégica y dominio en el campo de batalla.

3.3. FUNCIONAMIENTO DE LA CATAPULTA

El principio de funcionamiento de las catapultas parte de la transformación de energía almacenada en energía cinética. Estos dispositivos aprovechan diferentes formas de energía potencial que, al ser liberadas, impulsan el proyectil. Según el tipo de catapulta y su

diseño, esta energía puede obtenerse de dos maneras principales: por gravedad o por tensión mecánica.

En el caso de las catapultas que utilizan un contrapeso, se acumula energía al elevar una masa que, al caer, genera un movimiento rotacional en el brazo lanzador. Esa energía gravitatoria se convierte en fuerza útil para lanzar el proyectil con gran potencia y distancia. Este sistema se asocia normalmente a modelos como la catapulta tipo trebuchet, cuya eficacia dependía directamente del peso del contrapeso y su altura de caída.

Por otro lado, otros tipos de catapultas funcionan mediante la deformación de elementos como cuerdas, tendones o piezas de madera. En estos casos, se almacena energía elástica al generar torsión o flexión, y cuando se libera dicha tensión, el sistema transfiere esa energía al brazo de lanzamiento. Esta tecnología fue característica de modelos como el onagro, donde la clave estaba en la tensión acumulada. En la (*Figura 3*) se pueden apreciar las cuerdas enrolladas que generan tensión en un onagro medieval.



Figura 3: Catapulta de torsión tipo onagro. Fuente: shutterstock.com

En ambos casos, el objetivo era el mismo: proyectar un objeto con suficiente velocidad y fuerza para causar daño a distancia. Comprender estos mecanismos resulta esencial para el análisis técnico y el modelado virtual posterior, ya que determina directamente su diseño estructural y su comportamiento durante el lanzamiento.

3.4. TIPOS DE CATAPULTA

Según la forma en que se acumula la energía potencial, las catapultas pueden clasificarse en tres grandes grupos:

3.4.1 Catapultas de tensión

Estas máquinas de asedio funcionan mediante la acumulación de energía mecánica, la cual es almacenada a través de la deformación de elementos elásticos. Este principio se basa en la capacidad de ciertos materiales para conservar energía potencial cuando son sometidos a tensiones controladas. Un ejemplo elemental y ampliamente conocido de este mecanismo es la honda, en la que se aplica una fuerza para extender una banda flexible o cuerda. Al liberarse dicha tensión, la energía almacenada se convierte en energía cinética, impulsando el proyectil a gran velocidad en dirección contraria a la fuerza aplicada inicialmente. Es relevante mencionar que la honda es una de las armas más antiguas de la humanidad, su origen se remonta a tiempos prehistóricos y ha sido usada tanto en guerras en la antigüedad, como para caza hasta tiempos más recientes (*Figura 4*).



Figura 4: Honda. Fuente: facebook.com

Este mismo concepto fue empleado en dispositivos más complejos, como las catapultas de torsión. Un modelo clásico basado en este principio puede observarse en la (Figura 5), en el cual el sistema de lanzamiento se encontraba compuesto de dos brazos giratorios. Estos brazos eran accionados por un sistema de torsión compuesto por haces de cuerdas o fibras elásticas, principalmente tendones animales, que se enrollaban en sentido opuesto. Cuando los brazos eran forzados hacia atrás, los tendones se comprimían y almacenaban energía. Al liberar los brazos, dicha energía se transfería de forma inmediata, generando un movimiento rotatorio que impulsaba el proyectil con gran fuerza.

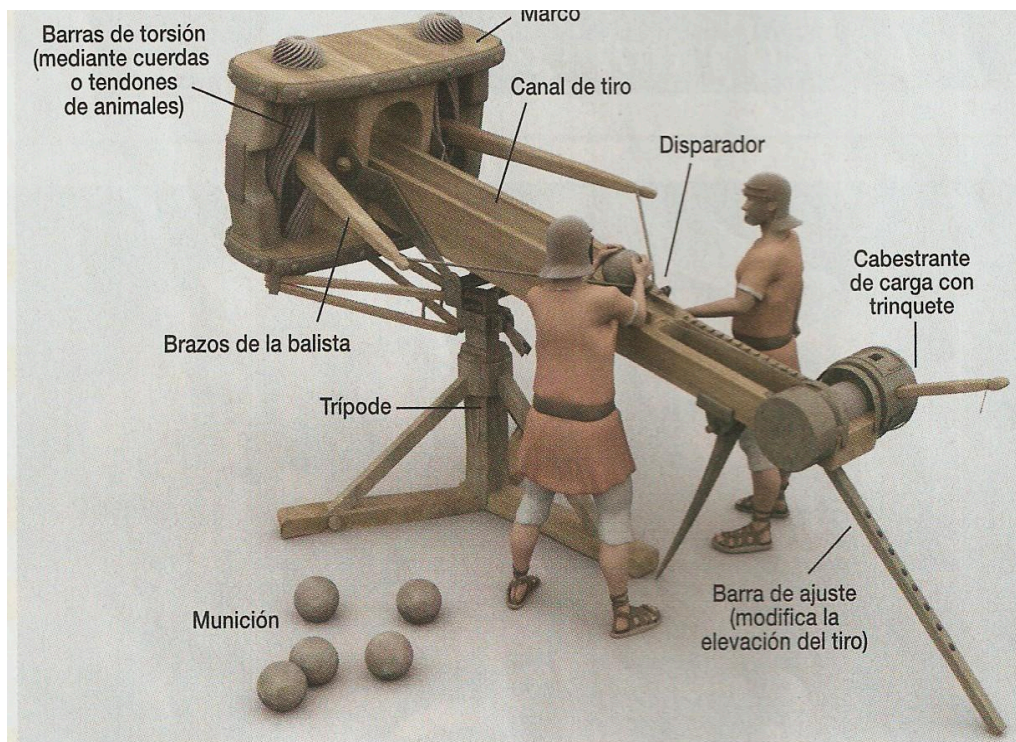


Figura 5: Catapulta o Balista Romana. Fuente: arqueologiaenmijardin.blogspot.com

El uso de tendones o fibras orgánicas no era casual, ya que estos materiales ofrecían una resistencia significativa a la deformación, así como una capacidad notable para recuperar su forma original. Esto permitía múltiples ciclos de carga y descarga sin una pérdida considerable de eficacia, aumentando la durabilidad del mecanismo. Gracias a esta combinación de elasticidad y resistencia, las máquinas de torsión resultan especialmente eficaces para lanzar proyectiles pesados a largas distancias, manteniendo una trayectoria estable y precisa.

3.4.2. Catapultas de torsión

Este tipo de catapultas se basa en la acumulación de energía mediante la torsión de cuerdas, sogas o elementos de propiedades similares, capaces de almacenar energía potencial al ser enrollados. Dicha energía se libera de forma repentina, generando un movimiento brusco del brazo lanzador que impulsa el proyectil a gran velocidad. Uno de los ejemplos más representativos de esta categoría es el onagro, una máquina de asedio en la que se empleaban haces de cuerdas enrolladas habitualmente hechas de fibras vegetales o tendones animales para conservar energía mecánica hasta el momento del lanzamiento. La tensión acumulada se liberaba de forma controlada, provocando una rápida rotación del brazo de lanzamiento.

Además de estos modelos tradicionales, existían diseños alternativos que empleaban materiales rígidos en lugar de cuerdas para generar la fuerza necesaria. Un caso particular es el de la catapulta diseñada por Leonardo da Vinci (*Figura 6*), cuyo funcionamiento se basaba en la torsión de listones de madera. Estos elementos se deformaban elásticamente al ser forzados, acumulando energía que, al ser liberada, permitía el desplazamiento brusco del brazo lanzador.

Esta variante representa un enfoque innovador dentro del mismo principio mecánico, empleando recursos estructurales distintos pero con un objetivo funcional idéntico; maximizar la potencia del disparo utilizando mecanismos de torsión como base para el almacenamiento y liberación de energía.



Figura 6: Catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia.

3.4.3. Catapultas de contrapeso

Este tipo de máquinas de asedio actúa mediante el uso de un contrapeso considerable para almacenar energía potencial de origen gravitatorio. Al liberarse dicho contrapeso, la energía acumulada se transforma en energía cinética, la cual se transfiere al brazo de la catapulta, provocando su movimiento repentino y permitiendo el lanzamiento del proyectil a larga distancia. El principio de funcionamiento se fundamenta en la acción de la gravedad sobre una masa suspendida, que al caer genera la fuerza necesaria para poner en marcha el mecanismo de disparo.

Una de las versiones más representativas de esta tecnología es la catapulta tipo trebuchet, una catapulta de gran tamaño que emplea un contrapeso fijo o articulado en uno de los extremos de un brazo largo. Este brazo actúa como una palanca asimétrica, permitiendo que, al caer el contrapeso, el extremo opuesto se eleve rápidamente y propulse el proyectil con gran fuerza y precisión. La eficiencia de este sistema reside en el aprovechamiento del

momento angular generado por la caída del peso, lo que permite alcanzar distancias notables con una elevada estabilidad en la trayectoria del disparo.

Gracias a esta combinación de simplicidad estructural y efectividad balística, la catapulta tipo trebuchet se convirtió en una de las armas de asedio más utilizadas durante la Edad Media, especialmente en los asedios prolongados, donde su capacidad para dañar fortificaciones a gran distancia representaba una gran ventaja táctica. Un ejemplo de este tipo de catapulta de contrapeso se puede apreciar en la (*Figura 7*).

Cada tipo de catapulta tiene sus propias ventajas y desventajas en términos de alcance, potencia, precisión y complejidad de construcción, pero todas operan bajo el mismo principio fundamental de convertir energía potencial en energía cinética para lanzar proyectiles a largas distancias.



Figura 7: Catapulta tipo trebuchet. Fuente: Elaboración propia.

3.5. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

El uso de materiales en las armas de asedio, como las catapultas, variaba considerablemente según la ubicación geográfica y los recursos disponibles en el área donde se construían. Las catapultas y otras armas de asedio (como los trabuquetes, balistas o arietes) dependían de materiales específicos para garantizar su eficacia, resistencia y durabilidad, lo que afectaba su diseño y fabricación en diferentes regiones. A continuación se presenta un resumen sobre los materiales y cómo éstos variaban según la localización de construcción:

3.5.1. Madera: Material esencial y variado según la región

- **Europa Medieval.** La madera era el material principal para la estructura de las catapultas. El tipo de madera utilizada dependía de la disponibilidad local. En Europa, las maderas más utilizadas eran el roble, el fresno y el haya, ya que eran fuertes y resistentes a las tensiones generadas por los mecanismos de torsión y contrapeso.
- **Asia Menor y el Cercano Oriente.** En estas regiones, las maderas duras como el cedro, el enebro o el ciprés también eran comunes, debido a su resistencia y relativa ligereza. Estas maderas, aunque no tan abundantes como en Europa, eran apreciadas por su capacidad para soportar el uso prolongado.
- **China y Asia Oriental.** Las maderas de bambú y abeto podían utilizarse para estructuras más ligeras y flexibles en las catapultas, especialmente en las primeras armas de asedio como las balistas chinas o los trabuquetes de contrapeso.

3.5.2. Cuerdas y tendones: Mecanismos de torsión y tensión

- **Cuerdas vegetales.** Las cuerdas utilizadas en las catapultas podían fabricarse con fibras vegetales como el cáñamo o el lino. El cáñamo era común en Europa, mientras que el lino y el sisal eran más frecuentes en las regiones mediterráneas y del norte de África. Éstas fueron utilizadas mayormente para mover el brazo de lanzamiento, pero había muchas que poseían un tambor donde estas cuerdas se enrollaban (*Figura 8*).

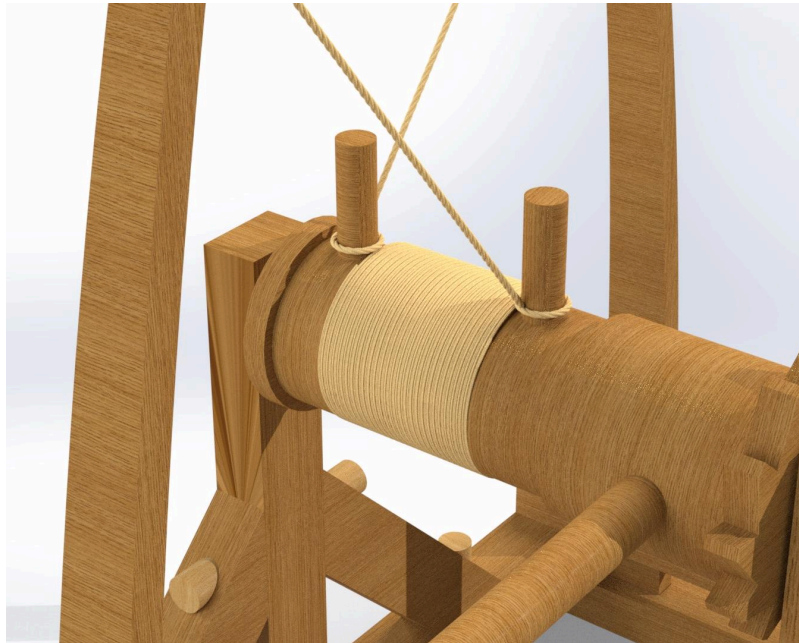


Figura 8: Tambor de la catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia.

- **Tendones y cuero.** En algunas regiones, especialmente en zonas donde los animales eran más comunes, se usaban tendones de animales (de bueyes, caballos o incluso camellos) para los mecanismos de torsión, lo que ofrecía una mayor resistencia y durabilidad en comparación con las cuerdas vegetales. Esto era típico en el Cercano Oriente, Asia Menor y el Imperio Bizantino.
- **Seda (en Asia).** En China, donde la seda era un recurso valioso, se podría haber empleado para ciertas partes de la catapulta debido a su increíble resistencia a la tracción y flexibilidad.

3.5.3. Piedra y metal: Refuerzos estructurales

- **Europa y Cercano Oriente.** Para asegurar la durabilidad de las armas de asedio, fueron utilizados refuerzos de hierro y acero en las zonas críticas de las catapultas, como las articulaciones y mecanismos de palanca. Otras zonas de desgaste donde se incluían refuerzos de metal solía ser las ruedas y zonas de rodamiento. Estos refuerzos se pueden apreciar en la catapulta medieval de la (*Figura 9*), donde se aprecia la parte de rodadura de las ruedas metálicas, y otros elementos de refuerzos estructurales y abrazaderas para unir piezas. El hierro estaba disponible en Europa y el Mediterráneo, y era el metal más utilizado. En algunas regiones donde el hierro

era más escaso, como el Cercano Oriente, el bronce o incluso aleaciones de cobre también podían emplearse.

- **China y Asia.** El hierro y el bronce también se empleaban para ciertos componentes de las catapultas, pero en menor cantidad que en Occidente debido a diferencias en el diseño. En Asia, se confiaba más en el equilibrio de las fuerzas y el uso de palancas, lo que reducía la necesidad de refuerzos pesados de metal.



Figura 9: Catapulta medieval con refuerzos metálicos. Fuente: depositphotos.com

3.5.4. Contrapesos: Variedad según el entorno

- **Piedra local.** En el caso de los trabuquetes de contrapeso, que requerían pesos sustanciales para lanzar proyectiles, el tipo de material usado para los contrapesos dependía de lo que estuviera disponible localmente. En Europa y el Cercano Oriente, fueron utilizadas piedras grandes, generalmente de caliza, granito o cualquier tipo de roca densa que fuera fácil de encontrar.
- **Arena y tierra (en desiertos o zonas áridas).** En regiones áridas o desérticas, como en algunas partes del Cercano Oriente, el contrapeso podía estar hecho de sacos llenos de arena o tierra, que eran más fáciles de manejar y transportar que las piedras grandes.

3.5.5. proyectiles: Disponibilidad local y el propósito de asedio

- **Piedra.** Los proyectiles lanzados por catapultas, trabuquetes y ballestas de asedio variaban según la ubicación. Las piedras locales eran el proyectil más común, y su tamaño variaba dependiendo de la capacidad de la catapulta. En regiones donde la piedra caliza o el granito eran abundantes, estos se utilizaban por su dureza. En museos de ciudades donde hay castillos o fortalezas se exhiben este tipo de proyectiles que se han conservado hasta la fecha (*Figura 10*).



Figura 10: Proyectiles de piedra. Fuente: commons.wikimedia.org

- **Bolas metálicas.** En algunas zonas ricas en metales, se empleaban bolas de metal (hierro o plomo) como proyectiles. Aunque esto era raro debido a los costos, podía ser extremadamente devastador.
- **Proyectiles incendiarios.** En zonas donde el aceite y los combustibles como el alquitrán o la resina eran abundantes (Mediterráneo, Asia Menor), se usaban proyectiles incendiarios. Los recipientes llenos de aceite o resina encendida se lanzaban contra las murallas o ciudades.

3.5.6. Diseño y adaptación a la geografía

- **Zonas montañosas y boscosas.** En regiones montañosas, como los Alpes o los Pirineos, el transporte de armas de asedio pesadas era difícil, por lo que las catapultas solían construirse en el sitio del asedio utilizando madera local. Esto reducía la necesidad de transportar grandes estructuras.
- **Zonas desérticas y llanuras.** En áreas como las llanuras del Cercano Oriente o el norte de África, donde la madera escaseaba, era más común encontrar estructuras de asedio más ligeras o fabricadas con madera importada. Las armas de asedio más ligeras y móviles también podían tener ventaja en estas regiones, donde la maniobrabilidad era crucial.

3.5.7. Innovaciones locales: Diferentes diseños por región

- **Europa medieval.** Aquí se desarrollaron diseños más robustos y potentes, como el trabuquete de contrapeso, que requería grandes cantidades de madera y piedra, materiales accesibles en la región.
- **China y Asia Central.** Los diseños asiáticos de armas de asedio a menudo se basaban más en el uso eficiente de materiales más ligeros y mecanismos complejos, como los trabuquetes de equilibrio o las balistas. La disponibilidad de materiales como bambú o diferentes tipos de maderas ligeras permitía una mayor movilidad.
- **Imperio Bizantino y el mundo árabe.** En estas regiones, se introdujeron innovaciones técnicas avanzadas y una mezcla de influencias romanas y persas en los diseños, con énfasis en el uso de cuerdas de tendón y mecanismos de torsión, utilizando metales como bronce y madera de alta calidad.

El tipo de materiales utilizados en las catapultas y otras armas de asedio dependía en gran medida de la ubicación geográfica, la disponibilidad de recursos locales y las técnicas de construcción de cada región. Los materiales empleados, desde la resistente madera europea hasta los tendones animales del Cercano Oriente, influían directamente en el diseño, la eficacia y la durabilidad de las armas de asedio. Además, la adaptación a la geografía y los materiales disponibles demostraba la capacidad de los ingenieros militares para innovar y crear armas personalizadas para cada escenario de guerra.

4. ELECCIÓN DE LOS MODELOS

4.1. SELECCIÓN DE MODELOS Y CONTEXTO HISTÓRICO

Como parte del desarrollo del Trabajo Fin de Grado, se ha realizado el modelado en SolidWorks de tres catapultas representativas de distintos enfoques en la utilización de mecanismos de propulsión, tanto históricos como experimentales. Los modelos seleccionados comprenden: una reinterpretación de una catapulta tipo trebuchet, una catapulta inspirada en los estudios técnicos de Leonardo da Vinci y una versión híbrida que integra un sistema de contrapeso junto con torsión generada por una goma enrollada.

Los modelos de la catapulta tipo trebuchet y la catapulta de Da Vinci han sido desarrollados como maquetas a una escala aproximada de 1:5, sus planos están diseñados para su futura fabricación. Dado que las fuentes disponibles consisten en documentos visuales sin especificaciones técnicas ni datos proporcionales precisos, las dimensiones han sido estimadas de forma visual mediante principios de proporcionalidad y criterios funcionales, adaptando la geometría para permitir su acorde representación en entorno CAD. La tercera catapulta también tiene dimensiones parecidas puesto que ha sido diseñada con el objetivo de que sea también fabricada en un futuro.

- **Catapulta tipo Trebuchet**

La catapulta tipo trebuchet es una de las máquinas de asedio más emblemáticas de la Edad Media, con mayor presencia entre los siglos XII y XV. Su funcionamiento se fundamenta en el principio de palanca, impulsado por un contrapeso que transmite energía al brazo lanzador. Esta estructura permitía alcanzar distancias considerables con alta precisión, superando a los diseños anteriores que dependían de la torsión de cuerdas. Su inclusión en el proyecto se debe tanto a su relevancia histórica como a su utilidad para el análisis estructural y del movimiento, al ofrecer un ejemplo claro de eficiencia en la transmisión mecánica de energía.

Aunque su principio operativo ha permanecido constante, su estructura y los materiales empleados han experimentado modificaciones a lo largo del tiempo. En el presente proyecto, se ha llevado a cabo una reinterpretación a escala del modelo tradicional, integrando principios modernos de diseño mecánico. Para ello, se han incorporado materiales contemporáneos y sistemas de fijación actuales, manteniendo la lógica funcional del mecanismo de contrapeso.

Las partes o diferentes piezas que constituyen el modelo las podemos distinguir en los siguientes subensamblajes. En la (*Figura 11*), se aprecia la estructura de la catapulta, en ella se pueden distinguir los listones que forman la base, los soportes laterales a 45°, los listones verticales y sus respectivos marcos superiores donde se hace la unión de los listones verticales con los soportes laterales.

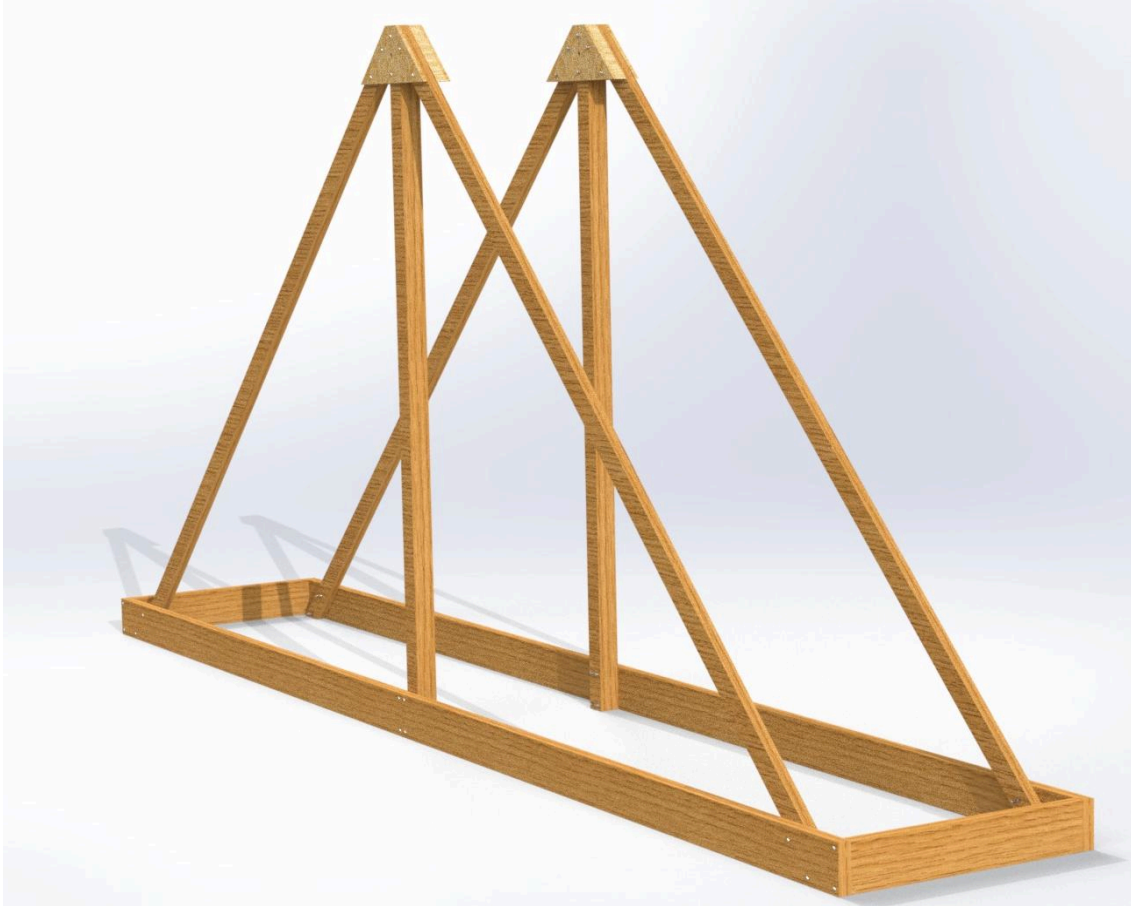


Figura 11: Estructura base catapulta tipo trebuchet. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, otro de los elementos más importantes es el brazo lanzador. La (Figura 12) representa el subensamblaje del brazo con sus ejes pasadores ya ensamblados.

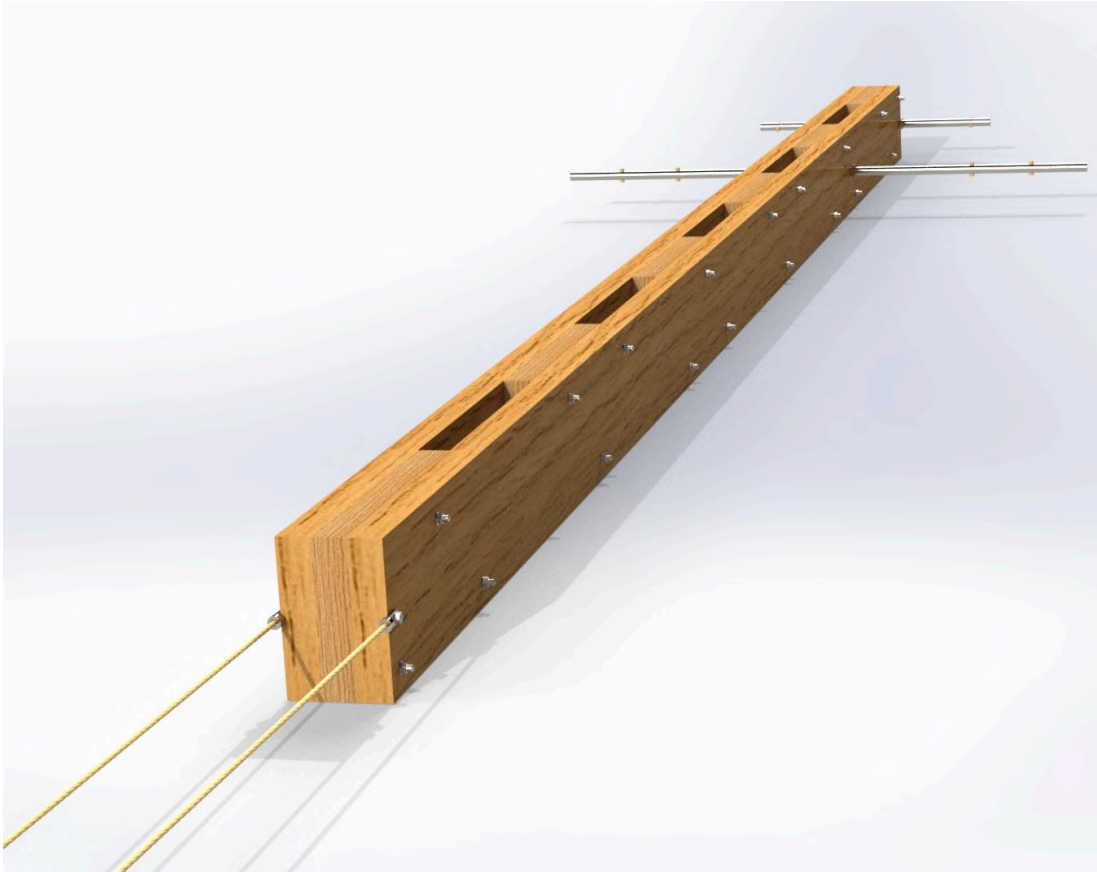


Figura 12: Ensamblaje brazo lanzador catapulta tipo trebuchet. Fuente: Elaboración propia.

En el ensamblaje final se pueden ver los dos anteriores grupos de elementos ensamblados con su respectivo contrapeso, y los pernos y arandelas en los ejes para fijar los mismos (*Figura 13*).



Figura 13: Ensamblaje principal catapultas tipo trebuchet. Fuente: Elaboración propia.

- **Catapulta de Leonardo da Vinci**

El segundo modelo está basado en uno de los bocetos incluidos en los manuscritos técnicos de Leonardo da Vinci, donde se exploran propuestas mecánicas con aplicaciones militares. Aunque estos diseños no llegaron a construirse en su época, destacan por su dominio en principios físicos, en los materiales y en las proporciones estructurales.

Debido a la falta de dimensiones originales, fueron estimadas medidas compatibles con principios ergonómicos y estructurales, lo que ha permitido su recreación tridimensional. Se ha intentado recrear al máximo la forma y estructura del diseño original, mayormente

haciendo proporciones de referencias visuales de los escasos planos e imágenes que se pueden encontrar en internet.

A continuación se muestra una representación de los diferentes subensamblajes para poder distinguir las diferentes partes o piezas que conforman el modelo. En primer lugar se puede apreciar la estructura base de la catapulta, donde se distinguen las piezas ensambladas mediante elementos de unión como pernos de madera a presión. En ella se diferencian los listones de la estructura base, dos listones verticales a cada lado con sus soportes laterales a 45°, los listones que hacen de tope del brazo lanzador en la parte frontal y trasera, un listón en el lado izquierdo que hace de freno del tambor, y por último los dos listones flexibles que se encuentran en la parte frontal y trasera y que son los encargados del almacenamiento de la energía potencial (*Figura 14*).



Figura 14: Estructura catapulta de Da Vinci. Fuente propia.

El subensamblaje del brazo lanzador consta de un tambor donde se enrollan las cuerdas que tensan los listones que conservan la energía, el brazo, la cuchara y las cuerdas enrolladas, como se aprecia en la (*Figura 15*).

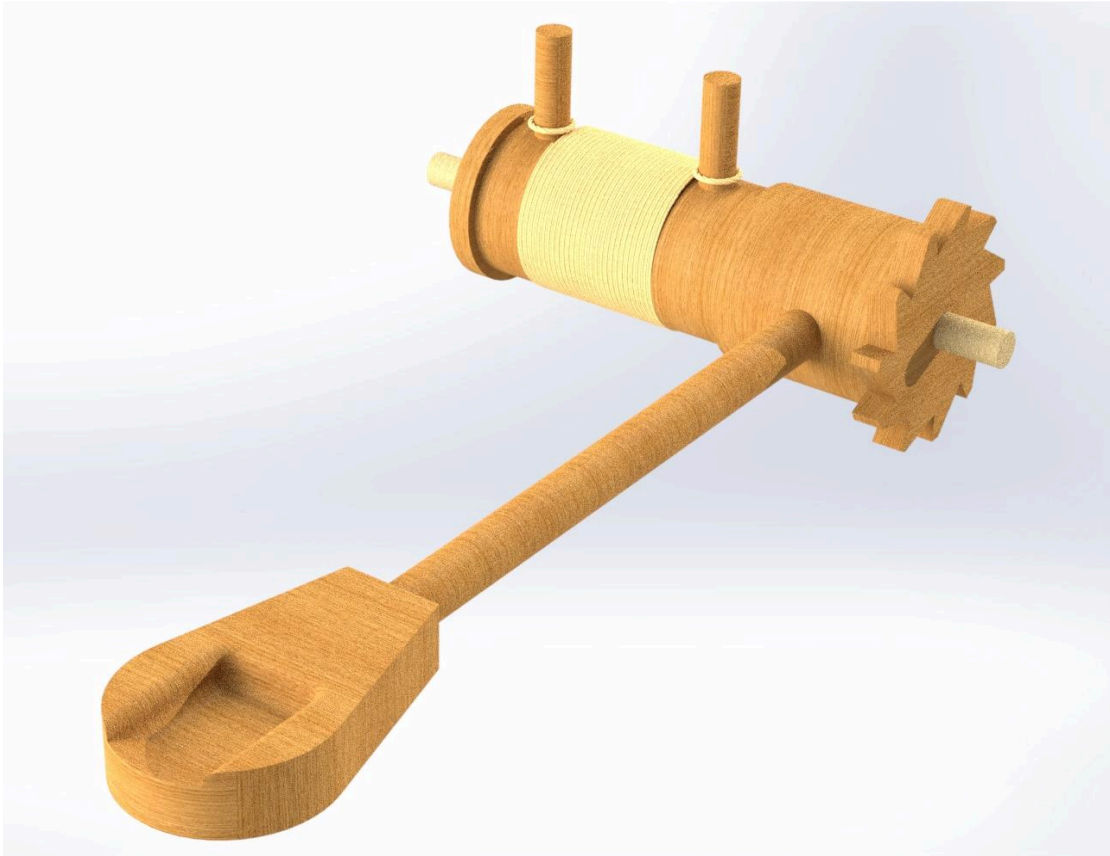


Figura 15: Tambor y brazo lanzador catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia.

En la (*Figura 16*) se aprecia el ensamblaje principal de este modelo, resultado de la unión de los dos subensamblajes anteriores.



Figura 16. Ensamblaje final catapulta de Da Vinci. Elaboración propia.

- **Catapulta híbrida: contrapeso y torsión**

El tercer diseño combina un sistema de contrapeso con un mecanismo de torsión activado mediante una goma enrollada en el eje de giro. Se ha desarrollado con dimensiones correspondientes a una maqueta mediana de sobremesa, lo que haría más fácil su posible fabricación física en etapas posteriores. A diferencia de los modelos anteriores, no se basa en una fuente histórica concreta, sino que tiene como objetivo explorar la interacción entre diferentes métodos de acumulación y liberación de energía.

Esta configuración permite analizar los efectos combinados de ambas tecnologías en la dinámica del lanzamiento, y se presenta como una herramienta útil para el estudio comparativo. Su integración en el conjunto de modelos contribuye, además, con una reinterpretación contemporánea de principios físicos clásicos, enriqueciendo así la variedad del proyecto.

A continuación, se representan los distintos subensamblajes que conforman este modelo, con el mismo propósito aplicado en los casos anteriores: exponer y diferenciar las piezas y estructuras de forma clara. En la (Figura 17) se aprecia la estructura base, compuesta por listones inferiores en las zonas frontal y posterior, junto con listones laterales planos que conectan con los elementos superiores. También se distinguen listones verticales reforzados con soportes a 45°, una ranura para el eje central, y un listón transversal que actúa como tope para el brazo lanzador. Finalmente, dos listones intermedios recorren los laterales del conjunto para aumentar la rigidez estructural, y al mismo tiempo, facilitar el montaje del tambor de cuerdas en la parte posterior. En el extremo posterior izquierdo, se observa una pieza encargada de cumplir la función de freno.



Figura 17: Estructura base de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.

En la (*Figura 18*) se presenta una vista detallada del tambor ubicado en la parte posterior de la catapulta. En la imagen se distingue un eje que sostiene la cuerda enrollada, una rueda en cada extremo y el freno descrito anteriormente. La rueda dentada situada en el lateral izquierdo actúa como freno del mecanismo, mientras que la rueda del lado derecho proporciona estabilidad al eje durante su funcionamiento.

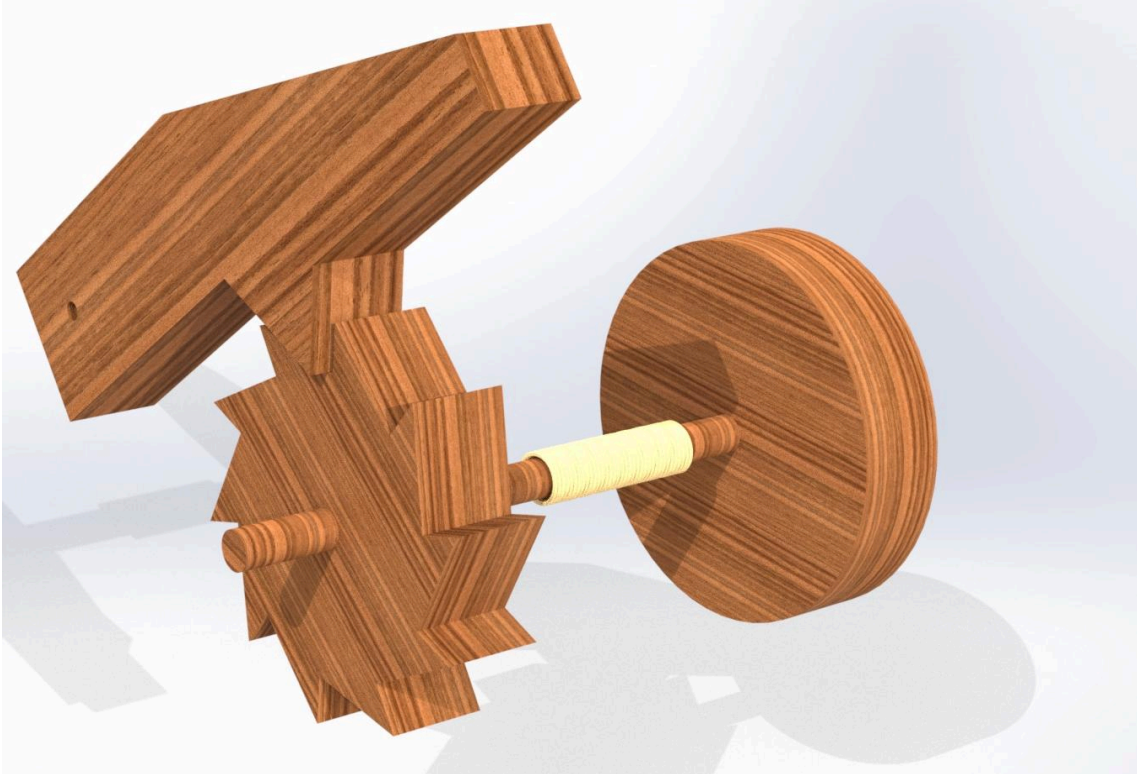


Figura 18: Tambor con cuerdas de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente representación (*Figura 19*), se aprecia un subensamblaje correspondiente al brazo lanzador. En la imagen se distinguen la cuchara, el brazo principal con un contrapeso fijado mediante cuerdas en el extremo opuesto a la cuchara, y un eje transversal que se ensambla en los listones verticales de la estructura base.



Figura 19: Ensamblaje del brazo lanzador de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en la (*Figura 20*) se representa el ensamblaje principal, en el que se integran los tres subensamblajes descritos previamente.



Figura 20: Ensamblaje principal de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.

4.2. PATRIMONIO INDUSTRIAL Y DIVULGACIÓN TÉCNICA

La reconstrucción digital de las catapultas forma parte de una iniciativa que se centra en la divulgación del Patrimonio Industrial mediante un museo virtual impulsado por la Escuela de Ingenierías de la Universidad de Málaga. El propósito de la plataforma es facilitar el acceso al conocimiento técnico mediante recreaciones tridimensionales interactivas, esto permite a estudiantes, docentes y al público general explorar la evolución de la ingeniería desde sus orígenes.

El Patrimonio Industrial no se limita solo a elementos materiales o arquitectónicos, también incluye el conocimiento técnico, las soluciones mecánicas y los avances que han influido significativamente en la evolución de la tecnología. En este contexto, las catapultas son ejemplos concretos de la aplicación de principios estructurales, dinámicos y energéticos que enfrentaron retos de carácter técnico y militar.

El análisis y la visualización digital de estos dispositivos contribuyen a la preservación de dicho legado técnico, al mismo tiempo, estos dispositivos promueven una cultura de valoración hacia los desarrollos técnicos del pasado. Del mismo modo, el uso de herramientas CAD en este tipo de desarrollos facilita la conexión entre los principios tradicionales de la ingeniería mecánica y las actuales posibilidades de representación tridimensional, análisis funcional y aprendizaje digital.

5. SOFTWARE DE MODELADO 3D

El diseño CAD de estos productos ha sido realizado utilizando el software SolidWorks-Student *Edition*, con una licencia de uso exclusivo académico proporcionada por la Escuela de Ingeniería Industriales. SolidWorks es un programa de diseño asistido por ordenador (CAD), muy utilizado en los campos de la ingeniería y el diseño de productos industriales. Este software facilita la creación de modelos en 3D, la elaboración de ensamblajes, así como el desarrollo de planos técnicos en 2D. Además, proporciona una amplia gama de funciones para diseñar, simular y fabricar componentes, facilitando todo el proceso de desarrollo de productos. El programa es desarrollado por SolidWorks Corp., una filial de Dassault Systèmes, y está diseñado para el sistema operativo Windows. El logotipo del software es visible en la ([Figura 21](#)).



Figura 21: Logotipo SolidWorks. Fuente: 1000marcas.net

SolidWorks ofrece numerosos recursos que facilitan el desarrollo de productos gracias a su potente software y la variedad de complementos y funciones que posee. Permite crear, diseñar, simular, fabricar, publicar y gestionar los datos del proceso de diseño. Con una amplia selección de funciones y complementos, SolidWorks permite supervisar todo el ciclo de vida del diseño de un producto, desde su concepción hasta su publicación, gestionando cada etapa del proceso.

5.1. ELECCIÓN DEL SOFTWARE

Entre las herramientas CAD disponibles actualmente, pueden encontrarse alternativas como Catia V5 o Solid Edge, cuyas funcionalidades resultan comparables. No obstante, la elección de SolidWorks se justifica por una serie de ventajas concretas:

- **Facilidad de uso y entorno intuitivo**

El entorno gráfico de SolidWorks se caracteriza por su diseño intuitivo y una curva de aprendizaje progresiva. La claridad de su interfaz permite que tanto diseñadores como ingenieros puedan adaptarse rápidamente al entorno de trabajo, incluso si cuentan con experiencia limitada en el uso de programas de diseño asistido por ordenador.

- **Herramientas completas y adaptabilidad**

SolidWorks incluye un abanico muy amplio de recursos que abarcan desde el modelado tridimensional hasta simulaciones, análisis y gestión de datos del producto (PDM). Gracias a esto, el software cubre todo el proceso de desarrollo, desde la concepción hasta la producción.

- **Compatibilidad con otros entornos de trabajo**

Entre sus principales ventajas destaca la capacidad de integrarse fácilmente con otras plataformas y entornos de trabajo, lo que favorece la compatibilidad entre departamentos técnicos, siendo compatible con herramientas como ANSYS para análisis y CAMWorks en procesos de manufactura.

- **Apoyo técnico y red de usuarios**

SolidWorks dispone de un soporte técnico consolidado, respaldado por una comunidad activa que ofrece acceso a foros, formación especializada y recursos complementarios. Esto facilita el acceso a tutoriales, foros, formación en línea y eventos especializados, como los organizados en SolidWorks World, que facilitan la resolución de dudas y el aprendizaje continuo.

- **Actualizaciones y mejora constante**

Dassault Systèmes, como entidad desarrolladora del software, incorpora actualizaciones periódicas orientadas a satisfacer las demandas del sector industrial. De este modo, se asegura la alineación continua del software con los avances tecnológicos y los requerimientos del usuario final.

- **Orientación hacia la fabricación**

SolidWorks no se limita al diseño, sino que integra funciones orientadas a la planificación y documentación de la fabricación. Entre estas utilidades se encuentran la generación automática de planos técnicos, listas de materiales (BOM) y otra documentación clave para el proceso productivo.

- **Capacidades de simulación integradas**

El módulo SolidWorks Simulation permite realizar análisis estructurales, térmicos, dinámicos y de fluidos directamente en el entorno CAD, sin necesidad de software adicional. Esta capacidad integrada permite validar diseños en fases tempranas del desarrollo, optimizando tiempos y recursos sin salir del entorno de modelado.

- **Relación coste-beneficio favorable**

Existen opciones equivalentes en cuanto a funcionalidad, como Catia V5 o Solid Edge, pero en términos de relación coste-beneficio, SolidWorks resulta especialmente competitivo para pequeñas y medianas empresas que requieren una solución completa sin comprometer funcionalidades clave.

- **Uso extendido en formación técnica**

SolidWorks cuenta con una amplia presencia en instituciones educativas, lo que permite a estudiantes y futuros profesionales familiarizarse con su entorno desde las etapas iniciales de su formación. Esta integración favorece un aprendizaje práctico, alineado con las herramientas empleadas habitualmente en el entorno profesional.

- **Síntesis final**

La combinación de un entorno accesible, herramientas funcionales, soporte especializado y enfoque orientado a la fabricación posiciona a SolidWorks como una de las soluciones CAD más versátiles y completas para entornos industriales y formativos.

5.2. CONOCIENDO LA INTERFAZ DEL PROGRAMA

Al iniciar el programa aparece esta ventana emergente (*Figura 22*) con estas tres opciones a elegir dependiendo del uso que se le va a dar al mismo.



Figura 22: Ventana de inicio del programa SolidWorks. Fuente: Elaboración propia.

- **Pieza.** Opción de interfaz destinada al modelado de piezas individuales desde uno o varios croquis en 2D.

- **Ensamblaje.** Permite insertar varias piezas o un conjunto de piezas ya modeladas que se ensamblan para conformar un producto. A las piezas se les aplican relaciones de posición para definir la forma y el movimiento.

- **Dibujo.** Se emplea para generar planos técnicos de piezas o ensamblajes, a partir de vistas proyectadas.

Estas tres secciones están vinculadas entre sí y comparten una interfaz similar, en la que se distinguen la ventana de trabajo, el Gestor de diseño, el Cuadro de diseño y el Administrador de comandos (*Figura 23*). Además, el programa dispone de un apartado con acceso a numerosos tutoriales interactivos sobre su funcionamiento.

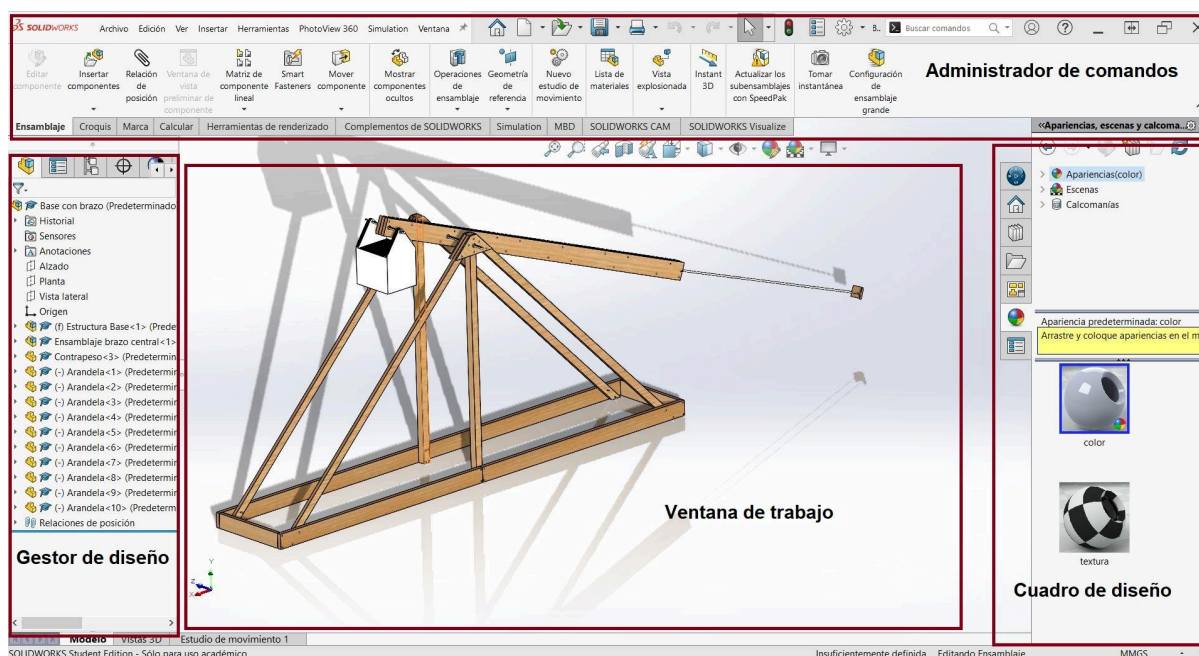


Figura 23: Área de trabajo de un ensamblaje de Solidworks. Fuente: Elaboración propia.

- **Ventana de trabajo**

Es el área principal de la interfaz, está destinada a mostrar en tiempo real el modelo en el que se esté trabajando, ya sea una pieza, ensamblaje o croquis. Ocupa la mayor parte de la pantalla y permite la visualización tridimensional desde cualquier ángulo mediante los controles del ratón. Entre sus funciones se incluye la posibilidad de activar vistas seccionadas, mostrar todos los croquis asociados al modelo y modificar el modo de

visualización. La (Figura 24) representa una captura de pantalla de la ventana de trabajo, donde se aprecia un ensamblaje y sobre él una barra de herramientas. Esta barra de herramientas permite ajustar la perspectiva, activar vistas específicas y gestionar aspectos gráficos del entorno. Además, ofrece opciones para modificar el estilo visual, la calidad de renderizado, aplicar escenas o realizar secciones con el fin de examinar el interior de las piezas.

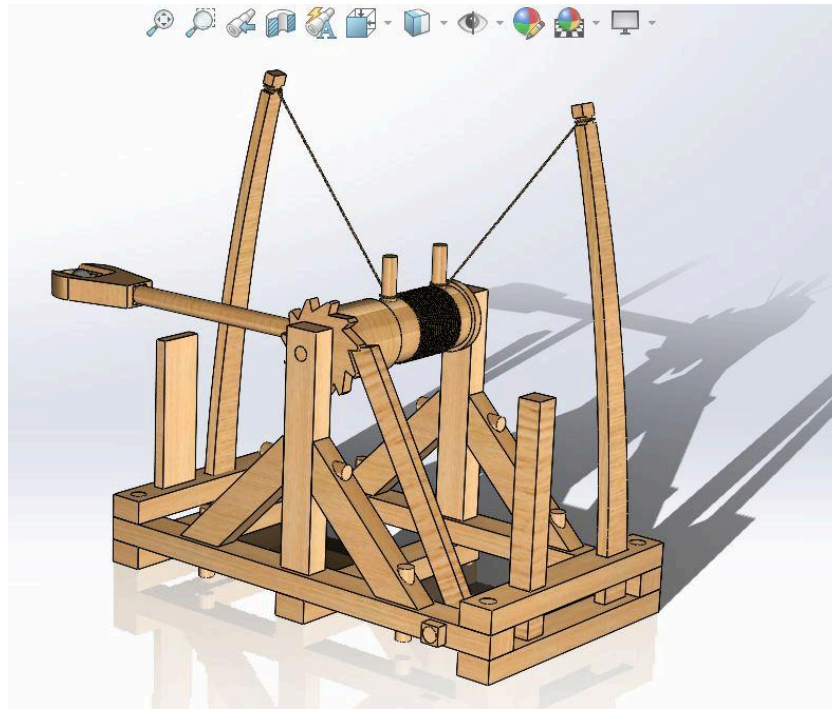


Figura 24: Ventana de trabajo de SolidWorks. Fuente: Elaboración propia.

- **Gestor de diseño**

Situado en la parte izquierda del área de trabajo, este panel organiza cronológicamente todas las operaciones y parámetros aplicados al modelo mediante un menú desplegable. Se estructura en diferentes pestañas, como el *FeatureManager*, *PropertyManager*, *ConfigurationManager* y *DisplayManager*, cuya disponibilidad varía según el entorno activo. Por ejemplo, *DimXpertManager* se activa al trabajar con ensamblajes, permitiendo visualizar los distintos componentes y subensamblajes.

Desde este panel es posible editar componentes, ajustar propiedades específicas y gestionar configuraciones del modelo. Existen dos tipos principales de Gestor de diseño: el correspondiente a piezas individuales, que muestra la lista de operaciones junto con

pestañas para editar croquis y operaciones; y el asociado a ensamblajes, que permite editar tanto el conjunto principal como sus subensamblajes y las piezas que los integran.

Además, en las pestañas del ensamblaje se accede a las relaciones de posición, encargadas de definir la ubicación y el movimiento relativo de cada pieza. La (Figura 25) representa ambos casos: a la izquierda, un Gestor de diseño aplicado a una pieza; a la derecha, el correspondiente a un ensamblaje.

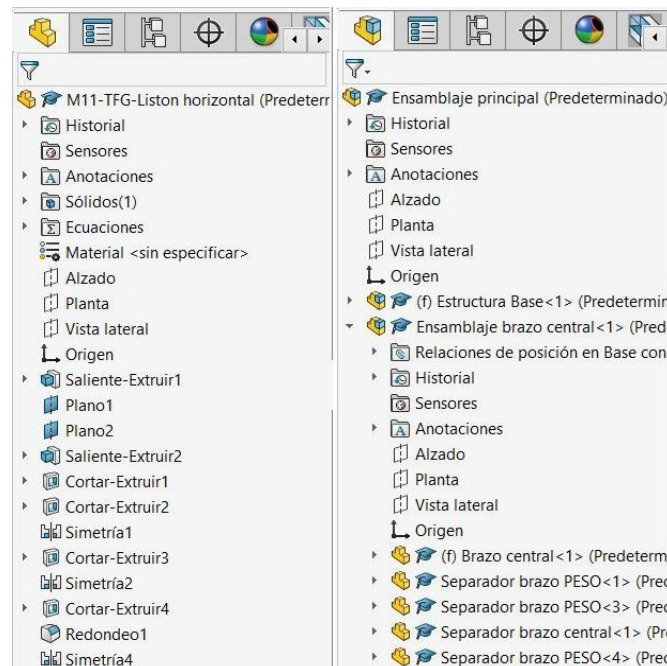


Figura 25: Presentación del Gestor de diseño de una pieza y un ensamblaje. Fuente: Elaboración propia.

- **Administrador de comandos**

Este componente, ubicado en la parte superior de la interfaz de SolidWorks, permite acceder a las principales funciones de modelado y configuración. Su estructura está organizada en pestañas, cada una ofrece herramientas según el tipo de tarea a realizar, ya sea el diseño de piezas, ensamblajes o croquis en dos dimensiones.

Uno de sus aspectos más relevantes es su comportamiento dinámico, ya que el contenido se adapta automáticamente al módulo activo. Entre las pestañas más utilizadas se encuentran Croquis y Operaciones. Croquis presenta los comandos necesarios para crear croquis sobre un plano, tales como líneas, círculos, polígonos, herramientas de simetría, recortes y cotas inteligentes.

Una vez definido el croquis y activado el entorno de pieza, se habilitan herramientas de operaciones como Extrusión, Corte u operaciones de Revolución, Redondeo, Matriz lineal; como puede observarse en la parte inferior de la (Figura 26).

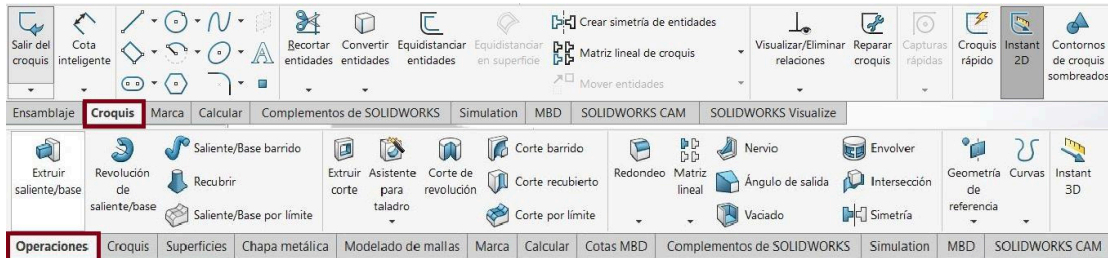


Figura 26: Administrador de comandos. Entorno de croquis y operaciones. Fuente: Elaboración propia.

Esta capacidad de adaptación convierte al Administrador de comandos en un elemento esencial para optimizar el flujo de trabajo, ya que reduce la necesidad de navegar por menús extensos, mejorando así la eficiencia en el proceso de diseño. Su disposición visual favorece la identificación de herramientas disponibles, lo que facilita el aprendizaje progresivo y contribuye a una interacción más clara y eficiente con la interfaz.

Al cambiar al entorno de ensamblaje, las funciones disponibles se ajustan a operaciones específicas, como insertar componentes, definir relaciones de posición entre piezas para crear el ensamblaje o generar vistas explosionadas del modelo (Figura 27).



Figura 27: Administrador de comandos. Entorno de ensamblaje. Fuente: Elaboración propia.

La pestaña *Calcular* permite acceder a propiedades geométricas y físicas asociadas a piezas o ensamblajes. Entre los comandos más utilizados se encuentra la herramienta *Medir*, que proporciona de forma inmediata las dimensiones de cualquier parte del modelo. Además, esta pestaña incorpora asistentes de taladro y utilidades de verificación que permiten realizar un análisis técnico más preciso del modelo (Figura 28).



Figura 28: Administrador de comandos. Entorno de cálculo. Fuente: Elaboración propia.

En la pestaña Complementos se muestran tanto los módulos actualmente activos como aquellos disponibles para su activación, en función de los requerimientos del proyecto (*Figura 29*). Estos módulos permiten ejecutar tareas como simulaciones físicas, análisis de movimiento o procesos de renderizado. Para evitar una sobrecarga de recursos y posible reducción de rendimiento o estabilidad del sistema, se recomienda activar únicamente los complementos necesarios durante cada proyecto.



Figura 29: Administrador de comandos. Entorno de complementos. Fuente: Elaboración propia.

- **Cuadro de diseño**

Este panel ofrece diversas funciones que permiten modificar elementos gráficos del modelo. Entre sus utilidades principales se encuentra el ajuste de características visuales como la textura, el color o el acabado superficial, lo cual resulta útil para generar imágenes destinadas a presentaciones o renderizados con mayor nivel de detalle (*Figura 30*).

Asimismo, es posible personalizar el fondo del área de trabajo, adaptándolo a los requerimientos del proyecto para la fase de visualización.

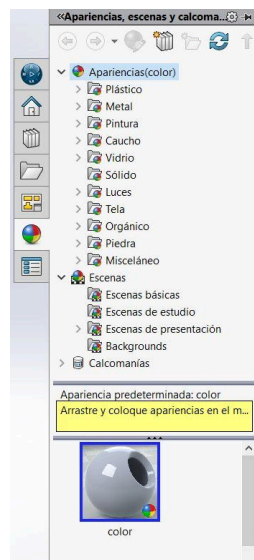


Figura 30: Cuadro de diseño. Fuente: Elaboración propia.

El panel también permite la integración con herramientas complementarias, como el módulo *ToolBox*, que proporciona acceso a una base de datos con elementos normalizados (tornillos, tuercas, arandelas o pasadores), que pueden insertarse fácilmente en el diseño.

Estos componentes se encuentran clasificados y parametrizados según las normativas técnicas aplicables en cada región, lo que favorece el cumplimiento de requisitos estandarizados durante el desarrollo del proyecto. La incorporación de este sistema contribuye a reducir el tiempo de diseño en piezas estándar y mejora la consistencia en la configuración de ensamblajes.

6. USO DEL SOFTWARE EN LA ELABORACIÓN DE PIEZAS

6.1. METODOLOGÍA DE DISEÑO

La creación de modelos en SolidWorks puede presentar distintos retos a lo largo del proceso de diseño, desde la elaboración del croquis inicial hasta la obtención de los planos técnicos del ensamblaje final.

El software ofrece herramientas intuitivas que facilitan el modelado de estructuras, acompañadas de documentación técnica, preguntas frecuentes y un amplio repertorio de tutoriales disponibles en línea. Estos contenidos permiten adquirir familiaridad con el programa, incluso sin experiencia previa, aunque se recomienda una formación académica para alcanzar un nivel de uso profesional.

El dominio del modelado en CAD no se limita únicamente a la reproducción de diseños complejos, sino que requiere una aplicación coherente de criterios técnicos, así como la adopción de una metodología estructurada a lo largo de todo el desarrollo.

Mantener una secuencia ordenada durante el modelado es fundamental para garantizar la integridad estructural de las piezas, incluso tras futuras modificaciones, sin que afecte la estructura del modelo. Para ello, es necesario seguir la misma metodología siempre y tener consistencia en las decisiones.

En un entorno profesional eficiente, se busca priorizar el aprovechamiento de las capacidades del programa, en particular aquellas vinculadas con la automatización y la compatibilidad entre módulos. Por este motivo, la toma de decisiones anticipadas resulta clave para facilitar el desarrollo técnico en fases avanzadas del proyecto, pese a tener que invertir más tiempo en las primeras etapas.

El desarrollo de los modelos requiere una justificación técnica para cada decisión tomada durante el proceso de modelado tridimensional. Esta justificación debe fundamentarse tanto en criterios asociados a la fabricación y la producción, como en las funcionalidades específicas y limitaciones del entorno CAD.

El planteamiento se basa en una metodología estructurada y progresiva, orientada a la elaboración sistemática de la geometría final mediante la aplicación secuencial de operaciones parciales, evitando procedimientos simplificados que puedan comprometer la solidez del diseño.

Con el objetivo de representar las diferentes operaciones del programa y su orden de aplicación, se presenta a continuación una pieza de referencia (*Figura 31*) a elaborar en el software.

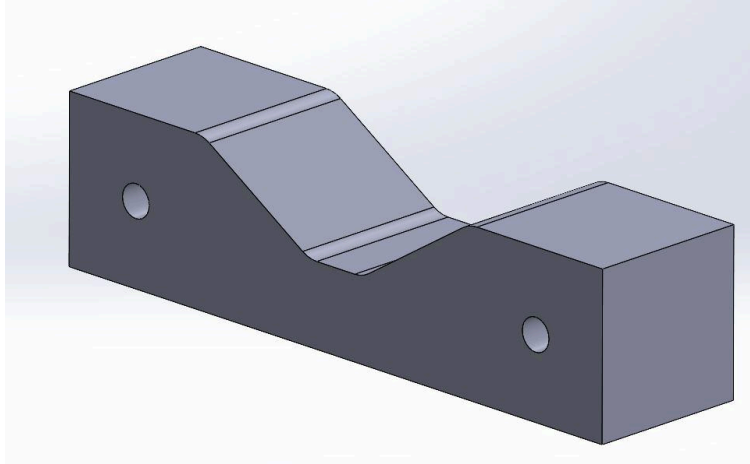


Figura 31: Pieza objetivo explicación orden de operaciones. Fuente: Elaboración propia.

Las operaciones parciales sobre las que se fundamenta la creación de una pieza o modelo son las siguientes:

6.2. OPERACIONES PARA ELABORAR UNA PIEZA

6.2.1. Operaciones de adición

Estas operaciones permiten generar un sólido a partir de un croquis bidimensional, añadiendo material al modelo existente. Su correcta aplicación influye directamente en la estabilidad estructural, la organización del modelo y su capacidad de edición posterior.

Entre las funciones más utilizadas se encuentran Extrusión, Revolución, Barrido y Recubrir. Cada herramienta se selecciona en función de la geometría deseada y de las condiciones específicas del contorno definido en el modelo.

- **Extrusión**

Esta operación es una de las funciones más frecuentes en el entorno de modelado, reconocida por su adaptabilidad y sencillez. Consiste en proyectar un perfil plano a lo largo de una dirección perpendicular a su plano base, generando un sólido a partir del volumen definido. SolidWorks permite configurar múltiples parámetros dentro de esta operación, como la dirección, la distancia, la simetría respecto al plano y la posibilidad de realizar

cortes o uniones con cuerpos ya existentes. Resulta especialmente útil para la creación de formas prismáticas y elementos base en diseño mecánico.

La Extrusión es la operación inicial empleada en el desarrollo del modelo representado en la (Figura 32), cuyo resultado puede observarse en la (Figura 31).

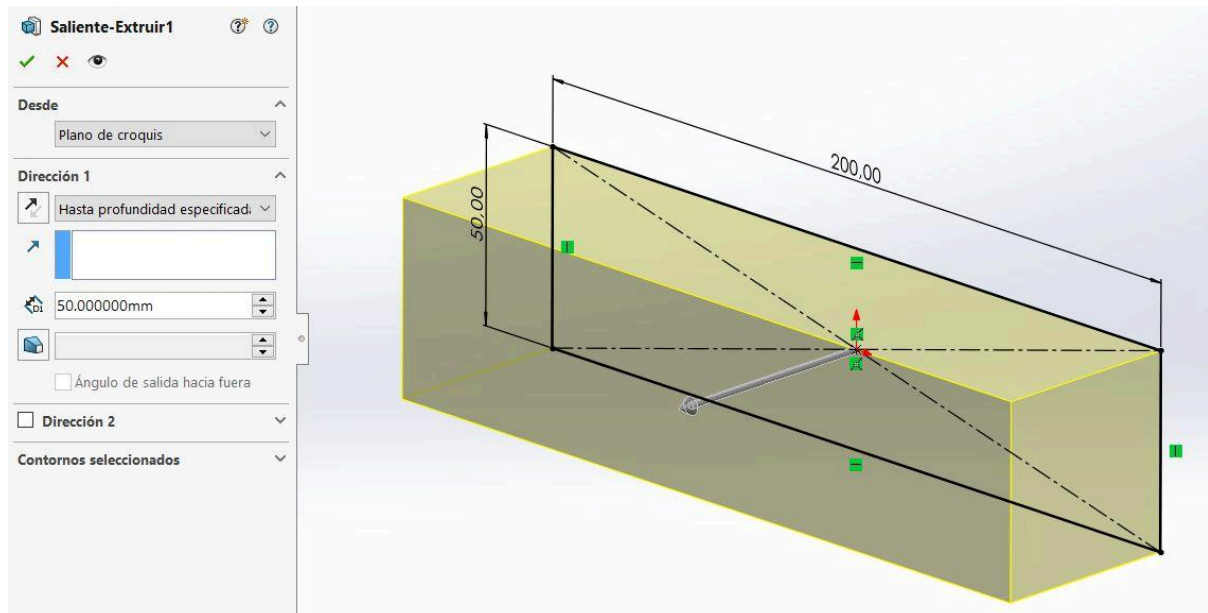


Figura 32: Ejemplo de Extrusión de una pieza. Fuente: Elaboración Propia.

- **Revolución**

Mediante esta operación, un croquis gira alrededor de un eje, dando lugar a formas de revolución como cilindros, conos o geometrías más complejas. Este método resulta muy útil para modelar componentes que presentan simetría radial, como poleas, ejes, ruedas o depósitos. La precisión del eje de revolución y la coherencia del perfil utilizado son fundamentales para garantizar una correcta geometría de la operación.

- **Barrido**

Esta operación genera sólidos desplazando un croquis a lo largo de un trayecto o ruta previamente definida. Esta ruta puede estar compuesta por una o varias entidades curvas, lo que aporta gran flexibilidad a la creación de piezas con geometría no lineal, como tubos, guías, cables o estructuras en espiral. SolidWorks también permite configurar secciones variables y ajustes de torsión a lo largo del recorrido, ampliando las posibilidades del diseño paramétrico.

- **Recubrir**

La herramienta de recubrimiento (*loft* en inglés) permite conectar varios perfiles ubicados en distintos planos mediante la creación de un volumen que suaviza la transición entre ellos. Esta función resulta imprescindible cuando se necesita modelar superficies o sólidos de forma orgánica, como carcasas, carenados o diseños con variaciones complejas entre secciones. El control sobre las condiciones de tangencia, la continuidad de las caras y la selección de curvas guía mejora significativamente la calidad del resultado final.

6.2.2. Operaciones de sustracción

En el entorno de diseño paramétrico de SolidWorks, las operaciones de sustracción representan una herramienta fundamental para eliminar material de un cuerpo sólido. Mediante estas operaciones se definen cavidades, ranuras, taladros y otras geometrías, internas o externas, que cumplen funciones estructurales y funcionales en piezas o conjuntos. Su correcto uso contribuye no solo a la precisión dimensional, sino también a la optimización del diseño desde una perspectiva de fabricación y ensamblaje.

Se comportan de forma análoga a las de adición, solo que generan desde un croquis un volumen negativo, extrayendo material de una pieza que previamente ha sido extruida. A diferencia de las operaciones de adición, las de sustracción se integran con mayor frecuencia en fases intermedias o finales del proceso de modelado, ya que dependen de un cuerpo base preexistente.

- **Corte por extrusión**

La función de esta operación permite remover material mediante la proyección de un croquis sobre el sólido. Este croquis puede avanzar en una o ambas direcciones, según las necesidades del diseño. Se usa frecuentemente para generar orificios pasantes, rebajes rectangulares o geometrías huecas de contorno definido. SolidWorks ofrece opciones para especificar la profundidad del corte, su simetría respecto al plano de croquis, o extenderlo hasta una cara seleccionada o todo el cuerpo.

Esta operación es la segunda del método que se ha seguido para alcanzar la pieza objetivo de la (Figura 31), como se puede apreciar en la (Figura 33).

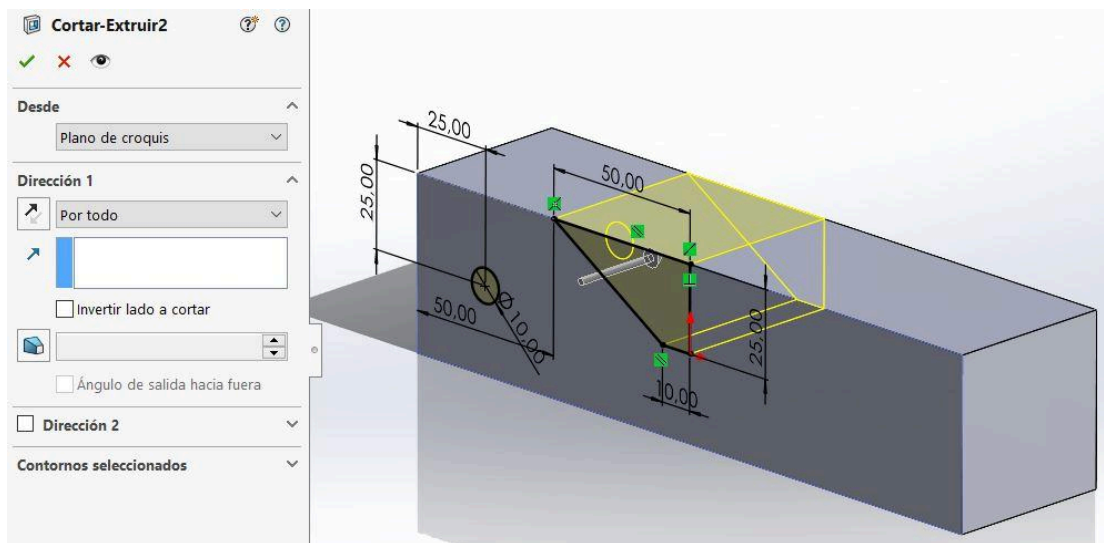


Figura 33: Ejemplo de Corte por extrusión de una pieza. Fuente: Elaboración Propia.

- **Corte por revolución**

Quando se requiere eliminar material mediante la rotación de un perfil en torno a un eje, se emplea la operación de corte por revolución. Esta herramienta permite modelar vaciados circulares, acanaladuras internas y otras geometrías asociadas a movimientos rotacionales. Su uso es común en componentes como ejes, casquillos o bridas, donde es necesario definir rebajes cilíndricos con alta precisión. El control del ángulo de rotación y la correcta definición del eje de revolución resultan esenciales para obtener una forma geométrica coherente y funcional.

- **Corte por barrido**

El corte por barrido es una solución eficaz para eliminar material siguiendo trayectorias no lineales. Se basa en desplazar un perfil a lo largo de una curva o trayectoria previamente definida. Este tipo de operación es especialmente útil para generar canales curvos, conductos internos o alojamientos para cables y tuberías. SolidWorks permite aplicar esta función tanto en cuerpos sólidos como en superficies, e incluso ofrece opciones avanzadas como el ajuste de la inclinación del perfil a lo largo del recorrido.

- **Corte por recubrimiento**

Esta operación extrae material mediante la conexión de perfiles distribuidos en distintos planos, formando un volumen intermedio que actúa como geometría de sustracción. Esta

técnica resulta adecuada cuando se requiere vaciar zonas con formas irregulares o transiciones geométricas complejas. SolidWorks permite emplear curvas guía para mejorar el control de la forma final y definir condiciones de tangencia entre las superficies resultantes.

6.2.3. Operaciones de detalle

En el proceso de modelado tridimensional con SolidWorks, las operaciones de detalle cumplen una función clave en la definición precisa y funcional de los modelos. Estas herramientas permiten refinar geometrías ya construidas, incorporando características adicionales que responden tanto a criterios estéticos como a exigencias mecánicas o de fabricación.

A diferencia de las operaciones base o de sustracción, que definen el volumen principal de una pieza, las operaciones de detalle se aplican normalmente en etapas finales del diseño, una vez definida la forma general.

- **Chaflán**

El chaflán sustituye una arista aguda por una superficie plana inclinada, eliminando así el vértice. Esta herramienta es habitual en entornos industriales, ya que facilita los procesos de ensamblaje, reduce el desgaste por contacto y mejora la seguridad durante la manipulación. En SolidWorks, es posible definir chaflanes mediante distancia y ángulo, con dos distancias distintas o mediante una distancia uniforme. Su aplicación puede realizarse sobre aristas, caras o vértices, y configurarse para adaptarse automáticamente a la geometría circundante.

- **Taladros y roscas**

Entre las operaciones de detalle se incluyen los Taladros y las Roscas, esenciales para el diseño de uniones mecánicas. A través del asistente de taladro (*Hole Wizard*), SolidWorks ofrece un sistema parametrizado que permite generar orificios normalizados según normativas internacionales (ISO, ANSI, DIN, entre otras). Se pueden definir aspectos como el tipo de taladro (pasante, roscado, avellanado, escalonado), su diámetro, profundidad y ubicación, mediante croquis o cotas definidas.

- **Redondeo**

El redondeo, o *fillet*, suaviza bordes o aristas vivas mediante la aplicación de un radio constante o variable. Esta operación mejora el acabado visual y contribuye a la resistencia estructural del componente, al reducir los puntos de concentración de esfuerzos, especialmente en piezas sometidas a cargas cíclicas o dinámicas. SolidWorks permite

aplicar redondeos de forma selectiva, continua o encadenada, e incorpora variantes como el redondeo de caras múltiples o el redondeo simétrico con transiciones suaves entre superficies. En la (Figura 34) se muestra un ejemplo del uso de esta herramienta, donde se redondean dos aristas con un radio de 10 milímetros.

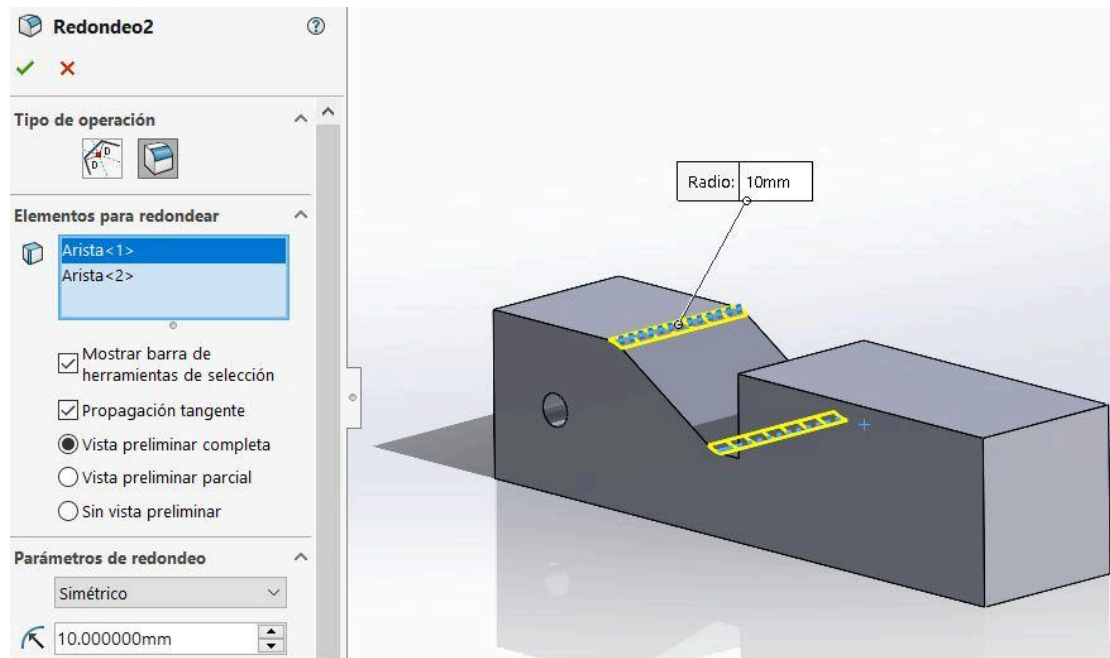


Figura 34: Ejemplo de redondeo en una pieza. Fuente: Elaboración Propia.

- **Avellanados y escariados**

Los avellanados y escariados, empleados como complemento de los taladros, permiten adaptar los orificios a elementos como tornillos de cabeza cónica o pernos cilíndricos. Estas operaciones pueden definirse directamente mediante el asistente de taladro (*Hole Wizard*) o utilizarse como funciones independientes cuando se requiere un mayor control dimensional.

- **Ranuras y rebajes**

Las ranuras y rebajes también forman parte de las operaciones de detalle. Se utilizan para alojar componentes móviles, fijaciones o elementos de guiado. SolidWorks permite su creación a través de operaciones de Extrusión, Corte por revolución o mediante croquis ubicados en planos auxiliares. Su definición precisa es esencial para garantizar la funcionalidad y el ensamblaje correcto dentro del conjunto final.

Aunque estas operaciones puedan considerarse complementarias respecto a las operaciones base, las operaciones de detalle resultan determinantes para lograr un modelo CAD completo, preciso y funcional. Además, representan una oportunidad para aplicar

buenas prácticas de diseño, que facilitan los procesos de fabricación, ensamblaje y mantenimiento. Una selección adecuada y un uso correcto de estas herramientas repercute directamente en el rendimiento mecánico del componente, en el tiempo de optimización de los procesos de producción y en la disminución de errores en etapas posteriores.

6.2.4. Operaciones de reutilización

En el entorno de modelado tridimensional, las operaciones de reutilización constituyen un conjunto de herramientas orientadas a optimizar el tiempo de diseño y garantizar la coherencia geométrica. SolidWorks incorpora diversas funciones que permiten replicar entidades previamente definidas, evitando repetir manualmente cada operación. Estas herramientas no solo incrementan la eficiencia, sino que también reducen la probabilidad de errores, especialmente en componentes con geometría repetitiva o disposiciones simétricas.

- **Matriz lineal**

La matriz lineal permite replicar una o varias operaciones a lo largo de una dirección específica, definida mediante una arista, una línea auxiliar o un eje de croquis. Esta herramienta resulta útil para distribuir de forma uniforme elementos como orificios, nervios o vaciados. Es posible configurar parámetros como la distancia entre instancias, el número de repeticiones y la dirección de propagación. Además, SolidWorks permite aplicar esta función sobre múltiples entidades simultáneamente, favoreciendo un diseño más compacto y ordenado.

- **Matriz circular**

La matriz circular se usa para ubicar elementos alrededor de un eje, siendo común en componentes como poleas, bridas, engranajes o piezas con distribuciones radiales. Esta operación permite definir el número de repeticiones, el ángulo de cobertura y el eje de rotación. Al igual que la matriz lineal, admite la replicación de operaciones individuales, agrupadas o incluso cuerpos sólidos completos, lo que aporta gran versatilidad al proceso de diseño.

- **Matriz por curva**

La matriz por curva es una herramienta avanzada destinada a replicar geometrías siguiendo trayectorias no lineales, como espirales, *Splines* o curvas tridimensionales. Esta función permite que las instancias mantengan su orientación relativa a lo largo del recorrido, adaptándose a los cambios de dirección o torsión. Es especialmente útil en piezas decorativas, componentes biomecánicos o diseños complejos que no siguen patrones no convencionales.

- **Simetría**

La herramienta de Simetría permite reflejar elementos geométricos o cuerpos completos respecto a un plano de referencia. Su uso resulta especialmente útil en diseños que requieren una distribución equilibrada, como es habitual en piezas mecánicas o estructurales. En SolidWorks, esta operación puede utilizarse sobre funciones individuales, conjuntos de operaciones o cuerpos sólidos completos, generando una copia especular perfectamente alineada. Para su correcta aplicación, es necesario definir un plano que actúe como eje de simetría; dicho plano puede corresponder a uno de los planos estándar del sistema o a uno personalizado por el usuario. En la (Figura 35) se representa la operación de simetría donde se reutilizan dos operaciones, en este caso de Corte por extrusión y Redondeo.

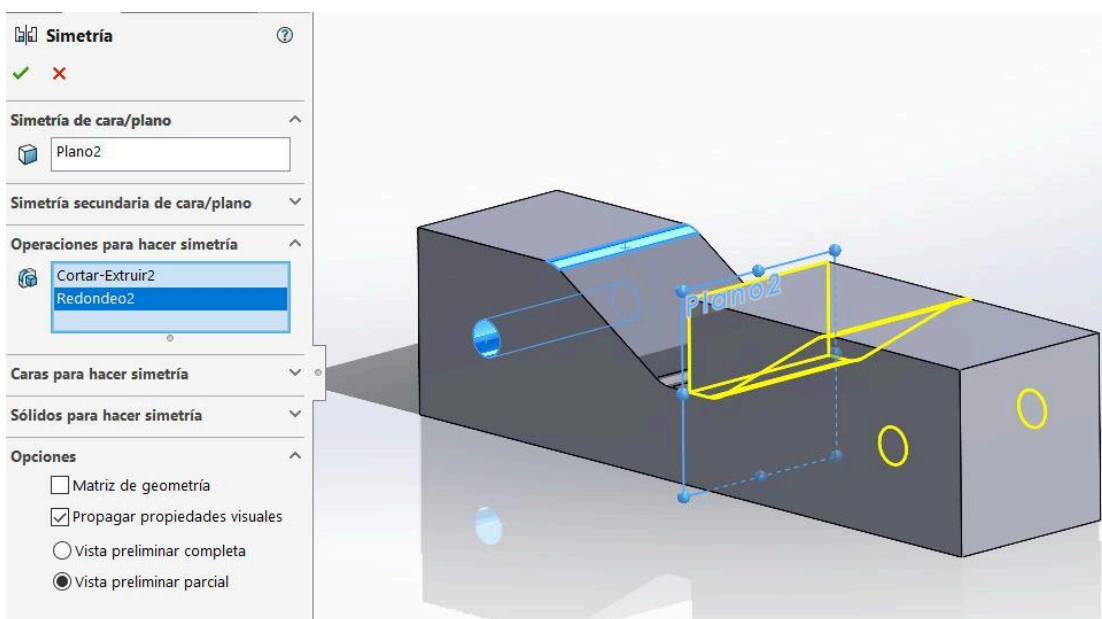


Figura 35: Ejemplo de simetría en una pieza. Fuente: Elaboración Propia.

- **Ventajas en el flujo de trabajo**

El uso de estas operaciones no sólo acelera significativamente el modelado, sino que garantiza que todos los elementos generados mantengan una coherencia geométrica precisa con respecto al elemento original. Además, al tratarse de funciones paramétricas, cualquier modificación realizada sobre la geometría base se actualiza automáticamente en las copias generadas, lo que contribuye a una mayor robustez del modelo y mejora la capacidad de edición.

Las herramientas de reutilización en SolidWorks, como la Simetría y las Matrices, representan un recurso fundamental para lograr modelos más eficientes, editables y

estructurados. Su aplicación refleja un alto nivel de competencia técnica y responde a buenas prácticas de diseño orientadas a la automatización, la estandarización y la eficiencia en entornos de ingeniería y fabricación.

Tras exponer las operaciones más relevantes para el modelado de una pieza, así es como debe quedar el orden de las operaciones en el Gestor de diseño del programa (*Figura 36*).

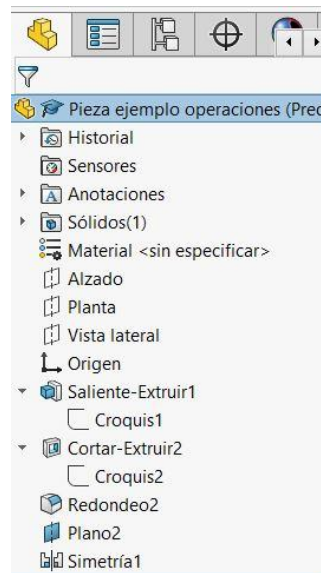


Figura 36: Orden de operaciones en el Gestor de diseño. Fuente: Elaboración propia.

En la (*Figura 37*) se presenta el resultado obtenido tras la aplicación secuencial de las operaciones descritas en los apartados anteriores, las cuales dan como resultado el modelo final mostrado en la (*Figura 31*). El seguimiento del orden mostrado contribuye a obtener un diseño más robusto y eficiente.

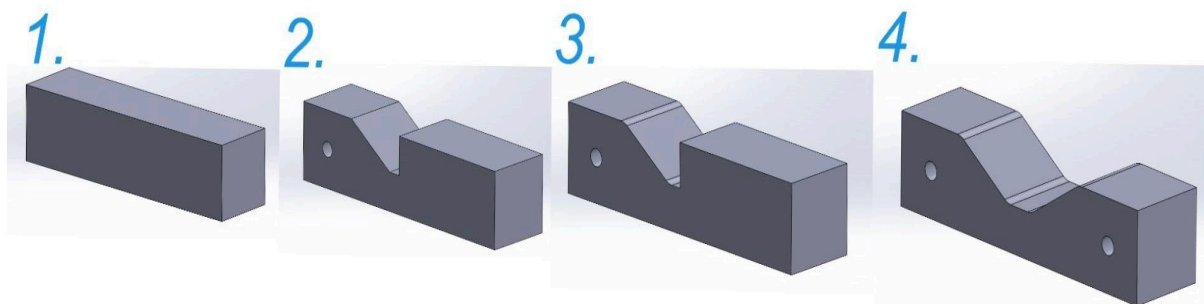


Figura 37: Orden de operaciones en el modelado de piezas. Fuente: Elaboración propia.

7. ELABORACIÓN DEL MODELO

7.1. DEFINICIÓN DEL MODELO TIPO TREBUCHET

En este apartado se describe desde cero el proceso de recreación del modelo de catapulta tipo trebuchet. Las dimensiones adoptadas corresponden a una escala reducida, pensada para un modelo de sobremesa. Se estima que dicha recreación se encuentra aproximadamente a escala 1:5 respecto a una catapulta de tamaño real, considerando que estas estructuras podían alcanzar longitudes comprendidas entre 6 y 12 metros.

A lo largo de los siglos, las catapultas de contrapeso han experimentado diversas modificaciones estructurales, adaptando sus proporciones y configuraciones según el entorno, el propósito específico y el número de operarios disponibles. Esta evolución ha dado lugar a múltiples variantes del diseño tipo trebuchet. Para este proyecto, se ha tomado como referencia un modelo estimado de 7 metros de longitud, al cual se le han aplicado adaptaciones en términos de materiales actuales, refuerzos estructurales y sistemas de fijación modernos.

Antes de comenzar su diseño, fue muy importante comprender los principios físicos que rigen el funcionamiento de este tipo de dispositivos. La disposición de sus elementos, así como su forma y dimensiones, varían en función del entorno y, en especial, del método empleado para almacenar y liberar la energía potencial. En la ([Figura 38](#)) se muestran algunas dimensiones clave que deben considerarse a la hora de diseñar una catapulta de tipo trebuchet.

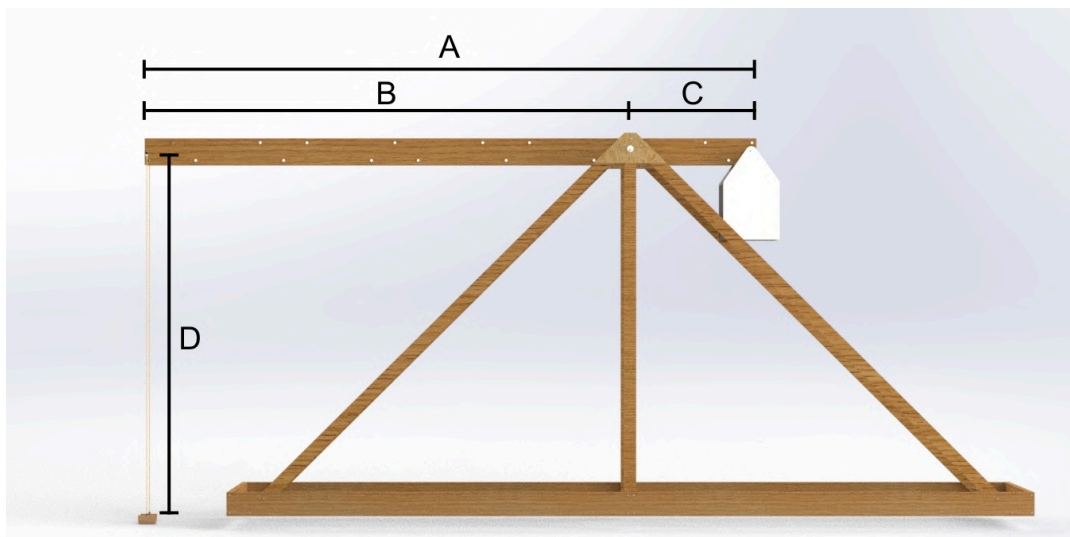


Figura 38: Dimensiones generales catapulta tipo trebuchet. Fuente: Elaboración propia.

En la (*Figura 38*) se identifican letras asociadas a distintas dimensiones generales. La letra 'A' hace referencia a la longitud total del brazo lanzador, que a su vez se encuentra dividida en las secciones 'B' y 'C'. La relación entre estas dos secciones establece que 'B' representa cuatro veces la longitud de 'C'. También se incluye una cuarta dimensión, señalada con la letra 'D', que corresponde a la longitud de las cuerdas que conectan el extremo del brazo con el portaproyectil. En este proyecto, se utiliza el término "portaproyectil" para designar la pieza de cuero encargada de sostener el proyectil antes del lanzamiento. Si bien no se trata de una denominación técnica estandarizada, se adopta en este caso por razones de claridad en la descripción del diseño.

La relación entre las dimensiones indica que la longitud 'D' es equivalente a tres cuartas partes de la longitud 'B'. Asimismo, los soportes laterales inclinados se disponen a 45° respecto a la base, y el brazo lanzador se dispone en paralelo a dichos soportes, formando el mismo ángulo, con el fin de lograr un lanzamiento eficiente. En cuanto al contrapeso, su masa debe ser, aproximadamente, 100 veces superior al peso del proyectil.

Una vez analizados estos aspectos, la estructura general del modelo quedó claramente definida. No obstante, se consideró prioritario garantizar la rigidez del conjunto, teniendo en cuenta las fuerzas dinámicas y vibraciones que se generan durante su funcionamiento. Por esta razón, antes de iniciar la modelación de las piezas, se elaboraron varios bocetos orientados a definir los elementos clave de la estructura.

Estos bocetos sirvieron de guía para establecer las dimensiones principales, las zonas de refuerzo estructural y las ubicaciones de los orificios necesarios para los elementos de fijación. Cabe señalar que los bocetos originales fueron realizados de forma rápida y a mano alzada, en libretas de tamaño A5. Posteriormente, aquellos más representativos fueron adaptados digitalmente en el programa Sketchbook de Autodesk, con el fin de lograr una representación más clara.

Comenzando por la base, se optó por usar seis listones: dos a cada lado, uno delantero y otro trasero. Los dos listones laterales quedarían ensamblados, como se ve en el boceto de la (*Figura 39*), con el listón vertical para dar más rigidez a la estructura.

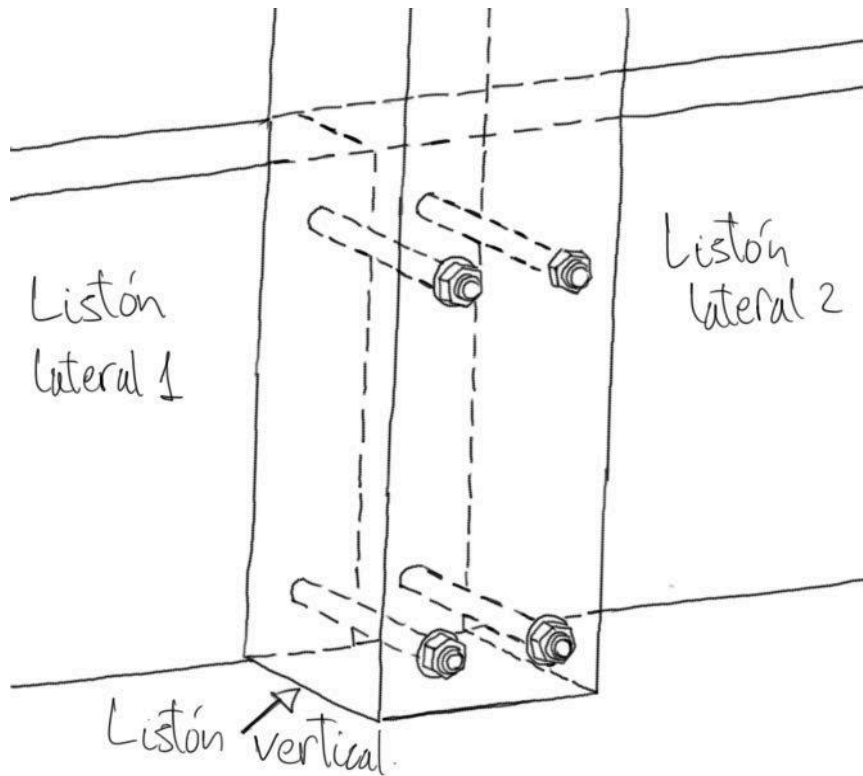


Figura 39: Boceto de la unión de los listones laterales y el listón vertical. Fuente: Elaboración Propia.

El siguiente punto estructural que requería especial atención era la unión entre los soportes laterales inclinados a 45° y el listón vertical ubicado en la parte superior. En esa zona debía incorporarse un refuerzo estructural, ya que por ella atraviesa el eje del brazo lanzador, y como consecuencia implica más fuerzas externas y vibraciones durante el funcionamiento.

Se elaboraron varios bocetos para dar solución a esta parte de la estructura, pero finalmente se eligió el diseño representado en la (Figura 40). En esta opción, los tres listones mencionados se ensamblan mediante dos placas de contrachapado dispuestas en las caras externas del conjunto. Además, se añadieron dos bastidores en la parte interna, situados entre los soportes laterales y la placa de contrachapado interior, con el objetivo de incrementar la rigidez estructural y mejorar la distribución de carga.

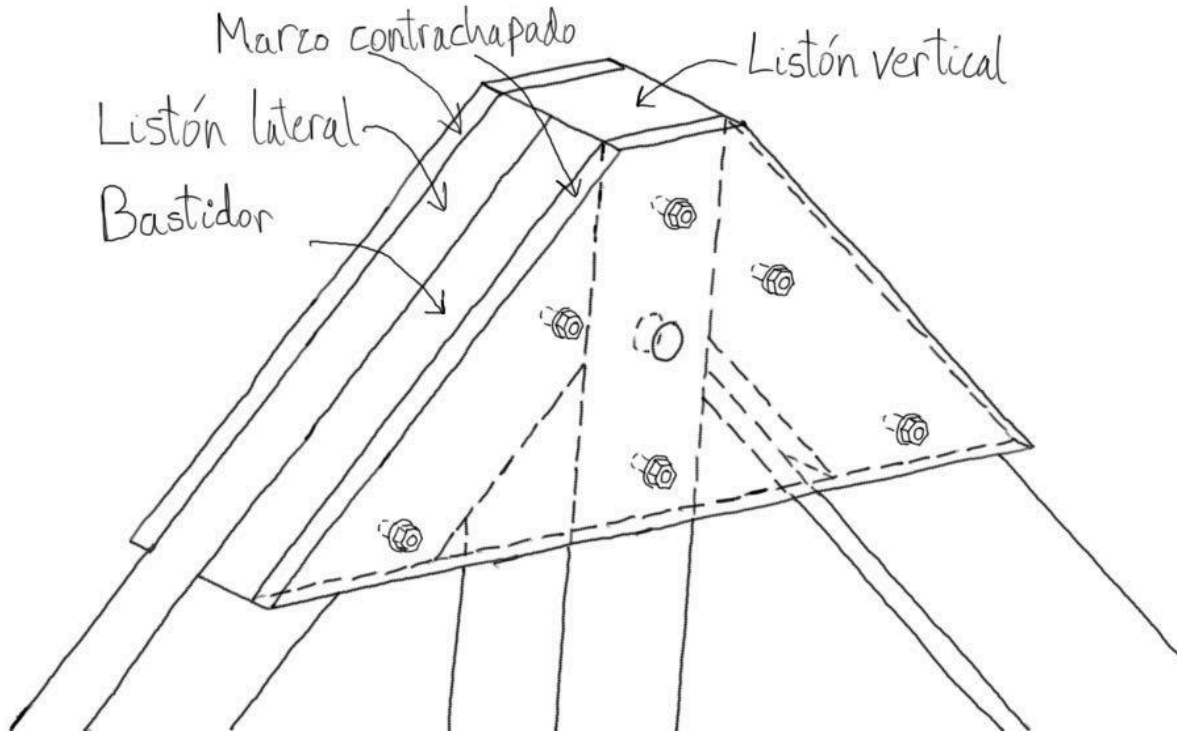


Figura 40: Boceto de la estructura del marco superior. Fuente: Elaboración propia.

El brazo lanzador también es uno de los subensamblajes que más versiones y opciones tuvo en los inicios del diseño de este modelo. Desde el diseño inicial se determinó que no debía tener del mismo grosor que los demás listones del modelo; ya que es un elemento con una gran longitud, cuyo peso apoya sobre un eje y que debe soportar el contrapeso en uno de los extremos, así como resistir a las aceleraciones de los lanzamientos.

Entre las primeras alternativas consideradas se propuso incrementar considerablemente el grosor del listón, aunque esta opción fue descartada al comprobar que supondría un aumento excesivo del peso del componente, lo que derivaría en mayores esfuerzos sobre la estructura. Por esto, se evaluaron otras soluciones que permitieran mejorar la rigidez del brazo sin penalizar significativamente su masa.

El objetivo seguía siendo obtener un brazo lanzador de mayor anchura respecto al resto de los elementos, pero sin comprometer su ligereza. Para ello, se planteó un diseño formado por dos listones paralelos unidos entre sí mediante separadores de madera. Estos separadores fueron dispuestos de forma alterna, dejando huecos intermedios, con el fin de que este tipo de elementos debe comportarse de forma equilibrada durante su movimiento, el ensamblaje fue diseñado de manera simétrica. En concreto, la disposición de

los pernos de sujeción entre los listones se realizó en configuraciones triangulares alternas. En cada separador, tres pernos conforman un triángulo, y en el siguiente, la geometría se invierte, tal como se representa en el boceto de la (*Figura 41*).

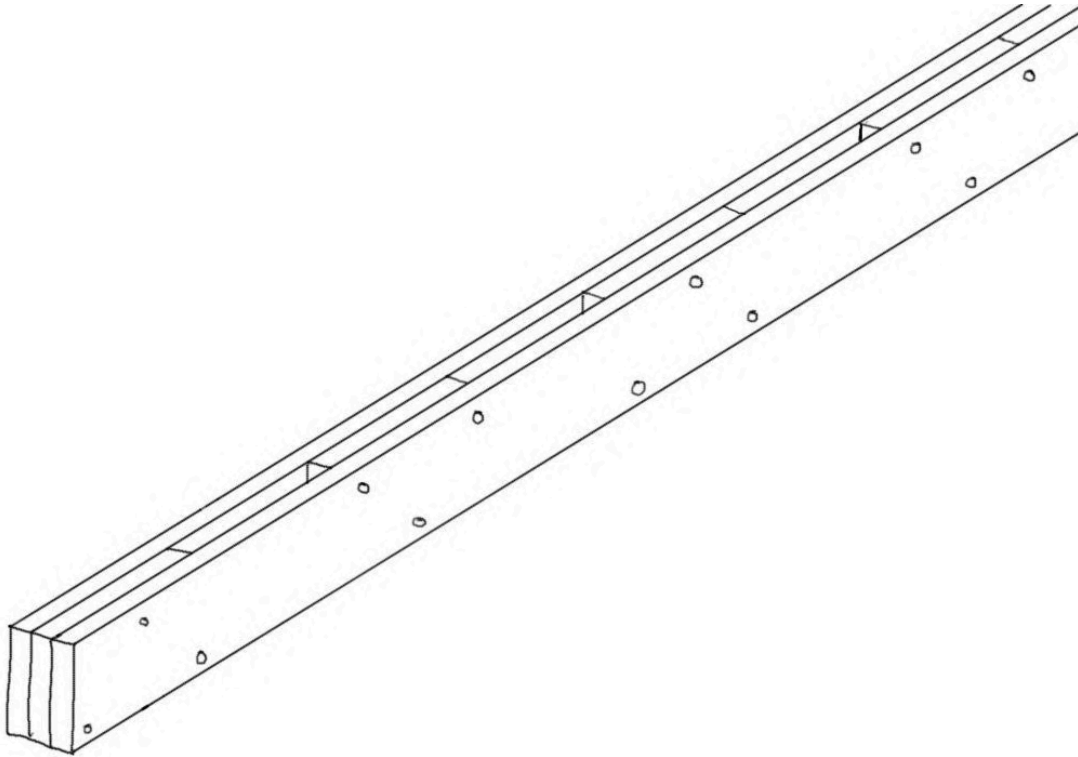


Figura 41: Boceto del brazo lanzador. Fuente: Elaboración Propia.

7.2. MODELADO DE PIEZAS DE LA CATAPULTA TIPO TREBUCHET

La elaboración de todos los elementos del modelo se basan en las dimensiones establecidas en la creación de los bocetos. Tener una idea general acerca de las dimensiones y la estructura antes de comenzar a usar el software de diseño es importante porque evita pérdidas de tiempo en la fase del modelado. Al mismo tiempo, basar un proyecto en una metodología de diseño eficiente y robusta permite hacer cambios en etapas posteriores, pero se debe hacer el trabajo previo al modelado para que las modificaciones sean mínimas.

Una de las cosas más importantes a la hora de modelar piezas es elaborar croquis cuyos trazos o líneas estén fijados por las cotas y por las relaciones del Gestor de diseño previamente a una operación del tipo Extrusión, Corte o cualquiera de ellas. La ventaja a la hora de hacer esto es poder editar el croquis en etapas posteriores cambiando las cotas sin que éste modifique su forma y que el trabajo anterior sea en vano. Para identificar un croquis completamente definido, todos sus trazos deben quedar en color negro en vez de azul oscuro, esto se consigue usando el origen de coordenadas como referencia, dando restricciones de verticalidad y horizontalidad, o dando relaciones entre dos o más trazos como se puede observar en el Gestor de diseño de la (Figura 42).

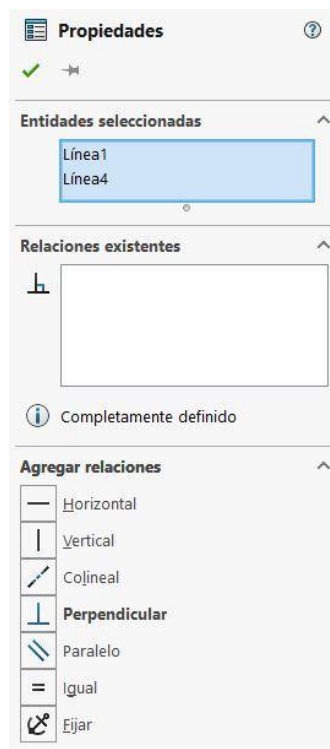


Figura 42: Relaciones entre elementos de un croquis. Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, se comienza modelando los listones de la base; cuyo conjunto trata de seis listones, dos listones a cada lado, uno en la parte frontal y otro en la trasera. Pero entre estos seis listones sólo hay dos modelos, uno de ellos es el listón lateral y el otro el de la parte frontal y trasera. La (Figura 43) representa el croquis completamente definido previo a la operación de Extrusión. Los recuadros pequeños que se aprecian en la figura son las relaciones de posición que definen el croquis.

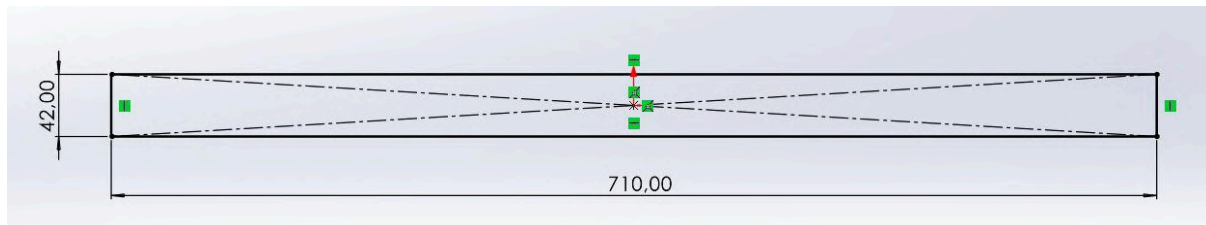


Figura 43: Croquis del listón lateral. Fuente: Elaboración propia.

Tras definir el croquis se realiza la operación de Extrusión, generando el volumen desde el croquis con una profundidad de 12mm como se ilustra en la (Figura 44).

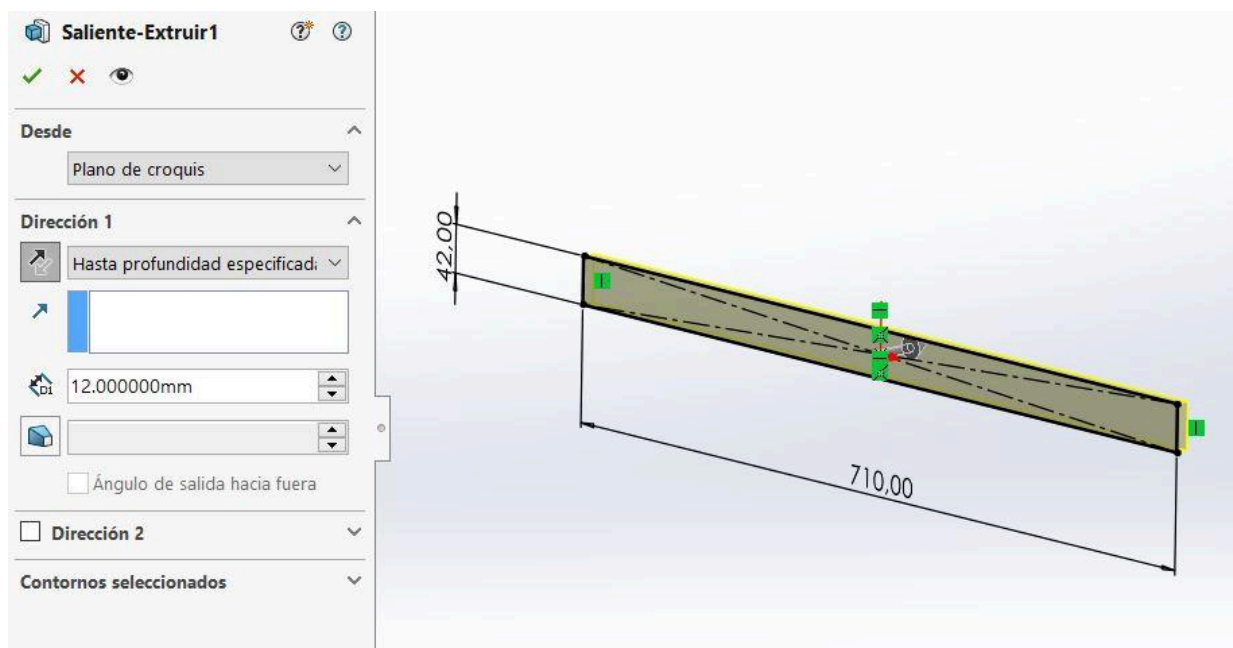


Figura 44: Operación de Extrusión del listón lateral. Fuente: Elaboración propia.

Tras esto se procede a seleccionar una de las caras laterales para elaborar el croquis de corte, donde se elaboran los círculos desde los que se generan los agujeros para los elementos de fijación. Para no tener que acotar todos los círculos en cada operación de corte, pueden usarse las relaciones de posición de la (Figura 42) y hacer clic en que uno o más trazos son iguales a un elemento acotado. También para reutilizar directamente un trazo en elementos simétricos se pueden trazar líneas desde donde se hace la simetría y en las opciones del trazo seleccionar línea de construcción, que son líneas discontinuas con puntos que sirven de referencia y no computan a la hora de realizar las operaciones.

La simetría se puede hacer desde el propio croquis o tras realizar las operaciones como se explicó en el punto 6 de este proyecto, pero a veces cuando la simetría es en la misma cara del modelo resulta más sencillo el realizarla desde el croquis ya que no es necesario elaborar un plano medio del volumen generado.

Puede observarse en la (Figura 45) el croquis de la primera operación de corte para un agujero del listón lateral.

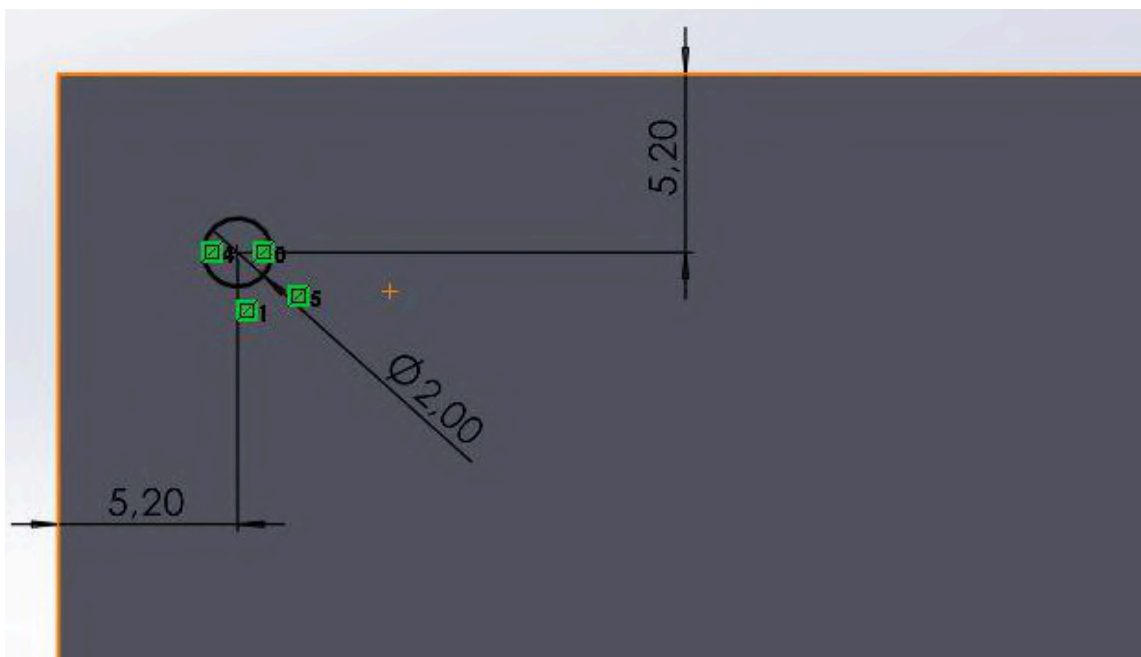


Figura 45: Primer croquis de agujero en el modelo. Fuente: Elaboración propia.

A continuación se elaboran dos líneas constructivas en el centro del listón, una horizontal y otra vertical para reutilizar el círculo acotado cuatro veces. Esta operación se repite en casi todas las piezas del modelo, ya que casi todas las piezas son simétricas o parcialmente simétricas. La (Figura 46) representa la simetría del croquis del círculo.



Figura 46: Primera simetría en croquis del modelo. Fuente: Elaboración propia.

Tras elaborar los cuatro círculos del listón lateral de la base, aún faltan otros dos. Estos dos son los que hacen que el listón lateral ensamble con el soporte lateral a 45° . Estos trazos no van a ser reutilizados en el mismo croquis como los anteriores puesto que no son simétricos en la misma pieza. El uso de las líneas constructivas no son solo de utilidad para realizar simetrías o matrices, también sirven de guía como se observa en la (Figura 47), estos trazos paralelos pertenecen al soporte que queda detrás, facilitando mucho el croquis.

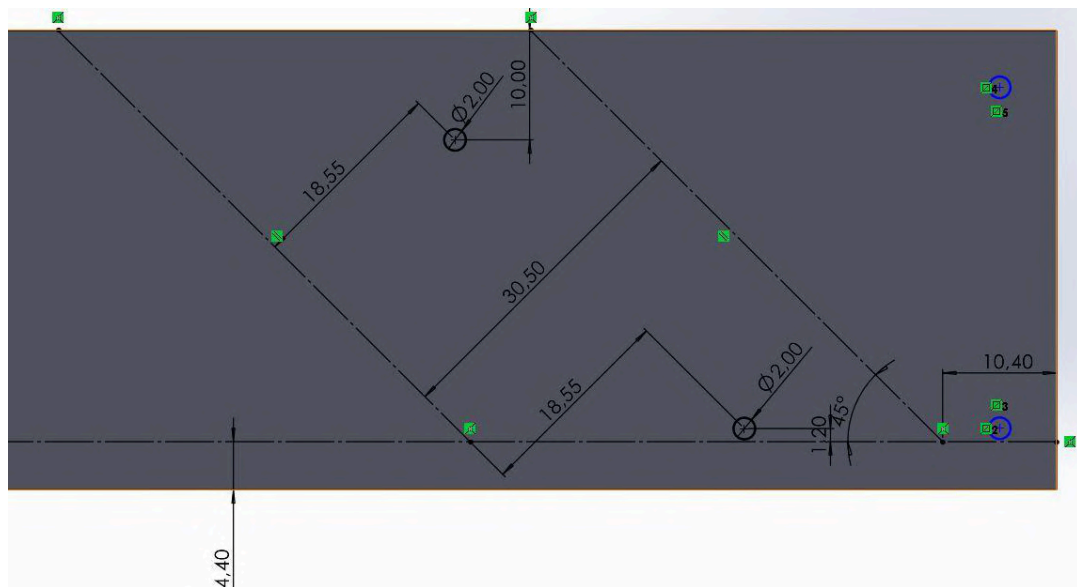


Figura 47: Croquis de corte del listón lateral. Fuente: Elaboración propia.

El diseño del segundo listón que conforma la base, tiene los orificios para el ensamble en la parte lateral de la pieza, ya que queda ensamblado entre dos listones laterales.

Para la operación de corte de esta pieza es importante seleccionar que el corte se realice hasta una profundidad específica e introducir esa dimensión del elemento de fijación en el Gestor de diseño como se observa en la (Figura 48). En la mayoría de piezas del modelo, en la operación de corte se selecciona “Por todo” ya que son desde una cara frontal y atraviesan el volumen por completo, ya sea el orificio para los elementos de fijación o para los ejes del brazo lanzador.

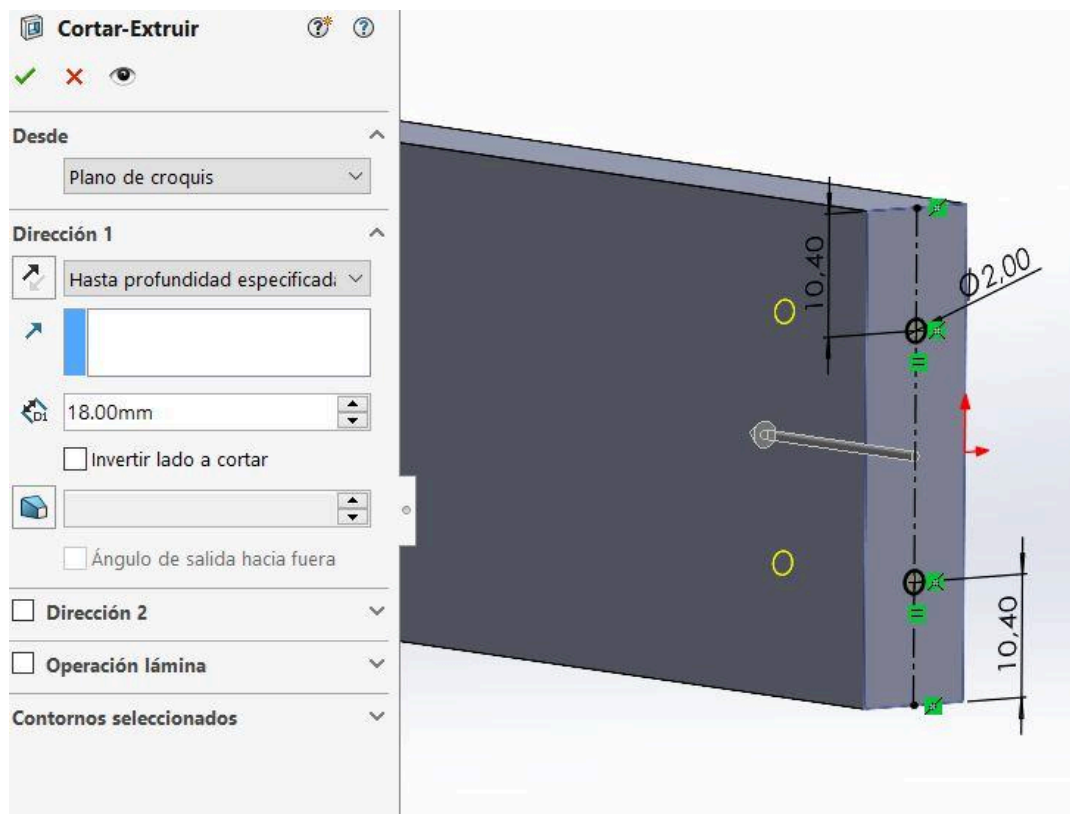


Figura 48: Operación de corte del listón frontal de la base. Fuente: Elaboración propia.

En esta pieza, la ubicación del croquis restante es en otra cara, así que la simetría se hace de la operación de Extrusión y así se reutiliza tanto la operación como su croquis. Para ello, debe elaborarse un plano medio del volumen, como se representa en la (*Figura 49*).

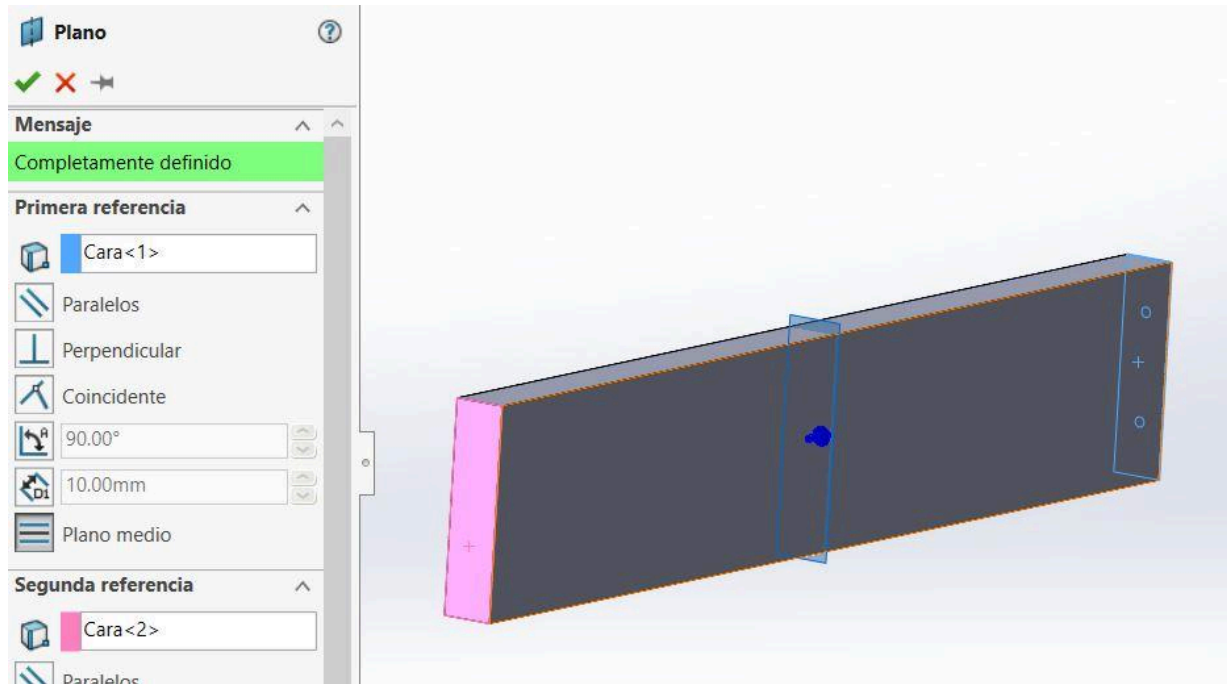


Figura 49: Operación de realización de un plano. Fuente: Elaboración propia.

Para acceder a la operación de planos hay que seleccionar “Geometrías de referencia” en la parte superior izquierda en el Administrador de comandos de operaciones, tras esto hay que seleccionar referencias como caras, aristas u otros elementos; cabe destacar, que a veces dependiendo de la estructura de la pieza no realiza el plano correctamente y hay que intentarlo varias veces.

Una vez configurado el plano, se elabora la simetría de la operación de corte que define la pieza como se puede ver en la (Figura 50).

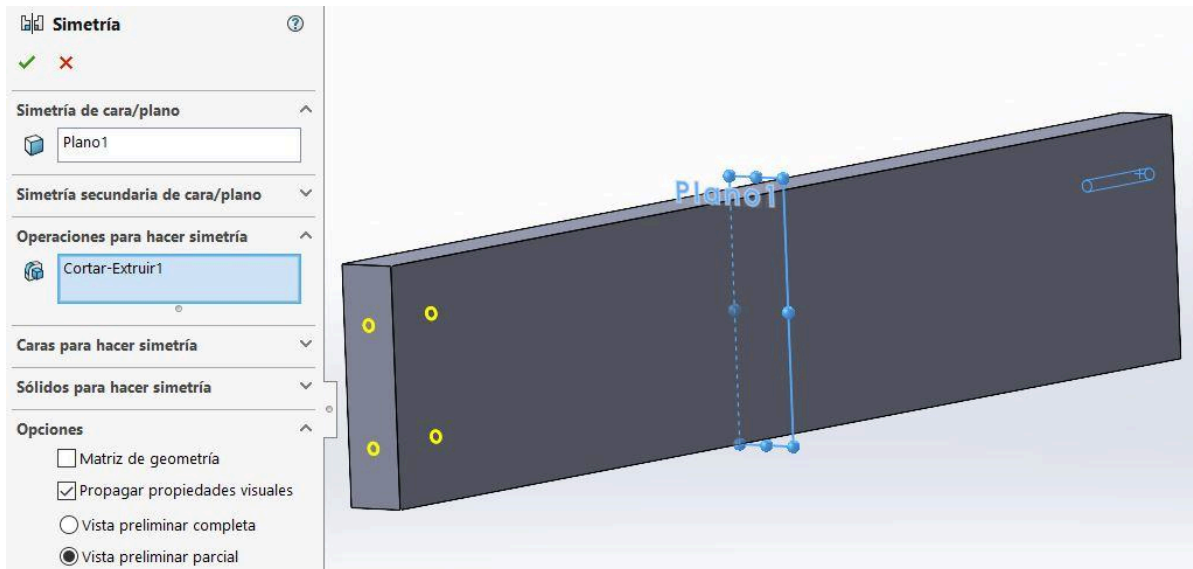


Figura 50: Operación de simetría en listón frontal de la base. Fuente: Elaboración propia.

Tras elaborar los elementos de la base se continúa con el listón vertical y el soporte lateral. Al igual que en la base, a pesar de tener cuatro soportes laterales en el modelo y dos listones verticales, sólo se elaboran dos diseños. Estos dos diseños conectan la base con la estructura del marco superior, por donde pasa el eje del brazo.

Los dos diseños basan sus dimensiones estructurales y la ubicación de sus orificios en los bocetos previos al modelado y en las referencias de los croquis de las piezas ya modeladas. Los croquis de las operaciones de Extrusión y Corte usan los mismos elementos de referencia y trazos que las piezas de la base, ya que ambos listones son simétricos.

En la (Figura 51) se observa la parte inferior del croquis del listón vertical, donde los elementos de fijación unen este listón a los listones laterales de la base. Tras esta simetría se realiza otra en la que se usa como referencia una línea de construcción horizontal en el centro de la pieza, para así replicar estos cuatro círculos en la parte superior de la pieza.

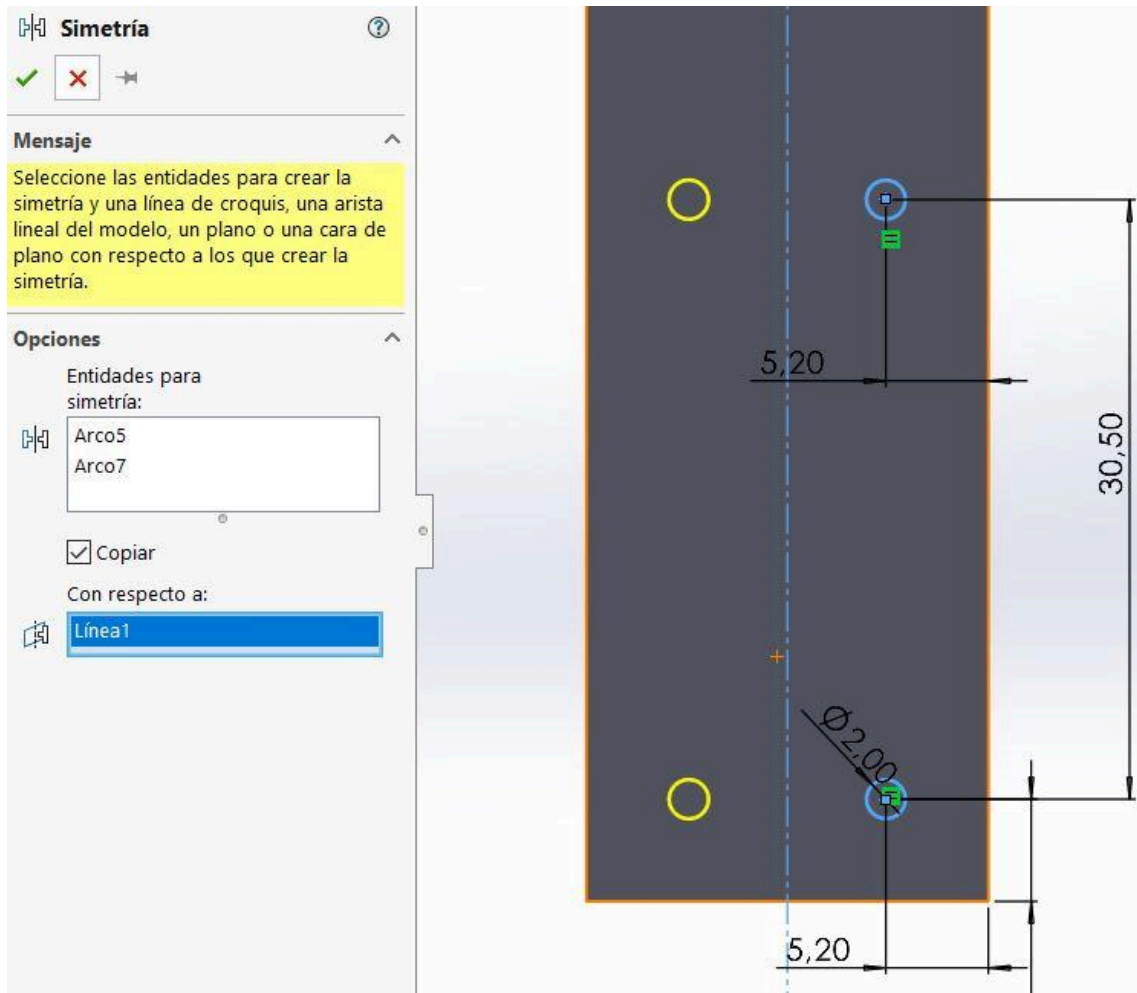


Figura 51: Parte inferior del croquis del listón vertical. Fuente: Elaboración propia.

Una vez modeladas estas dos piezas, se procede al diseño de las piezas que conforman el marco superior. Éstas son el bastidor y la placa de contrachapado que hace de marco lateral y ensambla por ambos lados en forma de sándwich al bastidor, los soportes laterales y el listón vertical. Para realizar el croquis del marco lateral se hace uso de líneas de construcción como guía y para hacer simetría de trazo como se aprecia en la (Figura 52).

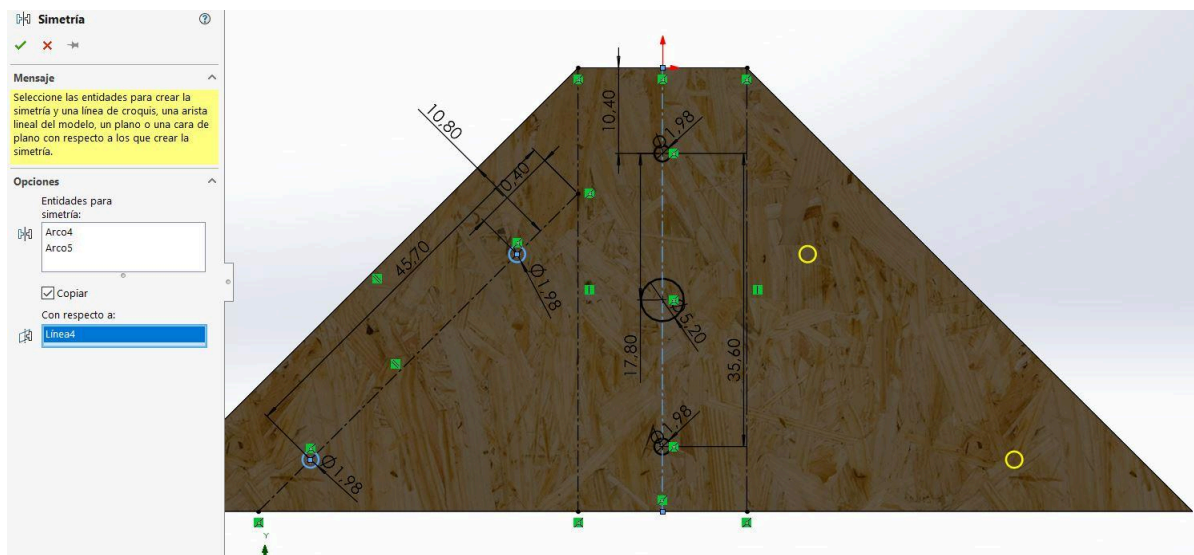


Figura 52: Croquis de la operación de corte de la placa lateral. Fuente: Elaboración propia.

El siguiente elemento a modelar es el brazo central, está formado por dos listones a cada lado y en medio de ellos seis separadores ubicados alternadamente a lo largo de la longitud de los listones. En el modelado de estas piezas hay que estar muy seguro de las dimensiones y la ubicación de los orificios por los que pasan estos elementos de fijación. En el croquis de corte, para saber dónde ubicar estos orificios, se hace uso de líneas constructivas que dividen el listón en secciones para que sea más fácil su elaboración como se representa en la (Figura 53).

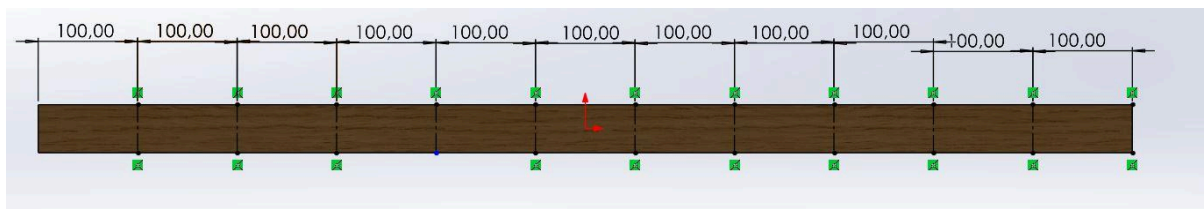


Figura 53: Secciones del croquis de corte del listón del brazo. Fuente: Elaboración propia.

Estas secciones representan el largo de los separadores. Cada pieza separadora es fijada a los listones por tres elementos de fijación, la forma de colocar estos elementos es coincidiendo con los vértices de un triángulo; que cambia alternadamente a un triángulo invertido para mejorar el reparto de peso y equilibrio.

Para la elaboración del croquis se trazan dos triángulos con líneas de construcción y se ubican los círculos en sus vértices, relacionándolos con una dimensión igual para solo acotar uno. Tras esto se elaboran dos matrices lineales para ambos triángulos, en el Gestor de diseño se selecciona el eje por el que se replica el croquis, la dimensión entre cada réplica y la cantidad de ellas como se puede observar en la (Figura 54).

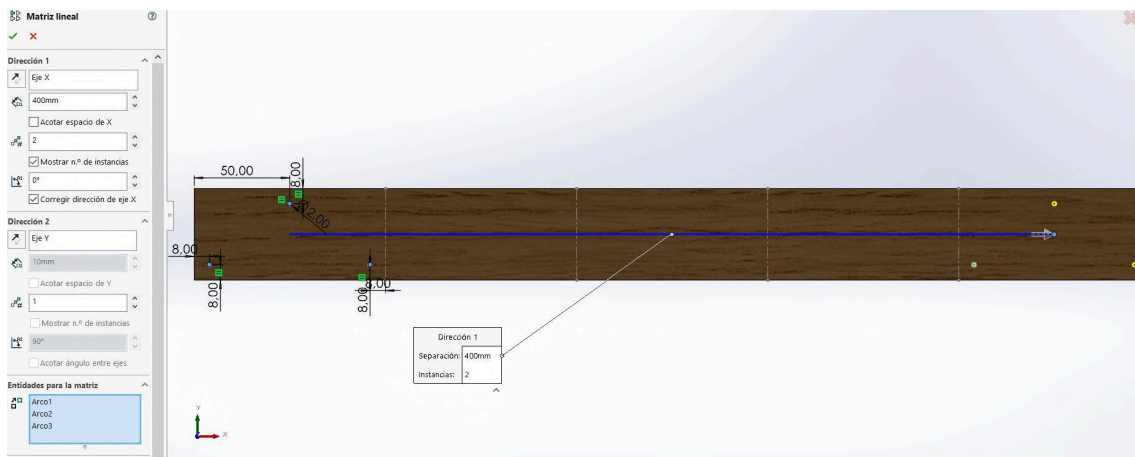


Figura 54: Matriz lineal del croquis del brazo lanzador. Fuente: Elaboración propia.

Sabiendo que a través del brazo lanzador debe pasar un eje principal de rotación del brazo, un eje para el contrapeso y un perno adicional al final del brazo para ensamblar la cuerda de lanzamiento; se elaboran cuatro diseños de separadores. El primer diseño es el separador base y los otros tres restantes, a parte de contener los tres orificios base en forma de triángulo incluyen otro orificio más con su dimensión y ubicación previamente calculada. Estos cortes también deben ser replicados en el listón del brazo lanzador, en el que sirve de ayuda las líneas constructivas del croquis para ubicar los orificios.

Las dimensiones y vistas de todos los elementos mencionados son incluidos en el apartado de planos, ya que en este apartado no se repiten representaciones ni detalles de operaciones ya mostradas, aunque sean diferentes elementos.

Tras esto se elaboran los elementos de fijación, entre ellos hay un perno de 30mm y 35mm con el mismo diseño, una tuerca y una arandela. Para la arandela se hace un croquis de un círculo, se extruye y luego se corta con un círculo de diámetro inferior. En el modelado del perno, se tiene en cuenta su diámetro, longitud, rosca y que tiene una cabeza de semiesfera. Tras realizar la Extrusión de un círculo con una profundidad mínima, ya que

este sólo sirve de referencia, se selecciona la operación Cúpula. Si no aparece en el Administrador de comandos se debe seleccionar el apartado de herramientas en la parte superior del Administrador de comandos, tras esto seleccionar Operaciones y buscar la operación de Cúpula. En la (Figura 55) se representa la operación Cúpula para modelar la cabeza del perno.

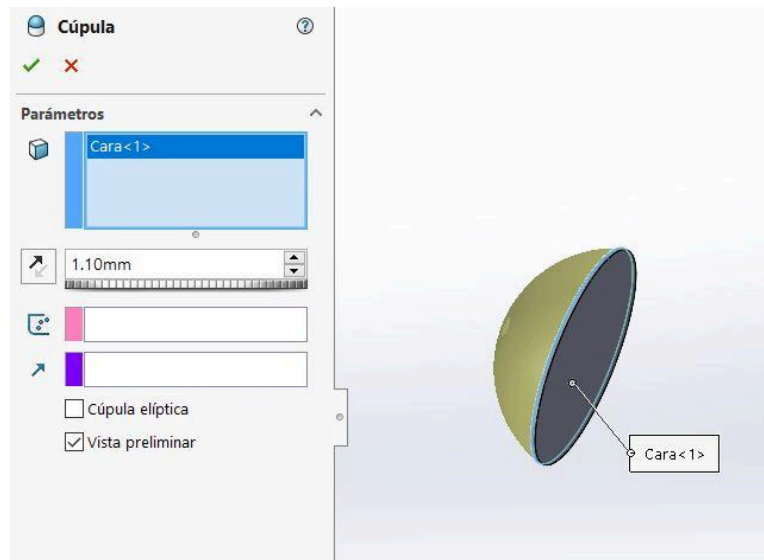


Figura 55: Operación Cúpula para la cabeza del perno. Elaboración propia.

Una vez modelada la cabeza, se extruye un cilindro con la longitud que se le quiere dar al perno. Debido a los diferentes ensamblajes y grosores que atraviesan éstos elementos de fijación en el modelo, se hacen dos tipos de perno, uno con 35mm desde la base, y otro con 30mm. A continuación se procede a realizar un Chaflán en la arista inferior del cilindro como se muestra en la (Figura 56).

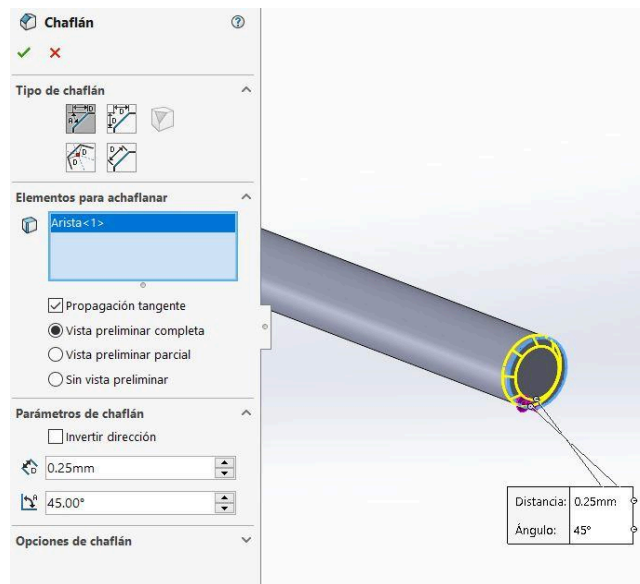


Figura 56: Operación “Chaflán” del perno. Fuente: Elaboración propia.

Lo último que falta para definir el perno es la rosca, para ello se selecciona la operación de Corte-Barrido. En esta operación se necesita un trayecto y el croquis de un perfil que se encarga de extraer volumen del cilindro. El trayecto del corte, tratándose de una rosca es una espiral, la operación se ubica en el apartado de operaciones del Administrador de comandos, en la parte derecha del mismo se selecciona Curvas y tras esto se selecciona Hélice y Espiral. Para elaborar la hélice se debe seleccionar una arista, y en el Gestor de diseño ofrecer parámetros como paso de rosca, revoluciones o el ángulo inicial (*Figura 57*).

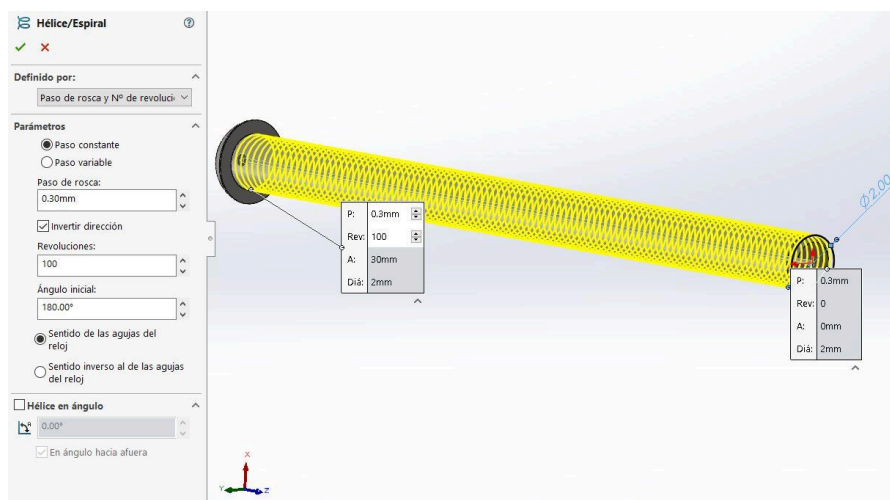


Figura 57: Elaboración de Hélice para el trayecto de una rosca. Fuente: Elaboración propia.

Para realizar el croquis del perfil para la operación que extrae el material, hay que situarse perpendicular a la base del perno y seleccionar el punto de inicio del croquis de la hélice, desde donde se hace un trazo triangular. La dimensión que define este triángulo es desde la punta del triángulo y la arista o pared del cilindro. Esta dimensión viene de una ecuación que estandariza todas las roscas de tuercas y pernos, se multiplica el valor de 0,866 por el paso de rosca como se muestra en la (*Figura 58*).

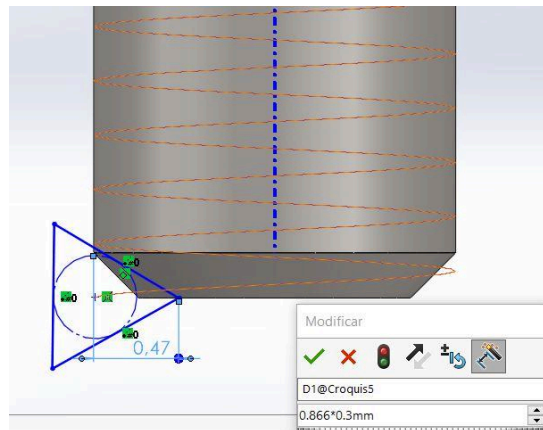


Figura 58: Elaboración del perfil de corte en roscas. Fuente: Elaboración propia.

Una vez elaborados el trayecto y el perfil de corte, se procede a realizar la operación *Corte-barrido* como se ve en la (*Figura 59*).

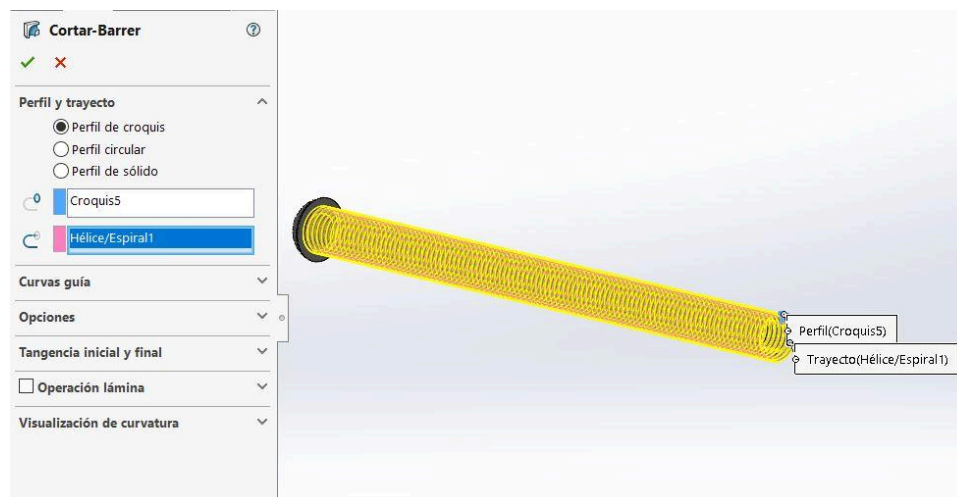


Figura 59: Operación Cortar-barrer para rosca de pernos. Fuente: Elaboración propia.

Para modelar una tuerca, se comienza haciendo una Extrusión que se basa en el croquis de un hexágono con un círculo inscrito del diámetro del perno. Tras esto se hace un corte

circular en su centro con el mismo diámetro del perno. La apariencia de tuerca se consigue haciendo un chaflán sobre las aristas de la pieza, con un ángulo de 45° y una distancia de 0,05mm, como se observa en la (Figura 60).

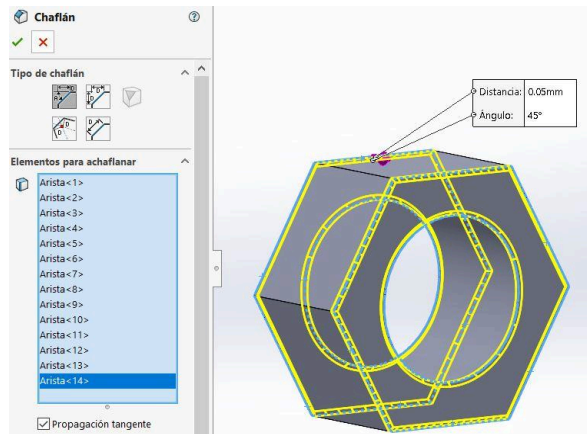


Figura 60: Operación chaflán de la tuerca. Fuente: Elaboración propia.

La rosca de este elemento se hace del mismo modo que el perno, pero debe considerarse que el perfil que sigue la espiral y que extrae el material deber ir con una rotación diferente con respecto al perno, ya que en la tuerca la rosca es interna al cilindro.

En la (Figura 61) se ve el perfil desde el que se elabora la rosca de la tuerca con la operación Corte-barrido.

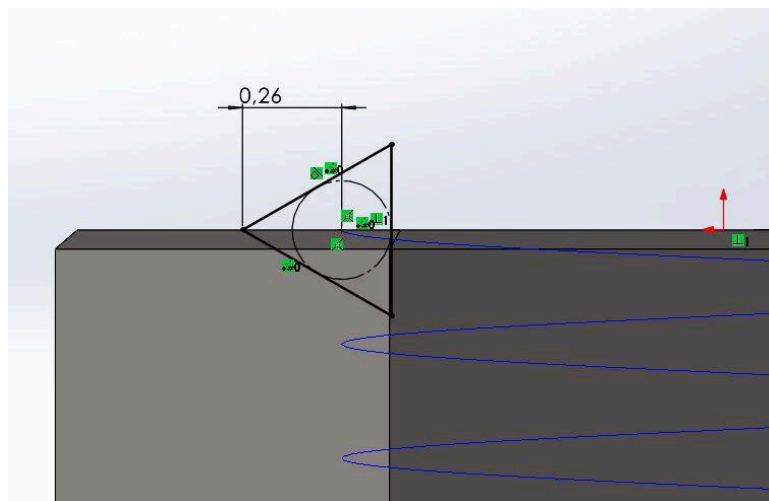


Figura 61: Croquis para perfil de la rosca de la tuerca. Fuente: Elaboración propia.

Uno de los elementos más problemáticos en la elaboración de las catapultas son los textiles y cuerdas, ya que por limitaciones de software, SolidWorks sólo trabaja con elementos sólidos. La creación de las cuerdas y textiles como el cuero portaproyectil han sido para su representación únicamente, ya que se comportan como elementos sólidos y no se pueden incluir de forma real en representaciones de movimiento ni tampoco en simulaciones o cálculos.

Para la representación de cuerdas estiradas o enrolladas se parte de un croquis en el que se hace un círculo con líneas constructivas en el centro y se realiza una matriz circular que replica cuatro veces el croquis entrelazando los trazos de los círculos. Tras esto, se recortan todos los trazos que se cruzan para que quede como se ve en la (Figura 62).

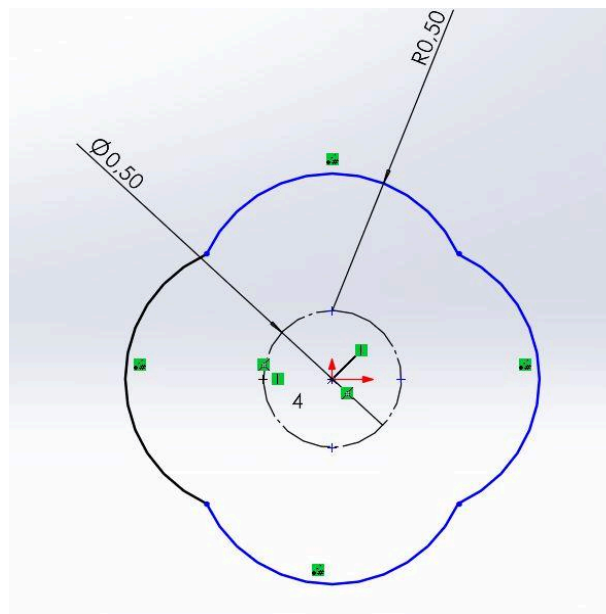


Figura 62: Croquis del perfil de las cuerdas. Fuente: Elaboración propia.

A continuación se realiza un recorrido por el que se extruye el croquis, si es una cuerda enrollada se elabora una espiral, definiéndose con un paso de curva acorde a las dimensiones de diámetro de la cuerda y al diámetro del eje donde esté enrollada. Si está estirada se crea una línea con las dimensiones de longitud deseadas.

Al tener un perfil y un trayecto, la operación que se selecciona para dar volumen a este elemento es Saliente barrido, pero con una peculiaridad que es dar una torsión a ese barrido. Esto se hace para dar apariencia de fibras textiles entrelazadas entre sí a un volumen .

La torsión se genera seleccionando en el Gestor de diseño en el apartado de Torsión de perfil, la opción de “Especificar valor de torsión”, y luego en el apartado de Control de torsión, seleccionar “Revoluciones”; para finalmente introducir el número de revoluciones según la longitud del trayecto o su forma, para que quede lo más parecido a un trenzado.

En la (Figura 63) se representa la operación de *barrido* con todas las opciones visibles en el Gestor de diseño antes de validar esta operación.

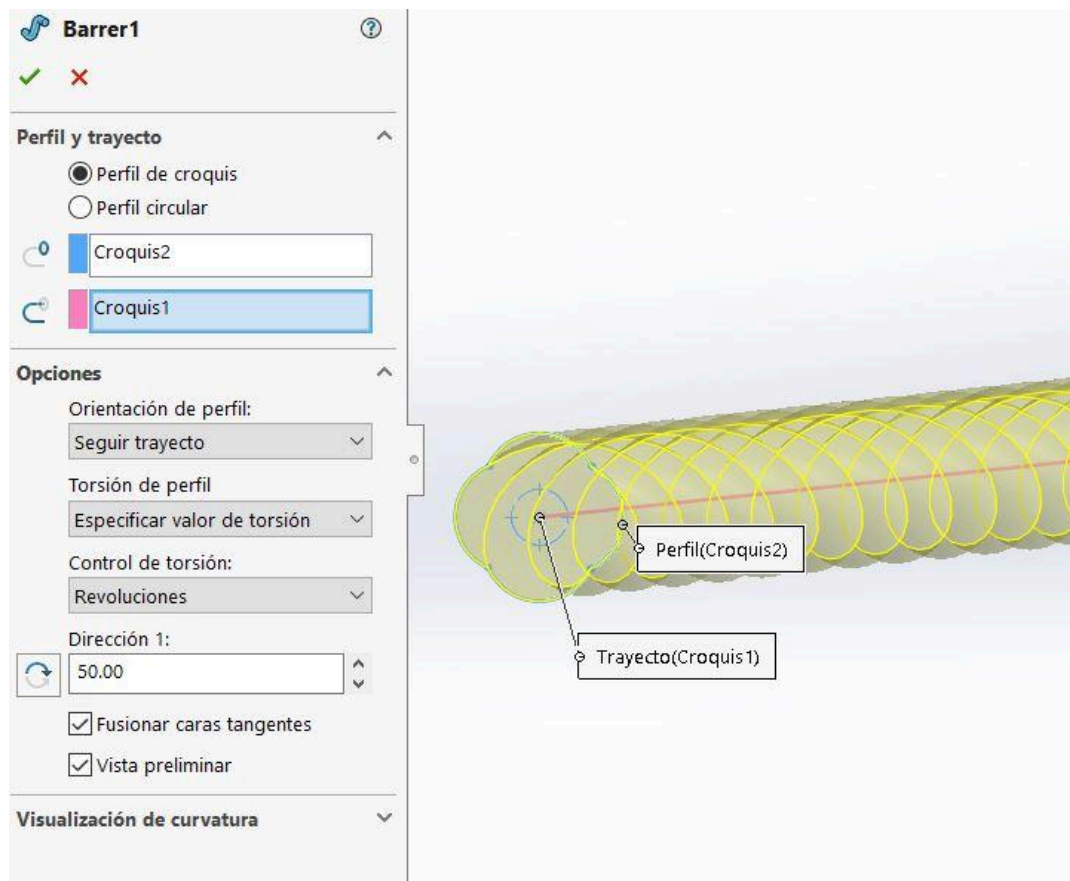


Figura 63: Operación de barrido con torsión para cuerdas. Fuente: Elaboración propia.

Hasta aquí han sido representadas y explicadas las diferentes operaciones realizadas tanto en el entorno de croquis como en el entorno de operaciones con volúmenes generados, así como el orden en el proceso del modelado de piezas de esta esta catapultas. A continuación se va a representar paso a paso cómo se genera un elemento del modelo como es la placa lateral que ensambla a ambos lados el marco del eje del brazo lanzador.

Tras seleccionarse la opción de nueva pieza al abrir el programa, se comienza un nuevo croquis seleccionando el comando que refleja la (Figura 64).

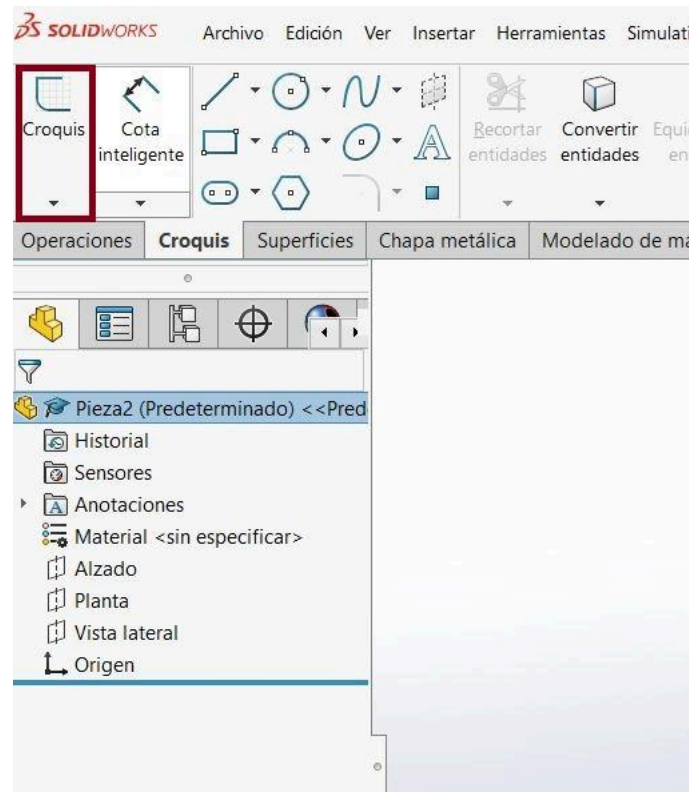


Figura 64: Selección de comenzar Croquis. Fuente: Elaboración Propia.

Antes de empezar a elaborar los trazos, se debe saber ubicar la pieza en el ensamblaje y elegir el plano en el que se realiza el croquis. Al ser una pieza lateral, se selecciona el Plano de Alzado como se muestra en la (Figura 65). Del mismo modo y posteriormente al comienzo de cualquier operación en el programa, se puede pulsar la barra espaciadora del teclado para que aparezcan los tres planos generales y hacer clic en el que nos queremos situar de frente. También al pulsar el botón de la rueda del ratón se puede rotar la vista para ubicarse en cualquier entorno del programa.

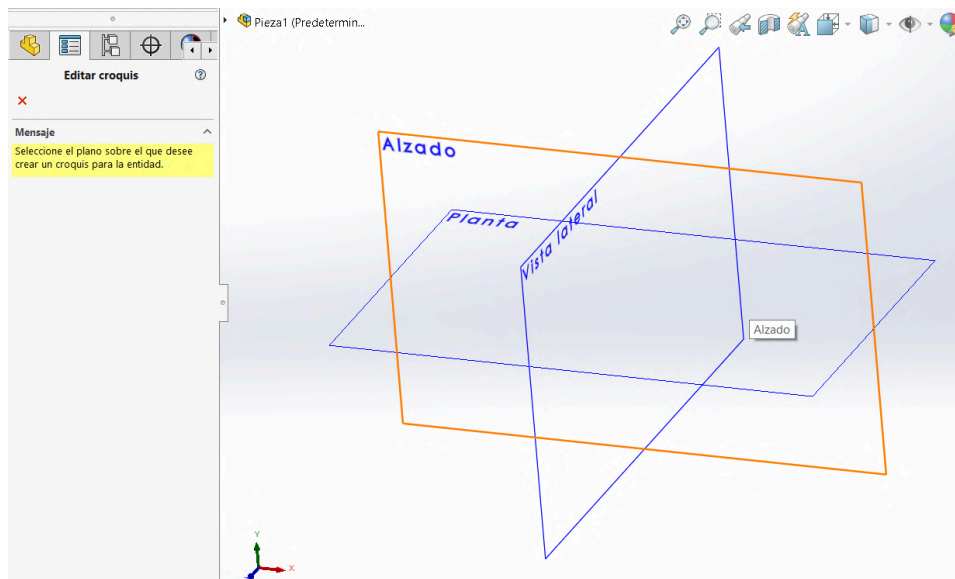


Figura 65: Selección de plano generar para realizar croquis. Fuente: Elaboración Propia.

En casi todos los croquis se deben usar líneas de construcción, ya que son de gran utilidad para reutilizar elementos del croquis realizando simetrías o matrices o simplemente para apoyarse cuando se le den las dimensiones al mismo. En este elemento al ser simétrico, se comienza por hacer una línea constructiva para ello se debe seleccionar el comando que se muestra en la (Figura 66).

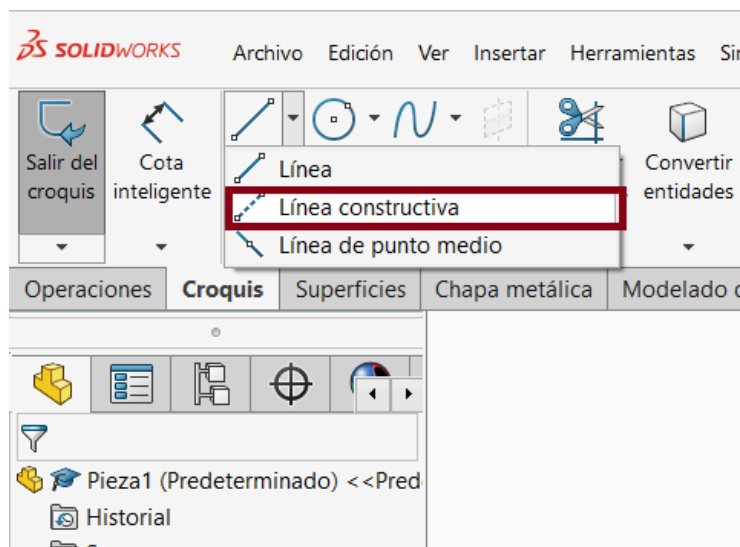


Figura 66: Selección de Línea constructiva. Fuente: Elaboración Propia.

Cabe destacar que la línea constructiva o eje no computa en las funciones u operaciones que se originan desde un croquis en el programa. Para realizar este eje de simetría se hace clic en el origen de coordenadas y se lleva el ratón hacia arriba haciendo otro clic para acabar el segmento, tras ello se pulsa 'Esc' en el teclado para salir de la creación de líneas. Para fijar esta línea y evitar que se gire o modifique, se selecciona y se hace clic en la opción de las relaciones de posición vertical como se puede observar en la (Figura 67).

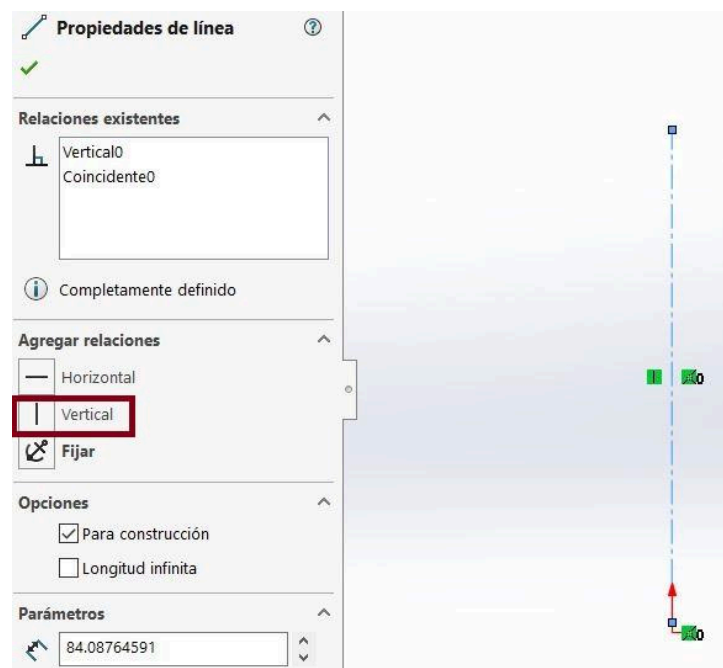


Figura 67: Selección de relación de posición Vertical. Fuente: Elaboración Propia.

Una vez definida esta línea, debe resultar en el color negro en vez de azul oscuro, esto indica que la línea o trazo está fijo. Tras esto se selecciona la operación Línea para comenzar los trazos del croquis; su ubicación en la interfaz del programa se ubica donde se muestra en la (Figura 68).

A continuación se elaboran las líneas pertinentes con el objetivo de reutilizarlas mediante una simetría. Los trazos deben quedar como en la (Figura 69).

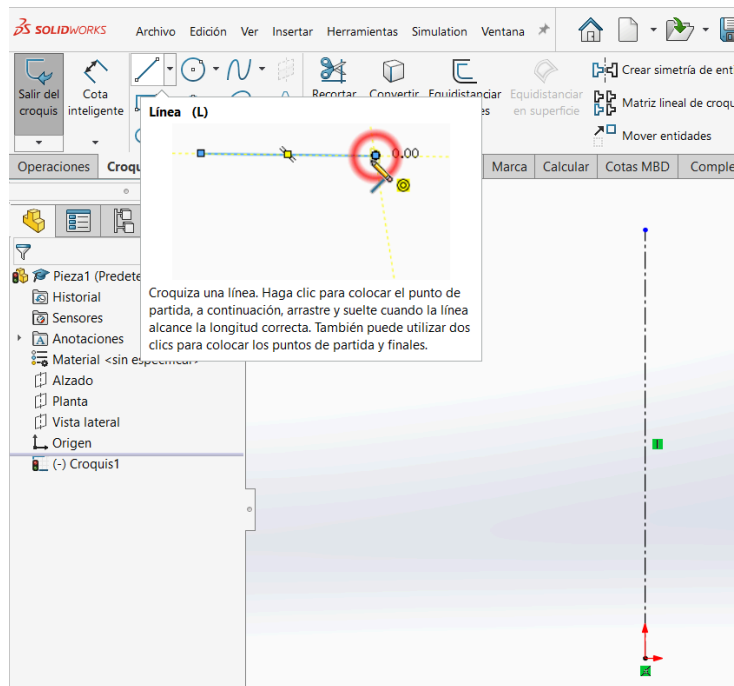


Figura 68: Ubicación de la operación Línea de croquis. Fuente: Elaboración Propia.

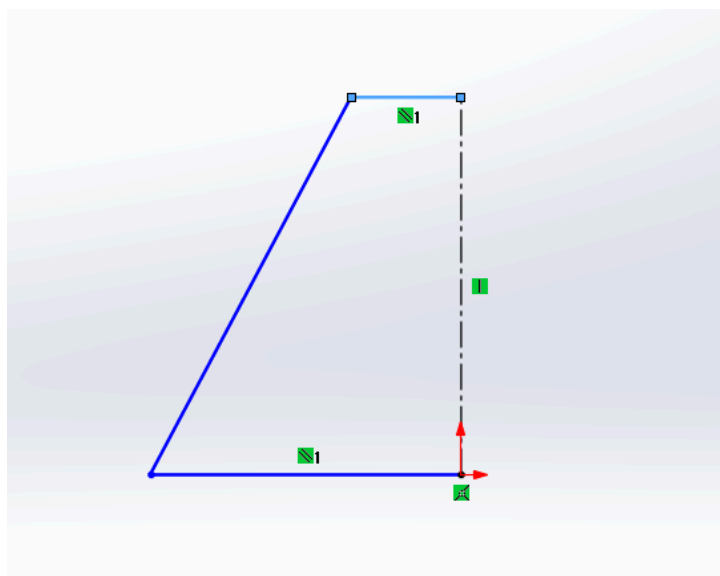


Figura 69: Primeros trazos del croquis. Fuente: Elaboración Propia.

Posteriormente se selecciona la operación de Simetría de entidades, la cual se ubica representada en la (Figura 70). Para que la simetría de un croquis se realice correctamente se deben seleccionar los elementos que se quieren reutilizar uno a uno y luego seleccionar el elemento de referencia con respecto al que se realiza la operación como se muestra en el Gestor de diseño en la (Figura 71).

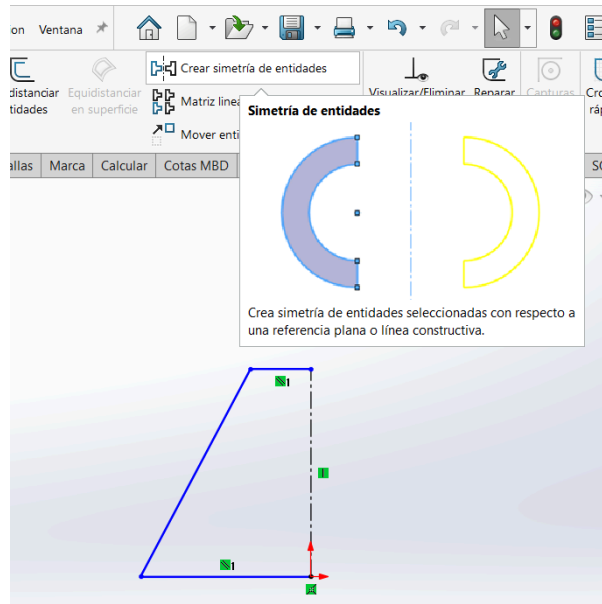


Figura 70: Ubicación de la operación Simetría de entidades. Fuente: Elaboración Propia.

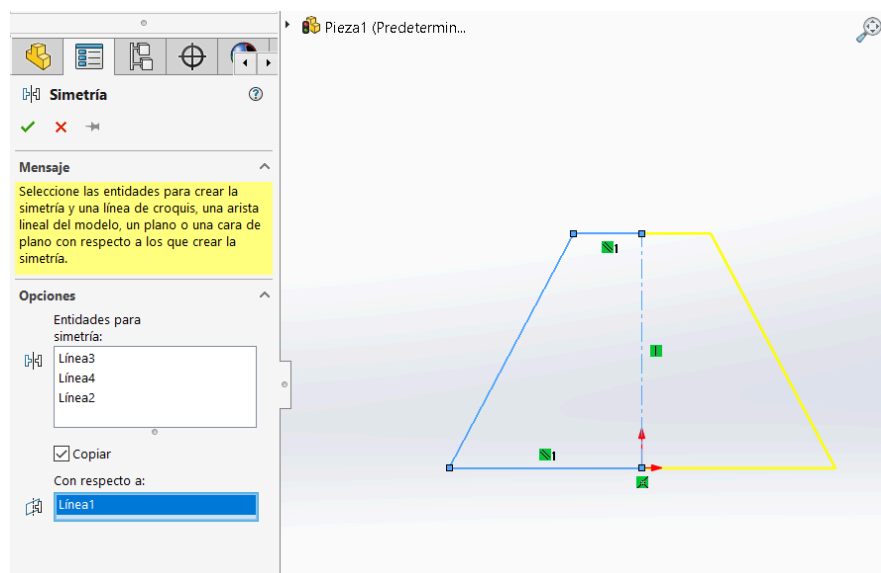


Figura 71: Operación Simetría de entidades en un croquis. Fuente: Elaboración Propia.

La siguiente función de la que se hace uso es la de Cota inteligente, sirve para dar dimensiones o relaciones numéricas para definir el croquis. La ubicación de la operación se aprecia en la (Figura 72).

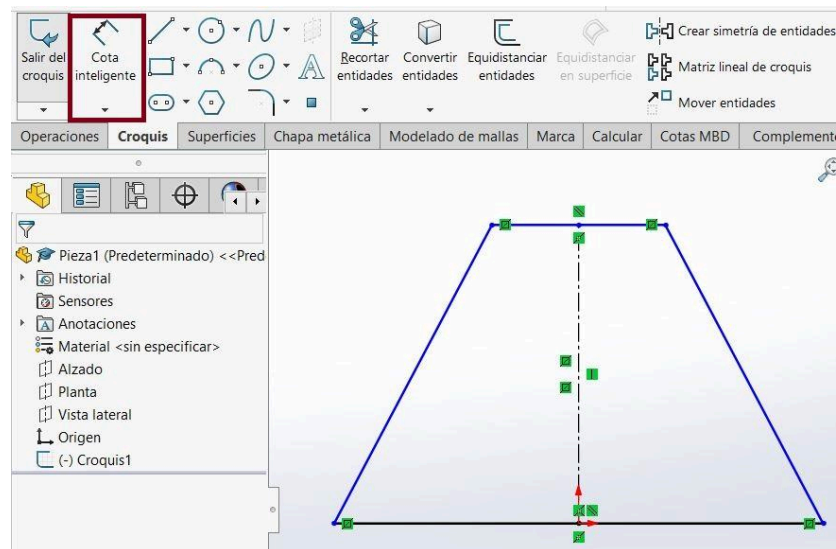


Figura 72: Operación Simetría de entidades en un croquis. Fuente: Elaboración Propia.

Para dar las dimensiones a las líneas hay que pulsar con el ratón encima de ellas y se introducen manualmente las diferentes dimensiones, como se observa en la (Figura 73).

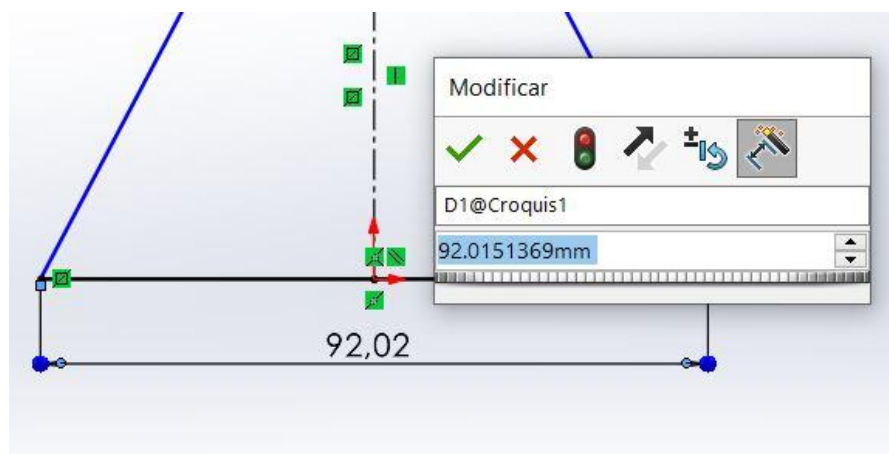


Figura 73: Introducción manual de dimensiones en Cota inteligente. Fuente: Elaboración Propia.

Si se incluyen las relaciones de posición de cada trazo correctamente y se acotan las dimensiones necesarias, los trazos del croquis se vuelven de color negro; que quiere decir que el croquis está fijo y definido en el plano, tal y como se ve en la (Figura 74).

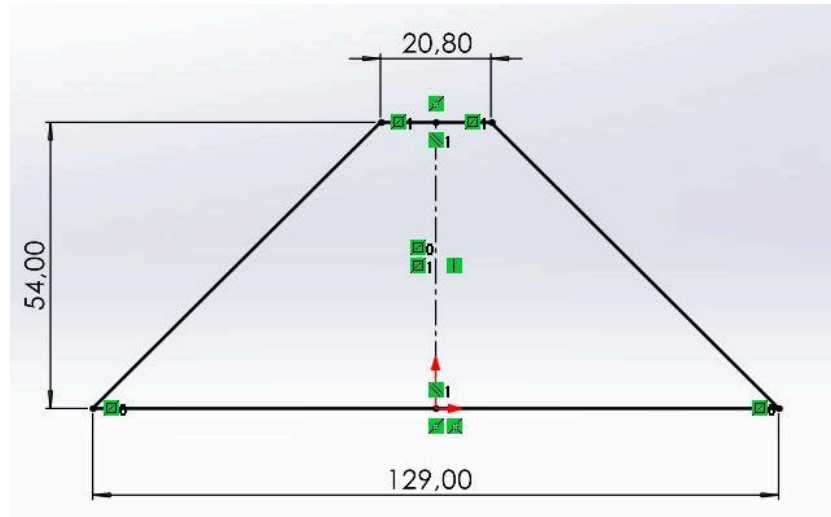


Figura 74: Croquis definido y acotado. Fuente: Elaboración Propia.

Una vez definido el croquis y antes de cerrarlo, se accede al entorno de Operaciones del Gestor de comandos; donde se selecciona la operación Extruir saliente/base (Figura 75).

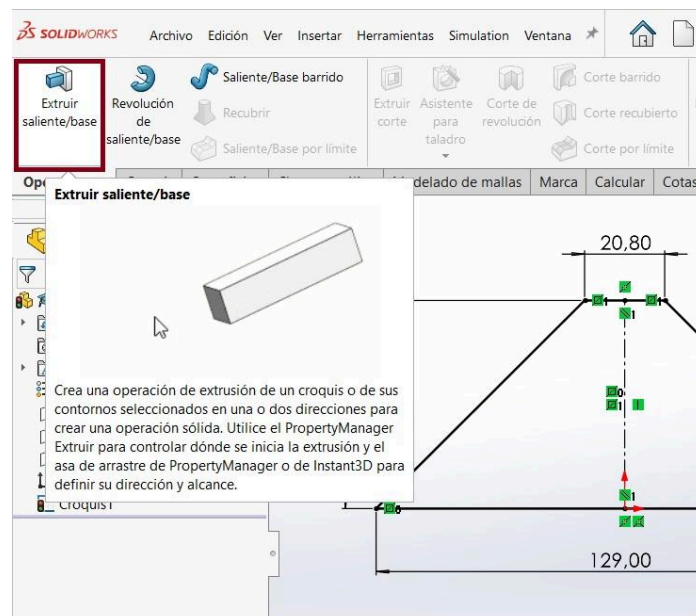


Figura 75: Ubicación de la operación Extruir saliente/base. Fuente: Elaboración Propia.

La (Figura 76) muestra el resultado tras seleccionar la operación de Extrusión de un croquis abierto o previamente seleccionado. En el Gestor de diseño se aprecian los parámetros que se pueden definir en la operación. En el caso del elemento que se está modelando, se introduce la dimensión de 3.8mm de profundidad.

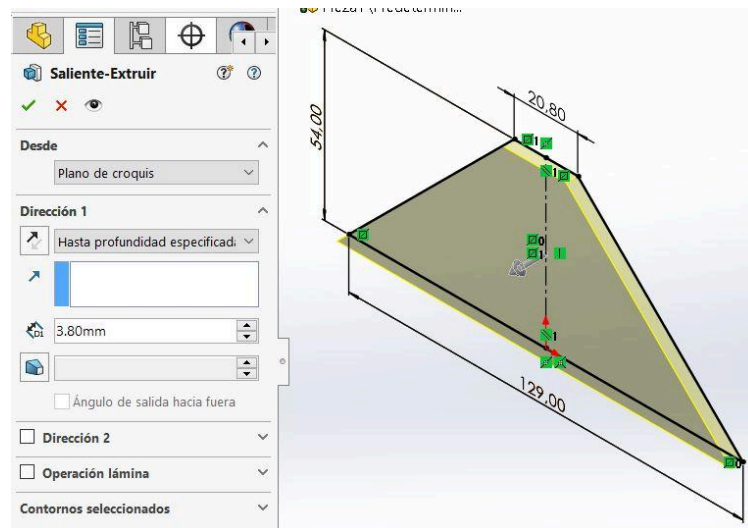


Figura 76: Representación de la operación Extruir saliente/base. Fuente: Elaboración Propia.

Tras introducir los datos necesarios que configuran la operación se hace clic en el tic verde de la parte superior del Gestor de diseño. El resultado de la operación se aprecia en la (Figura 77).

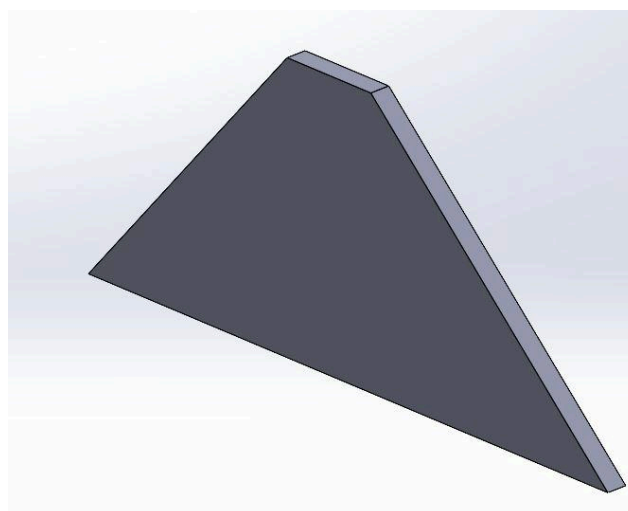


Figura 77: Resultado de la operación Extruir saliente/base. Fuente: Elaboración Propia.

En el momento en el que se tiene el volumen generado, se selecciona la operación de Extruir corte que se ubica donde se representa en la (Figura 78).

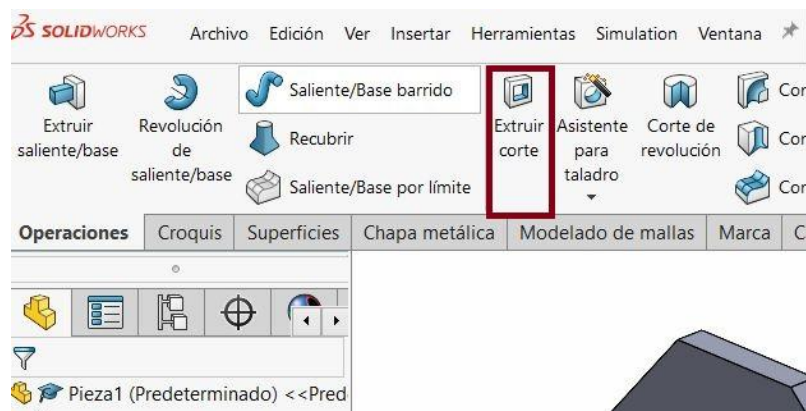


Figura 78: Ubicación de la operación Extruir corte. Fuente: Elaboración Propia.

Una vez se selecciona la operación, se hace clic en la cara desde donde se va a extraer volumen de forma perpendicular y donde se va a realizar el croquis de corte. Las líneas de construcción de piezas que ensamblan a otras puede ser útil para ubicar las aristas de elementos que van a ubicarse tras el elemento que se está elaborando. Por tanto los primeros trazos que se elaboran en este croquis son la línea que divide el modelo y dos más que hacen referencia al listón vertical, como se representa en la (Figura 79).

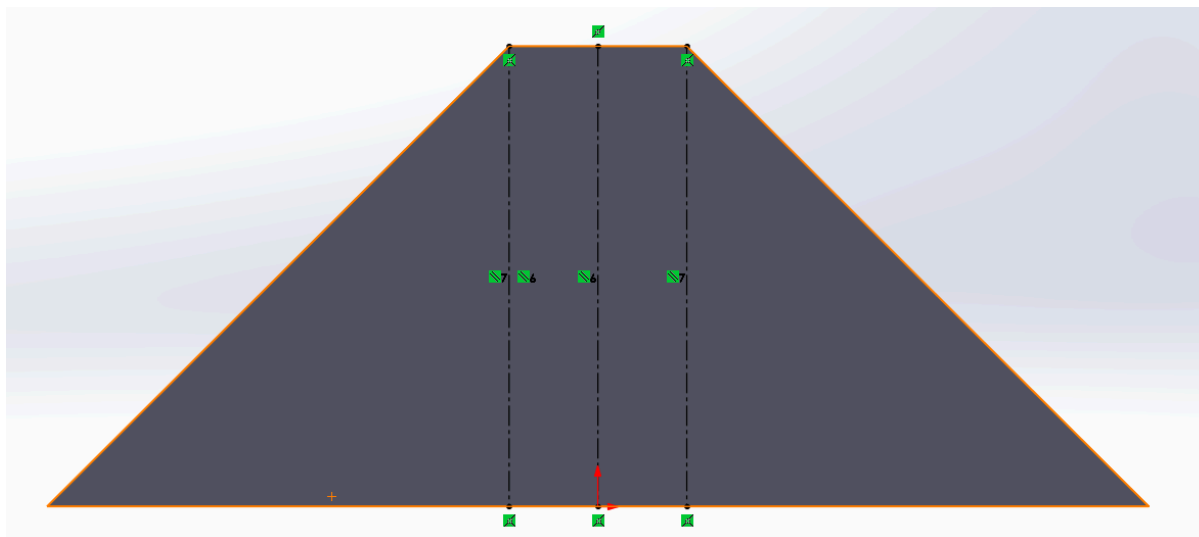


Figura 79: Inicio del croquis Extruir corte. Fuente: Elaboración Propia.

Estas líneas son de gran utilidad para ubicar los círculos que serán los elementos de fijación. Tras el modelo y ubicados a los lados del trapecio que conforma el volumen se ubican en el futuro ensamblaje los bastidores, así que se debe hacer una línea de construcción más que representa el eje del bastidor para ubicar los círculos del croquis. Esto se puede hacer con la operación línea pero se va a dar uso a la operación de Equidistar entidades, que se ubica donde se presenta en la (Figura 80).

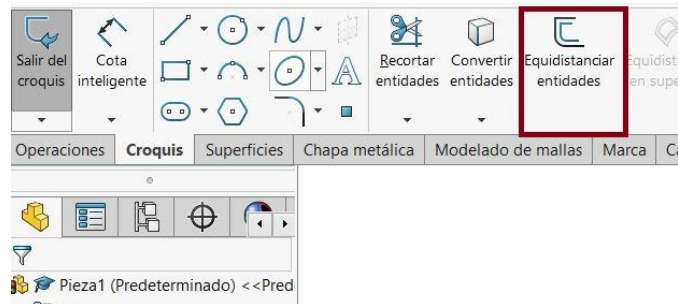


Figura 80: Ubicación de la operación Equidistar entidades. Fuente: Elaboración Propia.

Después de seleccionar la operación, se hace clic en la línea o elemento que se quiere equidistar. Se puede ver la previsualización de la operación en color amarillo, que facilita la elección de los parámetros. En este caso se introduce la dimensión de 10.8mm, se selecciona invertir dirección si no está definido en la dirección deseada, y finalmente se selecciona Geometría de equidistancia en el apartado de Geometría de construcción; ya que se quiere usar una línea base para elaborar una línea de construcción. Todos estos parámetros se muestran en la (Figura 81).

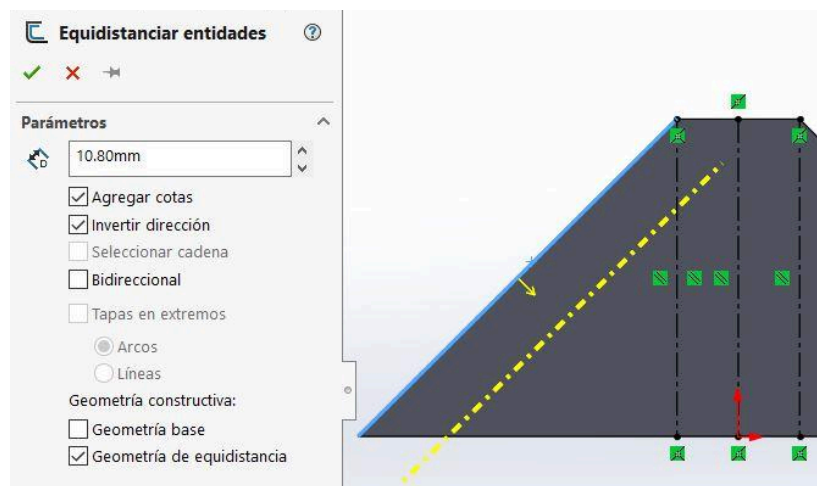


Figura 81: Representación de la operación Equidistar entidades. Fuente: Elaboración Propia.

El resultado de la equidistancia se representa en la (Figura 82). Como se aprecia, la línea corta parte del croquis, así que se procede a hacer una operación de Recortar entidades, para que así no moleste al resto de elementos. Esta operación recorta un elemento parcialmente cuando se cruza con otro elemento del croquis tras pulsar sobre el trazo deseado, la (Figura 83) representa la ubicación de esta operación.

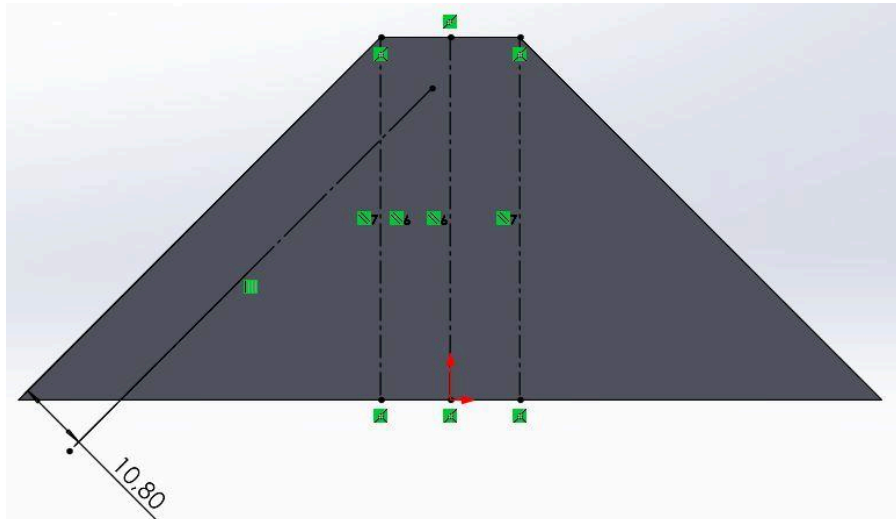


Figura 82: Resultado de la operación Equidistar entidades. Fuente: Elaboración Propia.

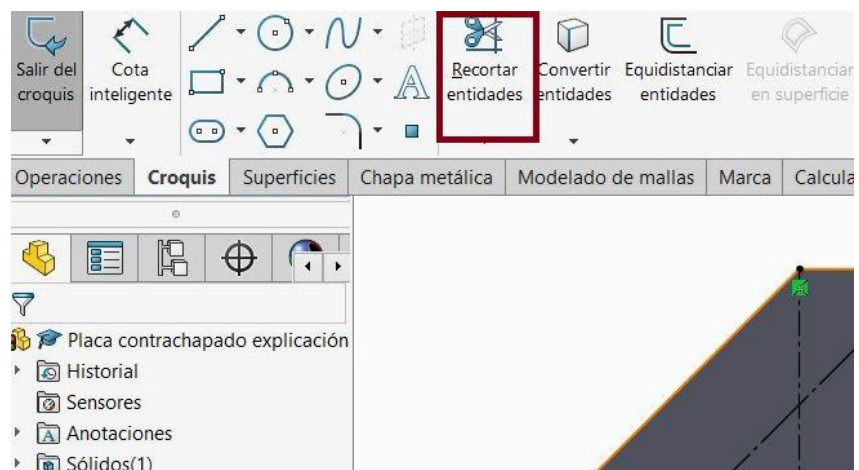


Figura 83: Ubicación de la operación Recortar entidades. Fuente: Elaboración Propia.

La función de recortar se usa para limpiar el croquis de líneas o trazos que se cruzan sin necesidad de tener que eliminar elementos y poder continuar rápidamente con el proceso. A

continuación, en la (Figura 84) se aprecia el entorno de la operación. Es muy fácil de usar ya que sólo se tiene que hacer clic en el trazo que se desea eliminar.

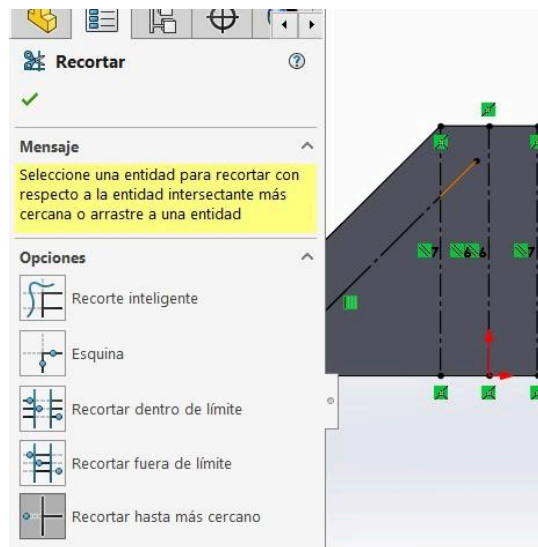


Figura 84: Representación de la operación Recortar entidades. Fuente: Elaboración Propia.

Posteriormente a recortar el trozo de línea constructiva sobrante, se procede a realizar los círculos seleccionando el comando de círculo donde se ubica en el Gestor de comandos en la (Figura 85).

Tras seleccionar el comando se hace clic sobre las líneas de construcción para que los centros de los círculos siempre sean coincidentes a estos elementos. Tanto las dimensiones como las cotas para su ubicación en el volumen se hace posteriormente. La (Figura 86) muestra el croquis tras realizar los cinco círculos necesarios, uno de ellos es el correspondiente al diámetro del eje del brazo lanzador.

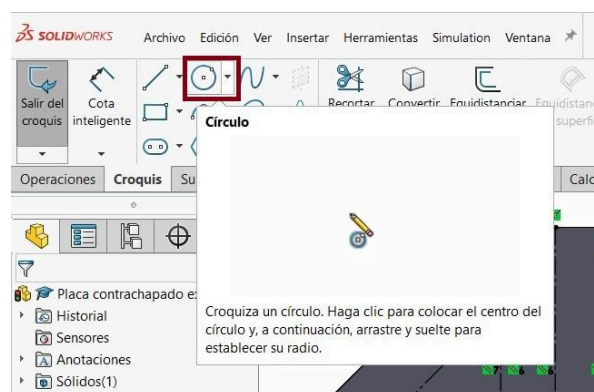


Figura 85: Ubicación del comando Círculo. Fuente: Elaboración Propia.

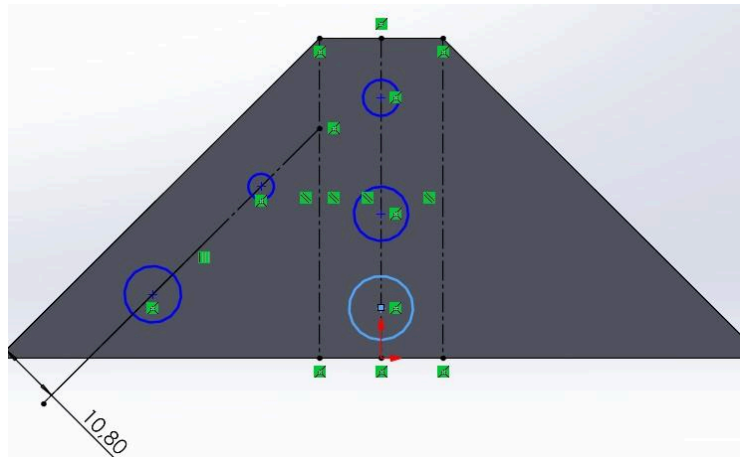


Figura 86: Uso del comando Círculo en un croquis. Fuente: Elaboración Propia.

Previamente a acotar, se debe tener en cuenta que se tienen 4 círculos en el croquis que van a tener el mismo diámetro, por tanto manteniendo pulsado 'Ctrl' en el teclado, se seleccionan todos los círculos menos el del eje del brazo y en el Gestor de diseño se hace clic en la opción Igual como se presenta en la (Figura 87). Esto se hace para evitar repetir el proceso de introducir manualmente la misma dimensión a cada uno de ellos y por limpieza de cotas en el croquis.

Esta operación que se muestra en la figura ha sido usada para la elaboración de todos los elementos de los modelos que han tenido más de un elemento con la misma dimensión, ya que supone un gran ahorro de recursos.

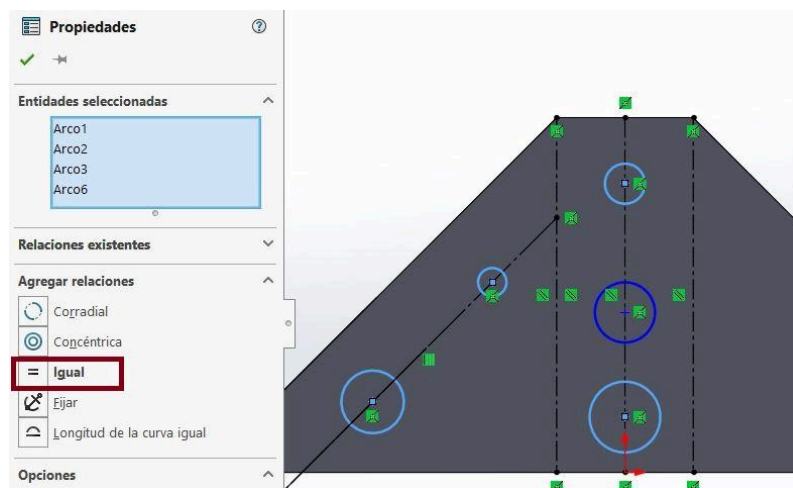


Figura 87: Agregar relaciones a trazos en un croquis. Fuente: Elaboración Propia.

Una vez se usa esta relación de igualdad en el croquis se procede a acotar los círculos para definir sus dimensiones y sus relaciones de posición entre ellos o entre ellos y las líneas de construcción. Se sabe que en un croquis definido sus trazos deben quedar fijos en el plano, pudiendo cambiar la ubicación o dimensión de sus trazos modificando rápidamente las cotas y sin riesgo a que los trazos se rompan haciendo el trabajo anterior vano.

La (Figura 88) representa el resultado del croquis definido tras introducir las cotas establecidas previamente en la etapa de diseño.

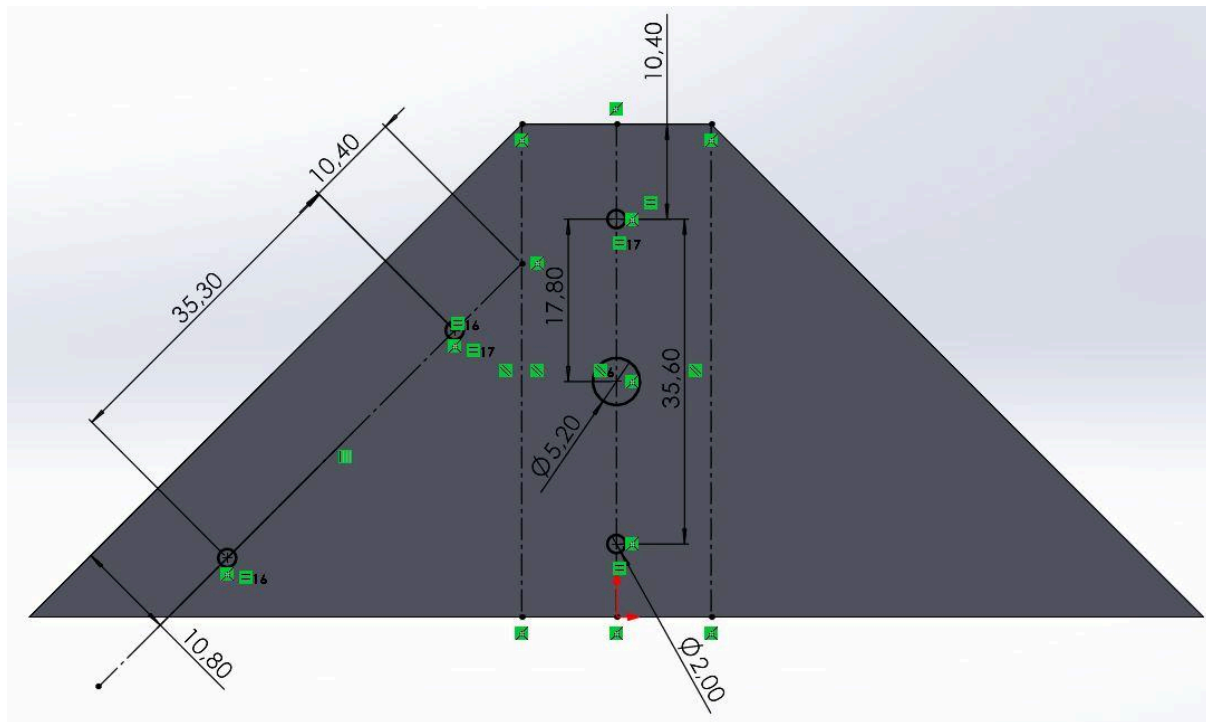


Figura 88: Resultado tras acotar un croquis. Fuente: Elaboración Propia.

Posteriormente se hace uso de nuevo de la simetría de entidades, en la que seleccionando la línea de construcción que divide el modelo se replican los dos círculos de la derecha en el lado izquierdo. Esta acción es representada en la (Figura 89) y supone ahorro de tiempo y de recursos.

Cuando el croquis está listo, salimos de él haciendo uso del botón en la pantalla o pulsando 'Esc' en el teclado. justo después, aparece directamente el entorno de la operación Extruir corte en el Gestor de diseño, como se muestra en la (Figura 90). En el Gestor de diseño se ven múltiples opciones de corte, como que se haga desde plano medio, hasta el siguiente elemento... Las opciones más usadas son Por todo, que es la usada en esta operación y la de Hasta profundidad especificada donde se debe introducir la dimensión manualmente.

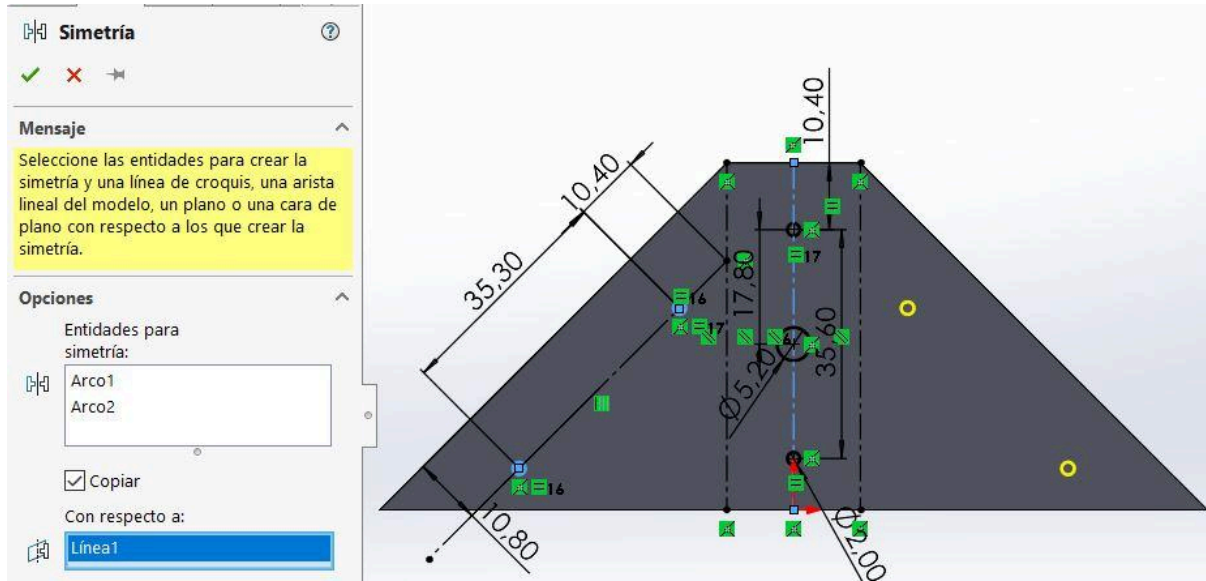


Figura 89: Simetría de círculos del croquis. Fuente: Elaboración Propia.

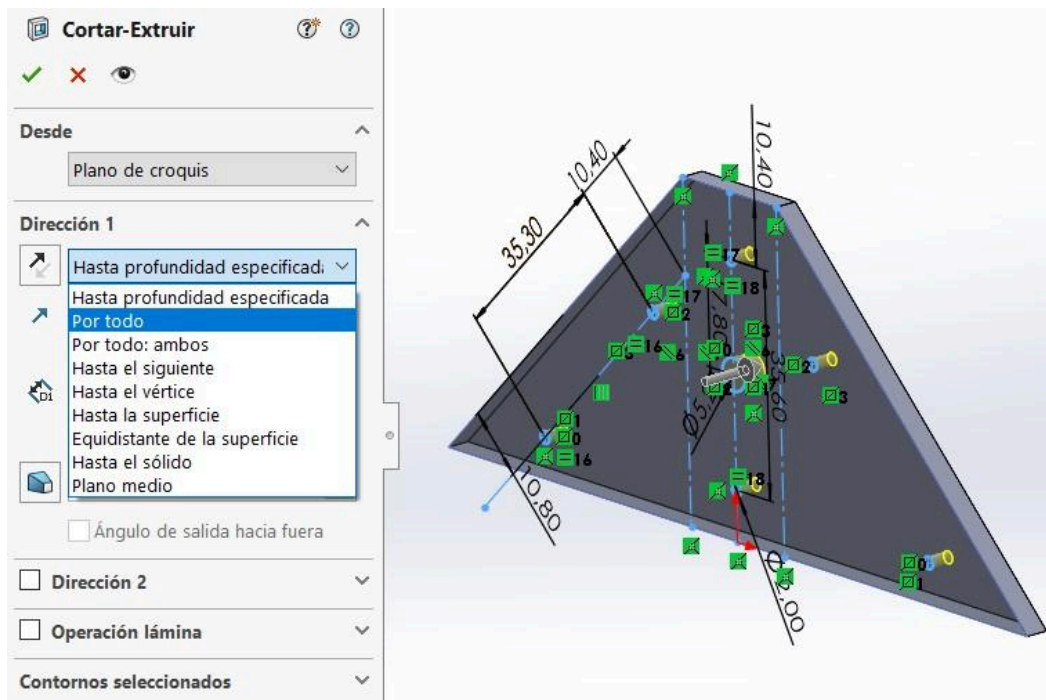


Figura 90: Representación de la operación Extruir corte. Fuente: Elaboración Propia.

Todas las piezas y elementos generados mediante todas las operaciones y funciones del programa, son volúmenes con una apariencia grisácea y lisa, como se aprecia en la (Figura 91). Posteriormente se debe proporcionar diferentes apariencias para definir los diferentes elementos del modelo.

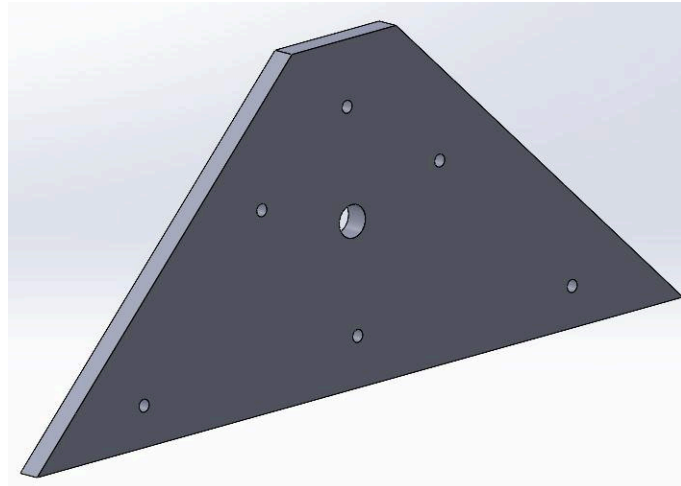


Figura 91: Volumen resultante de las diferentes operaciones. Fuente: Elaboración Propia.

Las apariencias se encuentran en el Cuadro de diseño y hay multitud de opciones distintas. Estas apariencias generalmente se incluyen en la fase de creación de la pieza, para ello se selecciona la apariencia que se quiere incluir y se arrastra hasta una de las caras, tras esto aparece un desplegable donde aparecen las siguientes opciones; se puede aplicar apariencias a caras, operaciones, o directamente al sólido, que es como se hace en la mayoría de casos. La (Figura 92) presenta los diferentes desplegables que dan acceso a las apariencias.

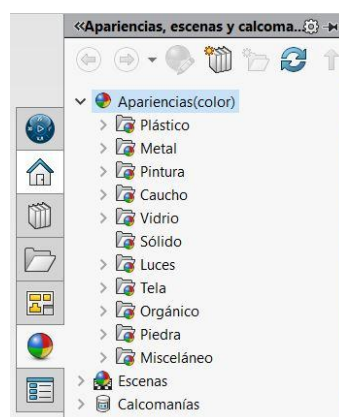


Figura 92: Apariencias del Cuadro de diseño. Fuente: Elaboración propia.

La ubicación de la apariencia que se le quiere dar a la pieza se debe buscar según el tipo de material al que se le quiera dar aspecto. En el caso de este elemento se trata de madera de contrachapado, por tanto se debe seleccionar la opción desplegable Orgánico, posteriormente seleccionar Madera, y finalmente hacer clic en Compuesto de madera. En esta opción sólo se encuentra una apariencia que es la de Tabla de fibras orientadas que hace referencia al contrachapado.

Tras encontrar la apariencia que se desea tener en la pieza, se hace clic y se mantiene pulsado, arrastrando la figura de la apariencia hasta el volumen. Luego se debe seleccionar que la apariencia se la damos al sólido completo, ya que existen opciones de dar la apariencia únicamente a caras del objeto u operaciones realizadas. En la (*Figura 93*) se muestra el Cuadro de diseño con la apariencia encontrada y el resultado del elemento con la apariencia modificada.

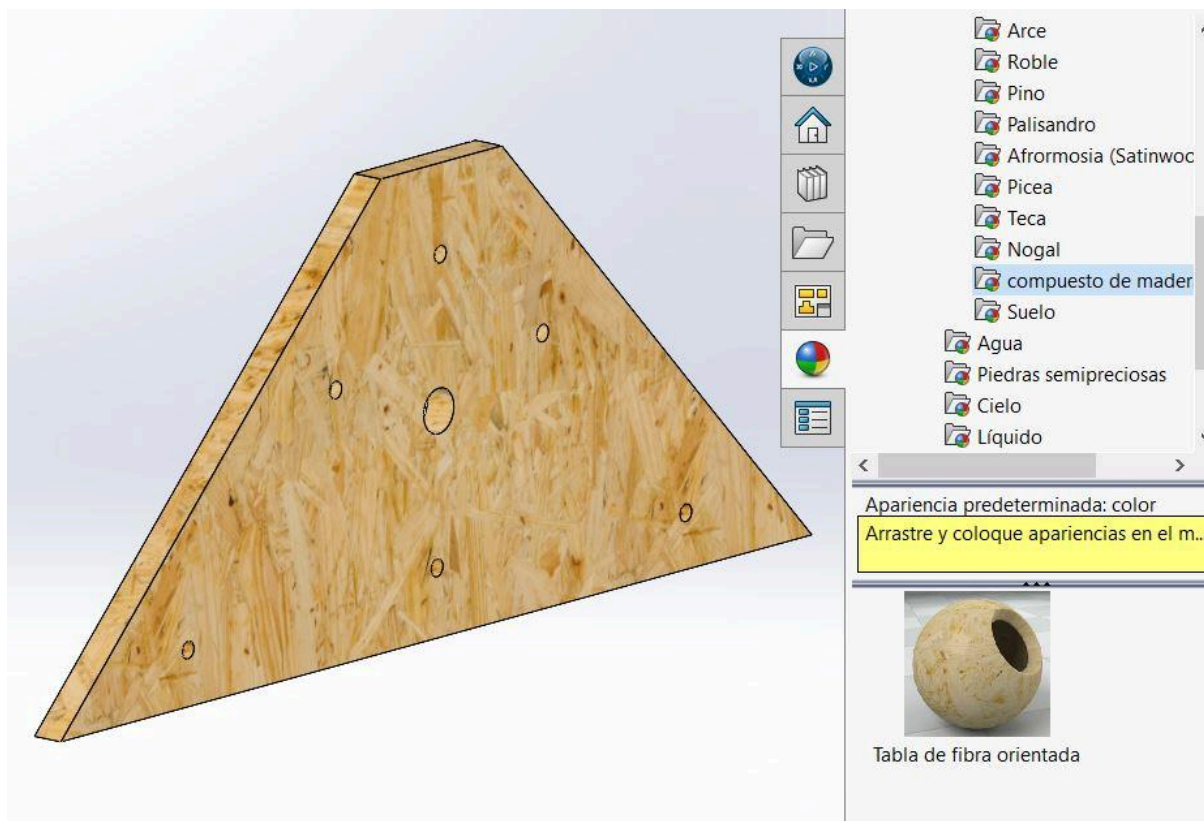


Figura 93: Elemento con apariencia modificada y Cuadro de diseño abierto con apariencias. Fuente: Elaboración propia.

7.3. ENSAMBLAJE DEL MODELO TIPO TREBUCHET

En la fase de ensamblaje de la creación del modelo, se ubican en una misma Ventana de trabajo todos los elementos o piezas que conforman el modelo. Previamente a esto la fase de modelado debe haber finalizado ya que los elementos deben ser definidos con anterioridad al ensamblaje. Previamente a colocar todos los elementos del modelo que conforman el ensamblaje total de la pieza, se elaboran unos subensamblajes que facilitan la labor del ensamblaje final; y también ahorran tiempo al poder reutilizar subensamblajes en modelos simétricos como este.

En el Administrador de comandos del apartado de ensamblaje se pueden identificar fácilmente las opciones Insertar pieza y Relación de posición que son las funciones más importantes para crear un ensamblaje. Antes de insertar piezas es muy importante saber ubicar los planos generales del entorno, como son Planta, Alzado y Vista lateral.

Al empezar por la base, se colocan las primeras piezas sobre la planta y se busca relacionar los primeros componentes a el origen de coordenadas como referencia. Para evitar equivocarnos al dar relaciones de posición entre las piezas, ya que es fácil confundir la ubicación de los orificios y poner algún elemento de la forma equivocada; se deben mover los elementos de tal forma que queden dispuestos correctamente y a una distancia prudente entre ellos. Estos elementos pueden moverse haciendo clic con el botón derecho y se selecciona la opción Mover con sistema de referencia, como se muestra en la (*Figura 94*).

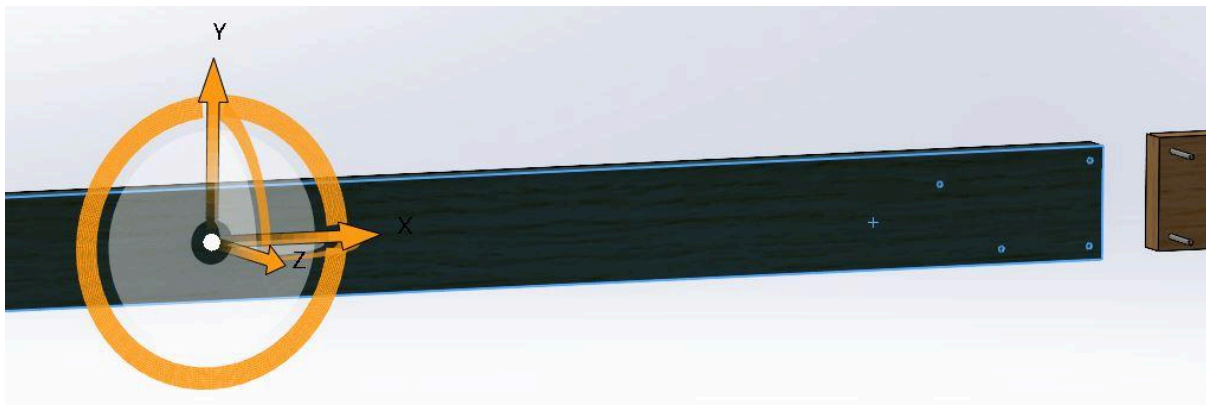


Figura 94: Función de ensamblaje Mover con sistema de referencia. Fuente: Elaboración propia.

Una vez se tienen dos piezas o elementos dispuestos en una forma correcta, con el botón *Ctrl* del teclado pulsado se seleccionan dos caras de piezas distintas y después se hace clic en Relación de posición para darle la relación de posición que se debe. Cada vez que se hace esto, sólo se le aplica una relación de posición a las piezas, por lo que si en la misma pieza se tiene que añadir otra relación de posición se debe repetir esto de nuevo, seleccionando otra cara del elemento u otra relación de posición.

En la (*Figura 95*) se observa una operación de hacer coincidentes dos caras de distintas piezas, en ella se aprecia el Gestor de operaciones con todas las relaciones de posición que se pueden seleccionar, aunque las más usadas en este proyecto son Coincidente y Concéntrica. Cabe destacar que en esta función se ve cómo se hacen coincidentes las dos caras superiores mientras las caras frontales están perfectamente alineadas. Esto se debe a que existe una relación de coincidencia previa entre estas dos piezas pero seleccionando diferentes caras a la operación actual.

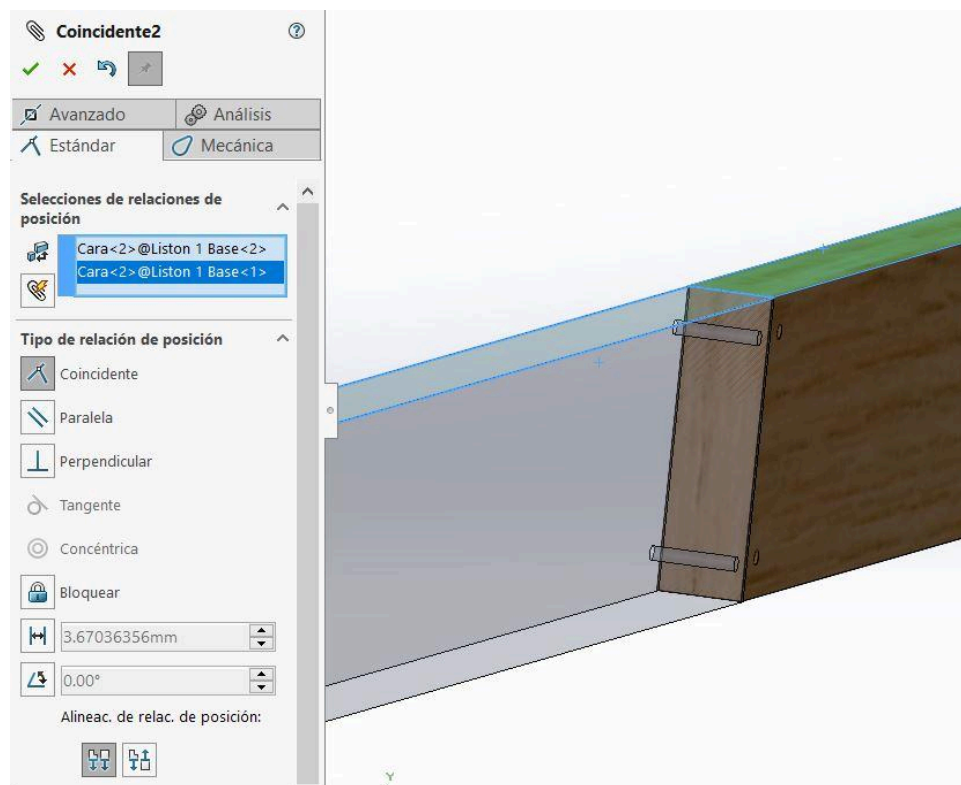


Figura 95: Relación de posición entre listones de la base. Fuente: Elaboración propia.

El tipo de relación de posición Concéntrica se usa para que dos elementos o caras curvas de los dos elementos compartan el mismo eje, por tanto todos los elementos que atraviesan orificios como los elementos de fijación o los ejes pasadores usan esta operación, como se ve en la (Figura 96).

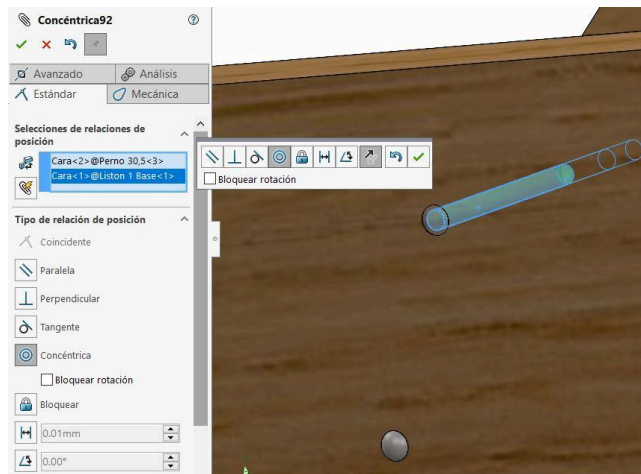


Figura 96: Relación de posición Concéntrica de un perno y un listón. Fuente: Elaboración propia.

Una vez añadida una relación de posición de concetricidad, se debe aproximar la cabeza del perno a la cara del elemento donde va a fijarse. Por tanto tras hacer que cada elemento de fijación coincida con el eje del orificio que atraviesa, hay que aplicar una relación Coincidente entre la cara interior de la cabeza del perno y la cara de la pieza donde se fija, como se aprecia en la (Figura 97).

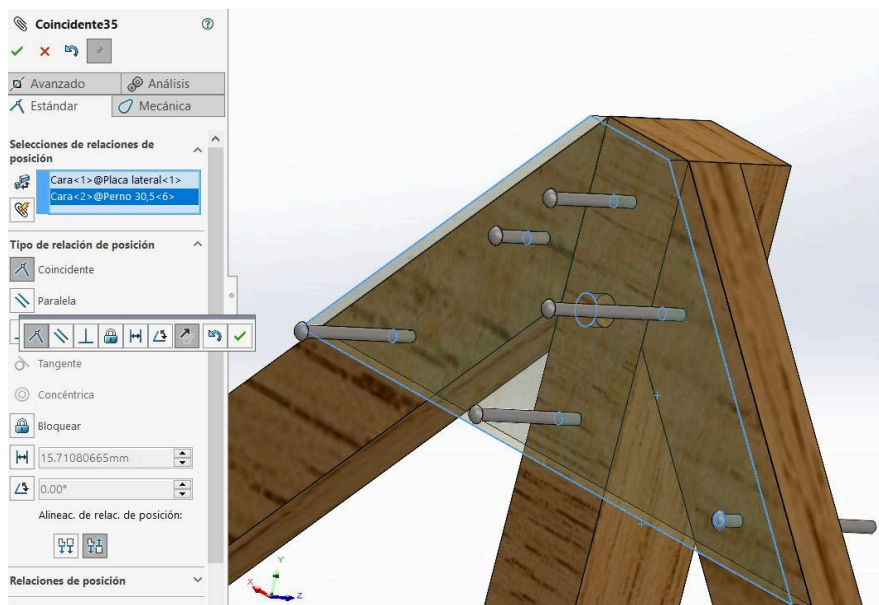


Figura 97: Relación de posición coincidente entre perno y placa lateral. Fuente: Elaboración propia.

Esta tarea vuelve a repetirse cuando al otro lado del elemento de fijación hay que ensamblar una arandela y una tuerca. Al igual que con los pernos hay que volver a dar relaciones de posición a estos dos elementos por separado, tanto la concentricidad con el eje del perno como que las caras interiores de las arandelas sean coincidentes con la cara del listón o pieza que ensamblan, y la cara interior de la tuerca sea coincidente con la cara exterior de la arandela. En la (Figura 98) se muestra la operación de dar la relación de posición coincidente a una tuerca con una arandela en la parte de la base donde se ensamblan los dos listones laterales con el listón vertical.

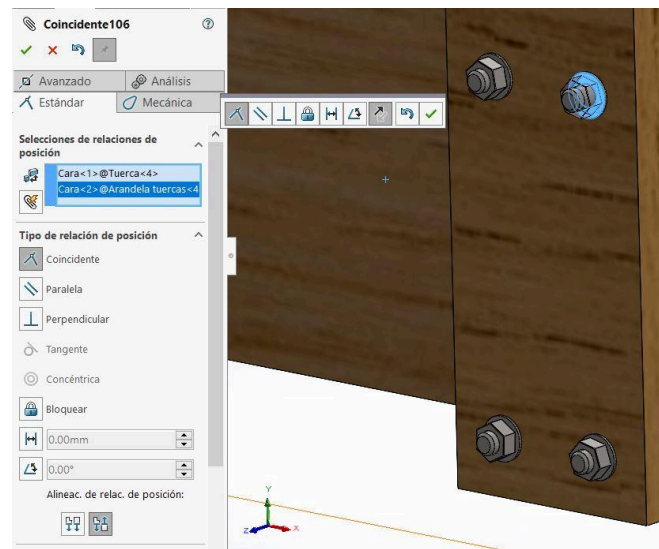


Figura 98: Relación de posición *coincidente* entre tuerca y arandela. Fuente: Elaboración propia.

Al ser una estructura simétrica, uno de los subensamblajes es el acople de todas las piezas de un solo lado de la estructura, por tanto se reutiliza. Posteriormente se inserta este subensamblaje en uno nuevo, también se insertan los listones de la base frontal y trasero, los elementos de fijación que faltan; y finalmente se inserta otro subensamblaje del lado opuesto que termina de definir la estructura base de la catapulta. El subensamblaje de la estructura se representa en el apartado de elección de modelos de este proyecto.

Los ejes pasadores también deben tener concentricidad con los orificios de la estructura ya que deben compartir eje con ellos para su movimiento de rotación. Pero en este caso tras hacer la operación de dar la relación Concéntrica, se ajusta mediante otro tipo de relación diferente a coincidente, puesto que no hace límite con la cara de ningún otro elemento.

En el subensamblaje del brazo lanzador es donde se define la posición final con respecto al resto de piezas de los ejes pasadores, tanto el eje de giro del brazo como el eje del contrapeso. Tras hacerlos concéntricos a sus orificios y conociendo sus dimensiones, se seleccionan dos caras paralelas, en este caso la base del cilindro y la cara de un listón del

brazo central. En el Gestor de diseño se selecciona un icono con flechas y se introduce una distancia entre las caras (*Figura 99*), esa distancia es la mitad del eje pasador menos la mitad del grosor de los listones y separadores del brazo central. De esta forma los ejes quedan totalmente definidos.

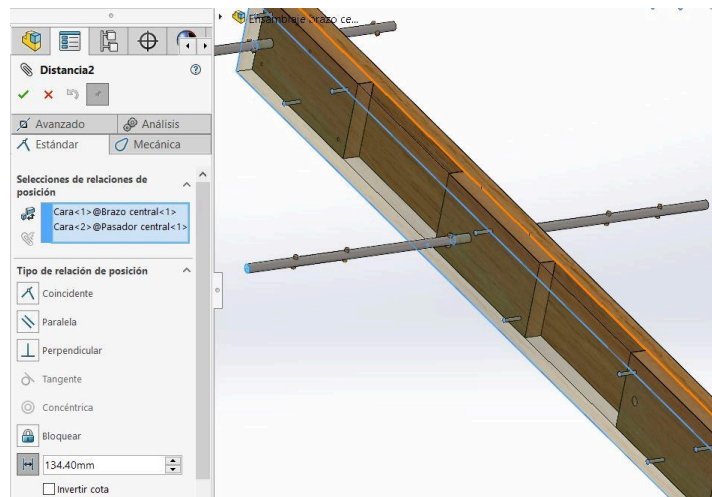


Figura 99: Relación de posición Distancia de los ejes. Fuente: Elaboración propia.

En el ensamblaje final, se inserta el subensamblaje de la estructura con el del brazo lanzador, el contrapeso y algunas arandelas de los ejes. El contrapeso también debe tener las mismas relaciones de posición que los ejes pasadores; pero además para dar apariencia de ser un objeto pesado al que no influye la rotación del brazo se le da una relación paralela seleccionando la cara de su base con la cara de un listón que sea paralela al suelo, como se observa en la (*Figura 100*).

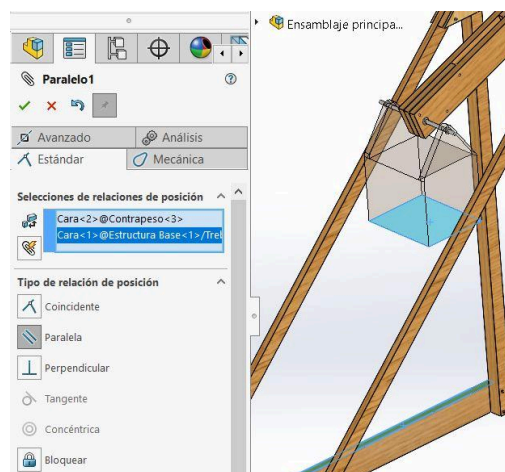


Figura 100: Relación de posición Paralela del contrapeso. Fuente: Elaboración propia.

Para finalizar, una relación de posición que se incluye en la parte final del ensamblaje principal de cada catapultas son las de distancia límite o ángulo límite. Los elementos que rotan, si no se les proporciona estas relaciones de posición, giran en los 360° sin importar que atraviesen otras piezas del modelo, por tanto es importante proporcionar un límite de distancia o ángulo con otros elementos.

Estas relaciones de posición se proporcionan seleccionando dos aristas de dos elementos diferentes, un elemento debe ser fijo y el otro debe rotar en un eje fijo. Tras esto, se selecciona el apartado de relaciones de posición avanzado en el Gestor de diseño y se hace clic en el logotipo de una cota de distancia, o en el otro de ángulo.

La (Figura 101) representa esta operación, donde se selecciona una arista del brazo lanzador y otra de un listón de la base. En el Gestor de diseño se aprecia cómo se inserta un ángulo mínimo y otro máximo desde un ángulo base para que el brazo tenga libertad de movimiento entre esa horquilla de grados. Hay veces que esos grados o distancia límite se deben ir modificando lentamente con las flechitas donde se introducen las dimensiones mientras se observa detenidamente con el zoom porque dos piezas intersecan en una posición más difícil de interpretar.

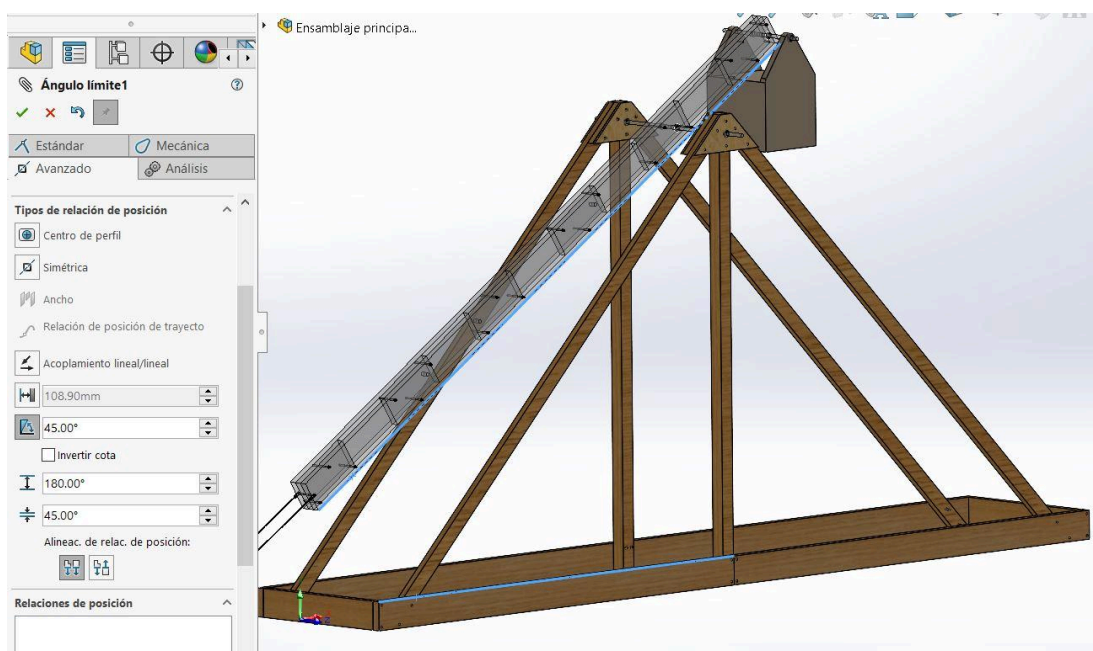


Figura 101: Relación de posición Ángulo límite del brazo. Fuente: Elaboración propia.

7.4. ELABORACIÓN DEL MODELO DE DA VINCI

A diferencia del modelo tipo trebuchet, cuyo proceso se ha explicado detalladamente mediante todas las operaciones aplicadas en el entorno CAD, en este apartado se presenta el orden de creación del modelo virtual de la catapulta de Leonardo da Vinci. El modelado ha sido realizado también en SolidWorks a partir de una interpretación tridimensional del esquema original, el cual carece de medidas exactas. Por tanto, se han estimado proporciones funcionales que permiten su construcción a escala tipo maqueta de sobremesa.

Este modelo ha sido organizado en diferentes subensamblajes, facilitando su ensamblaje final y dividiendo las piezas en diferentes grupos. En este caso, no se representan las operaciones utilizadas para la obtención de las piezas, sino únicamente la secuencia seguida en la elaboración y ensamblaje de sus componentes.

Los primeros elementos modelados han sido los elementos de la base, como son el listón lateral, el listón trasero y el delantero, y por último el central. Para ensamblar estos elementos se elaboró un perno de madera. La creación de estos elementos se ha hecho mediante operaciones básicas de extrusión y cortes.

La (Figura 102) representa los elementos descritos que conforman la base del modelo.

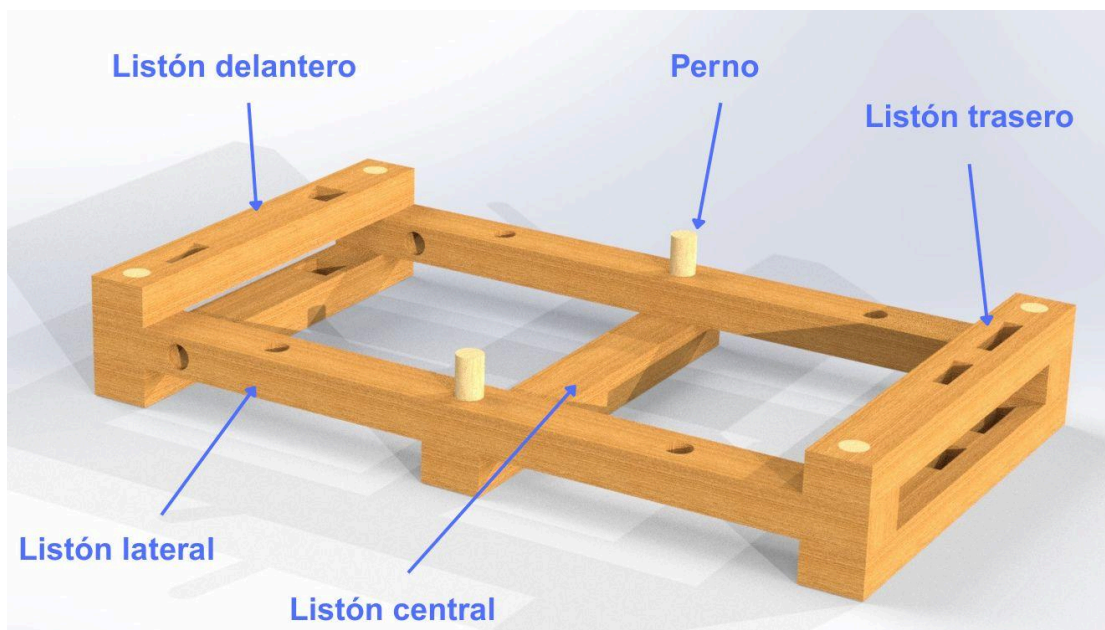


Figura 102: Base de la catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia.

Una vez creada la base, los siguientes elementos que elaboraron fueron el listón vertical y el soporte lateral a 45°. A la hora de elaborar el listón vertical se tuvo que hacer varias operaciones de corte ya que los croquis de estas operaciones tenían como planos caras diferentes. En cuanto al soporte lateral se tuvo que hacer también dos operaciones ya que los agujeros de los pernos están por un lado en sentido vertical para unirse a la base y por el otro, horizontal para conectar con el listón vertical, como se ve en la (Figura 103). Para unir el soporte lateral al listón vertical, se tuvo que crear un nuevo perno con mayor longitud, que es el que se aprecia paralelo a la base atravesando dos soportes laterales a cada lado.

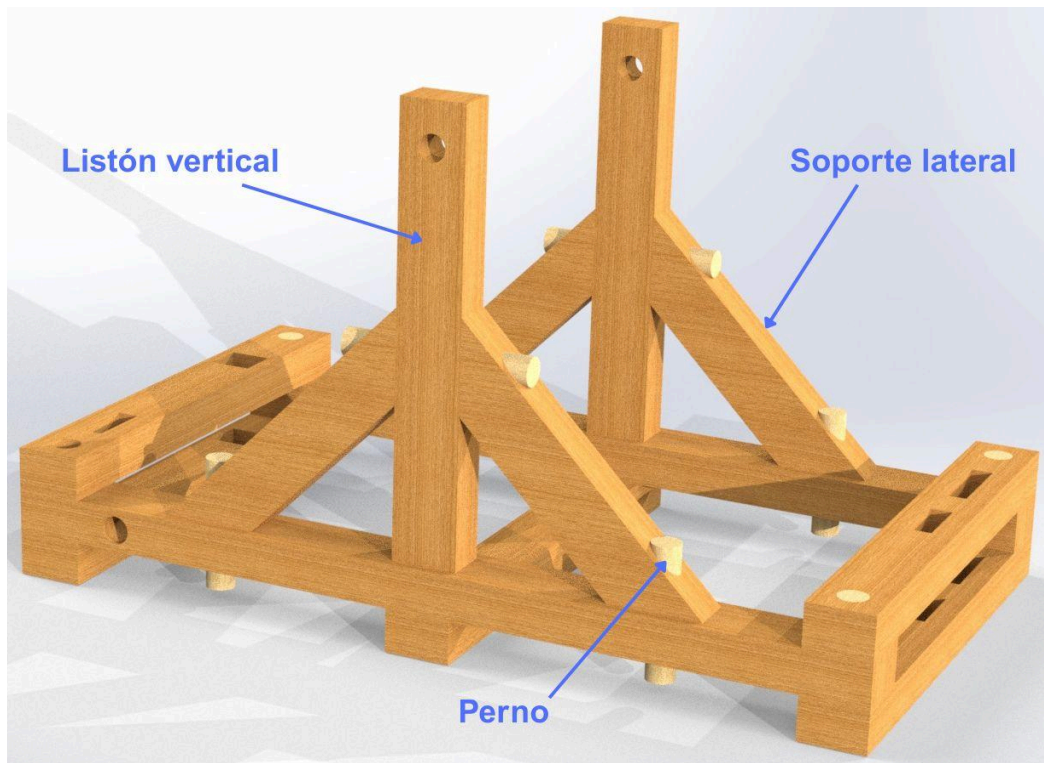


Figura 103: Ensamblaje de estructura catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia.

Los siguientes elementos que se elaboraron fueron los toques delanteros y traseros, encargados de frenar el brazo en el momento del lanzamiento. Para estos elementos solo se usó la operación de Extruir tras la elaboración de sus croquis.

Posteriormente se incluyó también en el ensamblaje los listones que acumulan la tensión con su propia torsión cuando se les aplica una fuerza. Para la elaboración de este elemento se hizo una extrusión y un corte para hacer la ranura donde se ubican las cuerdas, y finalmente se hace una operación de Flexionar que hace que este elemento se doble con un ángulo determinado para dar la impresión de estar bajo la tensión del cordaje.

La (Figura 104) representa los elementos mencionados incluidos en el ensamblaje del resto de piezas ya definidas.



Figura 104: Ensamblaje de topes de la catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia.

Tras la elaboración de estas piezas, se prosiguió con la elaboración del eje pasador del tambor, el freno del tambor y una pieza que fija el perno del freno, ya que el freno gira sobre ese perno para accionar el mecanismo. Las operaciones realizadas sobre estos elementos fueron extrusión y en el caso del fijador un corte con el diámetro del perno, estos elementos se ven representados en la (Figura 105).

Una vez se había elaborado el eje pasador del tambor y el freno del mismo; se modeló el tambor. Esta es la pieza con más operaciones de todo el ensamblaje. Se elaboró mediante operaciones de corte en diferentes planos generales, ya que es cilíndrico y no se pueden apoyar los croquis sobre caras planas. Estos agujeros fueron elaborados para el eje pasador, el brazo lanzador, y también para los pernos que fijan las cuerdas al tambor.

Además, se usó la operación de matriz circular para elaborar los cortes que conforman su rueda dentada que hace que el freno encaje perfectamente y pueda detener el mecanismo.

En la (Figura 106) se muestran estos elementos ensamblados junto con el resto de piezas.

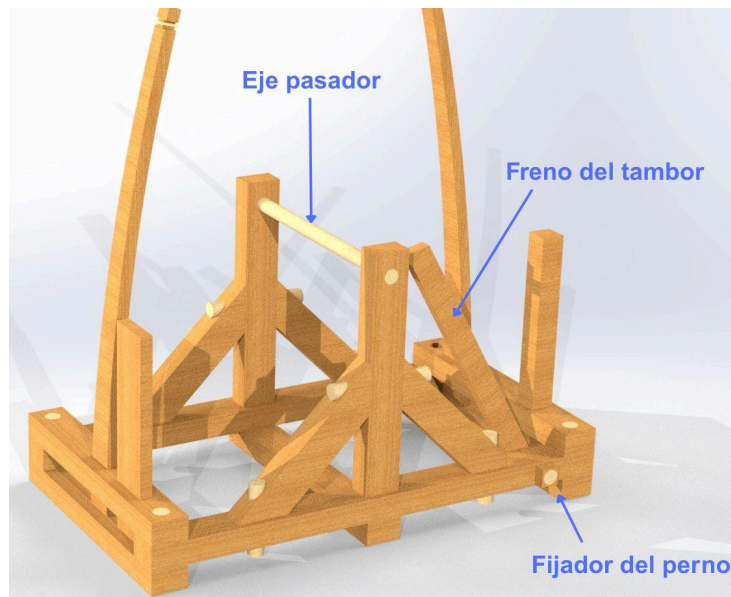


Figura 105: Ensamblaje del freno y el eje de la catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia.



Figura 106: Ensamblaje del tambor de la catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia.

El siguiente elemento que se modeló fue el eje del brazo lanzador, que consta de un cilindro. También se elaboró el portaproyectil, en el que se usaron diferentes operaciones de corte tras la extrusión y para terminar de definir la pieza se hizo un redondeo a las aristas de dentro del portaproyectil. Estos dos elementos se ven representados en la (*Figura 107*).

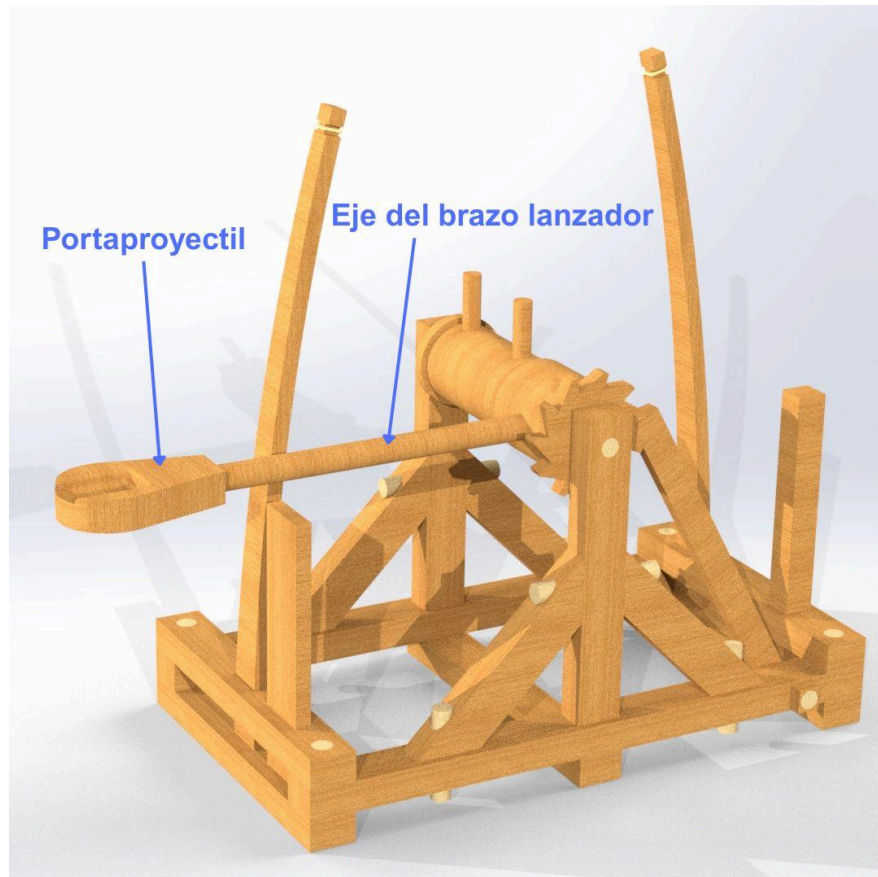


Figura 107: Ensamblaje del brazo lanzador de la catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia.

Para finalizar el modelado de esta pieza se generaron las diferentes cuerdas del mecanismo. Para dar impresión de cordaje a un volumen, se hace un barrido con torsión desde un croquis con cuatro semicírculos conectados que siguen un trayecto.

Es muy importante medir los contornos donde se ubican esas cuerdas para definir las trayectorias correctamente. No es lo mismo hacer una cuerda recta, cuyo croquis es una línea; una cuerda enrollada, cuyo croquis es una espiral; o una cuerda que rodea un elemento, cuyo croquis puede complicarse más o menos según la superficie o el contorno de la misma.

En la (*Figura 108*) se muestran los diferentes cordajes ensamblados en el tambor de cuerdas, donde se pueden apreciar su trenzado y la textura.

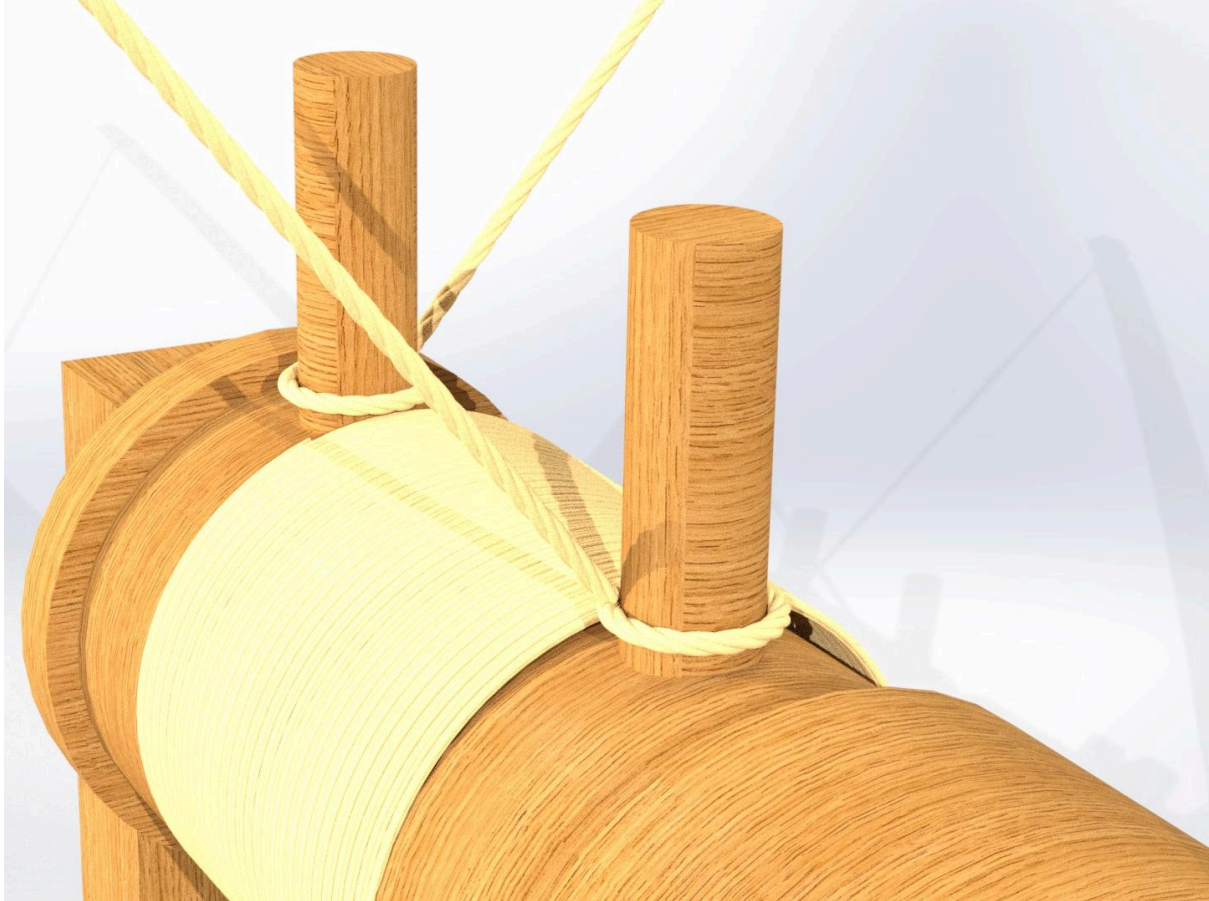


Figura 108: Ensamblaje de cuerdas de la catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia.

7.5. ELABORACIÓN DEL MODELO HÍBRIDO

En este apartado se detalla el proceso de modelado de una catapulta híbrida desarrollada en SolidWorks. A diferencia de los modelos anteriores, esta catapulta no está basada en un diseño histórico concreto, sino que representa una propuesta funcional que combina dos métodos de propulsión: la acumulación de energía mediante contrapeso y la torsión elástica generada por gomas enrolladas. Como en el caso del modelo de da Vinci, no se describen las operaciones realizadas para obtener las piezas, sino únicamente el orden seguido para su elaboración, y la representación de las mismas.

Este modelo fue diseñado como una maqueta funcional, cuyas dimensiones permiten su fabricación física. Los primeros elementos que se modelaron son los que conforman la base, como el listón inferior y el listón lateral, son elementos con una geometría básica. Estos elementos son representados en la (*Figura 109*).

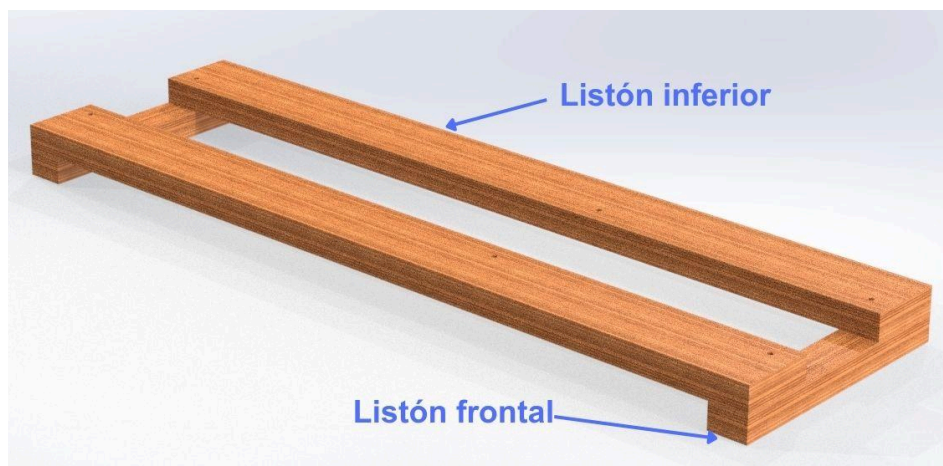


Figura 109: Representación de la base de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.

Los siguientes elementos que se crearon fueron el listón vertical y el soporte lateral. Estas piezas sí tuvieron operaciones de corte como es el caso del listón vertical en el que se hace una ranura donde va a ir ensamblado el eje del brazo lanzador. Estas piezas se muestran junto con las otras piezas de la base en la (*Figura 110*).

Posteriormente se elaboraron las demás piezas que conforman la estructura principal, estas son el listón lateral, el pilar del listón lateral y la tabla de apoyo, que por ella pasa el eje tambor de cuerdas.

Estos elementos constituyen el soporte principal sobre el que se asienta el sistema de lanzamiento y el mecanismo de torsión. El listón lateral y su pilar de apoyo son refuerzos

estructurales clave que mejoran la rigidez del conjunto. En la (Figura 111) se ve representado el ensamblaje de la estructura con las piezas creadas.

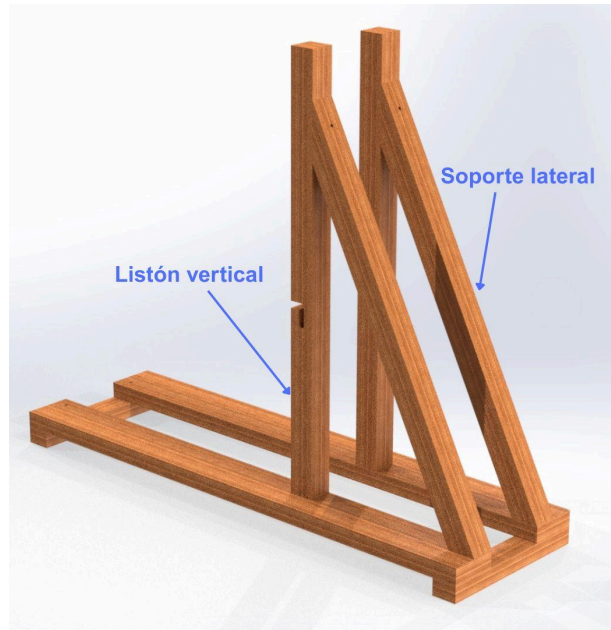


Figura 110: Base con listones verticales y soportes de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.

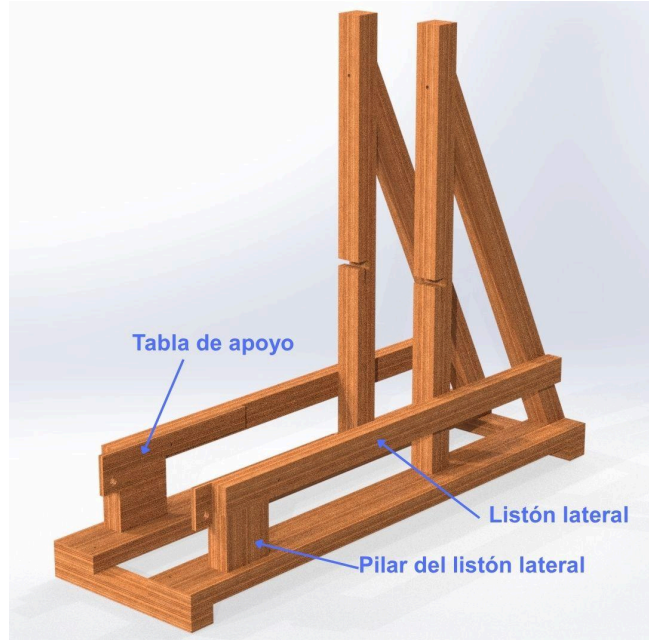


Figura 111: Estructura de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.

Una vez configurada la estructura, se crearon piezas como el eje del brazo lanzador, el brazo lanzador y el portaproyectil. Para definir estos elementos se usaron operaciones de extrusión y en el caso del portaproyectil también corte, para generar el vacío en el volumen generado donde se coloca el proyectil. El ensamblaje de estas piezas en la estructura se observa en la (Figura 112).



Figura 112: Ensamblaje del brazo de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se elaboraron los modelos correspondientes al eje trasero donde van las cuerdas que generan tensión. Estas piezas son el eje tambor de cuerdas, el freno del mecanismo, la rueda del freno y la rueda estabilizadora.

Estos elementos son las piezas clave del mecanismo, ya que mediante la rueda dentada y el freno, se detiene el movimiento y se genera la tensión necesaria para que el brazo se impulse con fuerza. Al mismo tiempo la fuerza estabilizadora sirve para equilibrar un eje que en su funcionamiento sufre de diversas aceleraciones y fuerzas que podrían romper el eje.

La (*Figura 113*) representa el ensamble de estas piezas en la parte posterior del modelo.

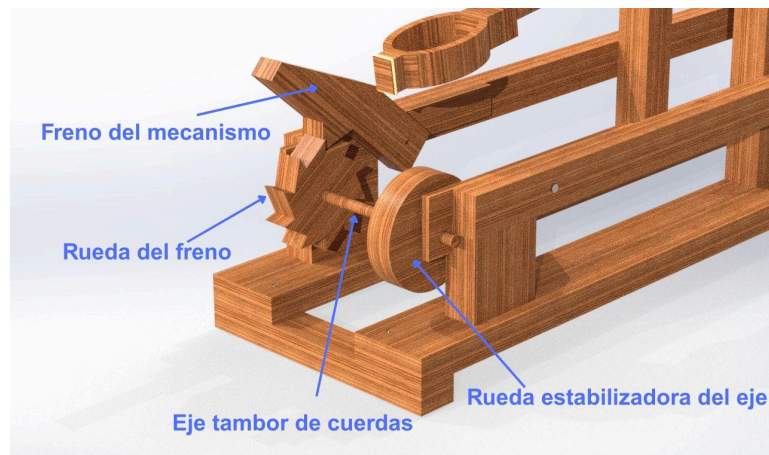


Figura 113: Ensamblaje del eje tambor de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.

Las siguientes piezas que se definieron fueron el contrapeso, que se elaboró con una forma ovalada para dar apariencia de piedra, las cuerdas que fijan el contrapeso y las del tambor; y finalmente los elementos de fijación usados en este modelo como los clavos. Estos elementos se ven representados en la (*Figura 114*).

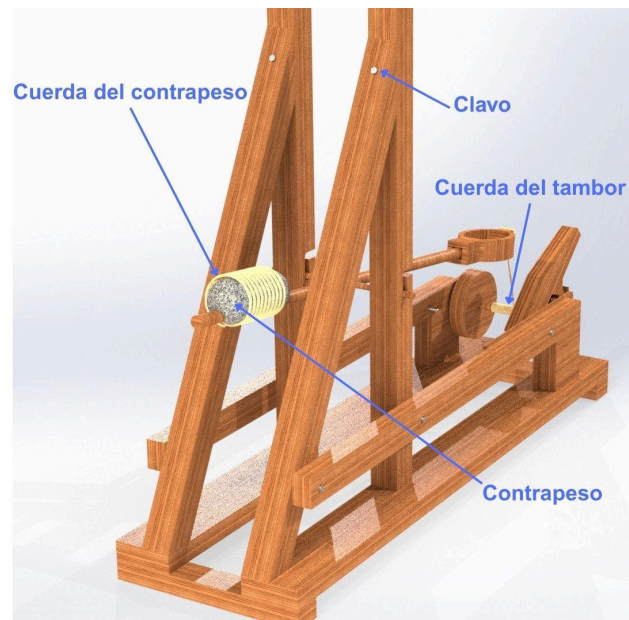


Figura 114: Ensamblaje de elementos de fijación de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.

Para terminar se elaboraron el tope del brazo lanzador y su refuerzo. En el momento de hacer este modelo físicamente, además de colocar un peso en el extremo del brazo lanzador, hay que colocar una goma elástica entrelazada entre el eje del brazo lanzador y el listón vertical.

Es muy importante no ensamblar con los clavos el tope ya que, para que esta goma elástica genere la tensión necesaria, se tiene que girar el brazo lanzador en sentido contrario al lanzamiento las veces que sean necesarias hasta notar suficiente resistencia. Posteriormente se ensambla el tope y ya queda definido el modelo. Estas últimas piezas se aprecian en la representación de la (*Figura 115*).

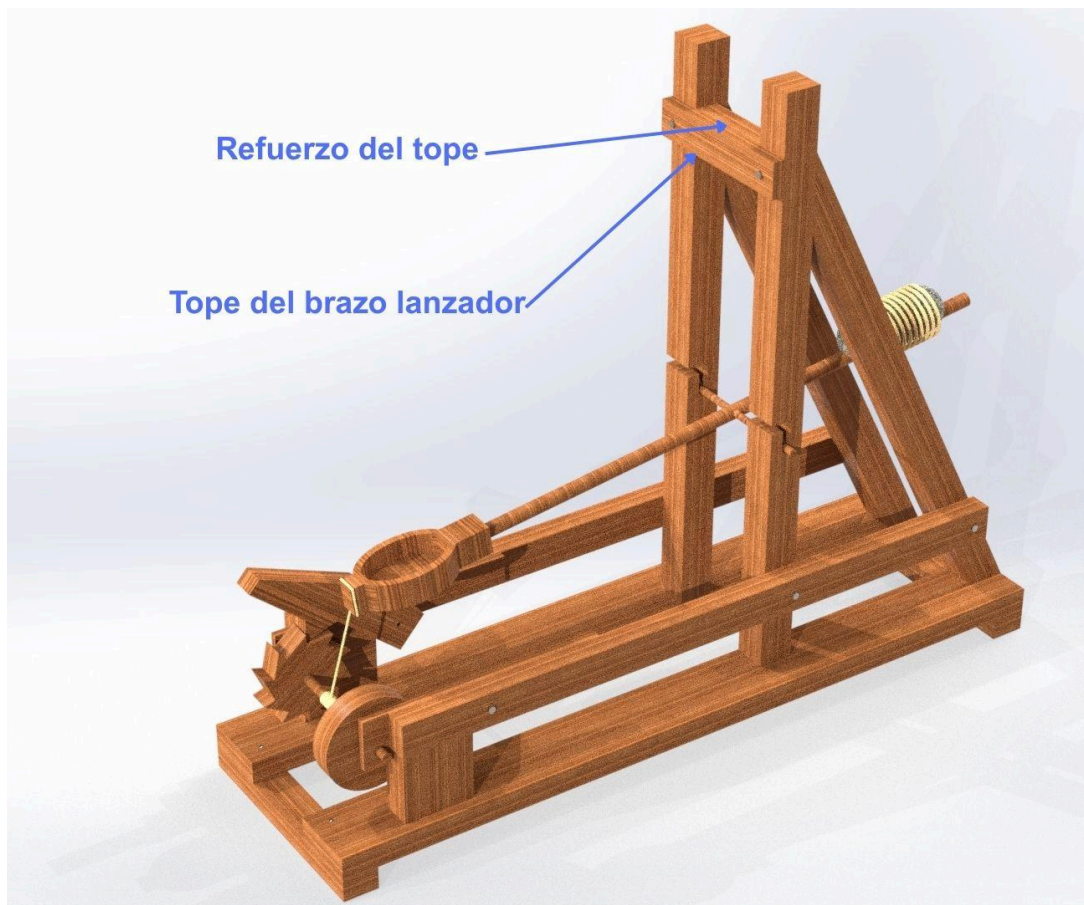


Figura 115: representación de ensamblaje de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.

7.6. REPRESENTACIÓN DEL MODELO Y HERRAMIENTAS DE RENDERIZADO

7.6.1. Interfaz del programa y uso de las herramientas de representación

En esta fase del modelado se intenta representar de la mejor forma posible las piezas y ensamblajes creados durante el proceso. Es clave realizar instantáneas o tomas donde se aprecien los detalles del modelo y de los diferentes materiales usados. Para lograr una buena representación, se recomienda aplicar apariencias, ajustar el entorno gráfico y activar sombras o gráficos según la cada vista.

El entorno de modelado de SolidWorks incluye una serie de herramientas específicas para la gestión de iluminación y cámaras, esto permite mejorar la percepción visual del modelo antes del renderizado. Mediante la inserción de focos direccionales, luces ambientales o reflectores, se pueden simular condiciones lumínicas más realistas, ajustando la intensidad, la dirección y la proyección de sombras sobre la superficie del modelo. La (Figura 116) muestra la ubicación en la interfaz del programa donde se accede a la configuración de luces y cámaras.

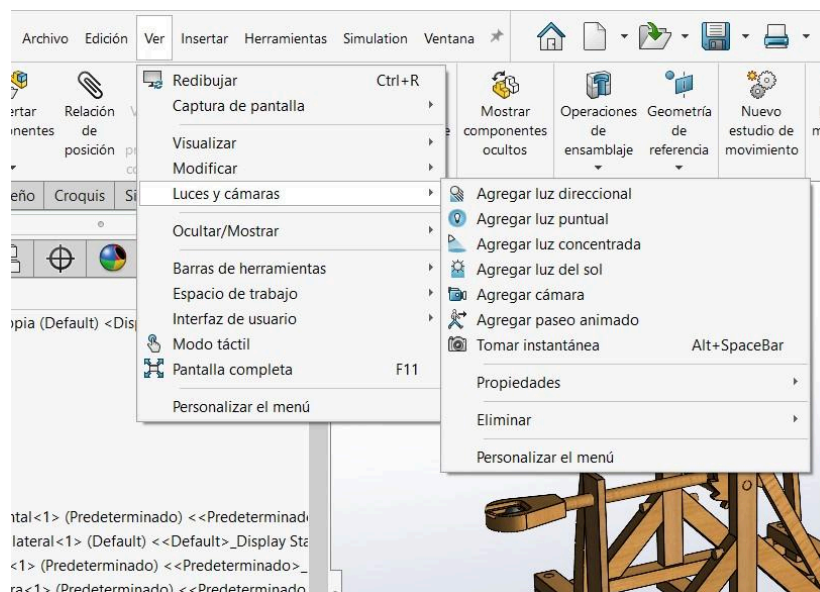


Figura 116: Ubicación de la configuración de luces y cámaras. Fuente: Elaboración propia.

En los distintos modelos se han aplicado luces antes de que se exporten al programa de renderizado. Es más fácil, rápido e intuitivo insertar estos elementos en el programa Solidworks y exportar el modelo con luces y cámaras ya definidas, además ayuda a una mejor visualización en etapas finales del modelado. Esto se debe a que el programa de renderizado consume más recursos gráficos y a veces es tedioso y algo lento ubicar y

definir cámaras y luces. Aunque el programa de renderizado pueda llegar a tener más parámetros y opciones que definen estos elementos, el programa Solidworks tiene lo suficiente para definir una representación suficiente.

En la (Figura 117) se observa un ejemplo de inserción de una luz direccional, donde puedes arrastrar tanto su ubicación como dirección con el ratón en la Ventana de trabajo y modificar una gran cantidad de parámetros en el Gestor de diseño.

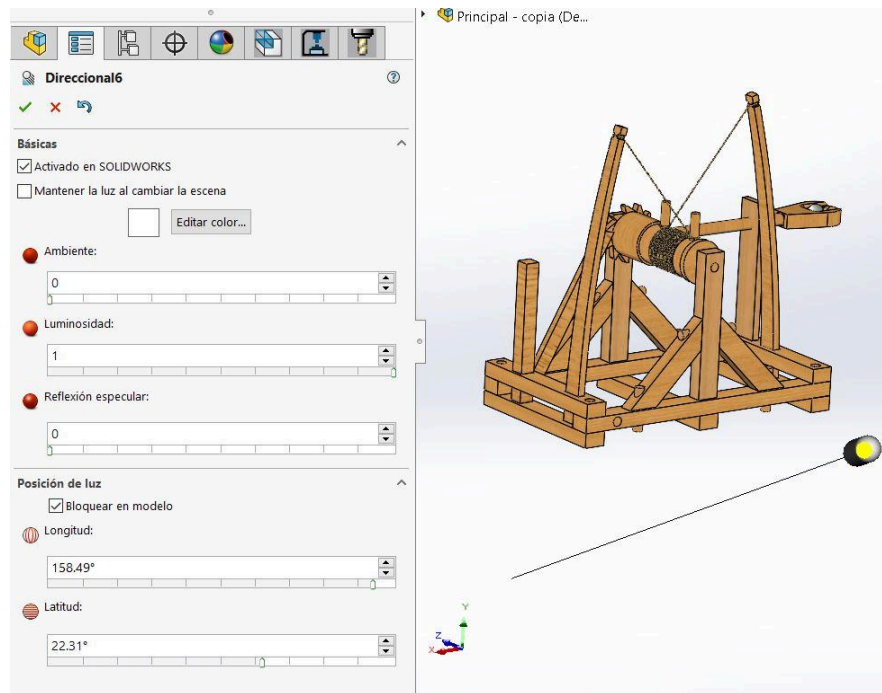


Figura 117: Inserción de luz direccional. Fuente: Elaboración propia.

Al mismo tiempo, configurar las cámaras facilita la captura de vistas personalizadas con control de perspectiva. Estas cámaras pueden posicionarse en ubicaciones estratégicas para mostrar detalles relevantes o generar composiciones visuales que mejoren la comprensión del conjunto. Las cámaras también pueden emplearse como punto de partida para secuencias animadas o para exportar imágenes con resolución predefinida. En los modelos creados han sido insertadas cámaras con vistas de detalles personalizados, cuyos parámetros también son exportados al programa de renderizado facilitando así el proceso de renderizado.

El programa de renderizado usado ha sido el SolidWorks Visualize, el cual se puede activar el Gestor de comandos si no está activado. Para ello se hace clic con el botón derecho del ratón sobre el Gestor de comandos, y en el desplegable Pestañas se selecciona.

Para exportar una pieza o un ensamblaje sólo se tiene que pulsar en la opción del Gestor de comandos sobre la opción Solidworks Visualize y hacer clic en Exportación sencilla o avanzada como se muestra en la (Figura 118), que determina la calidad del modelo exportado.

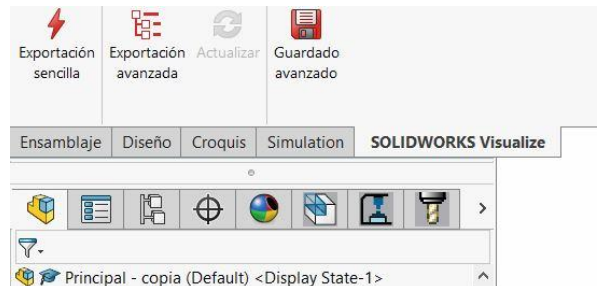


Figura 118: Entorno de Exportación a Visualize. Fuente: Elaboración propia.

SolidWorks Visualize es el software de renderizado que está vinculado al entorno CAD de SolidWorks, se usa para generar imágenes de alta calidad a partir de modelos tridimensionales. Es una herramienta que permite simular materiales aplicando texturas, recrear entornos, luces y cámaras con un nivel de realismo competente para presentaciones, documentación técnica o promocional.

Se destaca que todas las figuras de los tres diferentes modelos que son representadas en el proyecto y que no se aprecian como capturas de pantalla en el entorno de SolidWorks, han sido generadas en este programa con el fin de representar de una forma precisa la forma, estructura y texturas de los modelos.

Su interfaz está organizada de forma intuitiva en diferentes paneles que permiten gestionar materiales, escenas, cámaras y configuraciones de salida. La interfaz puede diferenciarse en la (Figura 119), donde se distinguen los diferentes paneles del programa.

Los diferentes paneles son representados en la figura con diferentes recuadros de colores, se distinguen de la siguiente manera:

- **Administrador de comandos.** Ubicado en el recuadro blanco en la parte superior de la pantalla. Ofrece el acceso a diferentes desplegables para editar parámetros, guardar y cargar de diferentes formas los archivos, parámetros del proyecto y un apartado de ayuda. El desplegable de herramientas ofrece diferentes herramientas de renderizado y el apartado para comenzar un nuevo renderizado desde la cámara que elijas.

- **Panel de configuración rápida.** Es el que está enmarcado en color rojo, permite acceder a funciones básicas del proyecto, como la selección de configuraciones activas, el control de entornos de iluminación, la vista de escena, el editor de cámaras y otras herramientas

esenciales que configuran la calidad del visualizado instantáneo en la ventana de trabajo según las necesidades del proyecto.

- **Panel de modelo.** El botón señalado en verde activa la vista y gestión de modelos importados. Desde aquí es posible acceder al árbol del modelo, seleccionar piezas específicas, modificar su visibilidad o agrupar componentes.

- **Panel de apariencias.** Está ubicado en el recuadro amarillo, este botón abre la biblioteca de materiales, tanto en local como en la nube. Los materiales están clasificados por categorías al igual que en SolidWorks (metales, plásticos, telas, vidrio, etc.), éstos se arrastran directamente sobre las superficies del modelo para aplicar texturas y acabados realistas. Esta función es clave para mejorar el aspecto final del render y reflejar fielmente los materiales de fabricación reales.

- **Panel de entornos.** En el recuadro azul se encuentra el acceso al panel de entornos, donde se pueden seleccionar fondos HDRI, controlar las diferentes luces de la escena y modificar la ambientación.

- **Panel de cámaras.** Está resaltado en morado, este botón abre el gestor de cámaras. Desde este panel es posible crear nuevas cámaras, modificar sus parámetros y establecer la vista activa.

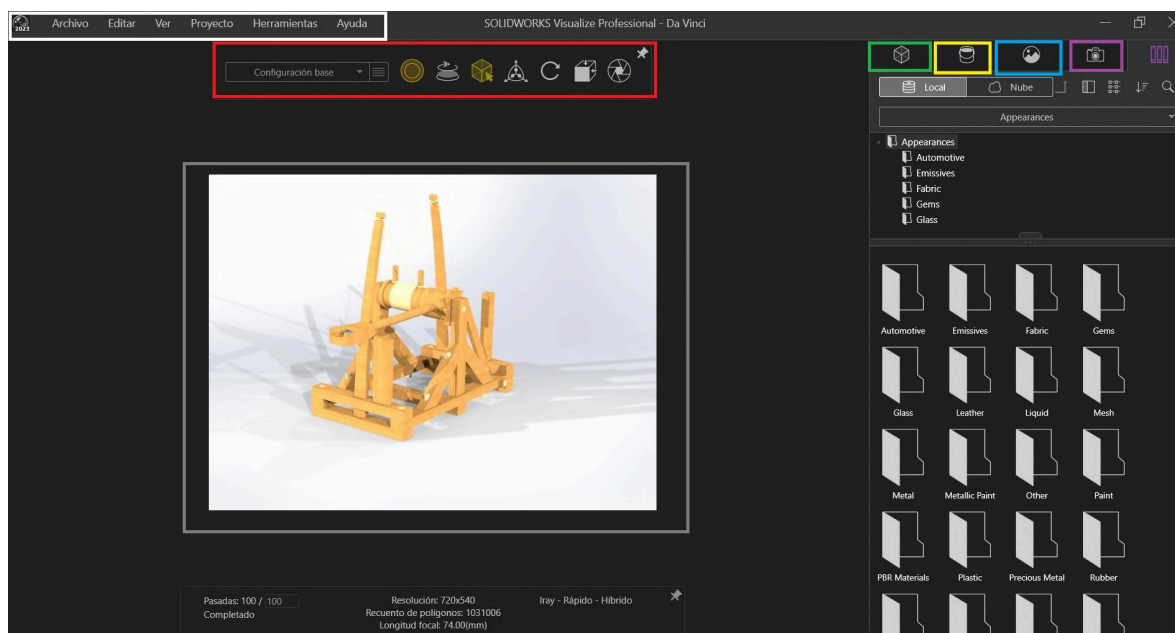


Figura 119: Interfaz de Solidworks Visualize. Fuente: Elaboración propia.

De estos paneles, los más usados en este proyecto son los de apariencias y entornos. Tanto las cámaras, luces y apariencias se conservan en el archivo tras la exportación, pero el programa Visualize ofrece más parámetros y herramientas para obtener resultados más realistas de las instantáneas de los modelos realizados.

Al entrar al apartado de apariencias y hacer clic sobre una que ya se ha importado, o sobre una nueva apariencia de la biblioteca del programa, se aprecian varios parámetros importantes que no ofrece Solidworks, como se presenta en la (Figura 120). Los parámetros pueden ser importados desde la biblioteca local como de la nube o de fuentes externas. Estos diferentes parámetros son:

- **Color.** Define el tono base del material aplicado. Puede seleccionarse a partir de una paleta RGB o mediante texturas de imagen.
- **Especular.** Controla la intensidad y el comportamiento de los reflejos en la superficie, es decir, cómo se reflejan las fuentes de luz.
- **Alfa.** Representa el grado de opacidad o transparencia de la superficie.
- **Relieve.** Permite simular irregularidades o texturas superficiales sin necesidad de modelar detalles adicionales. Esto se consigue mediante mapas de relieve que modifican la forma en que la luz incide sobre el objeto, generando sombras y volúmenes falsos.

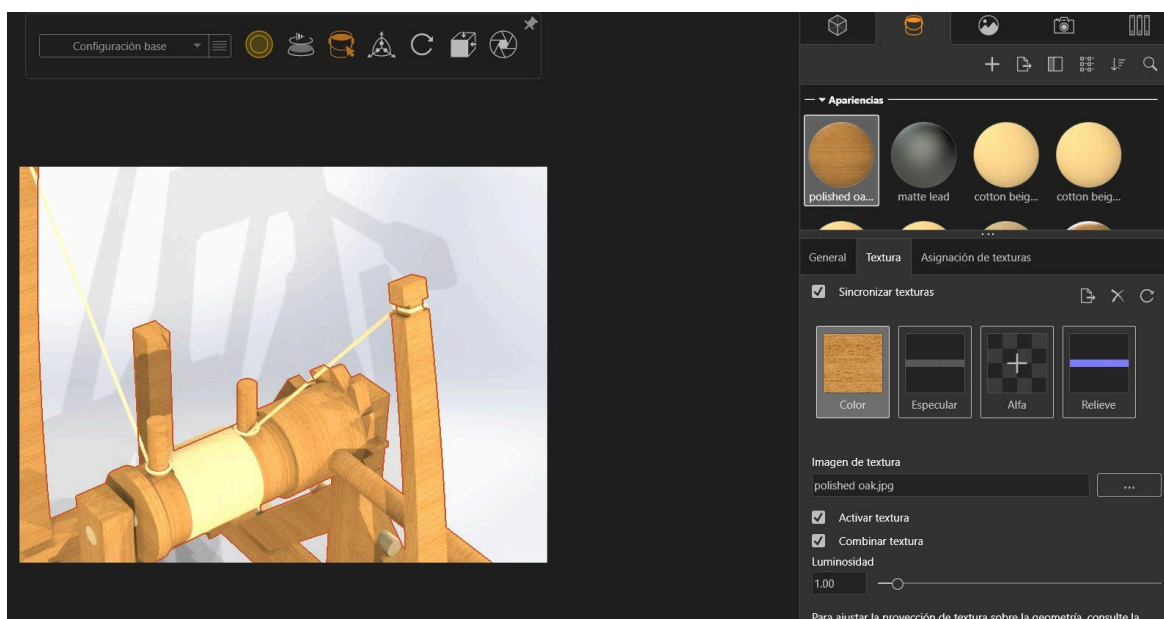


Figura 120: Panel de apariencias de Solidworks Visualize. Fuente: Elaboración propia.

El apartado Entorno en SolidWorks Visualize permite definir las condiciones ambientales que afectan al modelo, incluyendo la luz, los reflejos y el fondo de la escena. A través de este panel es posible incorporar distintos tipos de entornos HDRI, retroproyecciones o sistemas de iluminación personalizados, lo cual influye directamente en el realismo del renderizado final.

En el desarrollo del presente proyecto, el uso más relevante de este módulo ha sido la gestión de las luces en escena. Principalmente se ha trabajado con luces direccionales y puntuales, que han sido ubicadas estratégicamente en la escena para resaltar los elementos estructurales de las catapultas. La colocación adecuada de estas luces, así como la modificación de sus niveles de luminosidad, ha permitido obtener renders donde las sombras, brillos y materiales se aprecian con mayor definición.

La captura (*Figura 121*) muestra el menú desde el cual se añaden nuevas luces y entornos, así como los parámetros para definir una fuente direccional, donde se puede ajustar su intensidad, temperatura de color y visibilidad.

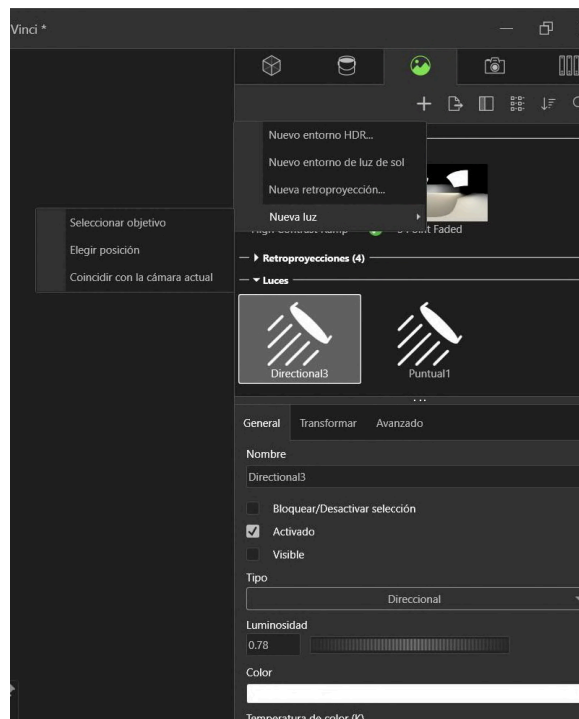


Figura 121: Panel de entorno de Solidworks Visualize. Fuente: Elaboración propia.

El proceso de generación de imágenes finales se lleva a cabo desde el apartado Herramientas, donde se accede al menú de renderizado. Esta interfaz permite definir

parámetros clave como la resolución de salida, el tamaño en píxeles o pulgadas y el método de cálculo a utilizar.

Tal como se aprecia en la (Figura 122), se ha seleccionado un formato de salida de 1440 × 1080 píxeles, con una resolución de 96 píxeles/pulgada, lo cual garantiza un nivel de detalle suficiente para este tipo de presentaciones sin comprometer el rendimiento del equipo. Desde este panel también se puede establecer el perfil de renderizado, ajustando tanto la calidad como el motor de render según los requisitos de cada escena.

La herramienta ofrece distintos modos de renderizado, como el preciso, rápido o vista preliminar. Los cuales pueden modificarse también para la visualización instantánea de la ventana de trabajo; ya que puedes trabajar sobre el modelo con un modo de renderizado que consuma menos recursos y luego modificar la calidad de renderizado para la generación de imágenes.

En la parte de la izquierda de la ventana de renderizado se puede acceder a otros parámetros. La primera ventana modifica el formato imagen y la ubicación de la carpeta de resultados. La tercera opción da acceso a los parámetros para crear animaciones o vídeos, en la siguiente opción se accede a los parámetros para crear animaciones en plato giratorio del modelo; y en la última opción se puede crear una animación con los efectos de la luz solar, como generar un *time-lapse*.

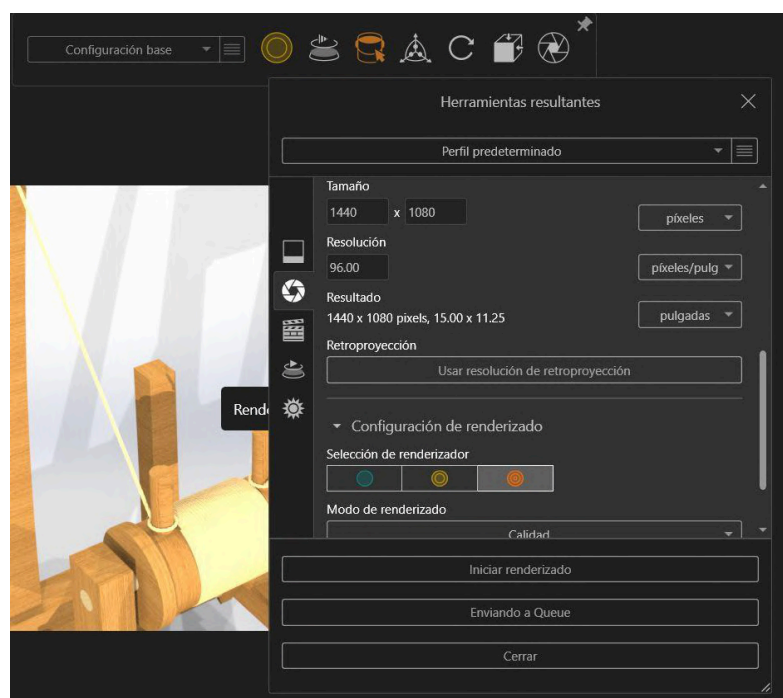


Figura 122: Panel de entorno de Solidworks Visualize. Fuente: Elaboración propia.

7.6.2. Representación de renders producidos

- **Catapulta tipo trebuchet**

La (*Figura 123*) muestra los detalles del eje del modelo, así como sus elementos de fijación y los diferentes elementos ensamblados..



Figura 123: Detalles del eje de la catapulta tipo trebuchet. Fuente: Elaboración propia.

En la (Figura 124) se observan los detalles de los diferentes materiales aplicados en el marco superior de la catapulta.



Figura 124: Detalle del marco superior de la catapulta tipo trebuchet. Fuente: Elaboración propia.

En la (*Figura 125*) se puede apreciar los detalles del extremo del brazo lanzador, como las cuerdas y los diferentes elementos de fijación.



Figura 125: Detalle de las cuerdas de la catapulta tipo trebuchet. Fuente: Elaboración propia.

La (*Figura 126*) representa una perspectiva donde se aprecian detalles del brazo lanzador, los ejes y el marco superior.



Figura 126: Detalles del brazo lanzador de la catapulta tipo trebuchet. Fuente: Elaboración propia.

- **Catapulta de Da Vinci**

En la (*Figura 127*) se aprecia el modelo desde una perspectiva inferior.

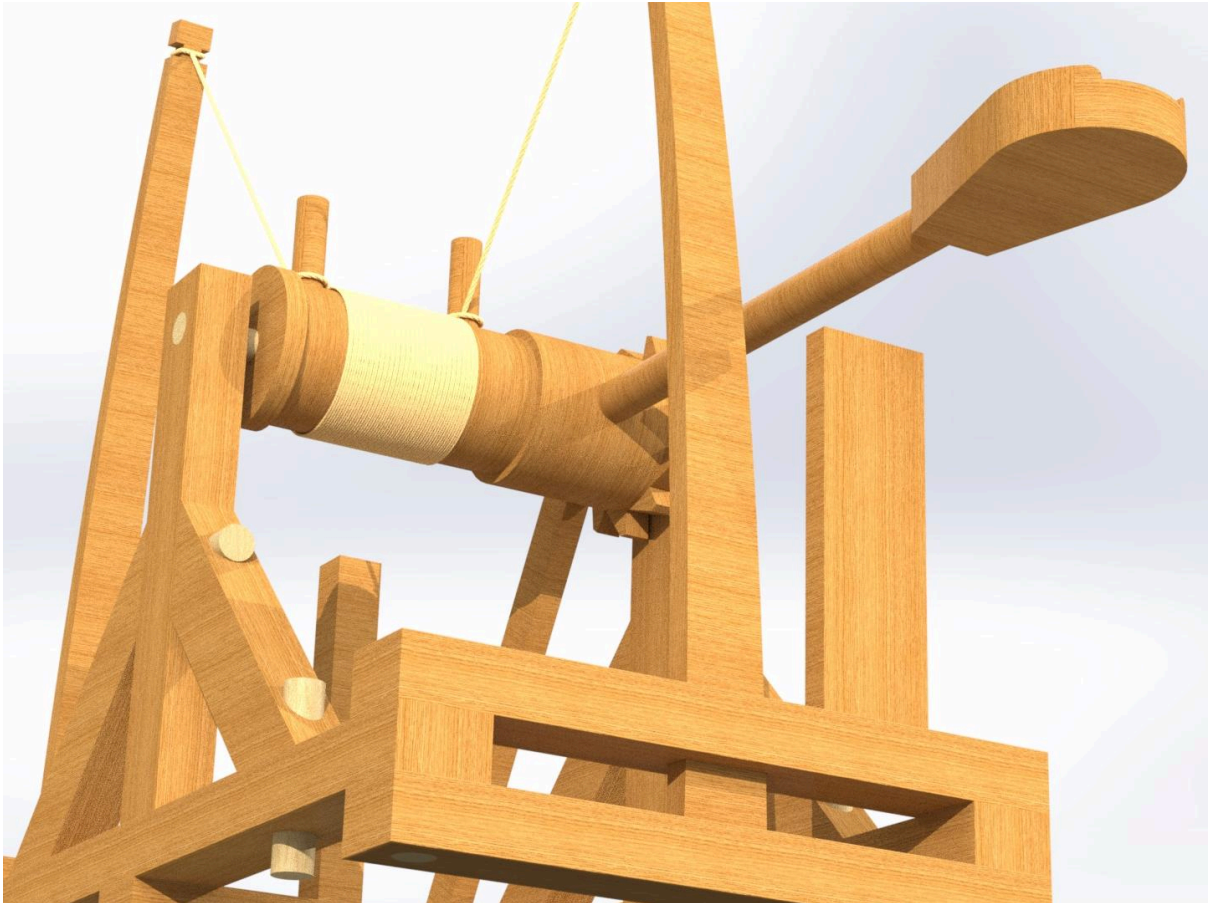


Figura 127: Detalles de la catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia.

La (*Figura 128*) muestra con detalle el tambor de cuerdas del modelo y la cuerda enrollada en el mismo.

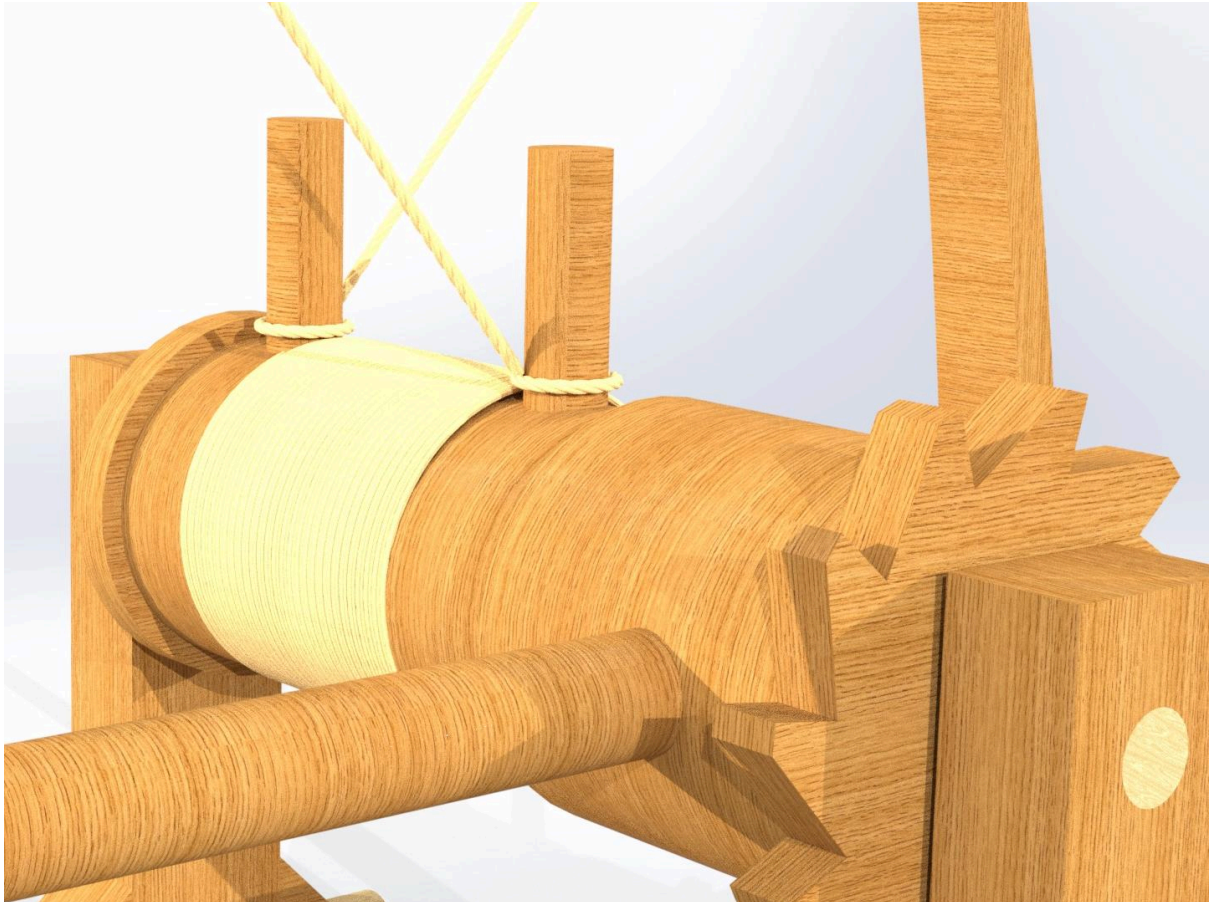


Figura 128: Detalles del tambor de la catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia.

En la (Figura 129) se observa el modelo desde una perspectiva superior, donde se distinguen los listones acumuladores de tensión y el tambor de cuerdas principalmente.



Figura 129: Vista superior de la catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia.

- **Catapulta híbrida**

En la (*Figura 130*) se aprecia el modelo desde una perspectiva inferior.



Figura 130: Vista inferior de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.

La (*Figura 131*) representa una vista superior de la parte posterior del modelo.

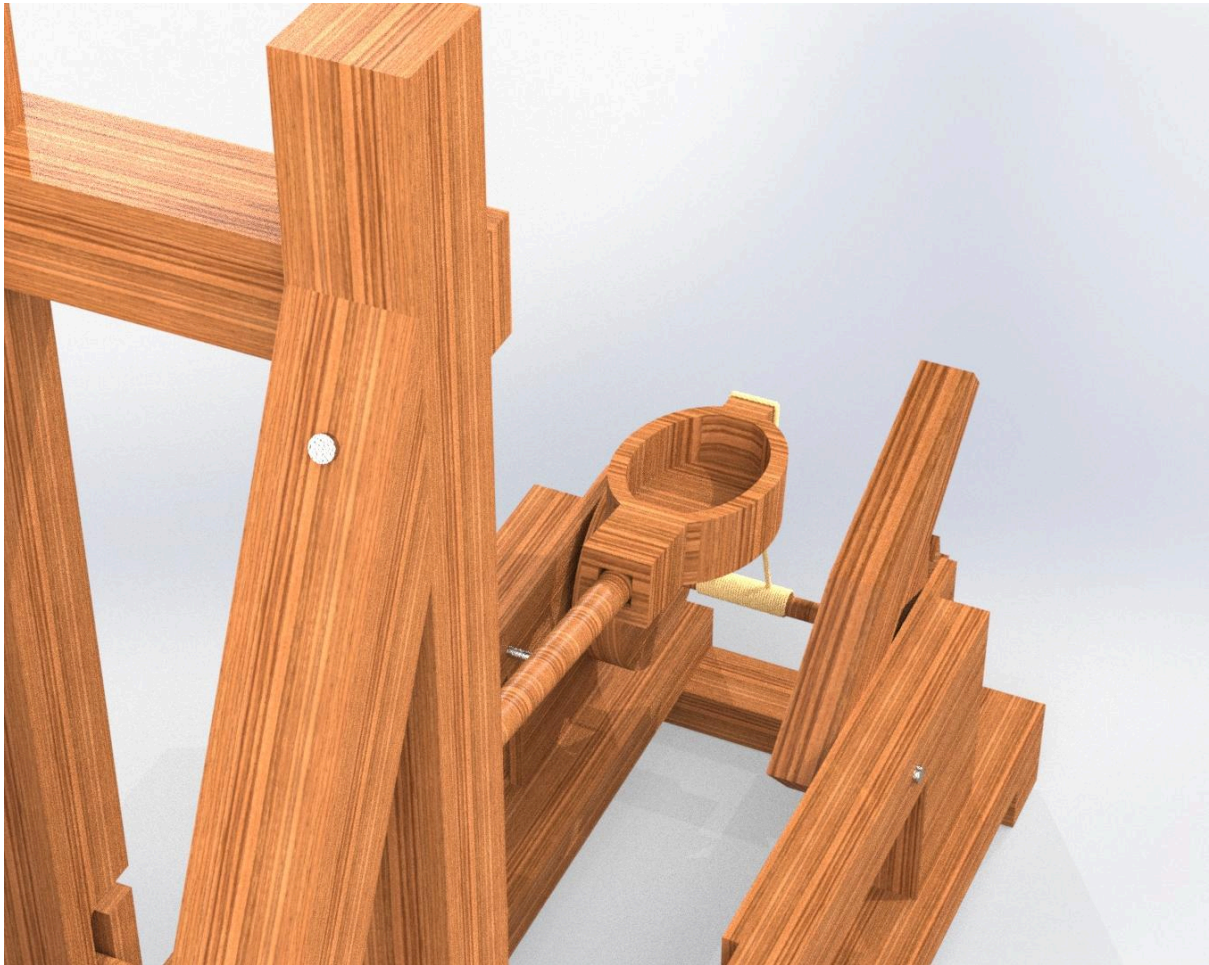


Figura 131: Vista superior de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.

En la (Figura 132) se muestran los detalles de la parte posterior del modelo, donde se distinguen el eje tambor y las cuerdas, así como el freno y la rueda del freno ensamblados.

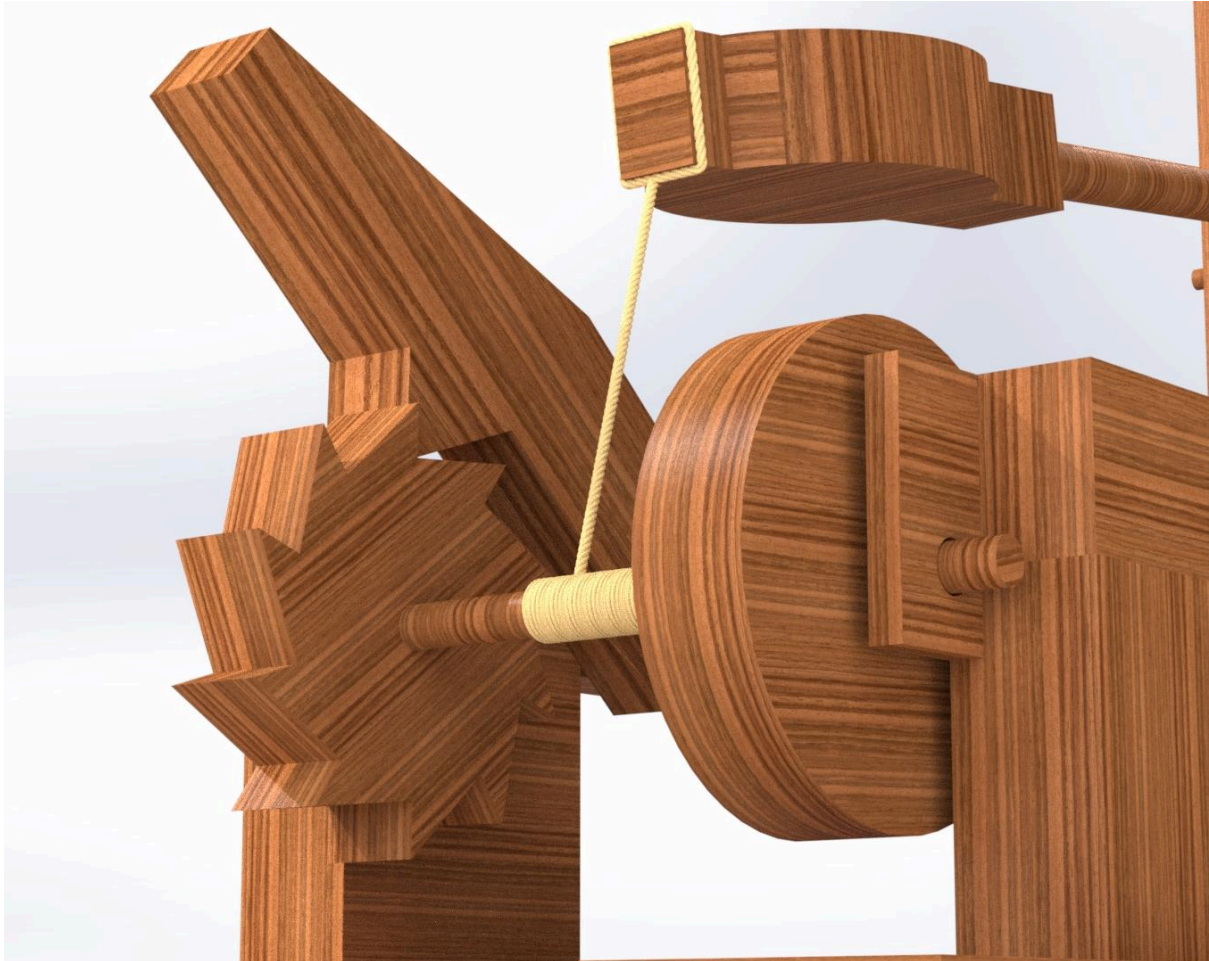


Figura 132: Detalle del tambor de cuerdas de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Tal y como se ha recogido en el presente trabajo, se ha realizado un estudio y recreación de diversos modelos históricos de catapultas, cumpliendo con los objetivos planteados al inicio del proyecto. A través de una investigación documentada, se ha podido conocer con mayor profundidad la evolución de las armas de guerra, teniendo en cuenta el papel que desempeñaron las catapultas en distintos períodos y culturas.

Al mismo tiempo, se ha realizado un análisis sobre los distintos tipos de catapultas históricas, clasificándolas según sus principios de funcionamiento y mecanismos de lanzamiento. Se han identificado las particularidades técnicas de cada modelo, así como los materiales y métodos de construcción más comunes en cada contexto histórico.

A partir de esta base teórica, el proyecto ha centrado su atención en tres modelos específicos: una catapulta tipo trebuchet, una catapulta inspirada en los diseños de Leonardo da Vinci, y una versión híbrida contemporánea. Estos modelos han sido estudiados en profundidad, valorando su comportamiento mecánico y su estructura.

Cada uno de estos modelos ha sido interpretado y representado en el entorno CAD de SolidWorks. La elaboración de los diseños en tres dimensiones ha permitido visualizar con precisión los diferentes componentes, sus ensamblajes y el orden constructivo, facilitando una clara interpretación del diseño de cada catapulta.

Otro de los aspectos destacables del proyecto ha sido su vinculación con la divulgación del Patrimonio Industrial. La posibilidad de integrar estos modelos en un museo virtual impulsado por la Universidad de Málaga contribuye a poner en valor los conocimientos técnicos del pasado desde una perspectiva actual, mediante herramientas digitales que permiten su estudio, difusión y comprensión.

Este proyecto ha supuesto también una oportunidad para reforzar las competencias en diseño asistido por ordenador, mejorando la autonomía en el uso del entorno CAD y ampliando la capacidad para abordar el modelado de sistemas mecánicos complejos.

En conjunto, este proyecto ha servido como un ejercicio práctico y teórico que ha reforzado conocimientos sobre historia, diseño mecánico y uso avanzado del software SolidWorks. La experiencia ha contribuido tanto al desarrollo de competencias técnicas como a una mayor valoración del legado tecnológico que, aunque muchas veces olvidado, sigue siendo base fundamental para comprender los avances de la ingeniería actual.



ANEXO I: EXPLOSIONADO DE MODELOS CON NUMERACIONES DE PIEZAS

- **Catapulta tipo trebuchet**

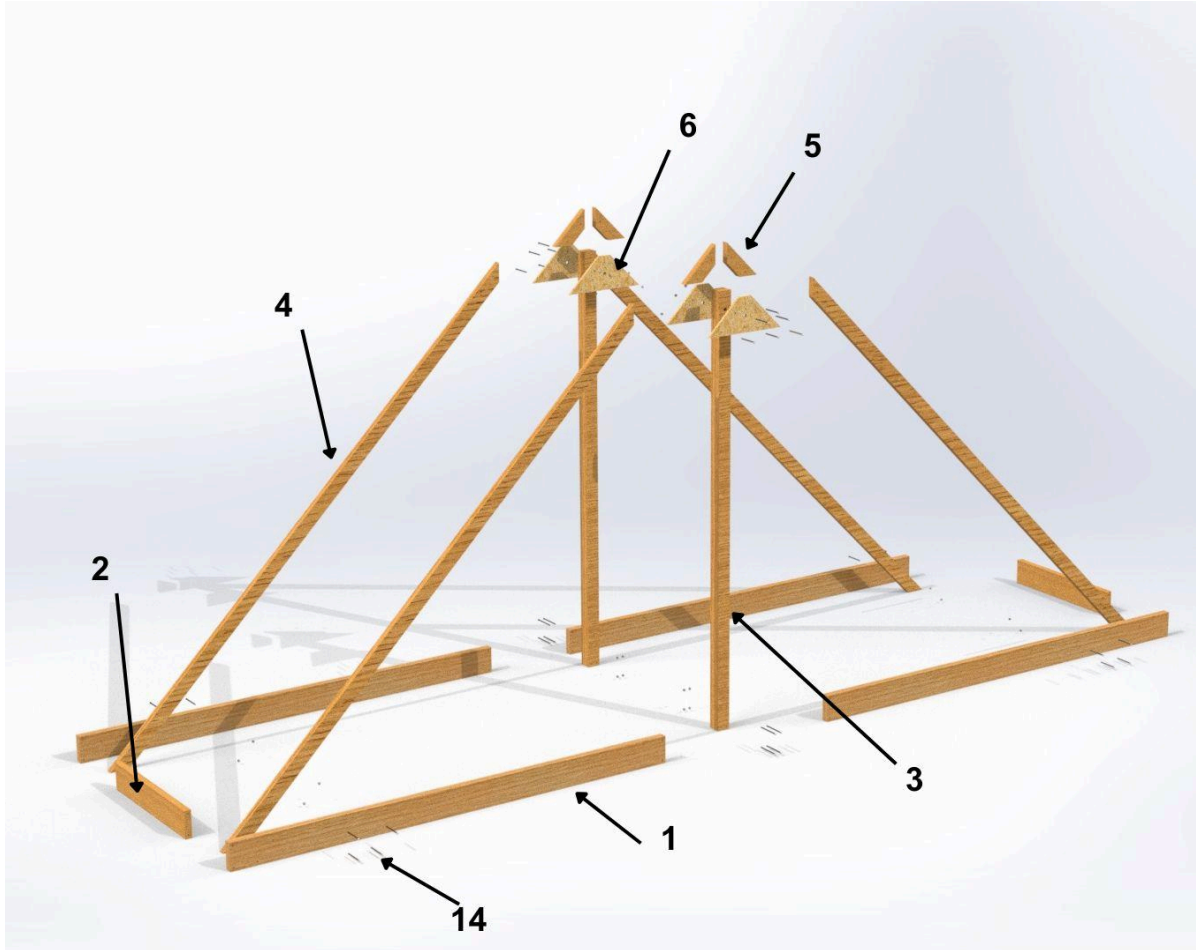


Figura 133: Explosionado numerado de la estructura de la catapulta tipo trebuchet. Fuente: Elaboración propia.

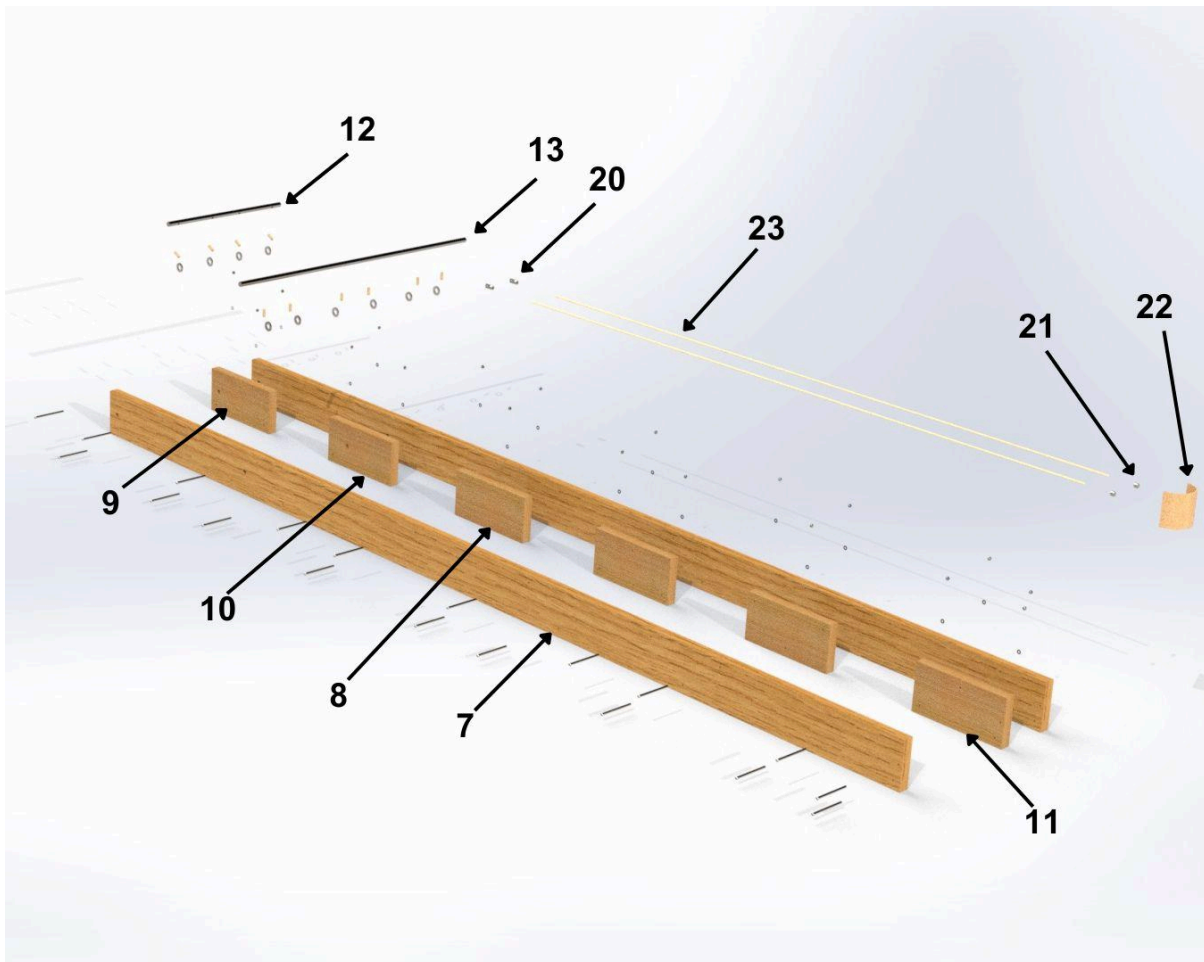


Figura 134: Explosionado numerado del brazo de la catapulta tipo trebuchet. Fuente: Elaboración propia.

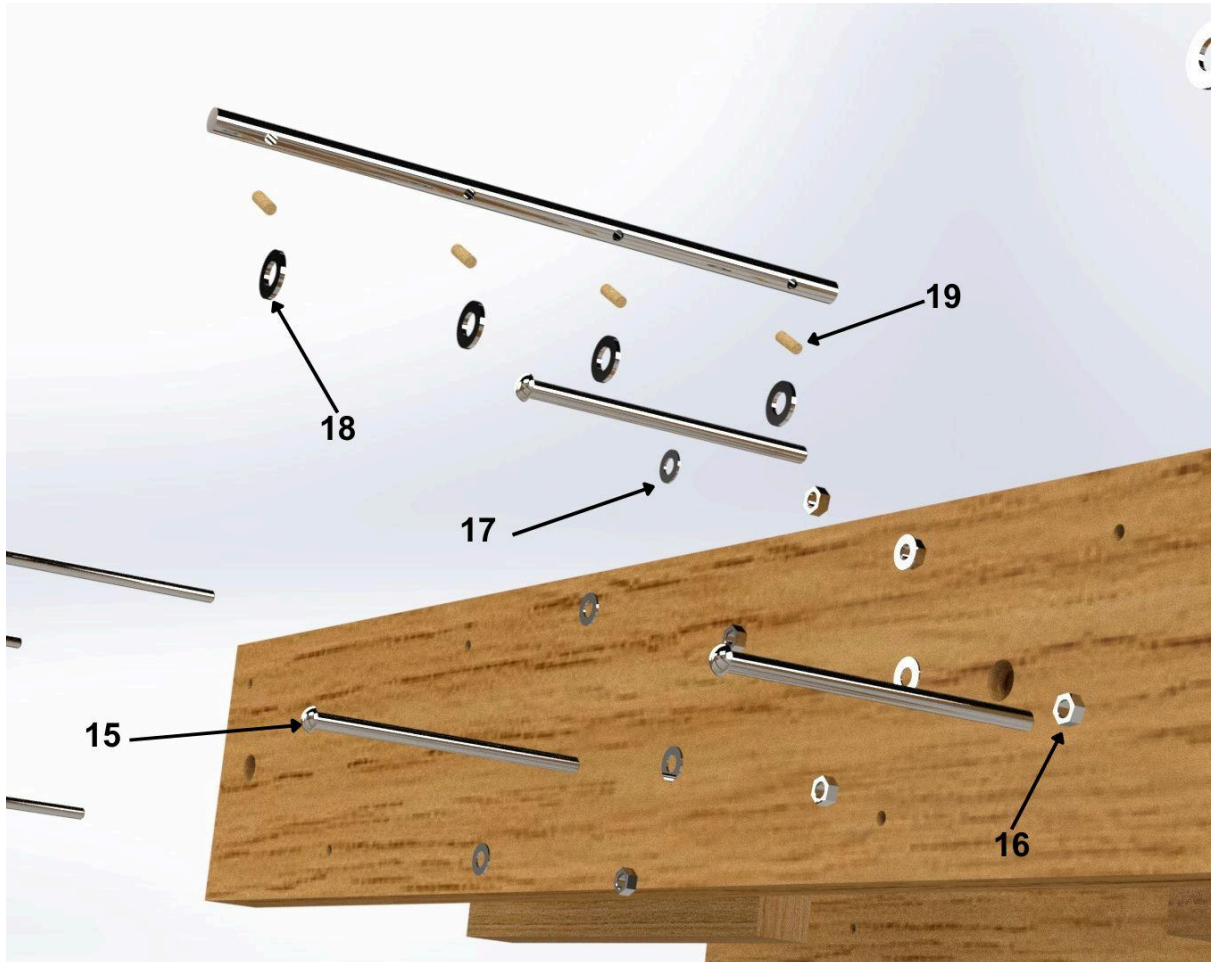


Figura 135: Explosionado numerado de elementos de fijación de la catapulta tipo trebuchet. Fuente: Elaboración propia.

Tabla de elementos de la catapulta tipo trebuchet

NÚMERO	TÍTULO DE LA PIEZA	CANTIDAD
1	LISTÓN LATERAL DE LA BASE	4
2	LISTÓN FRONTAL DE LA BASE	2
3	LISTÓN VERTICAL	2
4	SOPORTE LATERAL	4
5	BASTIDOR	4
6	PLACA LATERAL	4
7	LISTÓN DEL BRAZO LANZADOR	2
8	SEPARADOR DEL BRAZO	3
9	SEPARADOR DEL BRAZO CONTRAPESO	1
10	SEPARADOR DEL BRAZO EJE	1
11	SEPARADOR DEL BRAZO CUERDA	1
12	EJE DEL CONTRAPESO	1
13	EJE DEL BRAZO LANZADOR	1
14	PERNO DE FIJACIÓN CORTO	28
15	PERNO DE FIJACIÓN LARGO	27
16	TUERCA	47
17	ARANDELA	47
18	ARANDELA EJE	10
19	PERNO EJE	10
20	FIJADOR CUERDA BRAZO	2
21	FIJADOR CUERDA PROYECTIL	2
22	PORTAPROYECTIL DE CUERO	1
23	CUERDA	2
24	CONTRAPESO	1

- Catapulta de Da Vinci

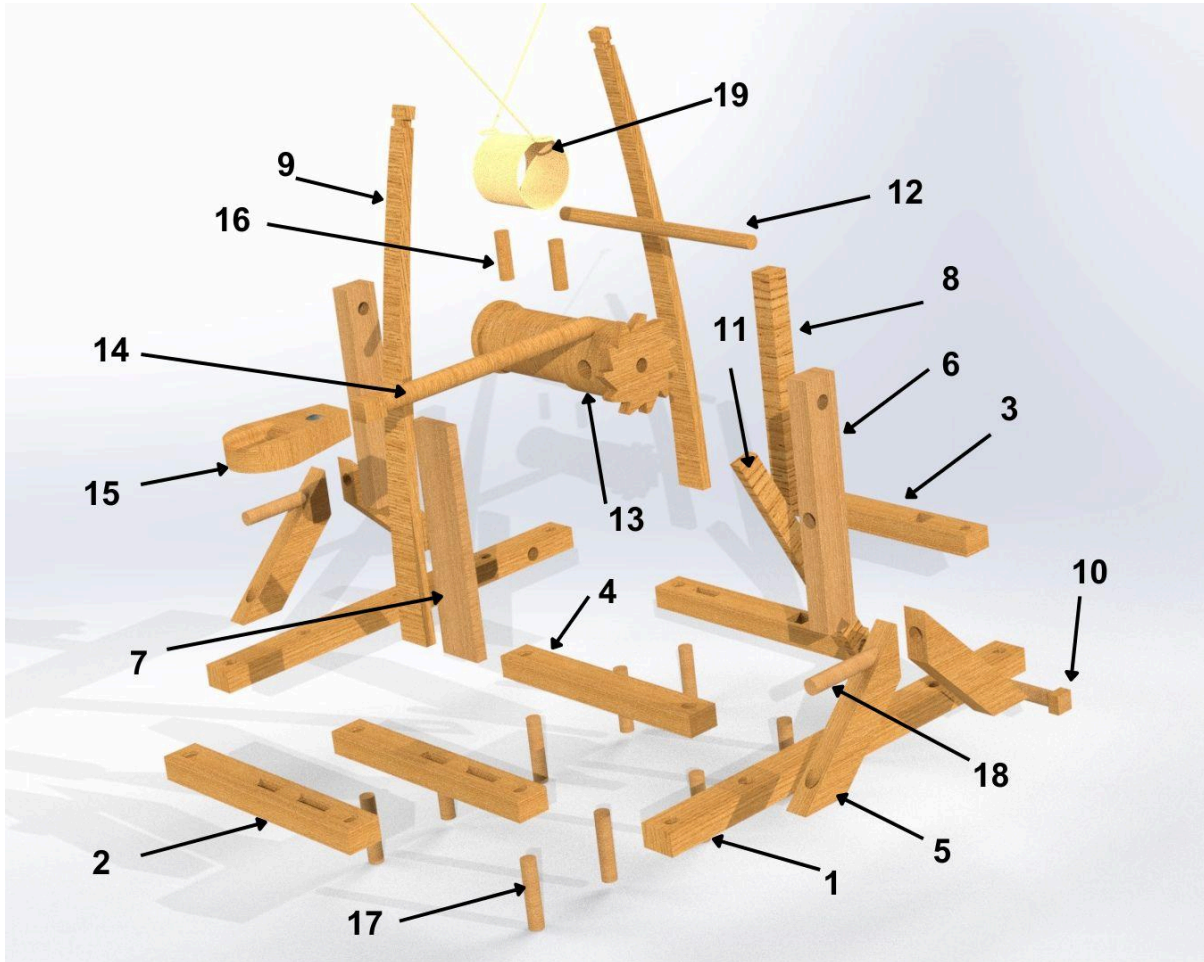


Figura 136: Explosión numerado de la catapulta de Da Vinci. Fuente: Elaboración propia.

Tabla de elementos de la catapulta de Da Vinci

NÚMERO	TÍTULO DE LA PIEZA	CANTIDAD
1	LISTÓN LATERAL DE LA BASE	2
2	LISTÓN DELANTERO DE LA BASE	1
3	LISTÓN TRASERO DE LA BASE	1
4	LISTÓN VERTICAL	2
5	LISTÓN CENTRAL DE LA BASE	1
6	SOPORTE LATERAL	4
7	TOPE DELANTERO	1
8	TOPE TRASERO	1
9	LISTÓN ACUMULADOR DE TENSIÓN	2
10	FRENO DEL TAMBOR	1
11	FIJADOR DEL PERNO	1
12	EJE PASADOR	1
13	TAMBOR DE CUERDAS	1
14	EJE DEL BRAZO LANZADOR	1
15	PORTAPROYECTIL	1
16	PERNO FIJADOR CUERDA	2
17	PERNO FIJADOR ESTRUCTURA	11
18	PERNO FIJADOR SOPORTE	2
19	CUERDA	1

- Catapulta híbrida

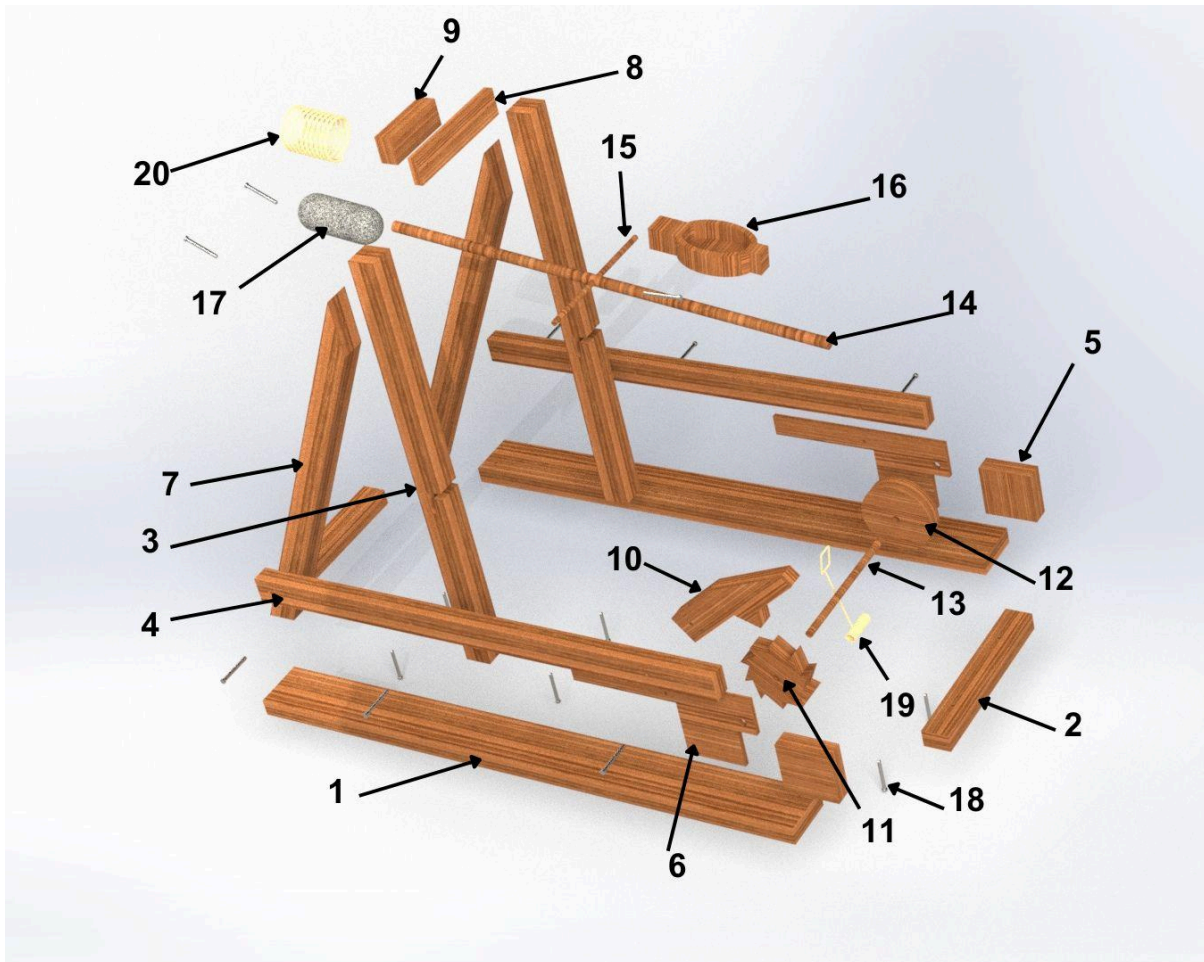


Figura 137: Explosionado numerado de la catapulta híbrida. Fuente: Elaboración propia.

Tabla de elementos de la catapulta híbrida

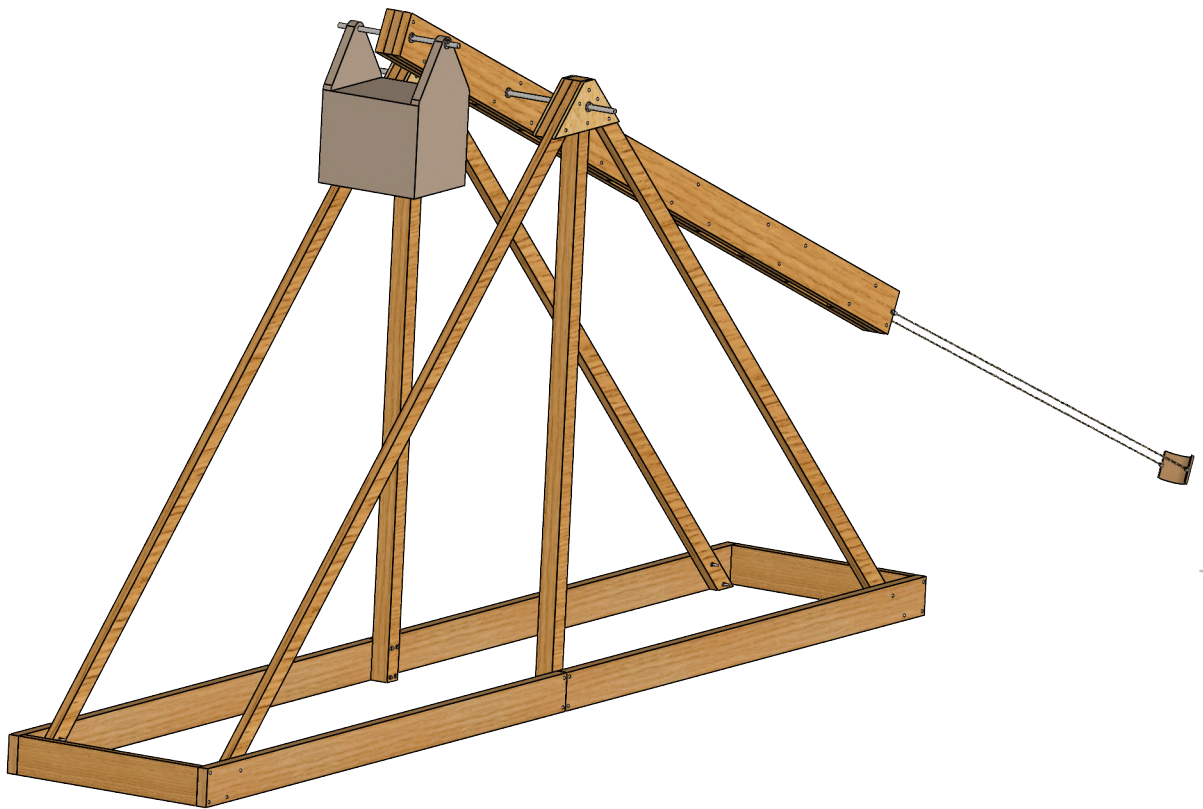
NÚMERO	TÍTULO DE LA PIEZA	CANTIDAD
1	LISTÓN INFERIOR DE LA BASE	2
2	LISTÓN FRONTAL DE LA BASE	2
3	LISTÓN VERTICAL DE LA BASE	2
4	LISTÓN LATERAL DE LA BASE	2
5	PILAR DEL LISTÓN LATERAL	2
6	TABLA DE APOYO	2
7	SOPORTE LATERAL	2
8	TOPE DEL BRAZO LANZADOR	1
9	REFUERZO DEL TOPE	1
10	FRENO DEL MECANISMO	1
11	RUEDA DEL FRENO	1
12	RUEDA ESTABILIZADORA DEL EJE	1
13	EJE TAMBOR DE CUERDAS	1
14	BRAZO LANZADOR	1
15	EJE DEL BRAZO	1
16	PORTAPROYECTIL	1
17	PIEDRA CONTRAPESO	1
18	CLAVO	16
19	CUERDA DEL TAMBOR	1
20	CUERDA DEL CONTRAPESO	1



ANEXO II: PLANOS



PLANOS DE LA CATAPULTA TIPO TREBUCHET



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

TÍTULO:

ENSAMBLAJE PRINCIPAL

ESCALA:
1:8

NÚMERO:
0

FIRMA:

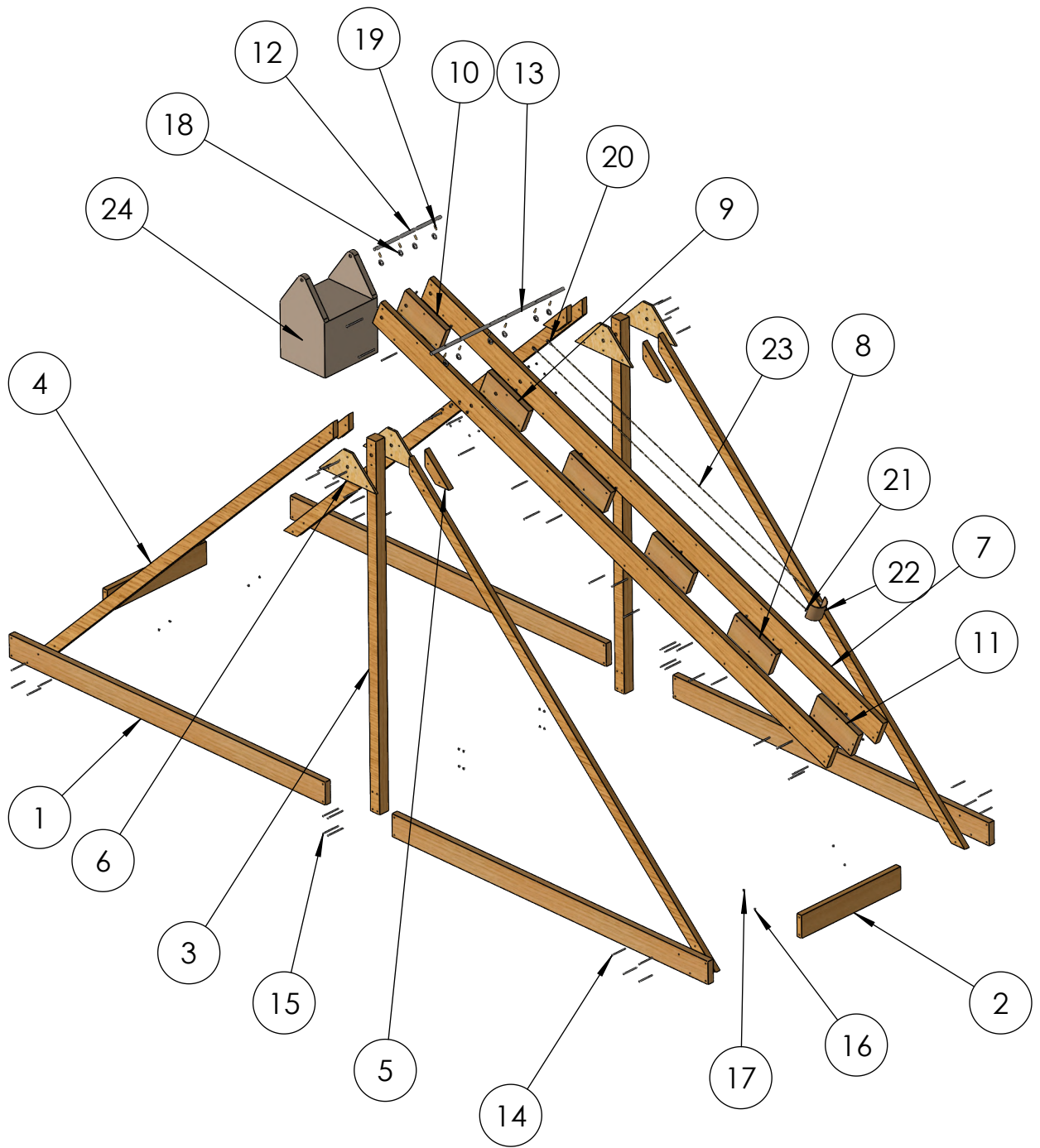
DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE



TAMAÑO DE HOJA:
A4

FECHA:
22/06/2025

HOJA:
1



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

TÍTULO:

EXPLOSIONADO NUMERADO

ESCALA:

1:10

NÚMERO:

0

FIRMA:

DIBUJADO POR:

PABLO MARTÍN BASALLOTE



TAMAÑO DE HOJA:

A4

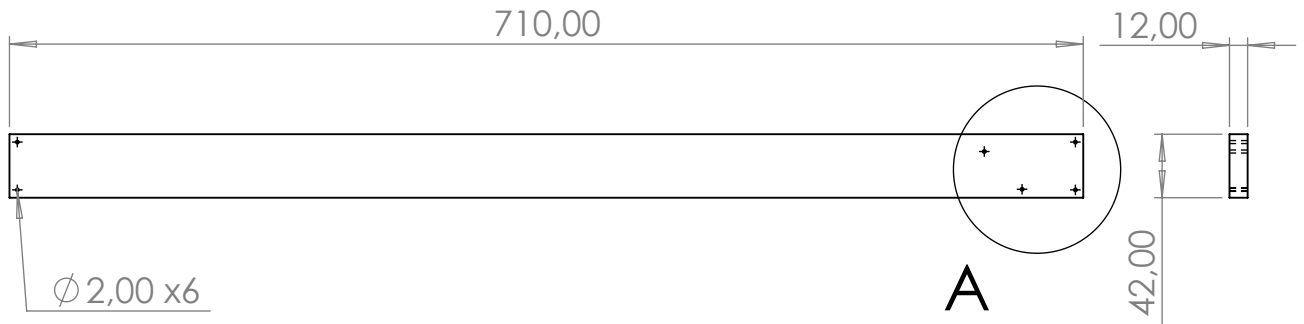
FECHA:

22/06/2025

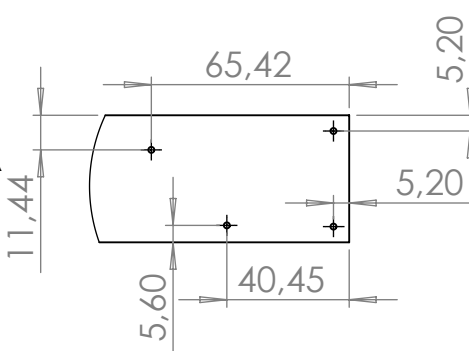
HOJA:

2

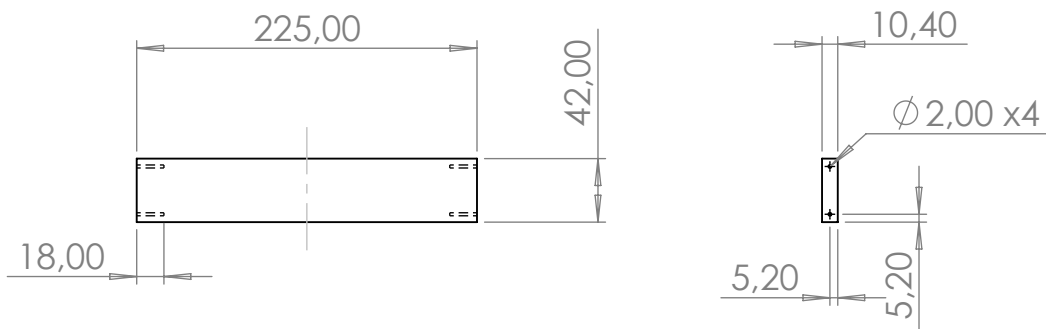
LISTÓN LATERAL DE LA BASE



DETALLE A
ESCALA 2 : 5



LISTÓN FRONTAL DE LA BASE



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:
LISTÓN LATERAL Y LISTÓN FRONTAL DE LA BASE

ESCALA:
1:5

NÚMERO:
1-2

FIRMA:

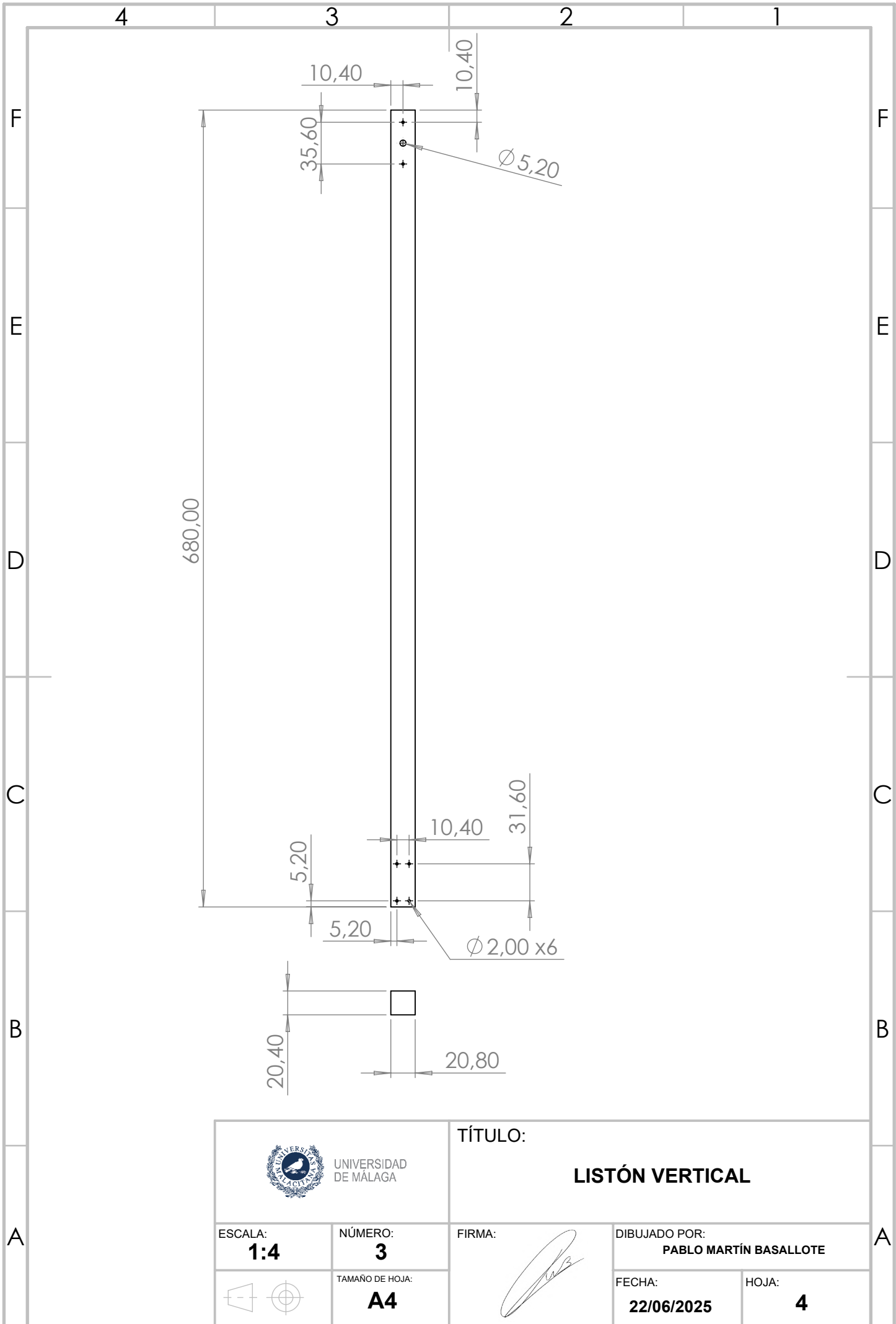
DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE



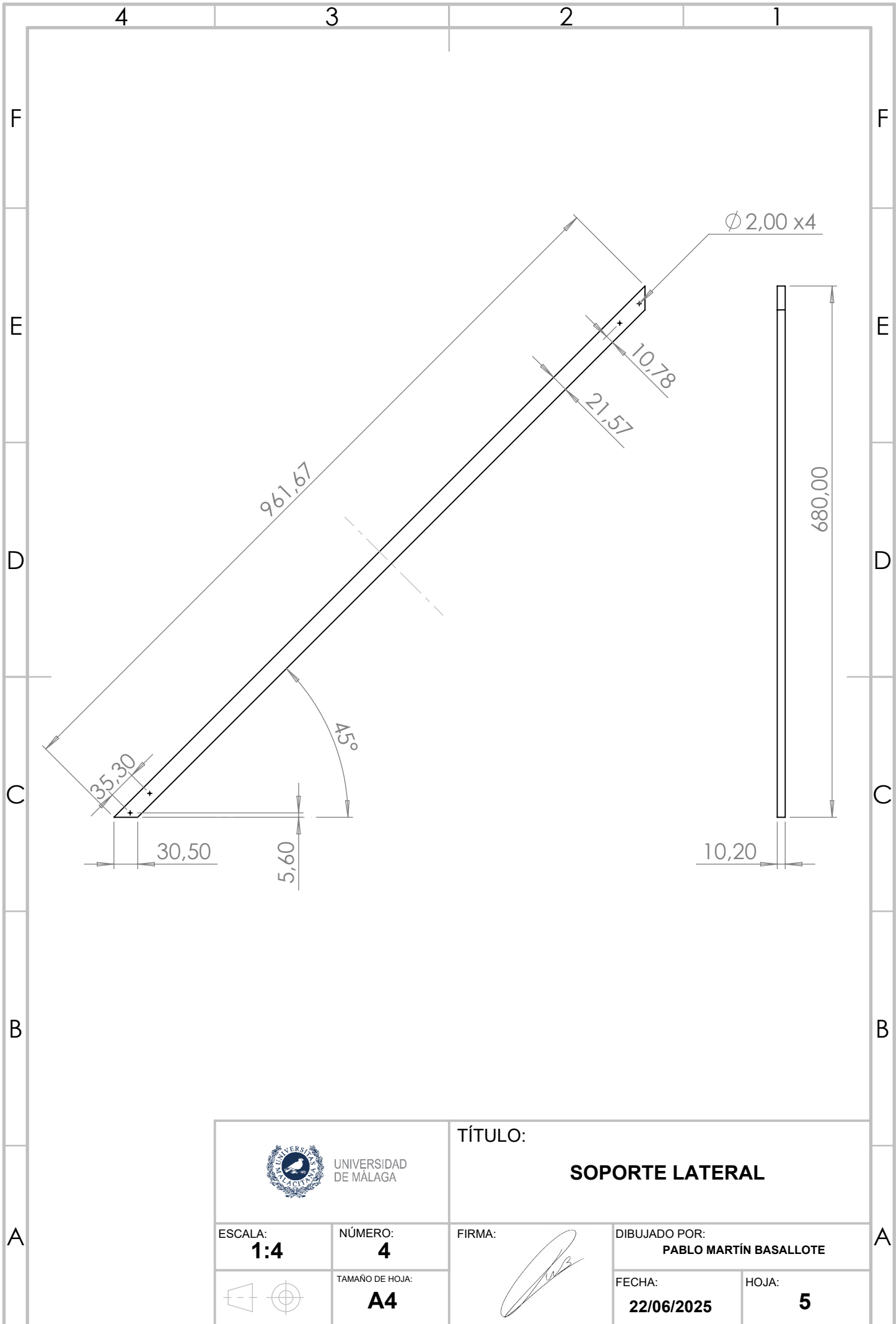
TAMAÑO DE HOJA:
A4

FECHA:
22/06/2025

HOJA:
3



 UNIVERSIDAD DE MÁLAGA		TÍTULO:	
		LISTÓN VERTICAL	
ESCALA: 1:4	NÚMERO: 3	FIRMA: 	DIBUJADO POR: PABLO MARTÍN BASALLOTE
 TAMAÑO DE HOJA: A4			FECHA: 22/06/2025



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:

SOPORTE LATERAL

ESCALA:
1:4

NÚMERO:
4

FIRMA:

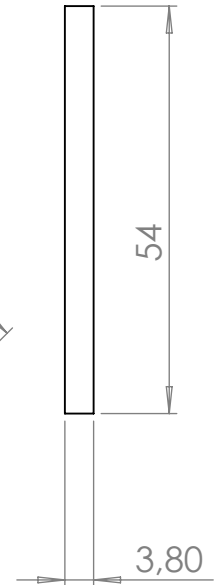
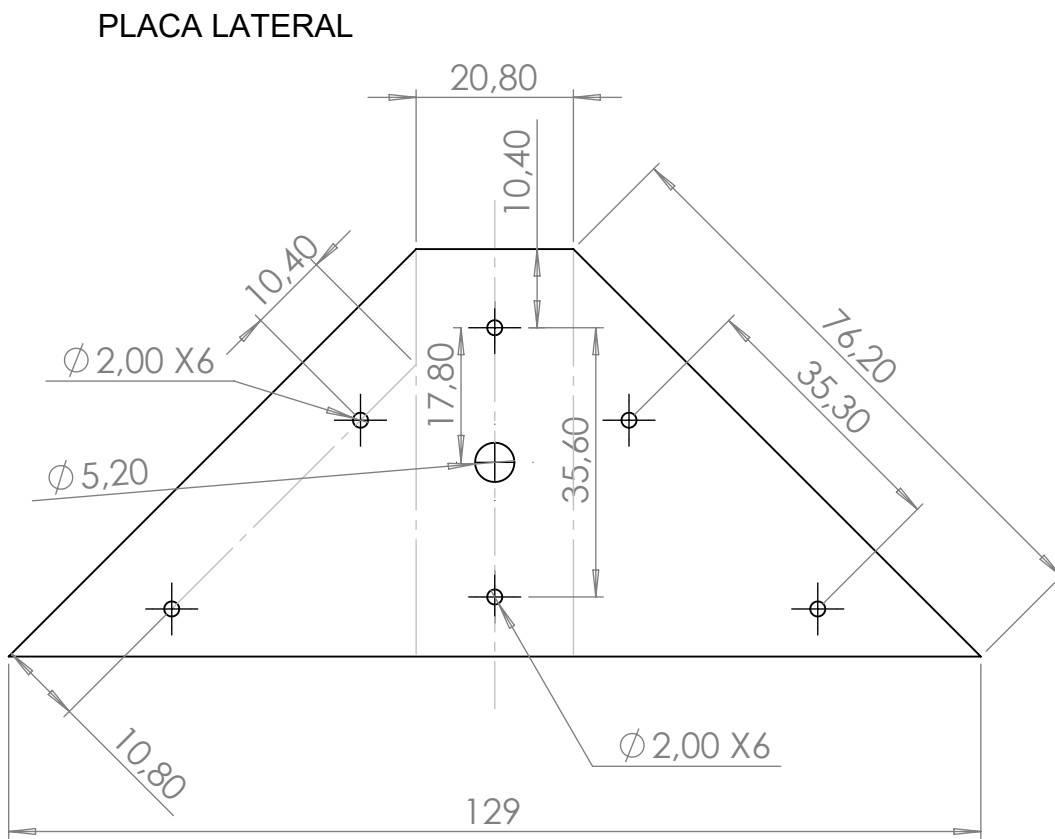
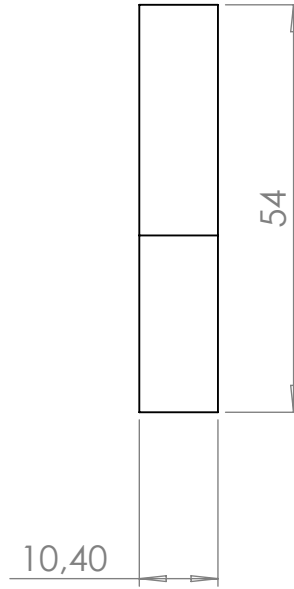
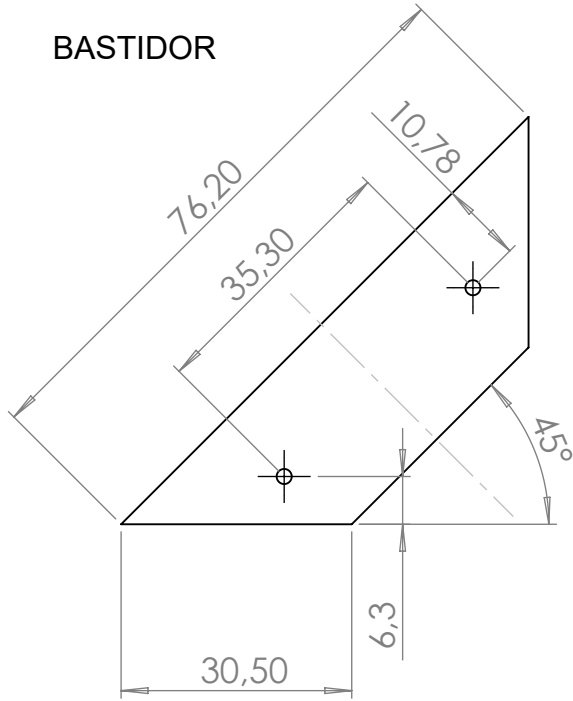
DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE



TAMAÑO DE HOJA:
A4

FECHA:
22/06/2025

HOJA:
5



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:

BASTIDOR Y PLACA LATERAL

ESCALA:
1:1

NÚMERO:
5-6

FIRMA:

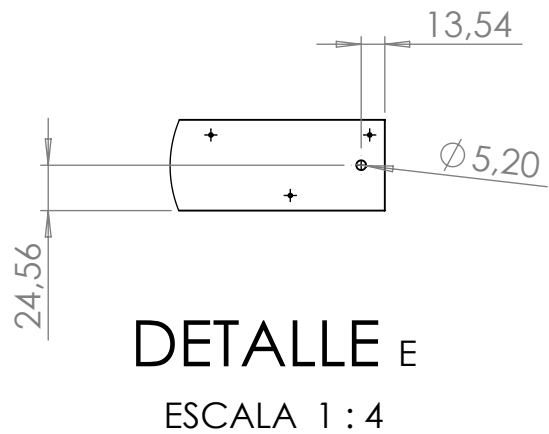
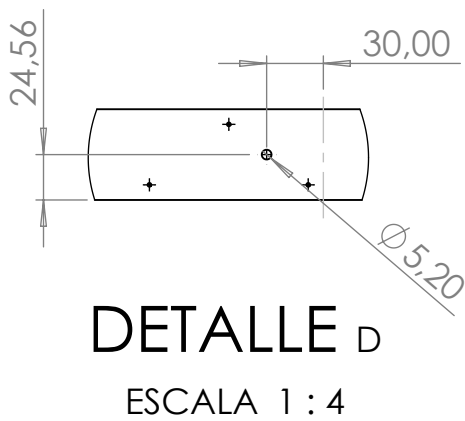
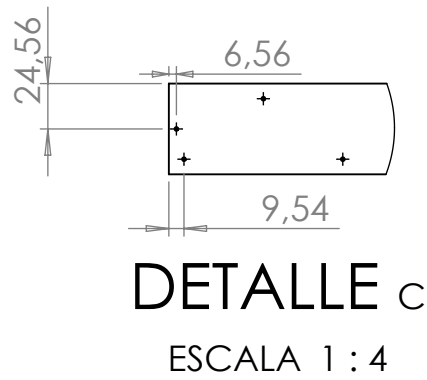
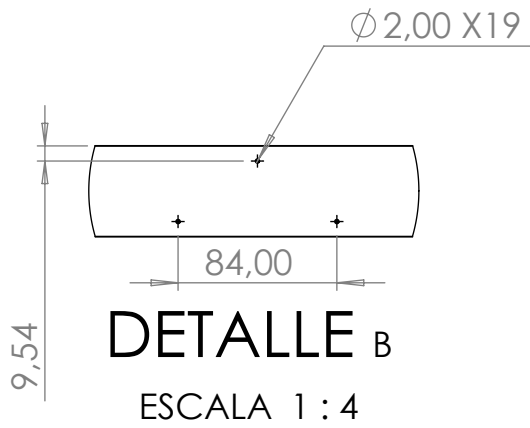
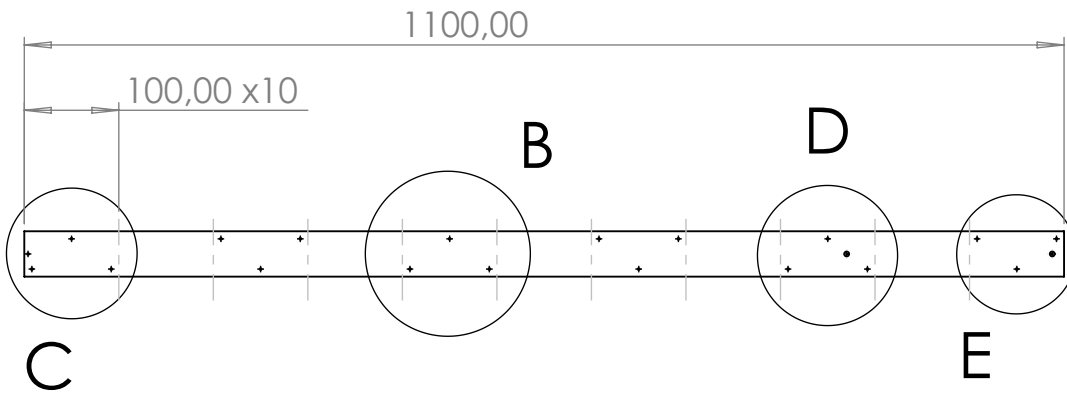
DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE



TAMAÑO DE HOJA:
A4

FECHA:
22/06/2025

HOJA:
6



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:

LISTÓN DEL BRAZO LANZADOR

ESCALA:
1:8

NÚMERO:
7

FIRMA:

DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE

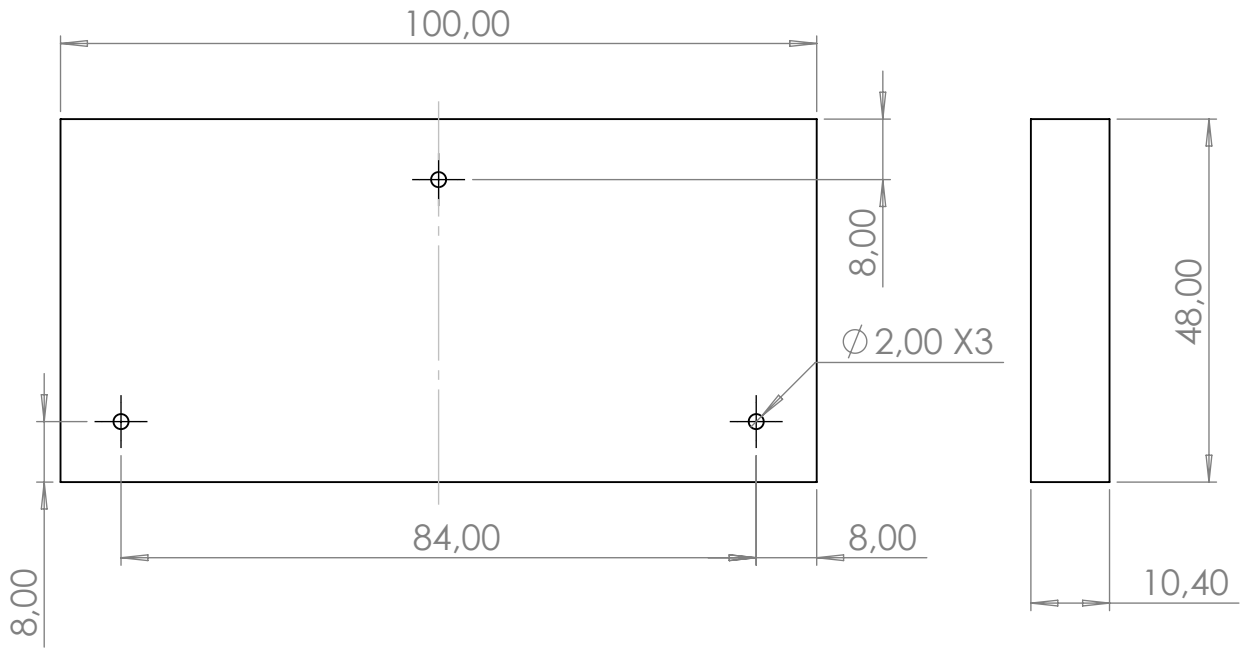


TAMAÑO DE HOJA:
A4

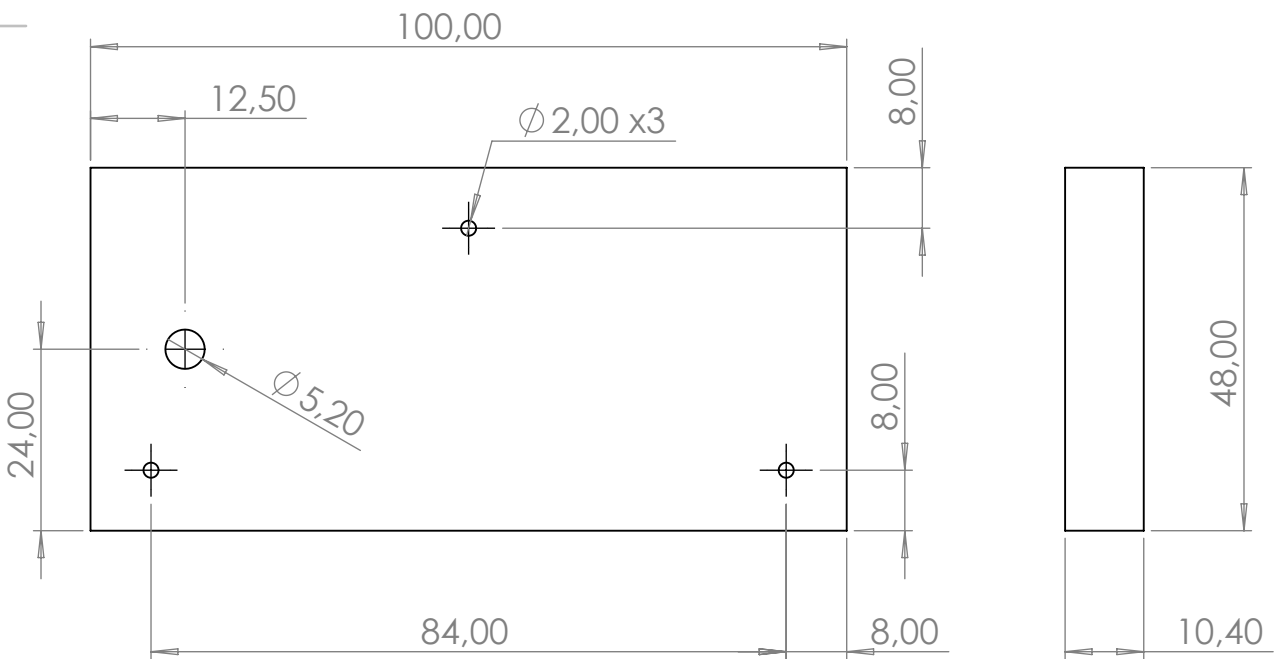
FECHA:
22/06/2025

HOJA:
7

SEPARADOR DEL BRAZO



SEPARADOR DEL BRAZO CONTRAPESO



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:
**SEPARADOR DEL BRAZO Y
SEPARADOR DEL BRAZO CONTRAPESO**

ESCALA:
1:1

NÚMERO:
8-9

FIRMA:

DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE

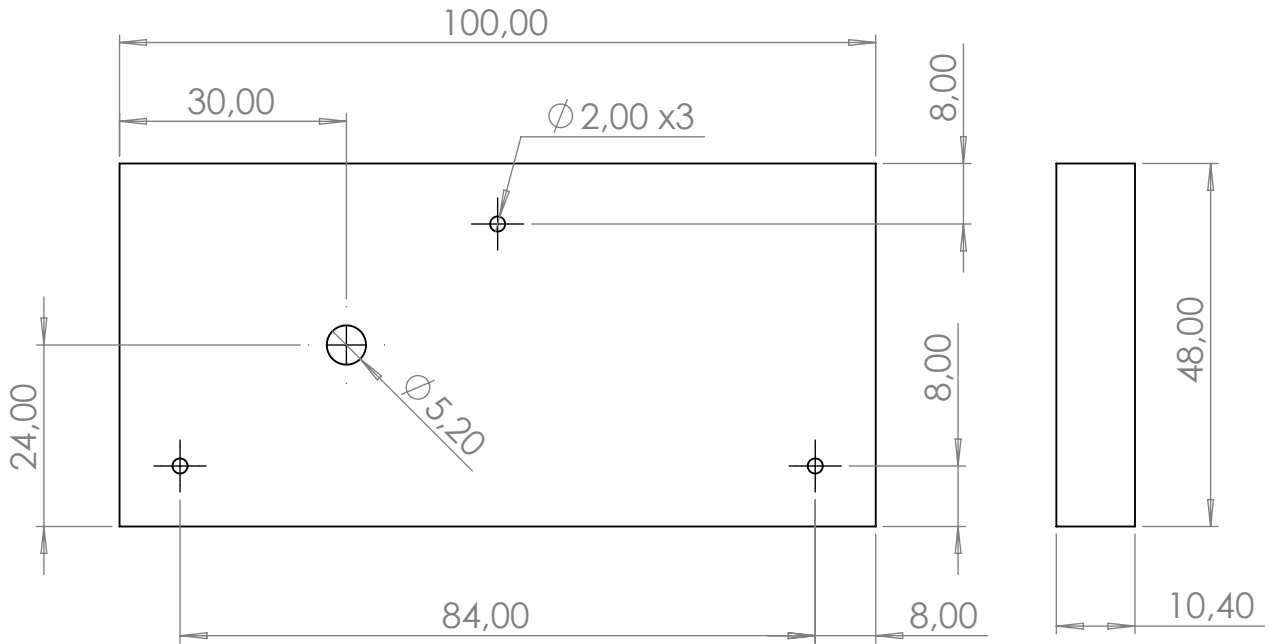


TAMAÑO DE HOJA:
A4

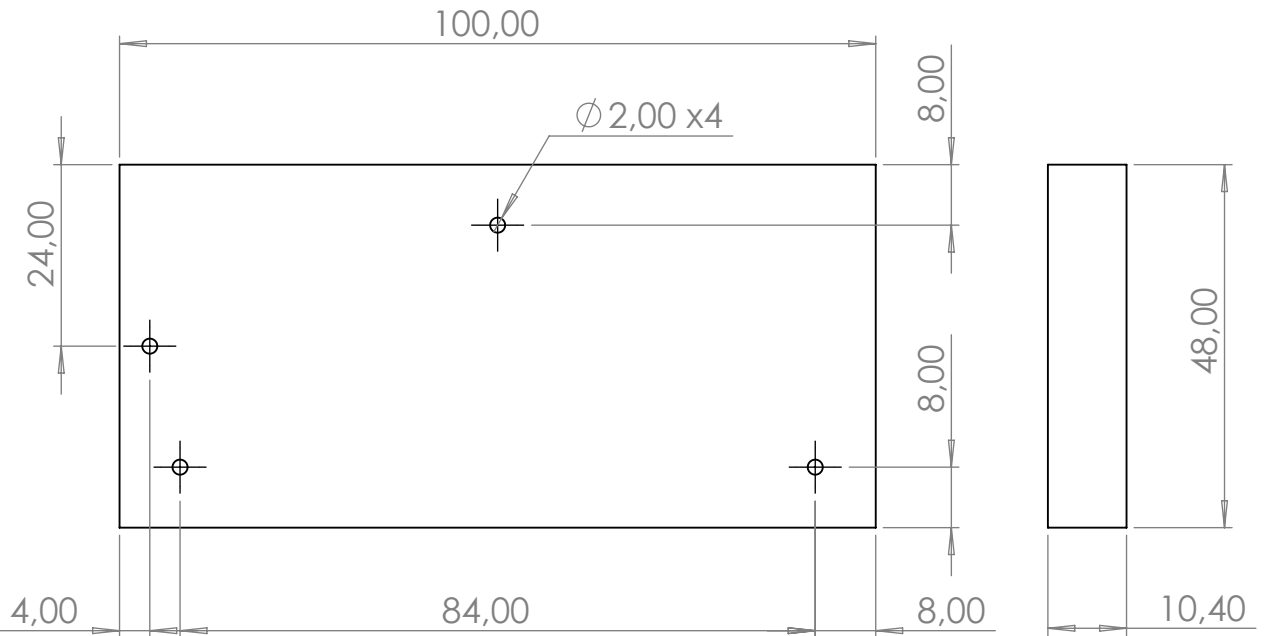
FECHA:
22/06/2025

HOJA:
8

SEPARADOR DEL BRAZO EJE



SEPARADOR DEL BRAZO CUERDA



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:

**SEPARADOR DEL BRAZO EJE Y
SEPARADOR DEL BRAZO CUERDA**

ESCALA:
1:1

NÚMERO:
10-11

FIRMA:

DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE



TAMAÑO DE HOJA:
A4

FECHA:
22/06/2025

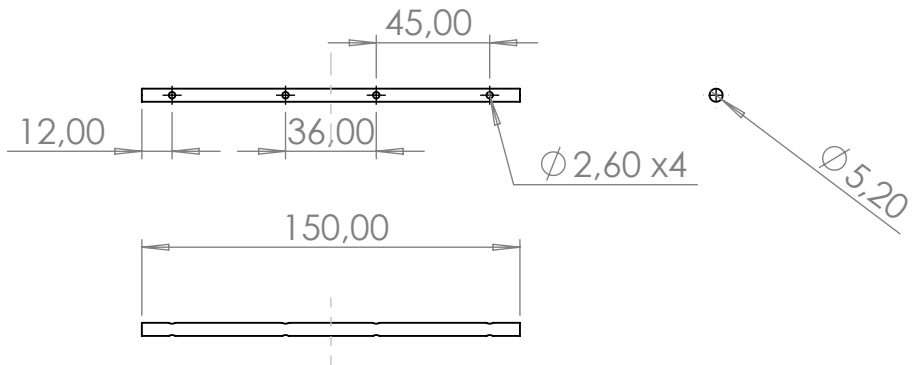
HOJA:
9

4 3 2 1

F

F

EJE DEL CONTRAPESO



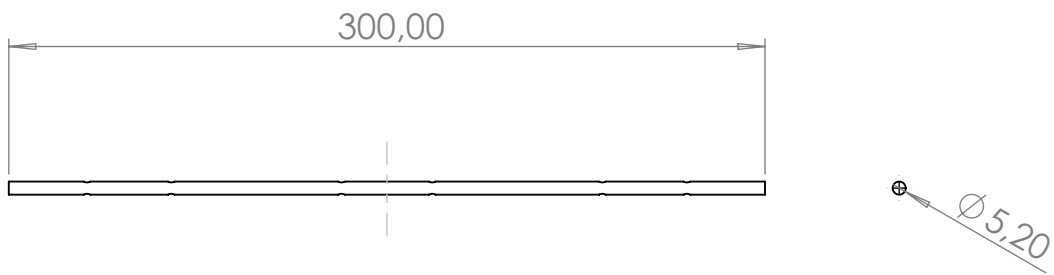
E

E

D

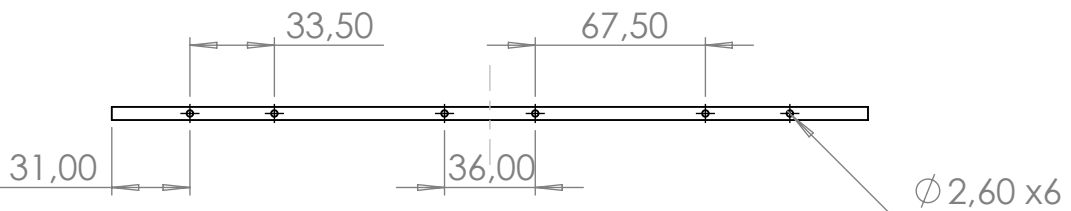
D

EJE DEL BRAZO LANZADOR



C

C



B

B

A

A



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:
EJE DEL BRAZO LANZADOR Y EJE DEL CONTRAPESO

ESCALA:
1:3

NÚMERO:
12-13

FIRMA:

DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE



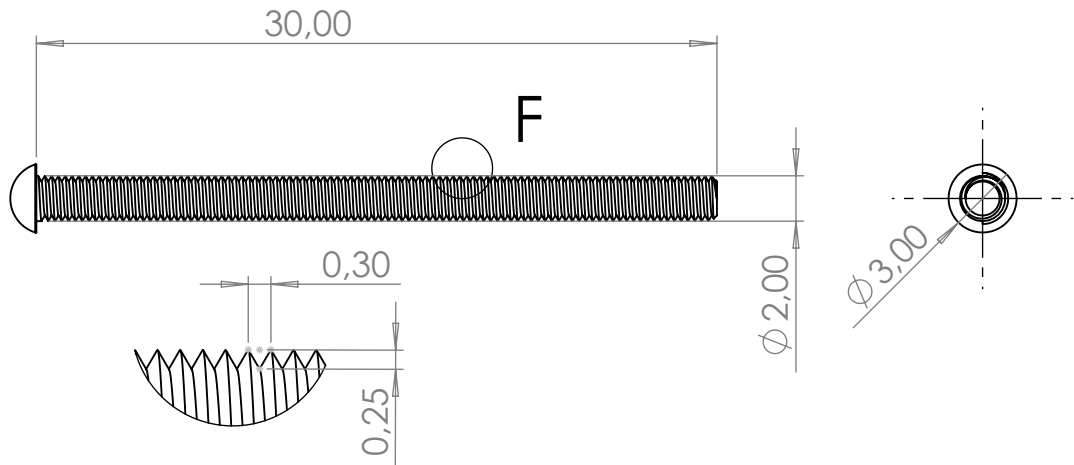
TAMAÑO DE HOJA:
A4

FECHA:
22/06/2025

HOJA:
10

4 3 2 1

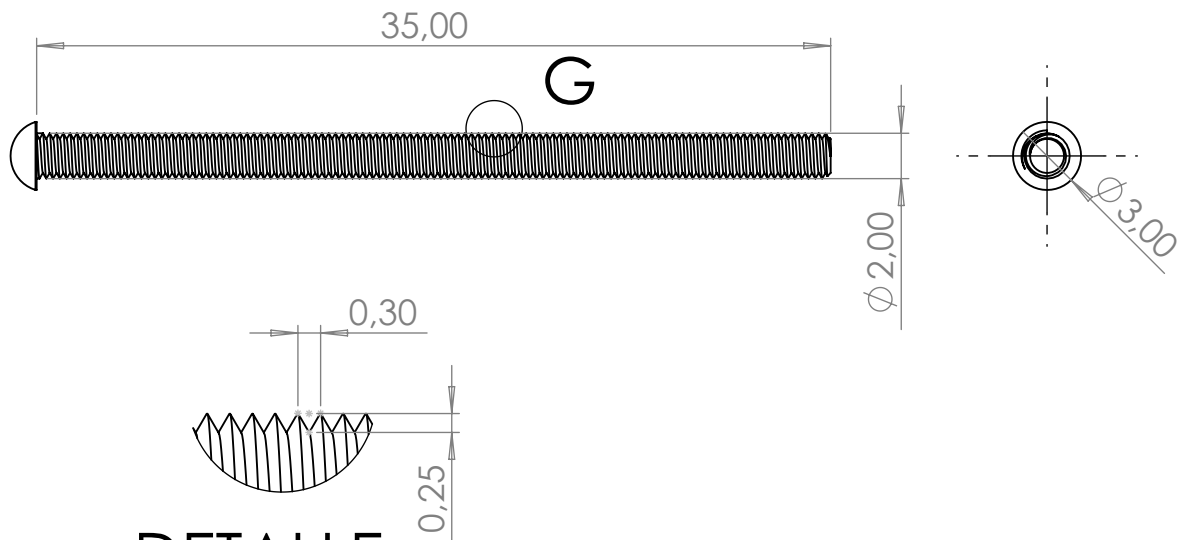
PERNO DE FIJACIÓN CORTO



DETALLE F

ESCALA 10 : 1

PERNO DE FIJACIÓN LARGO



DETALLE G

ESCALA 10 : 1



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:

PERNO DE FIJACIÓN LARGO Y PERNO DE FIJACIÓN CORTO

ESCALA:
3:1

NÚMERO:
14-15

FIRMA:

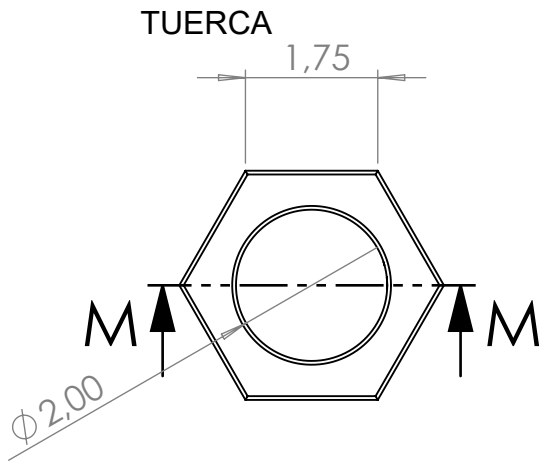
DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE



TAMAÑO DE HOJA:
A4

FECHA:
22/06/2025

HOJA:
11



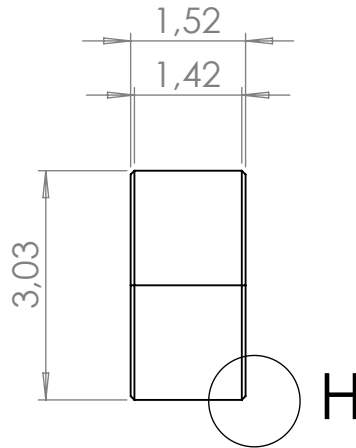
TUERCA

1,75

$\phi 2,00$

M

M

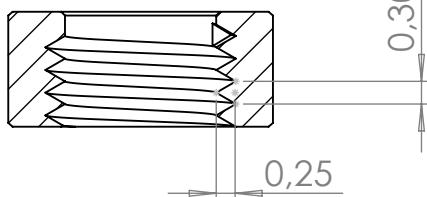


1,52

1,42

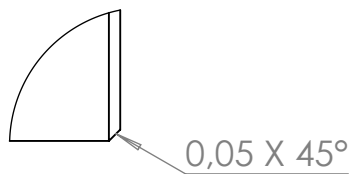
3,03

H



0,30

0,25



0,05 X 45°

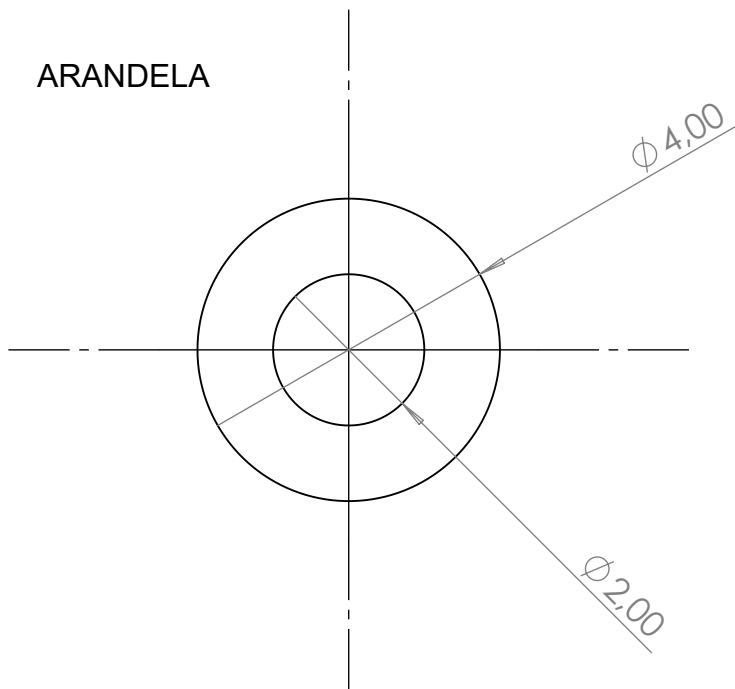
SECCIÓN M-M

ESCALA 10 : 1

DETALLE H

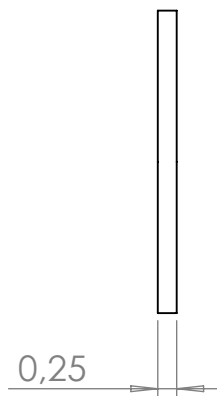
ESCALA 30 : 1

ARANDELA



$\phi 4,00$

$\phi 2,00$



0,25



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:

TUERCA Y ARANDELA

ESCALA: **10:1**

NÚMERO: **16-17**

FIRMA:

DIBUJADO POR: **PABLO MARTÍN BASALLOTE**

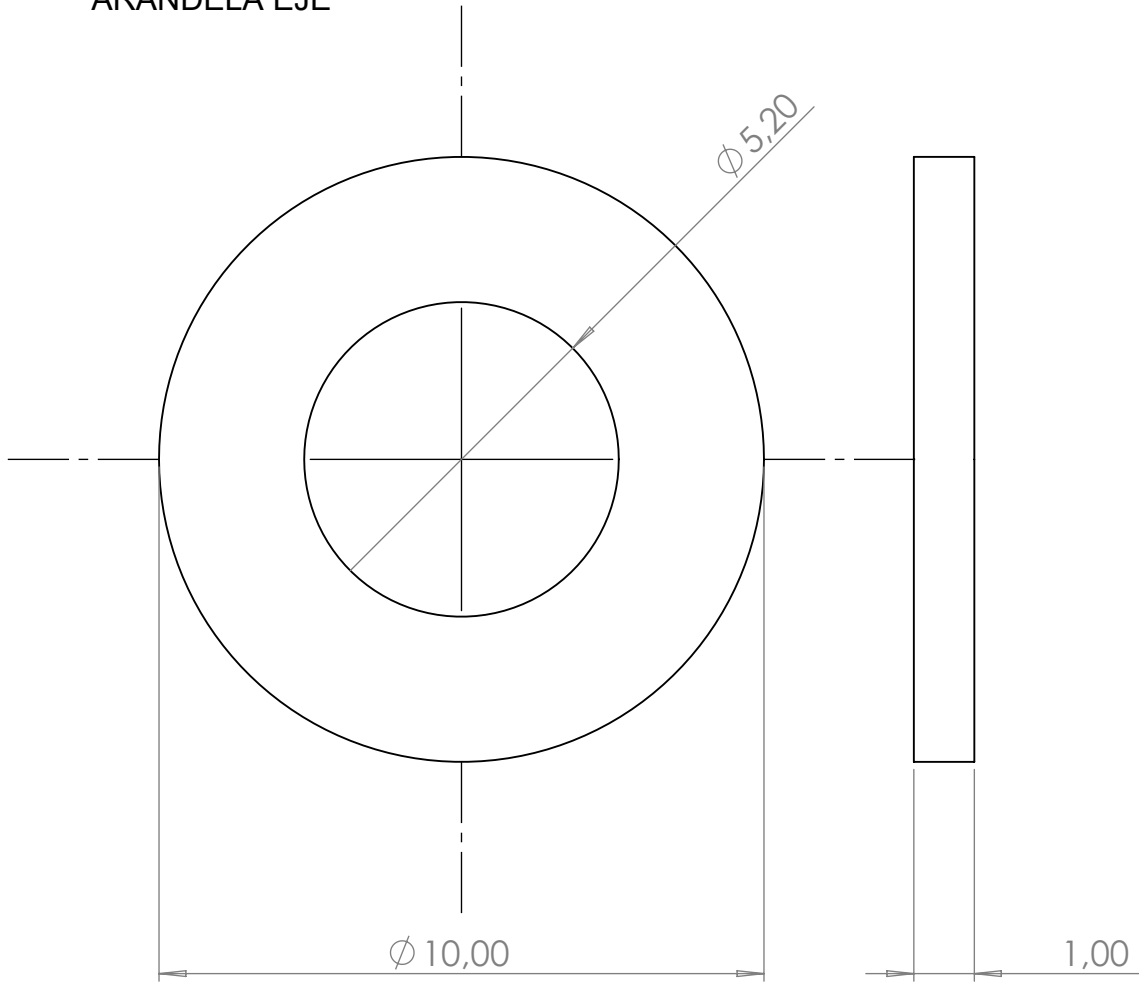


TAMAÑO DE HOJA: **A4**

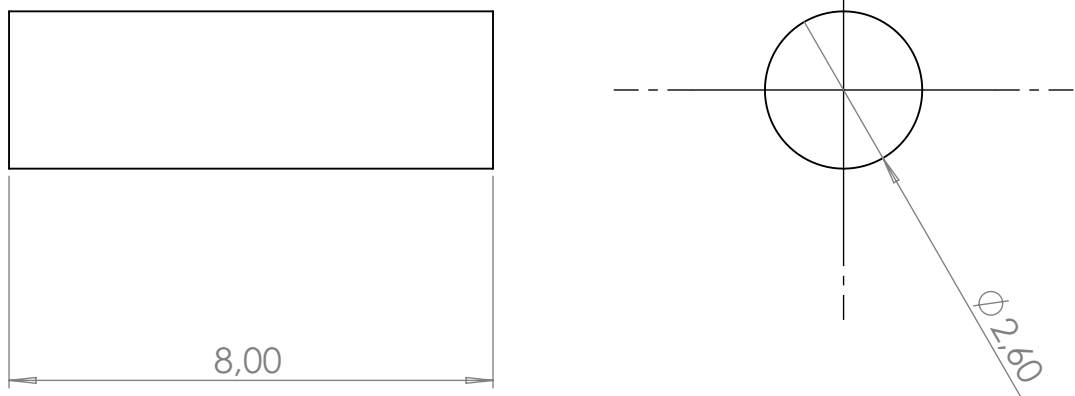
FECHA: **22/06/2025**

HOJA: **12**

ARANDELA EJE



PERNO EJE



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:

ARANDELA EJE Y PERNO EJE

ESCALA:
8:1

NÚMERO:
18-19

FIRMA:

DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE

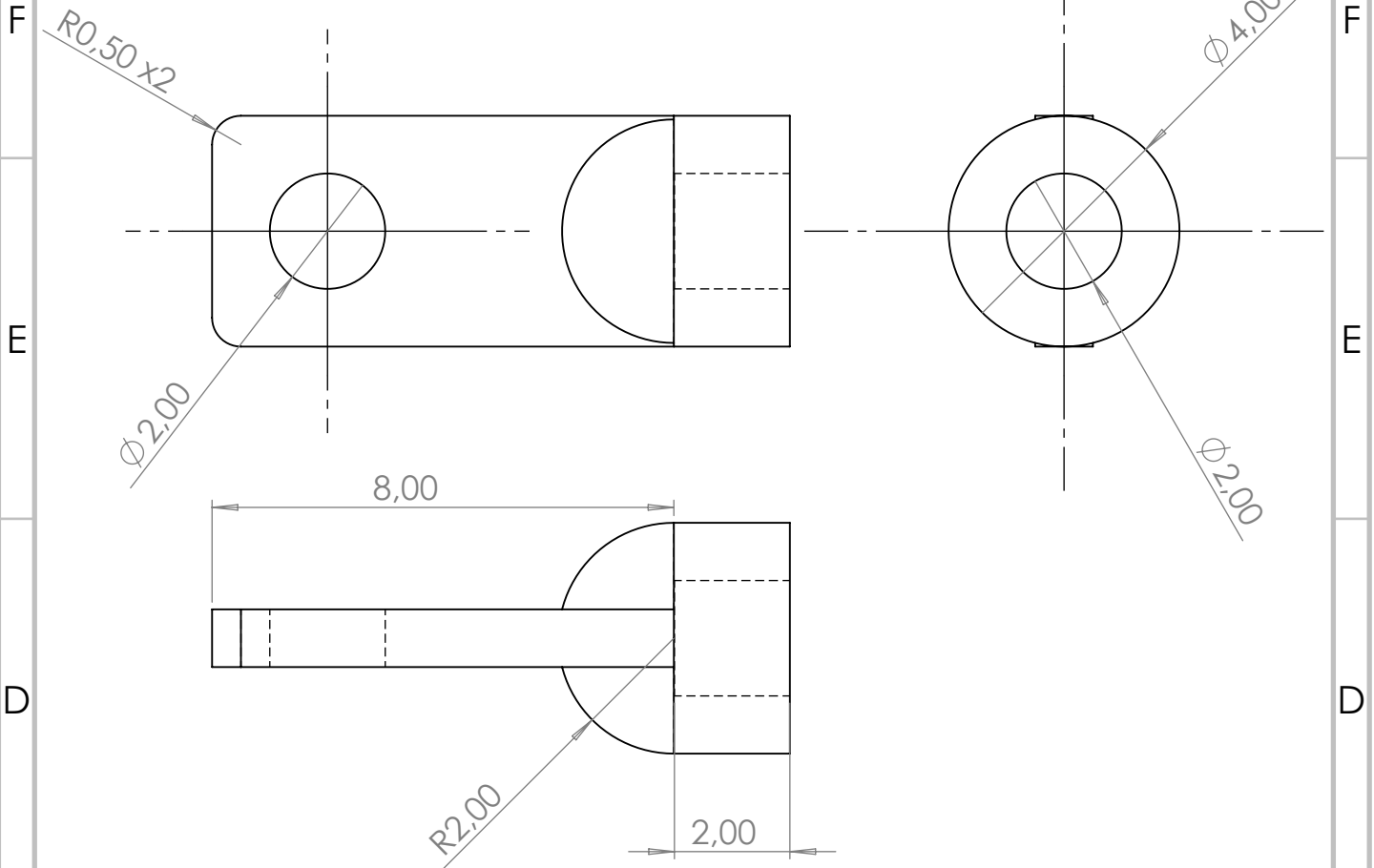


TAMAÑO DE HOJA:
A4

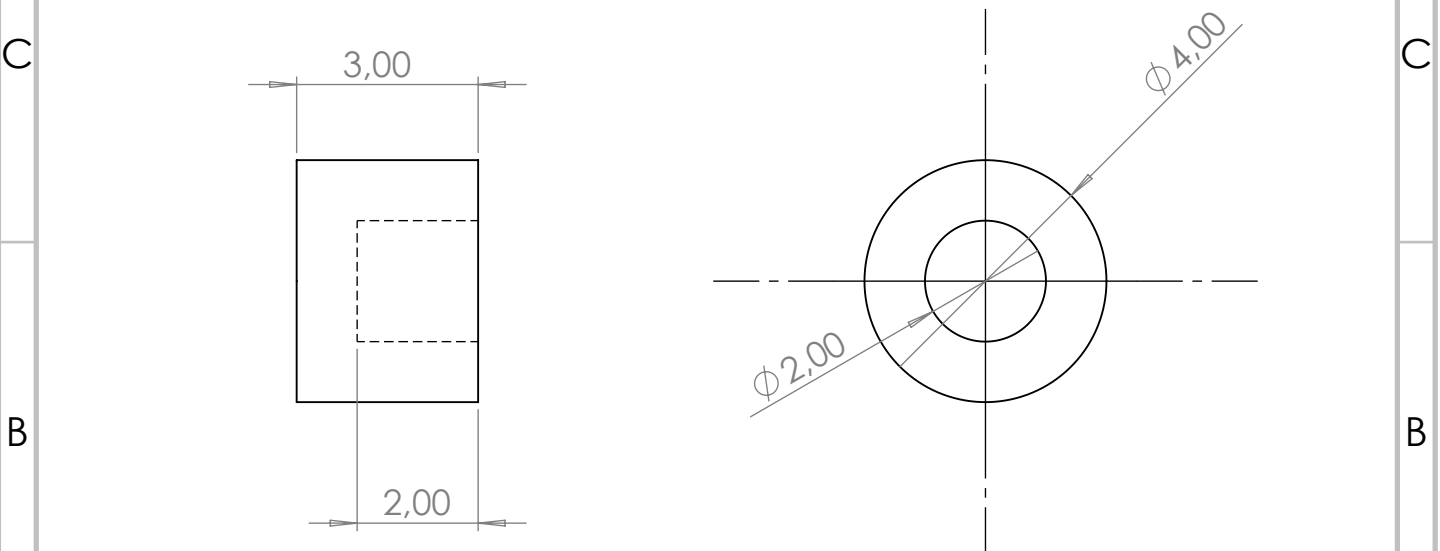
FECHA:
22/06/2025

HOJA:
13

FIJADOR CUERDA BRAZO



FIJADOR CUERDA PORTAPROYECTIL



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:

FIJADOR CUERDA PROYECTIL Y FIJADOR CUERDA BRAZO

ESCALA:
8:1

NÚMERO:
20-21

FIRMA:

DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE

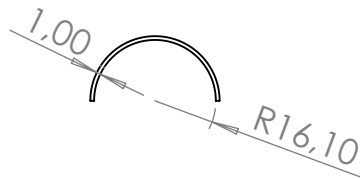
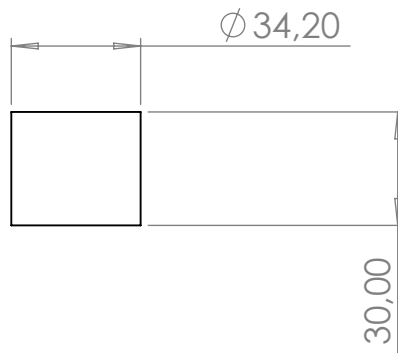


TAMAÑO DE HOJA:
A4

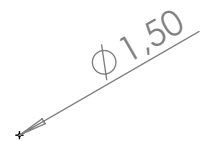
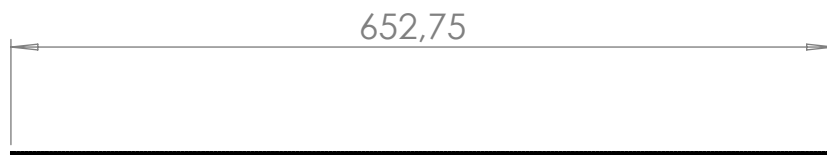
FECHA:
22/06/2025

HOJA:
14

PORTAPROYECTIL DE CUERO



CUERDA E= 1:6



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:

CUERDA Y PORTAPROYECTIL DE CUERO

ESCALA:
1:2

NÚMERO:
22-23

FIRMA:

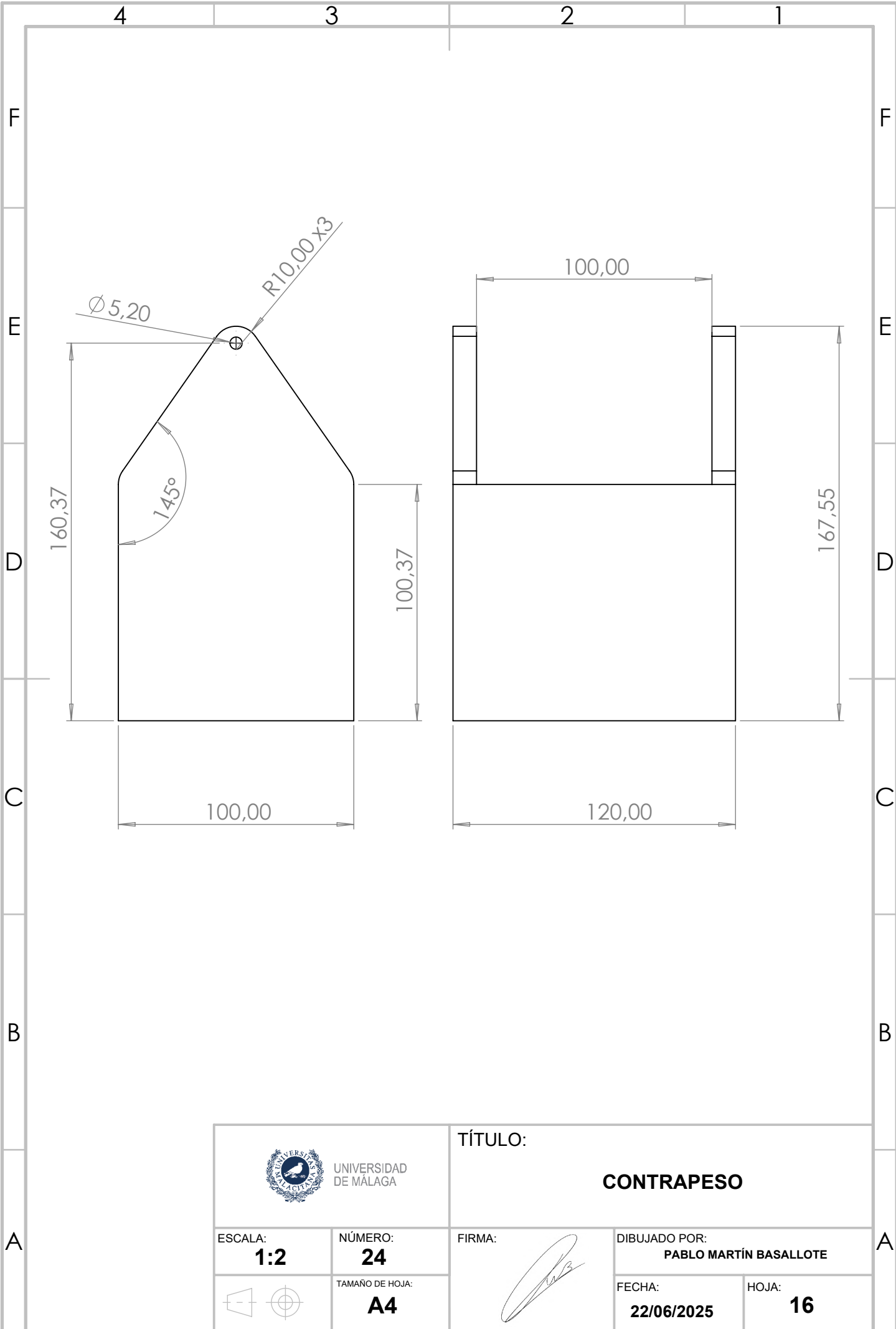
DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE



TAMAÑO DE HOJA:
A4

FECHA:
22/06/2025

HOJA:
15



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:

CONTRAPESO

ESCALA:
1:2

NÚMERO:
24

FIRMA:

DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE



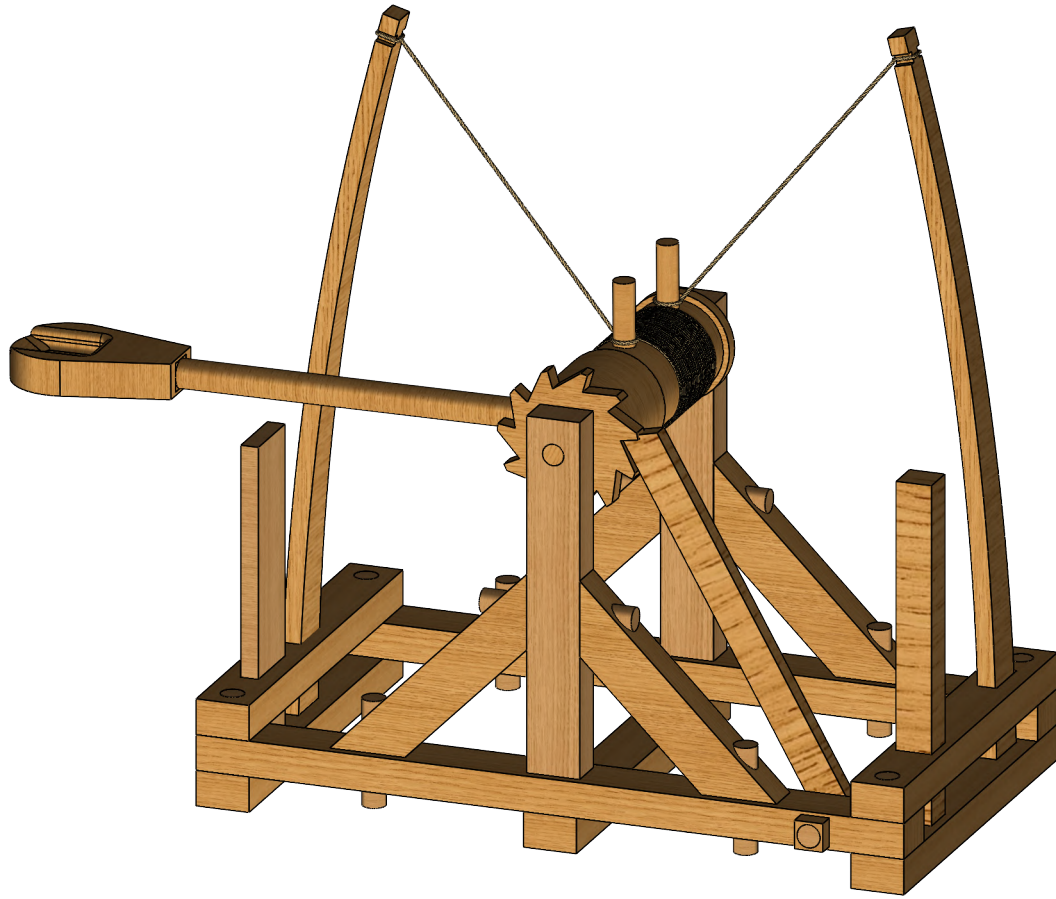
TAMAÑO DE HOJA:
A4

FECHA:
22/06/2025

HOJA:
16



PLANOS DE LA CATAPULTA DE DA VINCI



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

TÍTULO:

ENSAMBLAJE PRINCIPAL

ESCALA:
1:2

NÚMERO:
0

FIRMA:

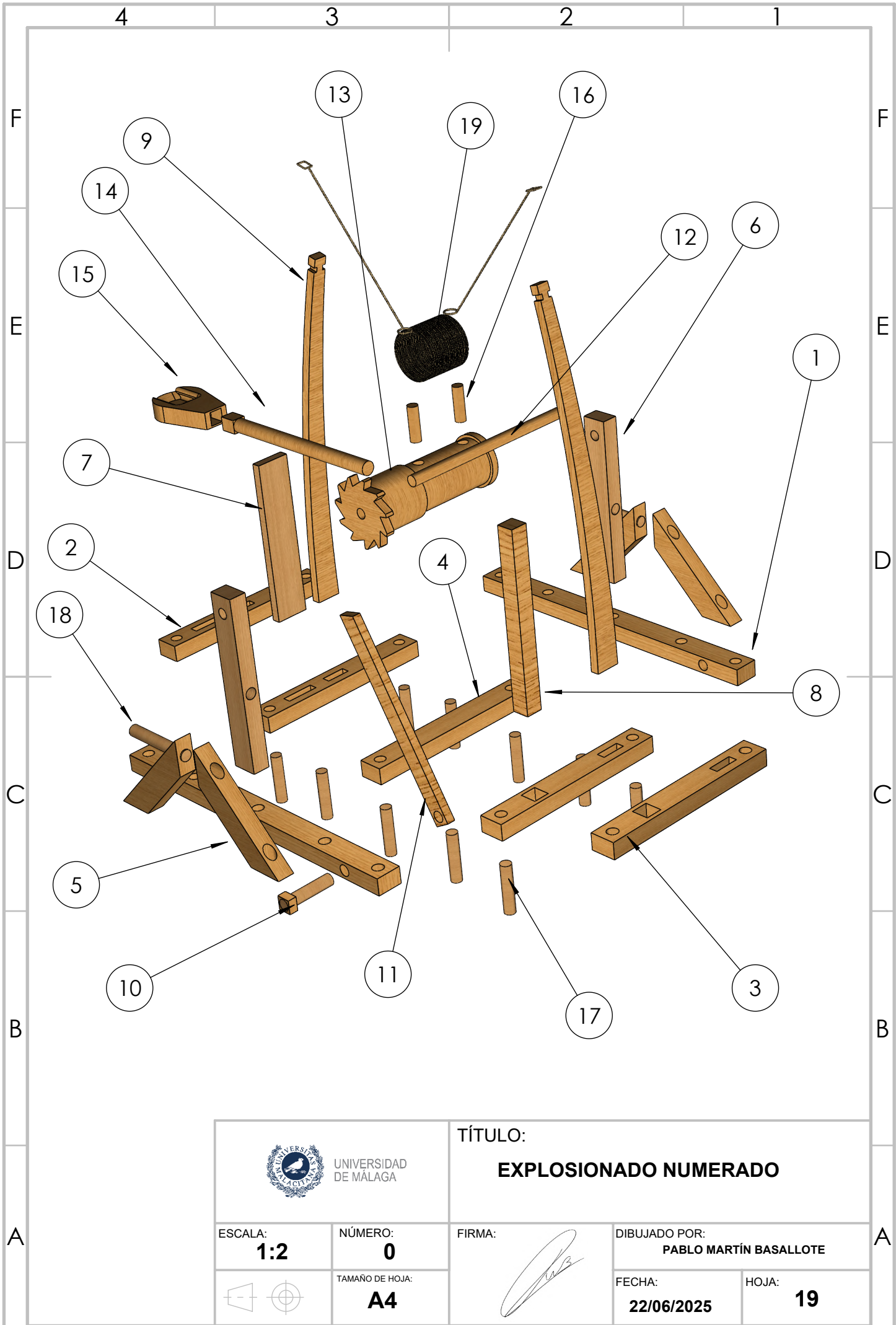
DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE



TAMAÑO DE HOJA:
A4

FECHA:
22/06/2025

HOJA:
18



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:

EXPLOSIONADO NUMERADO

ESCALA:
1:2

NÚMERO:
0

FIRMA:

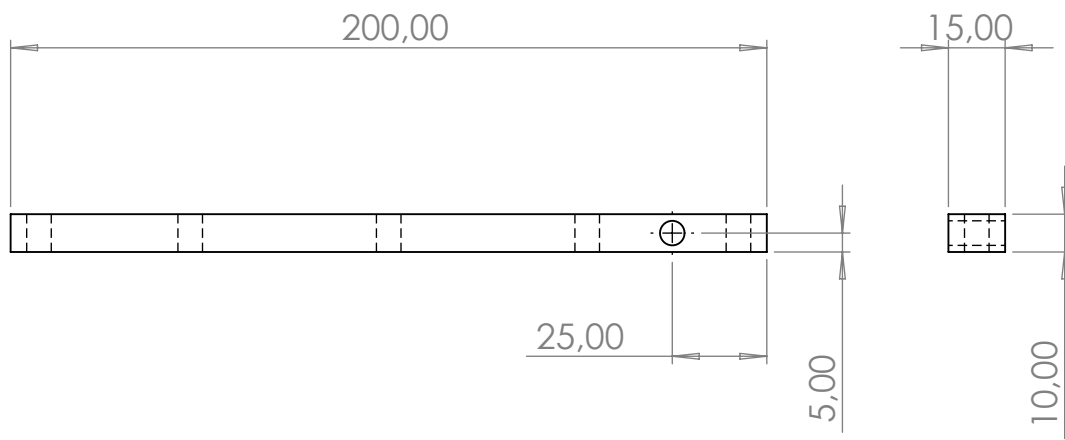
DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE



TAMAÑO DE HOJA:
A4

FECHA:
22/06/2025

HOJA:
19



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

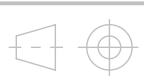
TÍTULO:
LISTÓN LATERAL DE LA BASE

ESCALA:
1:2

NÚMERO:
1

FIRMA:

DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE

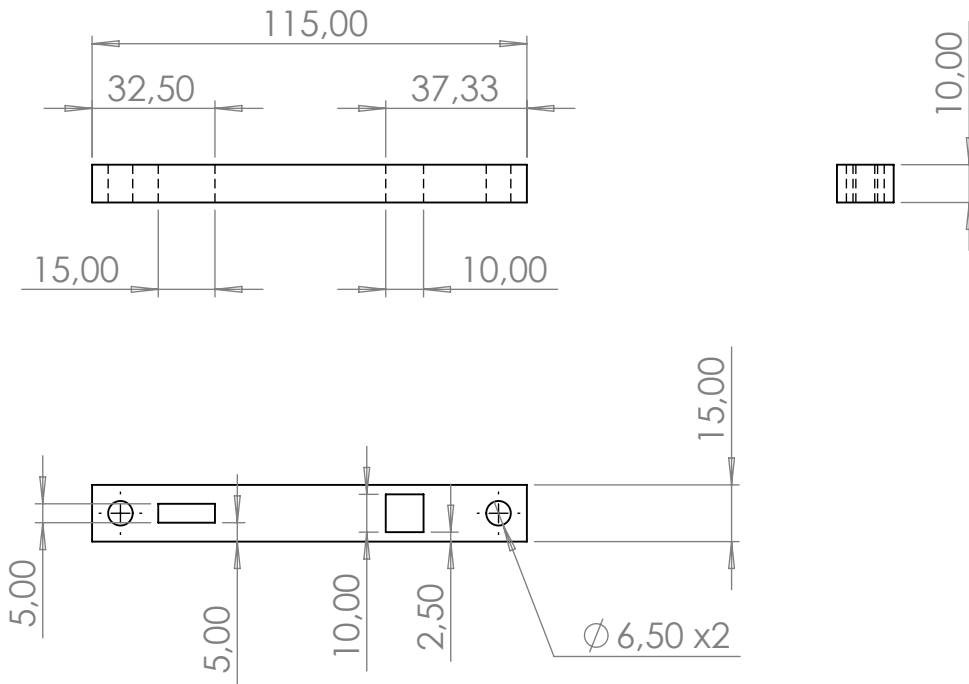


TAMAÑO DE HOJA:
A4

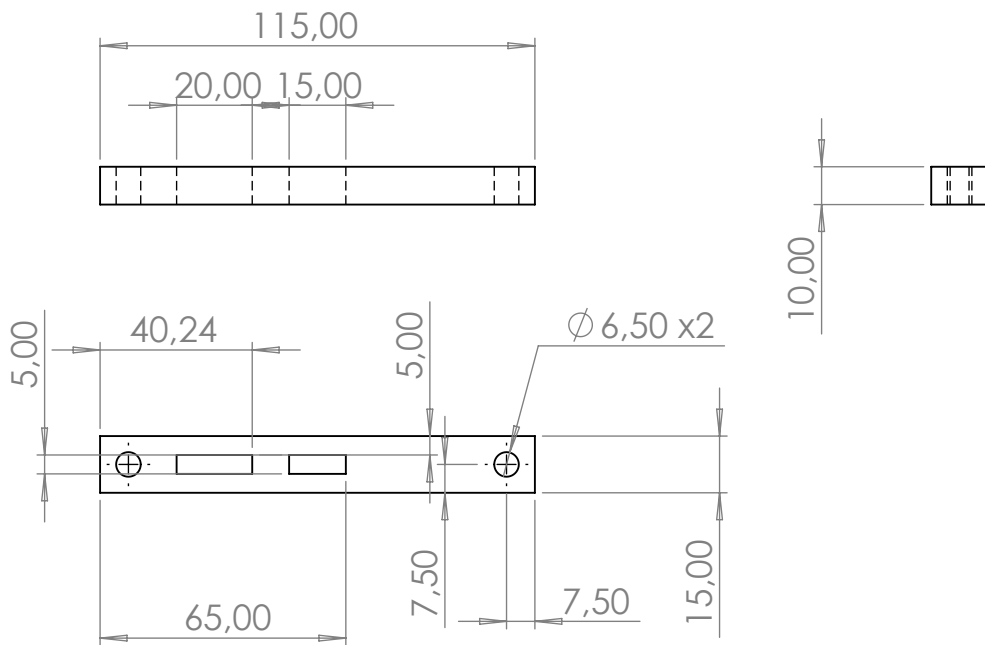
FECHA:
22/06/2025

HOJA:
20

LISTÓN DELANTERO



LISTÓN TRASERO



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:

LISTÓN DELANTERO Y TRASERO DE LA BASE

ESCALA:
1:2

NÚMERO:
2-3

FIRMA:

DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE

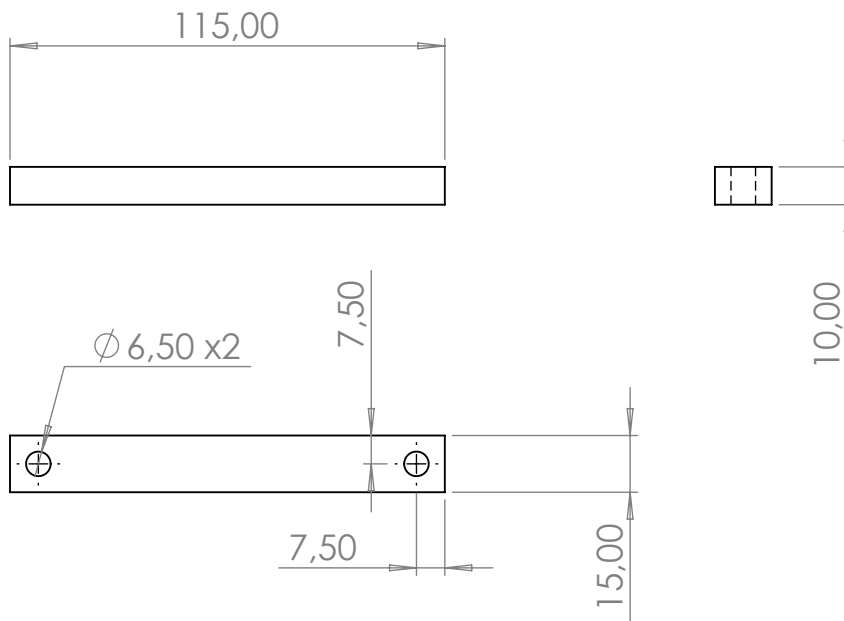


TAMAÑO DE HOJA:
A4

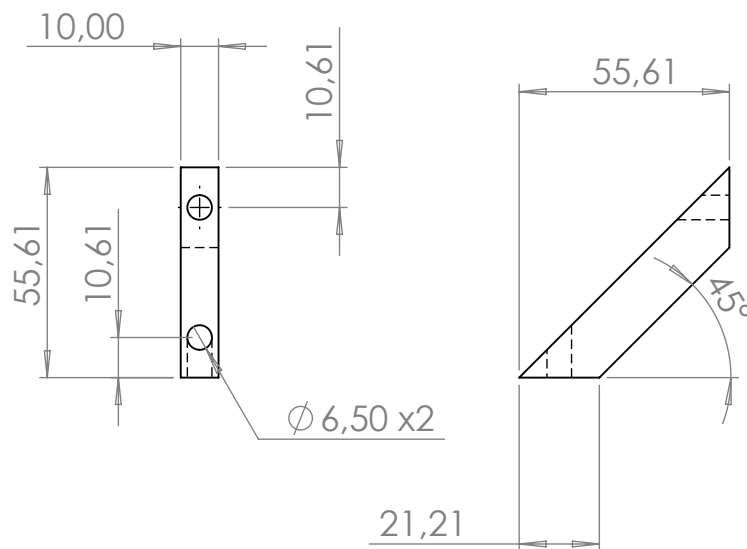
FECHA:
22/06/2025

HOJA:
21

LISTÓN CENTRAL



SOPORTE LATERAL



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:

LISTÓN DELANTERO Y TRASERO DE LA BASE

ESCALA:
1:2

NÚMERO:
4-5

FIRMA:

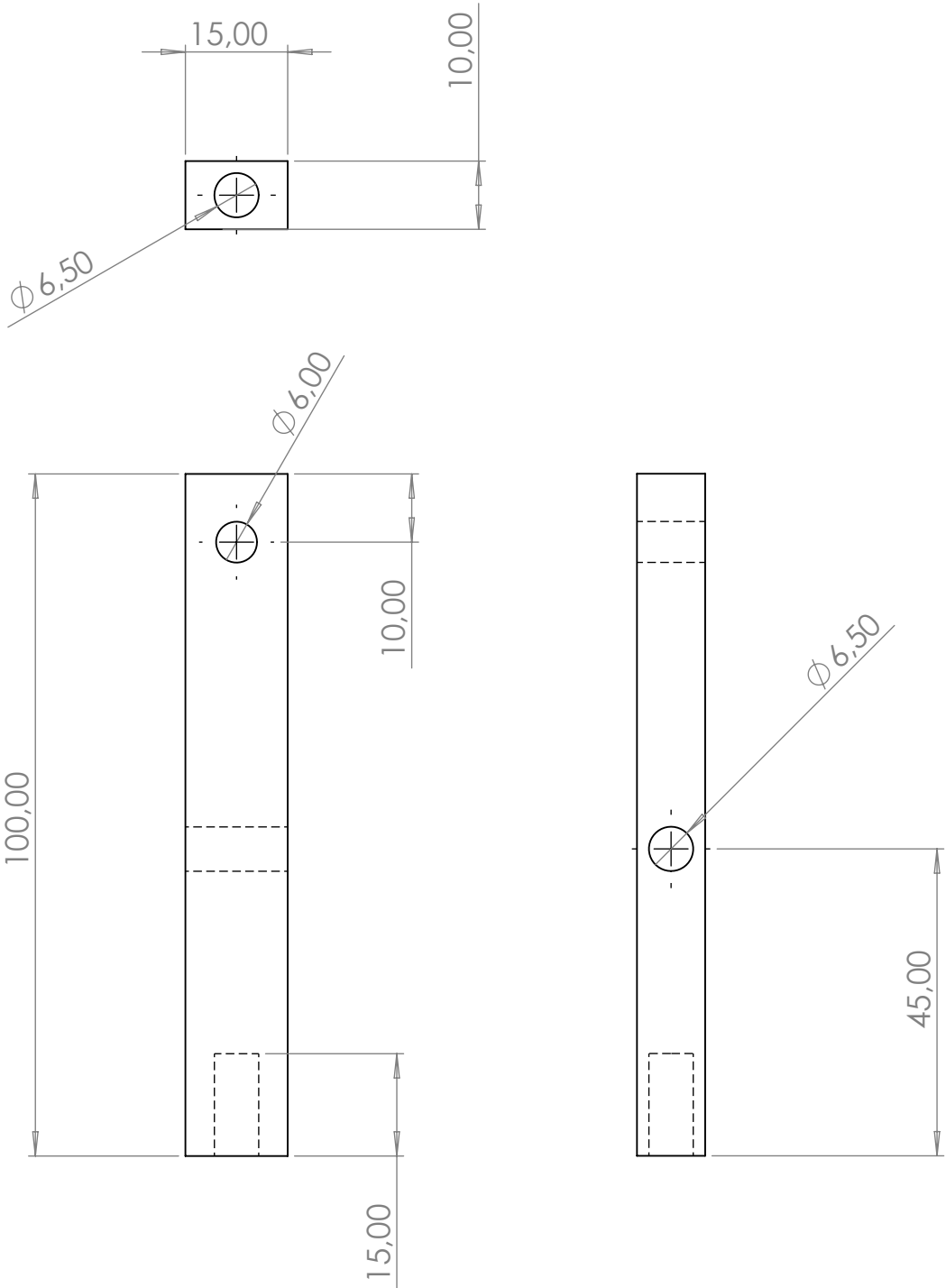
DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE



TAMAÑO DE HOJA:
A4

FECHA:
22/06/2025

HOJA:
22



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:
LISTÓN VERTICAL

ESCALA:
1:1

NÚMERO:
6

FIRMA:

DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE



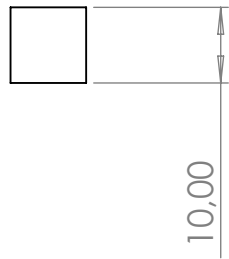
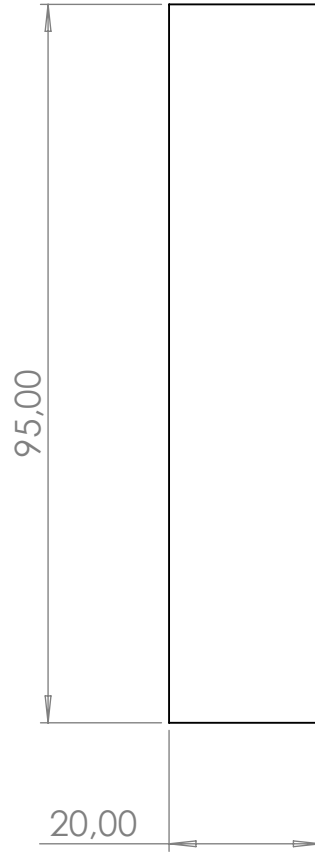
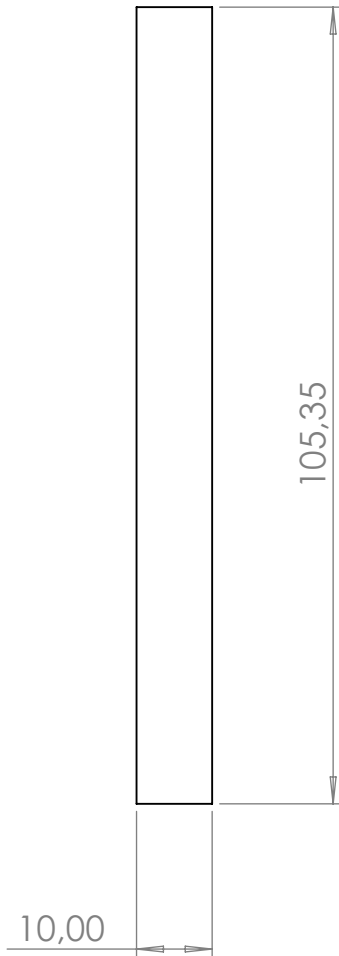
TAMAÑO DE HOJA:
A4

FECHA:
22/06/2025

HOJA:
23

TOPE DELANTERO

TOPE TRASERO



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:
TOPE DELANTERO Y TOPE TRASERO

ESCALA:
1:1

NÚMERO:
7-8

FIRMA:

DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE



TAMAÑO DE HOJA:
A4

FECHA:
22/06/2025

HOJA:
24

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

C

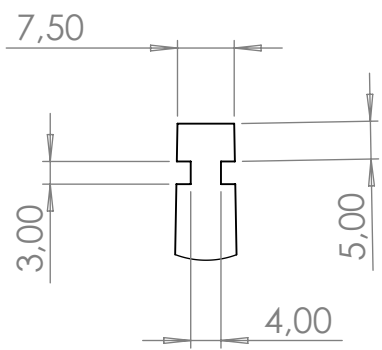
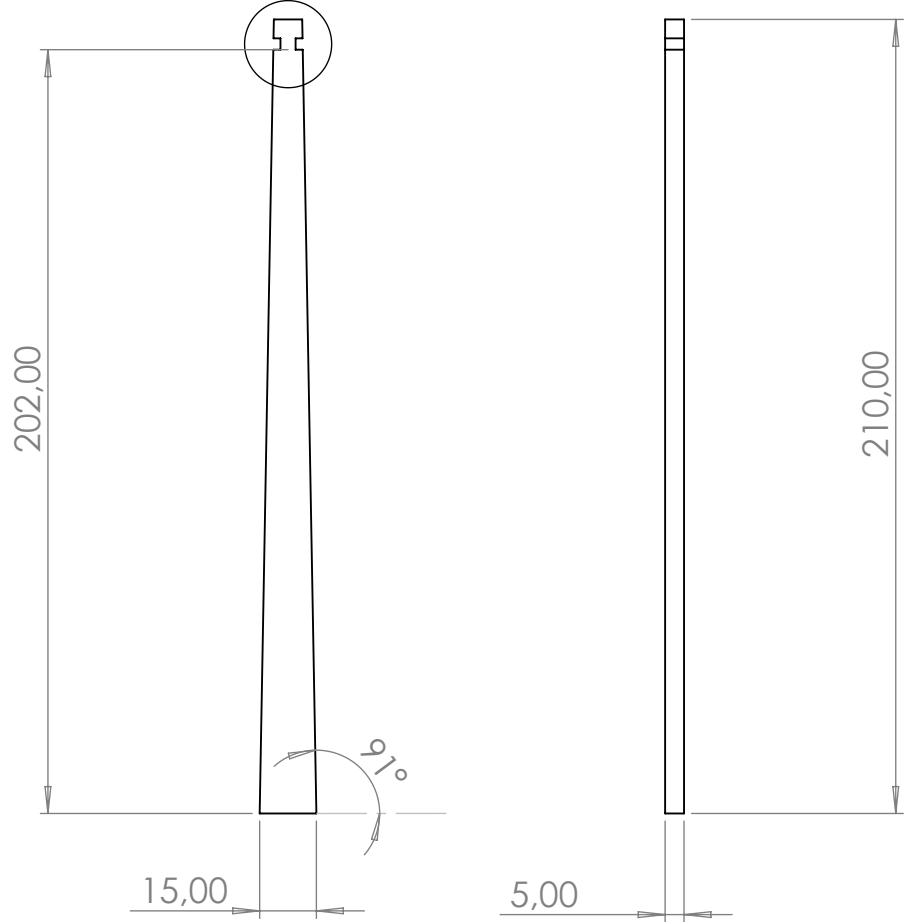
B

B

A

A

A



DETALLE A
 ESCALA 1 : 1



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:
LISTÓN ACUMULADOR DE TENSION

ESCALA:
1:1

NÚMERO:
9

FIRMA:

DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE



TAMAÑO DE HOJA:
A4

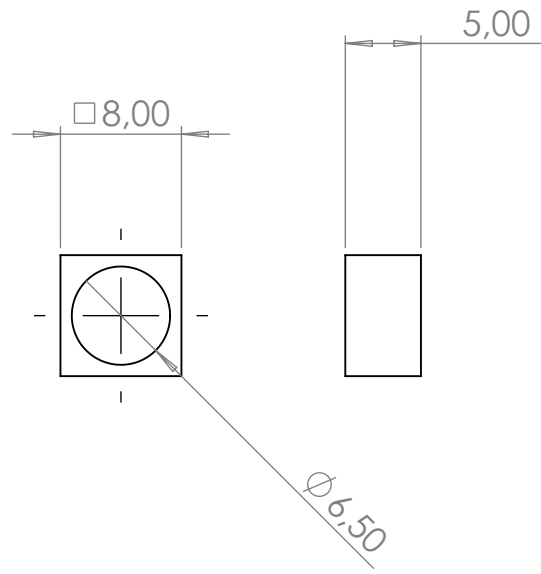
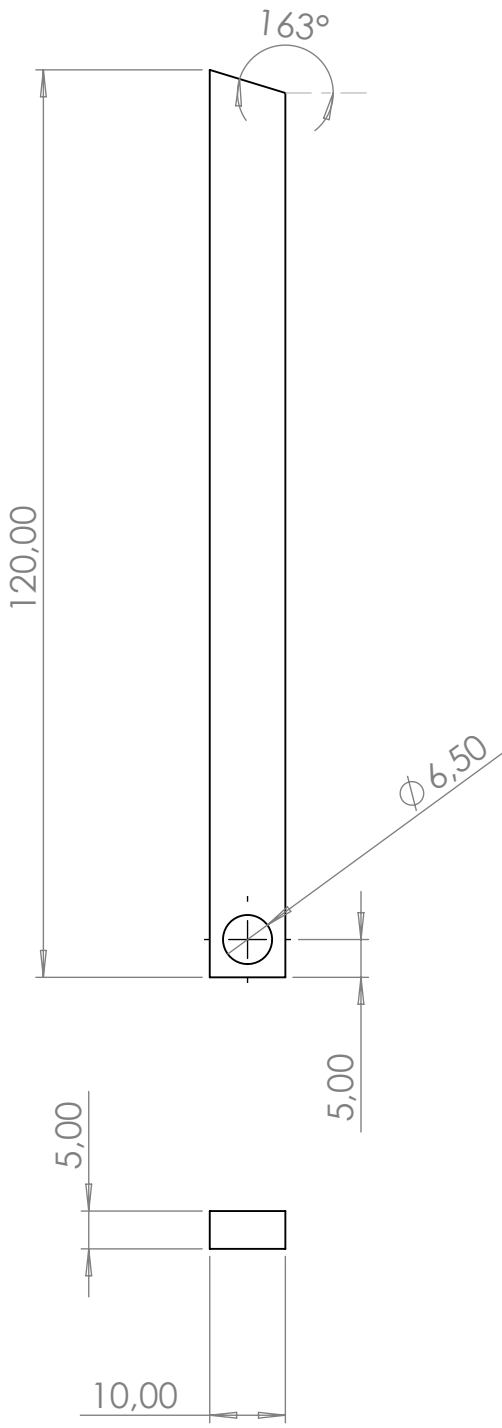
FECHA:
22/06/2025

HOJA:
25

4 3 2 1

FRENO DEL TAMBOR

FIJADOR DEL PERNO E= 2:1



TÍTULO:
FRENO DEL TAMBOR Y FIJADOR DEL PERNO

ESCALA:
1:1

NÚMERO:
10-11

FIRMA:

DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE

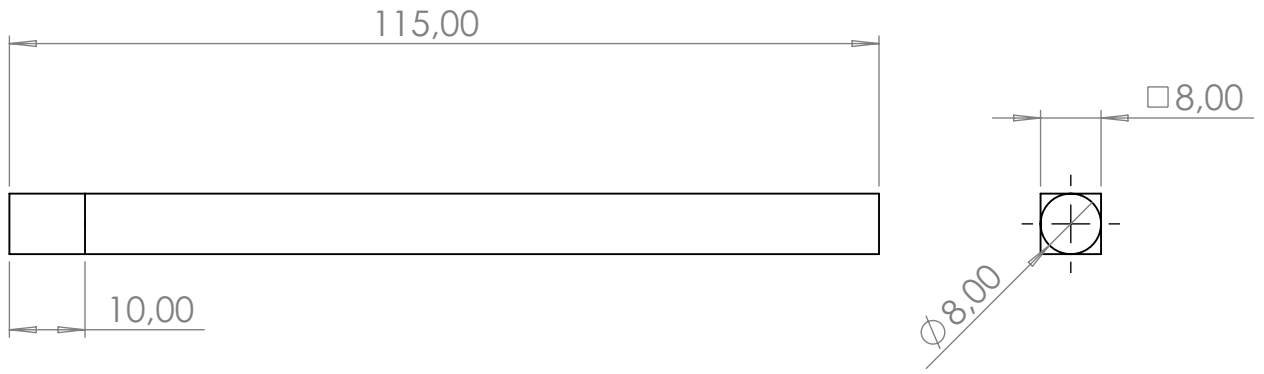


TAMAÑO DE HOJA:
A4

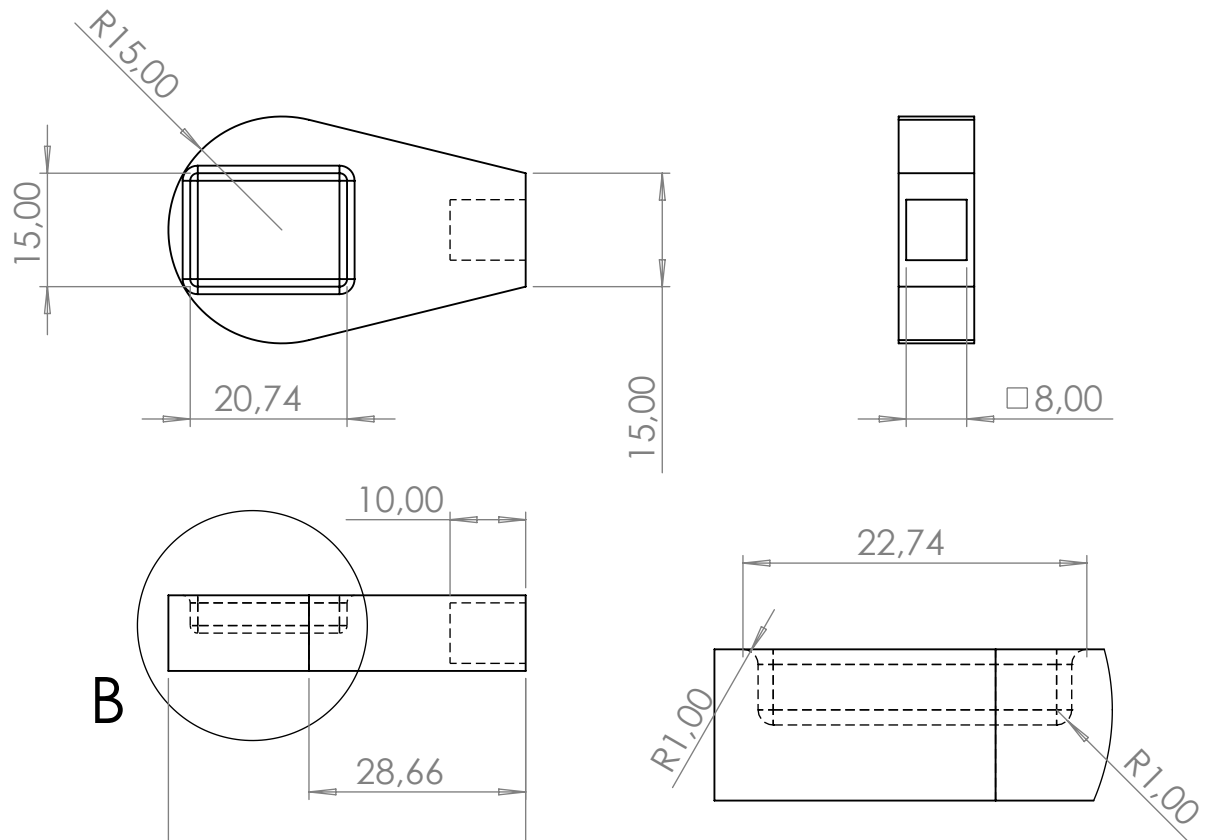
FECHA:
22/06/2025

HOJA:
26

EJE DEL BRAZO LANZADOR



PORTAPROYECTIL



DETALLE B

ESCALA 2 : 1



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:

EJE DEL BRAZO LANZADOR Y PORTAPROYECTIL

ESCALA:
1:1

NÚMERO:
14-15

FIRMA:

DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE



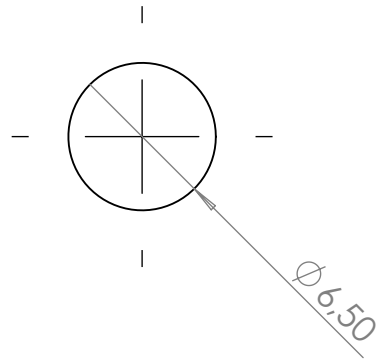
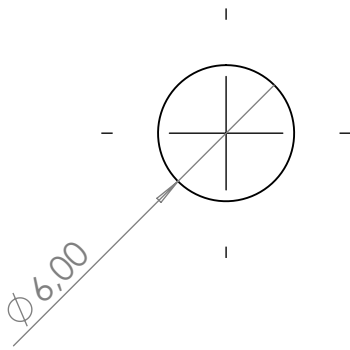
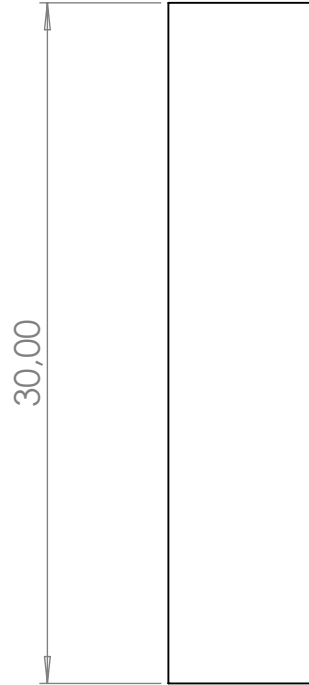
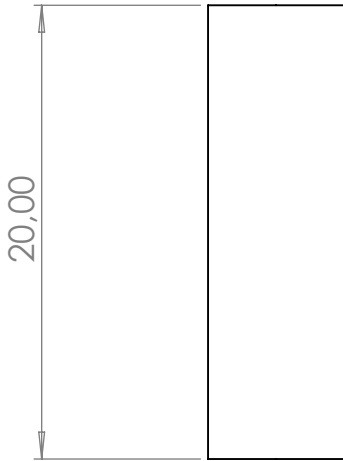
TAMAÑO DE HOJA:
A4

FECHA:
22/06/2025

HOJA:
28

PERNO FIJADOR CUERDA

PERNO FIJADOR ESTRUCTURA



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:

PERNO FIJADOR CUERDA Y PERNO FIJADOR ESTRUCTURA

ESCALA:
3:1

NÚMERO:
16-17

FIRMA:

DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE

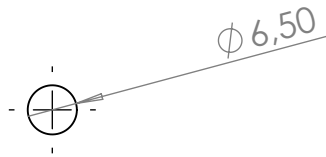
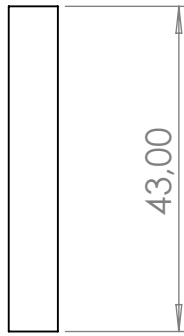


TAMAÑO DE HOJA:
A4

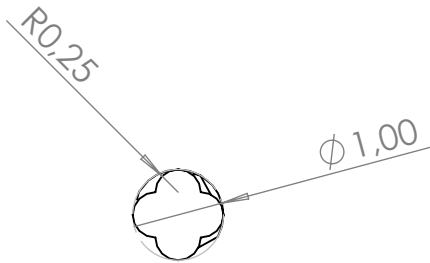
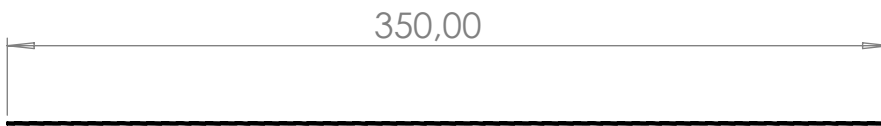
FECHA:
22/06/2025

HOJA:
29

PERNO FIJADOR SOPORTE E= 1:1



CUERDA



DETALLE C

ESCALA 12 : 1



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:

PERNO FIJADOR SOPORTE Y CUERDA

ESCALA:
1:3

NÚMERO:
18-19

FIRMA:

DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE



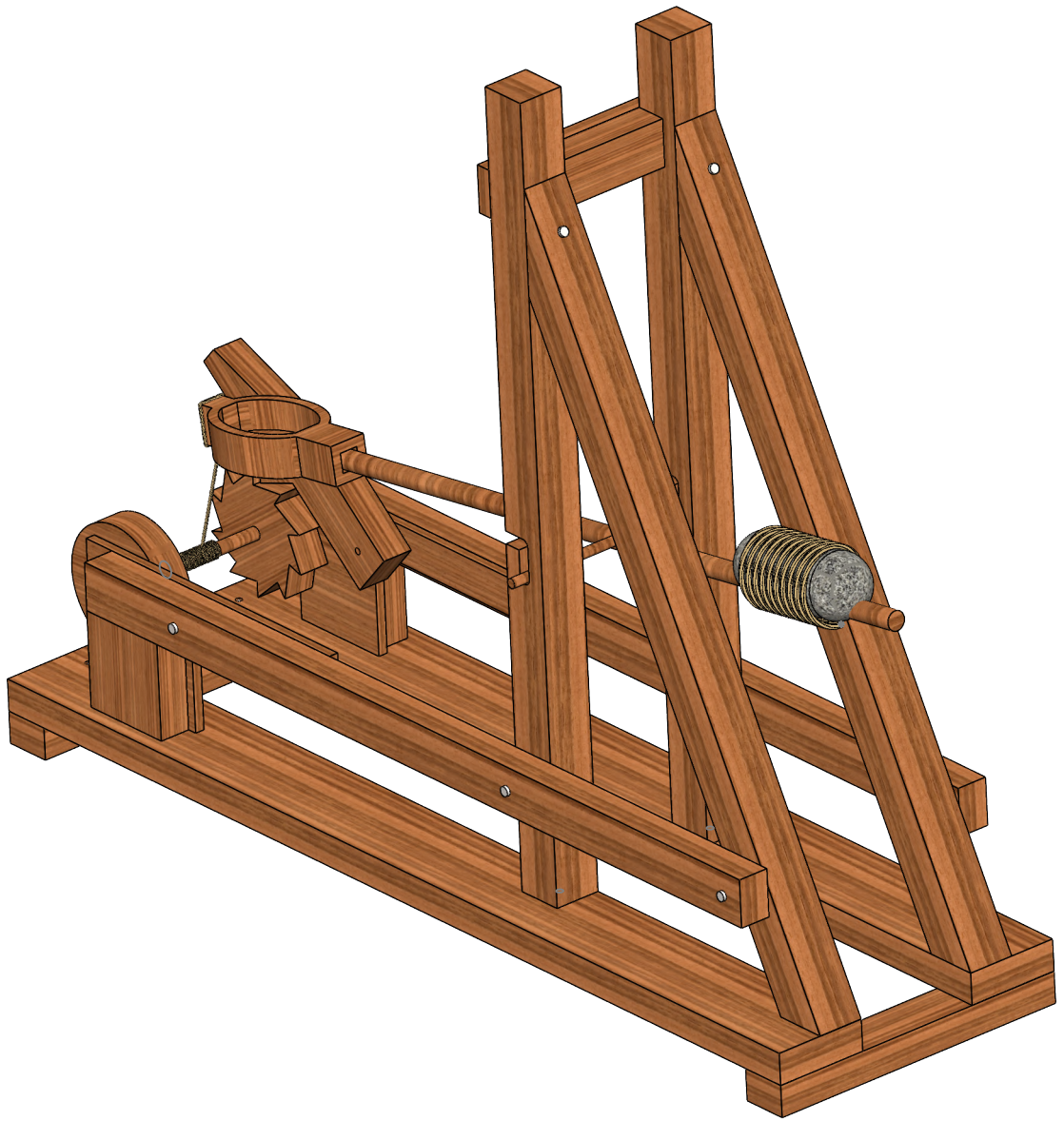
TAMAÑO DE HOJA:
A4

FECHA:
22/06/2025

HOJA:
30



PLANOS DE LA CATAPULTA HÍBRIDA



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

TÍTULO:

ENSAMBLAJE PRINCIPAL

ESCALA:
1:2

NÚMERO:
0

FIRMA:

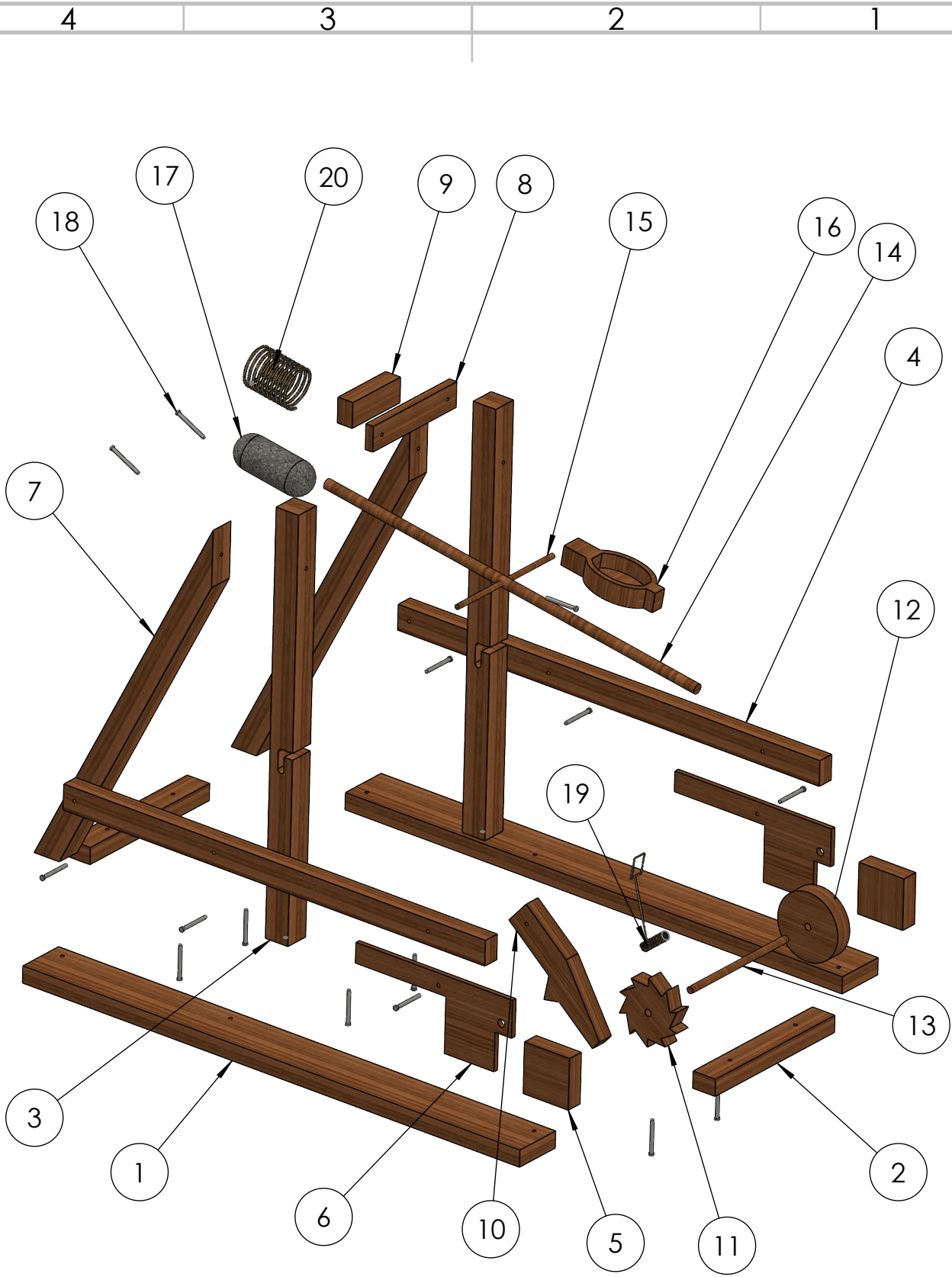
DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE



TAMAÑO DE HOJA:
A4

FECHA:
22/06/2025

HOJA:
32



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:

EXPLOSIONADO NUMERADO

ESCALA:
1:3

NÚMERO:
0

FIRMA:

DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE



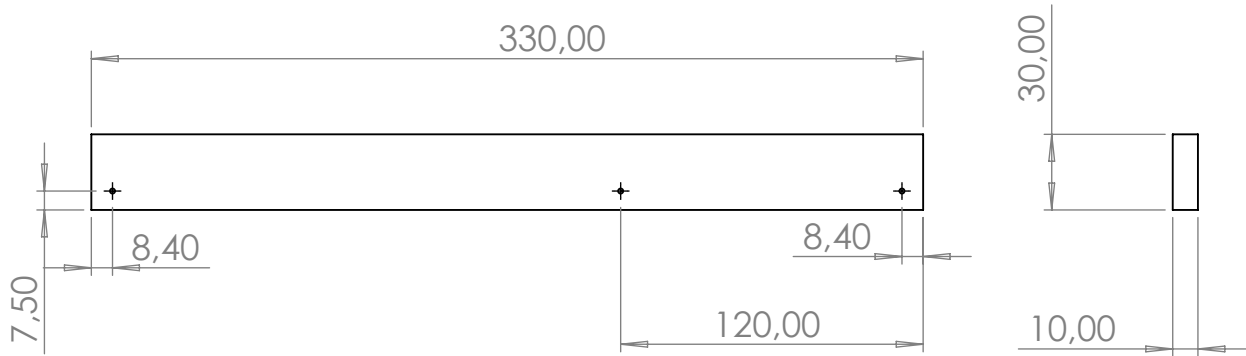
TAMAÑO DE HOJA:
A4

FECHA:
22/06/2025

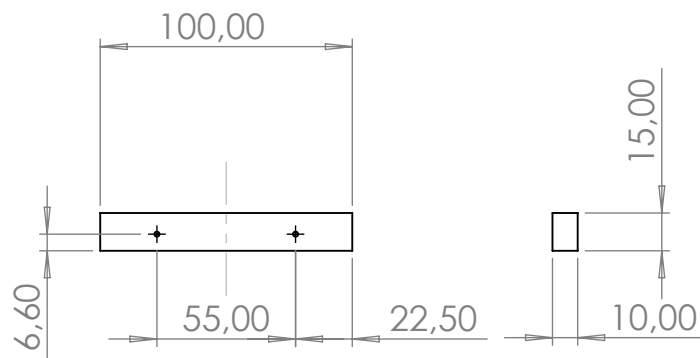
HOJA:
33

Se destaca que los agujeros no acotados en este plano con diámetro o radio, corresponden a la ubicación de donde se deben de poner los clavos para el ensamble de las piezas.

LISTÓN INFERIOR DE LA BASE



LISTÓN FRONTAL DE LA BASE



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

TÍTULO:

**LISTÓN INFERIOR Y FRONTAL
DE LA BASE**

ESCALA:
1:3

NÚMERO:
1-2

FIRMA:

DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE

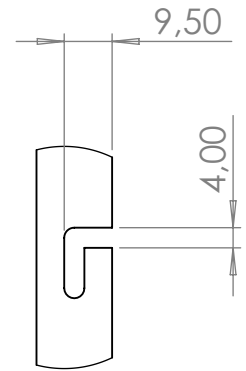
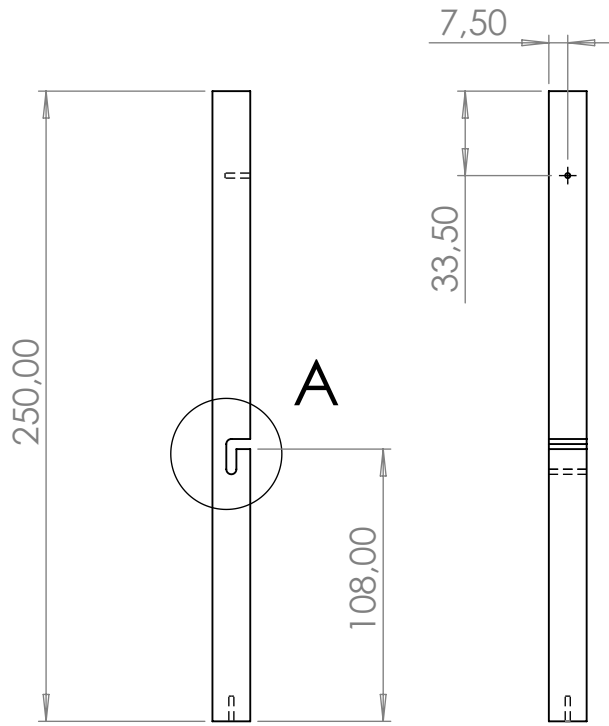


TAMAÑO DE HOJA:
A4

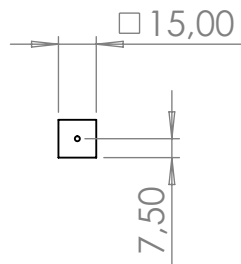
FECHA:
22/06/2025

HOJA:
34

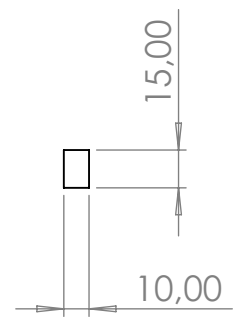
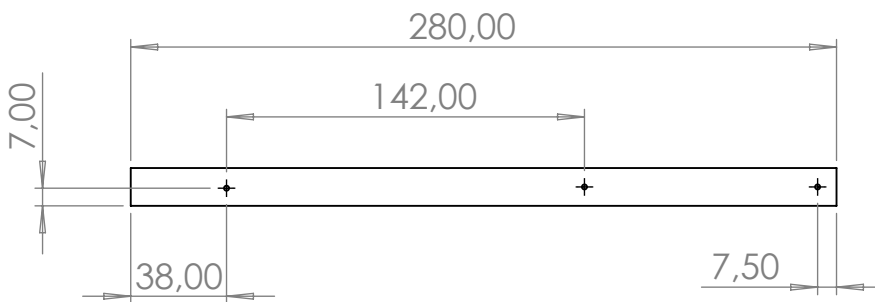
LISTÓN VERTICAL DE LA BASE



DETALLE A
ESCALA 2 : 3



LISTÓN LATERAL DE LA BASE



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

TÍTULO:

**LISTÓN VERTICAL Y LATERAL
DE LA BASE**

ESCALA:
1:3

NÚMERO:
3-4

FIRMA:

DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE



TAMAÑO DE HOJA:
A4

FECHA:
22/06/2025

HOJA:
35

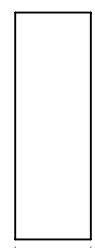
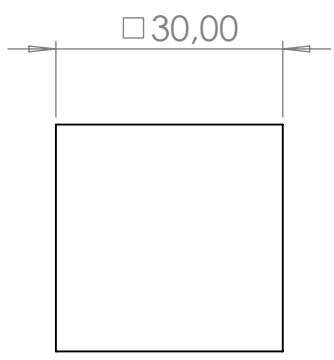
4 3 2 1

F

PILAR DEL LISTÓN LATERAL

El ensamblaje entre estos dos elementos y con los listones lateral e inferior se recomienda hacerlo con silicona caliente además de con clavos.

F



10,00

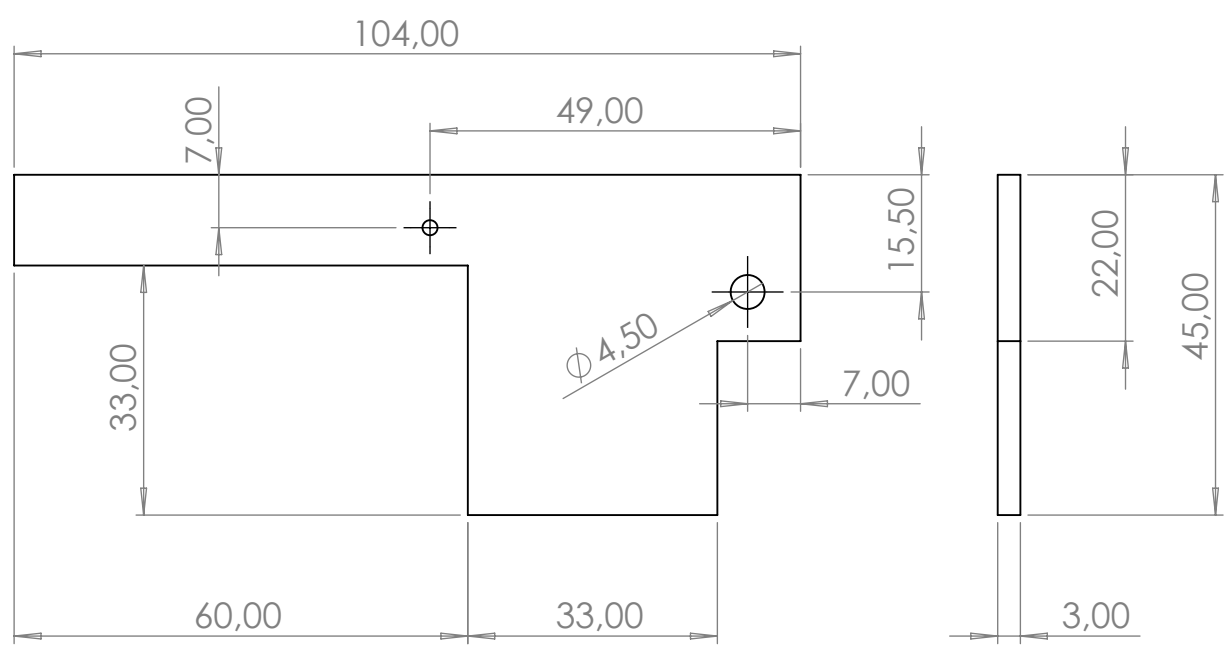
E

E

D

D

TABLA DE APOYO



C

C

B

B

A

A



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:

PILAR DEL LISTÓN LATERAL Y TABLA DE APOYO

ESCALA:

1:1

NÚMERO:

5-6

FIRMA:

DIBUJADO POR:

PABLO MARTÍN BASALLOTE



TAMAÑO DE HOJA:

A4

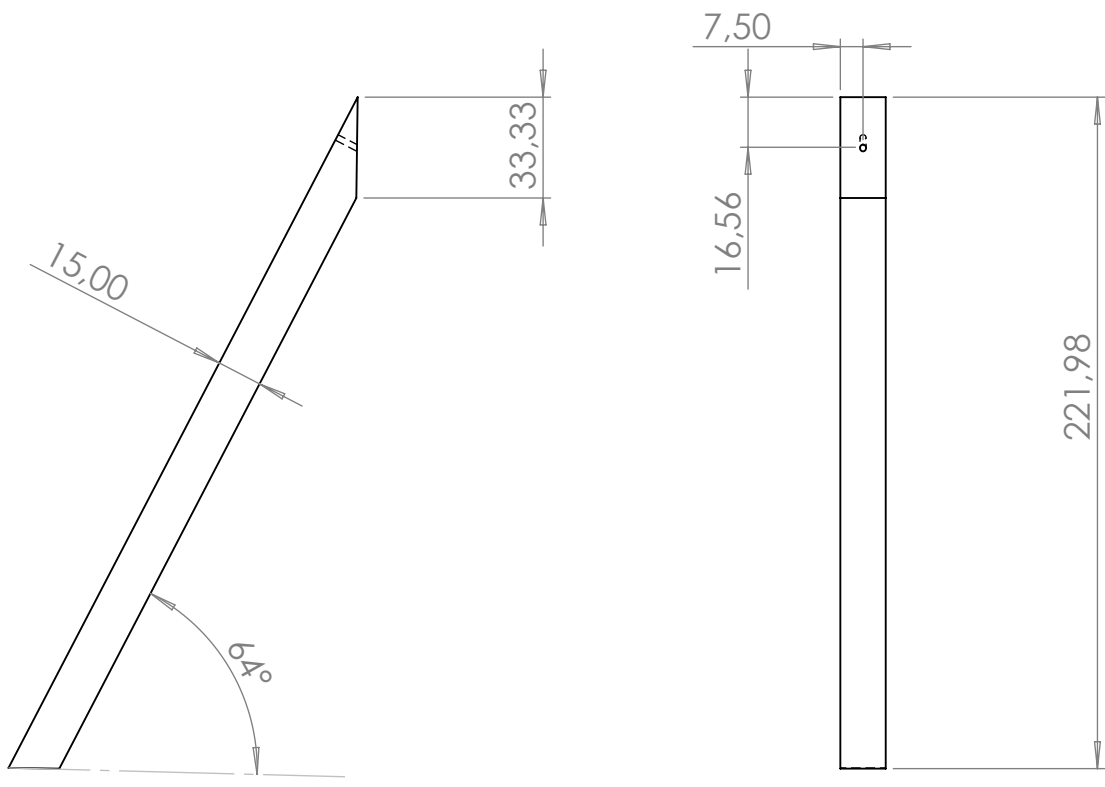
FECHA:

22/06/2025

HOJA:

36

4 3 2 1



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:

SOPORTE LATERAL

ESCALA:
2:5

NÚMERO:
7

FIRMA:

DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE



TAMAÑO DE HOJA:
A4

FECHA:
22/06/2025

HOJA:
37

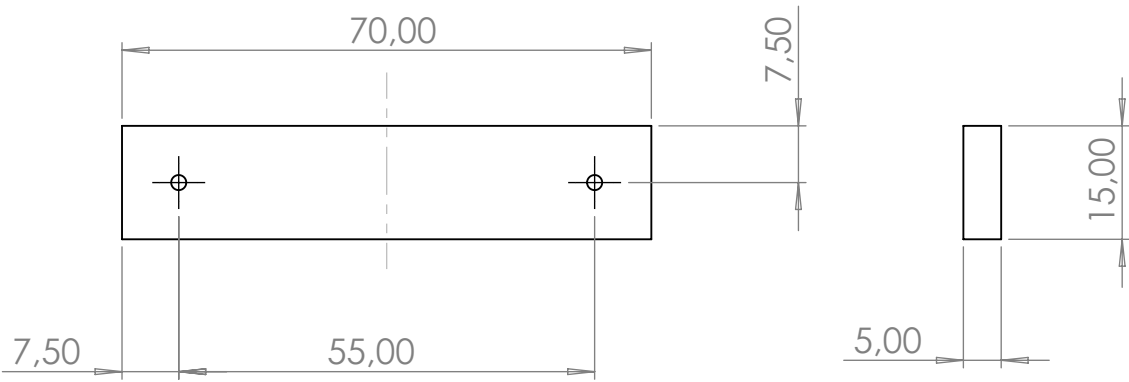
4 3 2 1

F

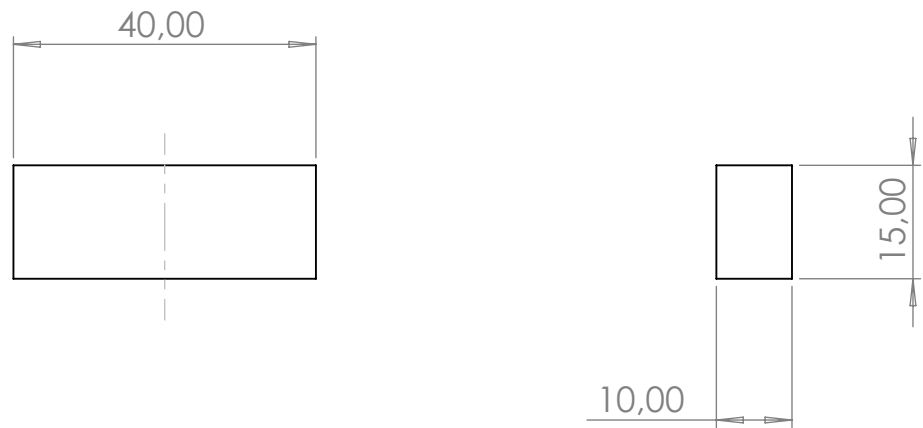
F

El ensamblaje entre estos dos elementos se recomienda hacerlo con silicona caliente.

TOPE DEL BRAZO LANZADOR



REFUERZO DEL TOPE



D

D

C

C

B

B

A

A



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:

TOPE DEL BRAZO LANZADOR Y SU REFUERZO

ESCALA: **1:1**

NÚMERO: **8-9**

FIRMA:

DIBUJADO POR: **PABLO MARTÍN BASALLOTE**



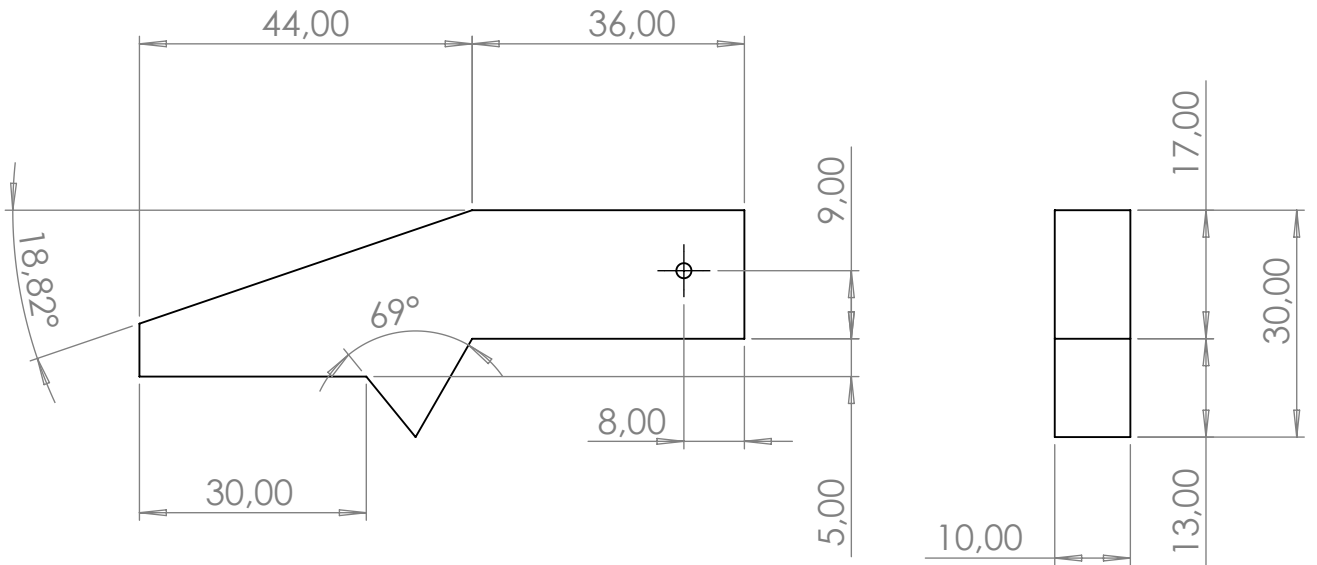
TAMAÑO DE HOJA: **A4**

FECHA: **22/06/2025**

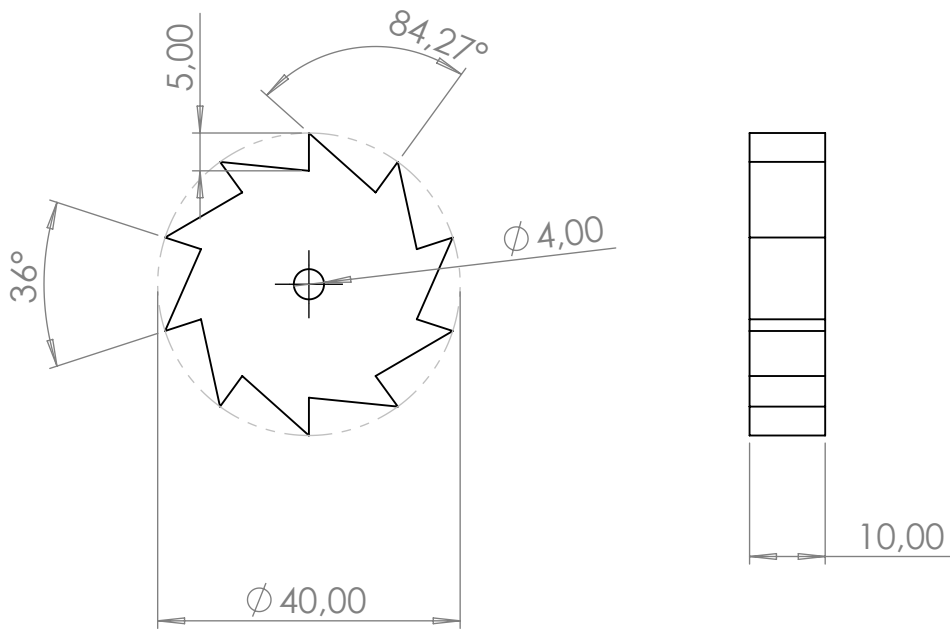
HOJA: **38**

4 3 2 1

FRENO DEL MECANISMO



RUEDA DEL FRENO



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:

FRENO DEL MECANISMO Y RUEDA DEL FRENO

ESCALA:
1:1

NÚMERO:
10-11

FIRMA:

DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE



TAMAÑO DE HOJA:
A4

FECHA:
22/06/2025

HOJA:
39

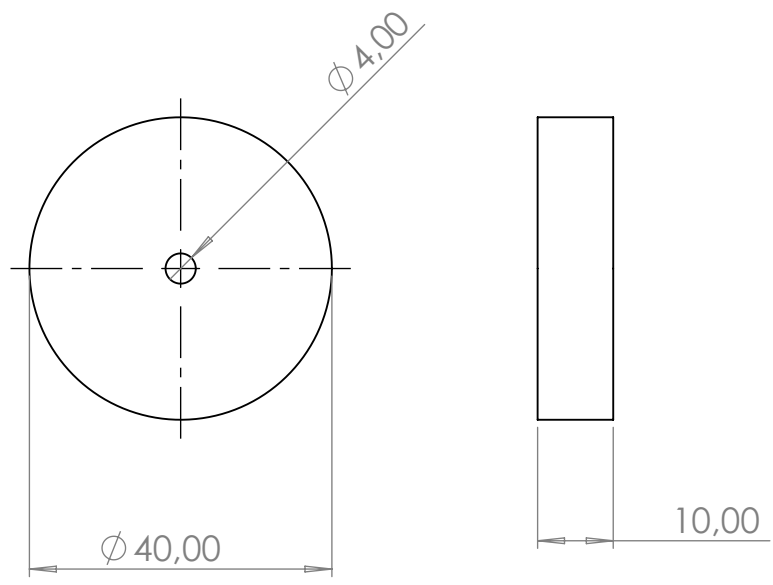
4 3 2 1

F

RUEDA ESTABILIZADORA DEL EJE

F

E

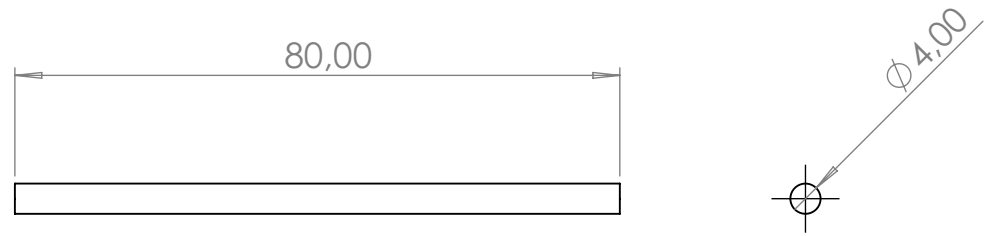


D

D

EJE TAMBOR DE CUERDAS

C



B

B

A

A



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

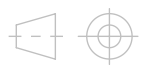
TÍTULO:
**RUEDA ESTABILIZADORA DEL EJE Y
 EJE TAMBOR DE CUERDAS**

ESCALA:
1:1

NÚMERO:
12-13

FIRMA:

DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE



TAMAÑO DE HOJA:
A4

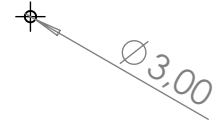
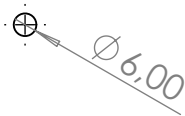
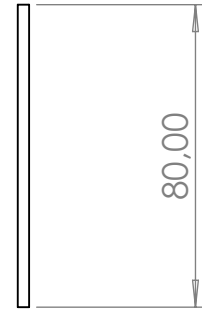
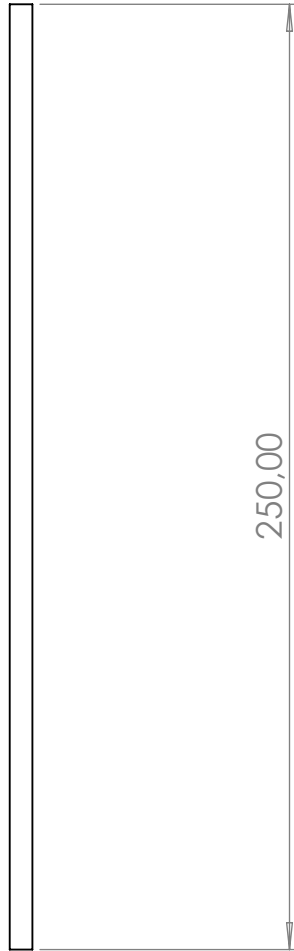
FECHA:
22/06/2025

HOJA:
40

4 3 2 1

BRAZO LANZADOR

EJE DEL BRAZO



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

TÍTULO:

**BRAZO LANZADOR Y EJE
DEL BRAZO**

ESCALA:
1:2

NÚMERO:
14-15

FIRMA:

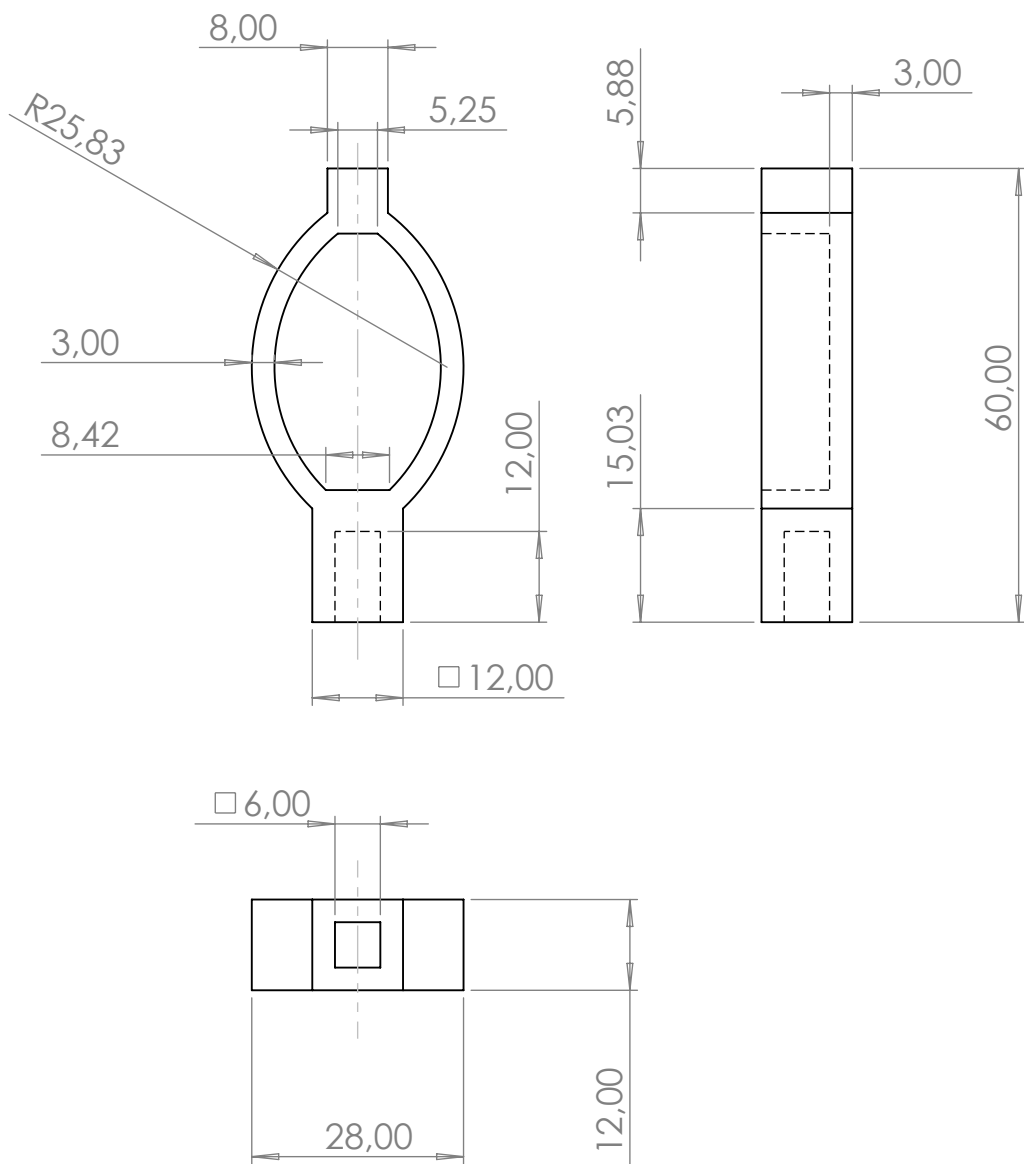
DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE



TAMAÑO DE HOJA:
A4

FECHA:
22/06/2025

HOJA:
41



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:

PORTAPROYECTIL

ESCALA:
1:1

NÚMERO:
16

FIRMA:

DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE



TAMAÑO DE HOJA:
A4

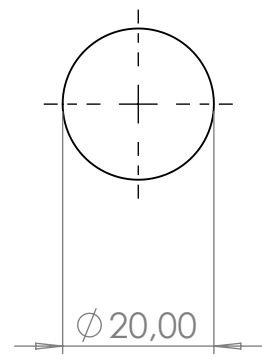
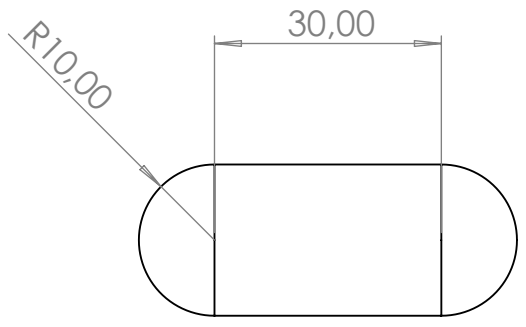
FECHA:
22/06/2025

HOJA:
42

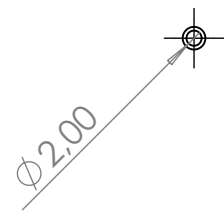
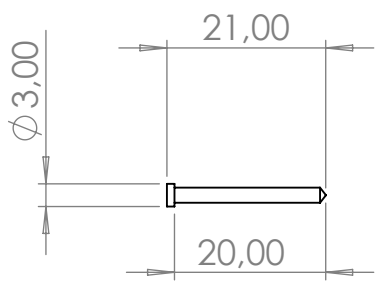
4 3 2 1

F
E
D
C
B
A

PIEDRA CONTRAPESO



CLAVO



F
E
D
C
B
A



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:

PIEDRA CONTRAPESO Y CLAVO

ESCALA:

1:1

NÚMERO:

17-18

FIRMA:

DIBUJADO POR:

PABLO MARTÍN BASALLOTE



TAMAÑO DE HOJA:

A4

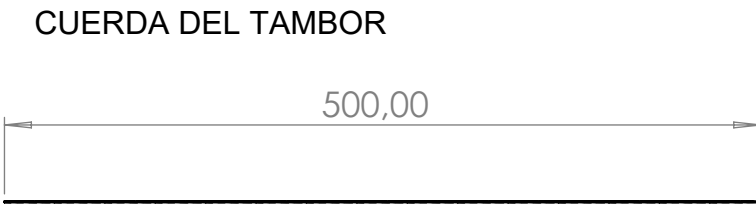
FECHA:

22/06/2025

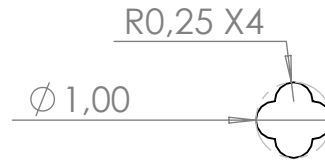
HOJA:

43

4 3 2 1

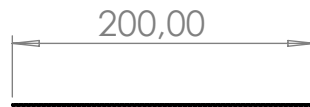


B

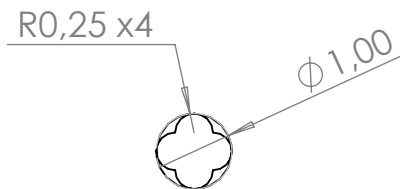


DETALLE B
ESCALA 10 : 1

CUERDA DEL CONTRAPESO



C



DETALLE C
ESCALA 10 : 1



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TÍTULO:

CUERDA DEL TAMBOR Y CUERDA DE FIJACIÓN CONTRAPESO

ESCALA:
1:5

NÚMERO:
19-20

FIRMA:

DIBUJADO POR:
PABLO MARTÍN BASALLOTE



TAMAÑO DE HOJA:
A4

FECHA:
22/06/2025

HOJA:
44

REFERENCIAS

- [1] Co, I. I. H. (2024, 7 abril). Catapulta: Arma de asedio antigua. *Invest In History Co.*
<https://investinhistory.ca/es/2024/04/06/catapulta-antigua-arma-de-asedio/>
- [2] Ssreymol. (2022, 14 octubre). Evolución de las armas de asedio. *Historipedia.*
<https://historipedia.org/curiosidades-historia/evolucion-armas-de-asedio/>
- [3] MedieWorld. (2023, 17 noviembre). Armas de asedio medievales: Maravillas de la ingeniería del mundo antiguo. *MedieWorld.*
<https://medieworld.com/es/blog/armas-de-asedio-medievales-maravillas-del-mundo-antiguo/>
- [4] Israely, Y. (2024, 20 junio). De la antigüedad a las FDI: El recorrido histórico de las armas de asedio. *Ynetespanol.*
<https://www.ynetespanol.com/tendencias/historias/article/rjvf8mwur>
- [5] De Montoto y de Simón, J. (2016). *Las guerras medievales: Y el renacimiento de los ejércitos.*
- [6] TecnoSalva. (2020, 15 mayo). Construcción de una catapulta trebuchet. *TecnoSalva.*
<https://www.tecnosalva.com/construccion-de-una-trebuchet/>
- [7] FasterCapital. (s. f.). ¿En qué se diferencia el uso de contrapesos o pesas en una catapulta de contrapeso de otros tipos de catapultas? *FasterCapital.*
<https://fastercapital.com/es/tema/%C2%BFen-qu%C3%A9-se-diferencia-el-uso-de-contrapesos-o-pesas-en-una-catapulta-de-contrapeso-de-otros-tipos-de-catapultas.html>
- [8] TecnoSalva. (2021, 2 febrero). Construye una catapulta Leonardo da Vinci. *TecnoSalva.* <https://www.tecnosalva.com/construye-catapulta-leonardo-da-vinci/>
- [9] Gettys, W. E., Keller, F. J., & Skove, M. J. (1991). *Física clásica y moderna.*
- [10] LaHistoria. (2024, 24 marzo). Historia de la catapulta. *LaHistoria.*
<https://lahistoria.info/historia-de-la-catapulta/>

- [11] Tiempo de Inventos. (2024, 26 enero). Catapultas y balistas: Las máquinas de guerra que cambiaron el arte de la batalla. *Tiempo de Inventos*.
<https://tiempodeinventos.net/historia-de-los-inventos/catapultas-balistas-maquinas-guerra-cambiaron-arte-batalla/>
- [12] Curistoria. (2012, 12 febrero). Evolución de la tecnología bélica. *Curistoria*.
<https://www.curistoria.com/2012/02/evolucion-de-la-tecnologia-belica.html>
- [13] Eras Arquitectónicas. (2024, 17 enero). Innovación en el asedio: Catapultas y trebuchets en el ataque a castillos. *Eras Arquitectónicas*.
<https://erasarquitectonicas.net/arquitectura-medieval/innovacion-asedio-catapultas-trebuchets-ataque-castillos/>
- [14] SolidWorks Corporation. (s. f.). *SolidWorks Web Help*. <https://help.solidworks.com/>
- [15] SolidWorks Corporation. (2021). *SolidWorks user guide*. Dassault Systèmes.
- [16] SolidWorks Corporation. (s. f.). Trabajo con modelos 3D – 2024 – Ayuda de SOLIDWORKS Visualize. *SolidWorks*.
https://help.solidworks.com/2024/Spanish/Visualize/c_working_with_3d_models.htm?id=a08f90136b2e4715a7e9afb6eb7453a2#Pg0



En Málaga a 22 de junio de 2025

Fdo.: Pablo Martín Basallote