



Universidad de Jaén

Escuela Politécnica Superior de Jaén

Estudio Histórico-Tecnológico y Reconstrucción Real a Escala de la Grúa Romana “Magna Rota Cuadrípode”

Autor: Pedro Javier Montoro Moreno

Grado: Ingeniería Mecánica

Tutor: Rafael López García

Departamento del tutor: Ingeniería Mecánica y Minera

Fecha: 07/01/2025

Licencia CC





Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Don Rafael López García, tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: Estudio Histórico-Tecnológico y Reconstrucción Real a Escala de la Grúa Romana “Magna Rota Cuadrípode”, que presenta Pedro Javier Montoro Moreno, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Enero de 2025

El alumno:

PEDRO J. MONTORO MORENO

Los tutores:

NOMBRE _TUTORES



Resumen

Este proyecto tiene como objetivo principal recrear una grúa romana a escala reducida, conocida como "Polyspasto", mediante herramientas tecnológicas modernas como el modelado 3D e impresión 3D. Se integra una investigación histórica y tecnológica sobre la ingeniería del Imperio Romano, basándose en documentos clave como "Los Diez Libros de Arquitectura" de Vitruvio.

El trabajo incluye un análisis del contexto histórico y de las aplicaciones de las grúas romanas, explorando su funcionamiento y evolución. Además, se detalla el diseño geométrico, selección de materiales, proceso de construcción y culmina con una maqueta funcional de la grúa, representando los principios mecánicos usados por los romanos, como la ventaja mecánica y sistemas de poleas. Esta investigación contribuye al entendimiento del ingenio técnico romano y su relevancia en la evolución de la ingeniería.

Palabras Clave

Grúa, mecanismo, diseño asistido por ordenador, maqueta, Imperio Romano, reconstrucción a escala, impresión 3D.

Abstract

This project aims to recreate a Roman crane, known as "Polyspasto," at a reduced scale using modern technological tools such as 3D modeling and 3D printing. It incorporates historical and technological research on Roman engineering, based on key documents such as Vitruvius' "Ten Books on Architecture."

The work includes an analysis of the historical context and the applications of Roman cranes, exploring their functionality and evolution. Additionally, it details the geometric design, material selection, construction process, and concludes with a functional model of the crane, showcasing the mechanical principles used by the Romans, such as mechanical advantage and pulley systems. This research contributes to understanding Roman technical ingenuity and its relevance in the evolution of engineering.

Key words

Crane, mechanism, computer-aided design, model, Roman Empire, scale reconstruction, 3D printing.



Índice

| | |
|---|----|
| Tabla de Ilustraciones | 5 |
| 1. FINALIDAD Y METODOLOGÍA DE TRABAJO..... | 7 |
| 2. INTRODUCCIÓN | 7 |
| 3. ANTECEDENTES | 7 |
| 3.1. Contexto Histórico Romano..... | 7 |
| 3.1.1. Situación histórica en Europa..... | 7 |
| 3.1.2. Situación histórica en la Península Ibérica | 9 |
| 3.2. Ingeniería y tecnología en la época..... | 11 |
| 3.3. Vitruvio | 13 |
| 3.3.1. De Architectura | 15 |
| 3.4. Máquinas | 22 |
| 3.4.1. Máquinas de tracción | 22 |
| 3.4.2. Máquinas para elevar agua | 25 |
| 3.4.3. Molinos | 26 |
| 3.4.4. Catapultas..... | 28 |
| 3.4.5. Ballestas | 30 |
| 3.4.6. Máquinas de ataque..... | 32 |
| 3.5. Grúa Romana “Magna Rota Cuadrípode o Monopode” | 34 |
| 3.5.1. Origen y evolución | 34 |
| 3.5.2. Uso de las grúas | 35 |
| 3.5.3. Principio de funcionamiento de la grúa..... | 37 |
| 4. OBJETIVOS | 39 |
| 5. MODELADO GEOMÉTRICO | 39 |
| 5.1. Consideraciones iniciales..... | 39 |
| 5.2. Software y Hardware | 40 |
| 5.3. Dimensionado y Diseño | 41 |
| 5.4. Metodología de diseño | 42 |
| 5.5. Partes de la Grúa Romana “Magna Rota Cuadrípode” | 43 |
| 5.5.1. Subconjunto 1: Base Cruciforme | 47 |
| 5.5.2. Subconjunto 2: Husillo..... | 49 |
| 5.5.3. Subconjunto 3: Esqueleto Móvil | 50 |
| 5.5.4. Subconjunto 4: Soporte y Freno de Rueda..... | 51 |
| 5.5.5. Subconjunto 5: Rueda..... | 53 |
| 5.5.6. Subconjunto 6: Pasadores | 54 |
| 5.6. Ensamblaje | 55 |



| | | |
|--------|--|----|
| 5.7. | Planos | 56 |
| 5.8. | Consideraciones y dimensionado..... | 57 |
| 5.8.1. | Documentación Histórica y Usos de las Grúas Romanas..... | 57 |
| 5.8.2. | Justificación de las Medidas Seleccionadas | 59 |
| 5.8.3. | Análisis de los Elementos Principales | 60 |
| 6. | CONSTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA. | 61 |
| 6.1. | Materiales | 61 |
| 6.1.1. | Propiedades de los materiales. | 62 |
| 6.2. | Máquinas/Herramientas utilizadas..... | 65 |
| 6.3. | Método de fabricación. | 72 |
| 6.3.1. | Impresión 3D..... | 72 |
| 6.3.2. | Carpintería. | 75 |
| 7. | MAQUETA COMPLETA..... | 81 |
| 8. | CONCLUSIONES..... | 82 |
| 9. | REFERENCIAS..... | 84 |
| 10. | ANEXOS..... | 86 |
| 10.1. | Reportaje videográfico..... | 86 |
| 10.2. | Planos completos. | 86 |

Tabla de Ilustraciones

| | | |
|-----------------|---|----|
| Ilustración 1. | Expansión del Imperio Romano en el 117 d.C. Andrei Nacu (Abril 2012). | 9 |
| Ilustración 2. | Acueducto de Segovia. Fuente: tickets.turismodesegovia.com | 10 |
| Ilustración 3. | Torre de Hércules. Fuente: O'Rincón deGalicia (2021) | 10 |
| Ilustración 4. | Puente de Alcántara. Fuente: turismocaceres | 11 |
| Ilustración 5. | Calzadas Romanas. Fuente: Atlas Didácto (Gobierno de España)..... | 12 |
| Ilustración 6. | Marco Vitruvio Polión. Fuente: BBC.com..... | 14 |
| Ilustración 7. | El "Hombre de Vitruvio" de Leonardo da Vinci. Fuente: publico.com | 14 |
| Ilustración 8. | De Architectura. (Los diez libros de Vitruvio). Fuente: | |
| | aldiapomer.wordpress.com | 15 |
| Ilustración 9. | Lámina LII. Fuente: Los diez libros de Vitruvio | 21 |
| Ilustración 10. | Continuación Lámina LII. Fuente: Los diez libros de Vitruvio..... | 22 |
| Ilustración 11. | Penstaspastos en uso. Fuente: Los diez libros de Vitruvio. | 25 |
| Ilustración 12. | Tambor (tympano). Fuente: | |
| | infraestructurasromanaspuebloaticum.wordpress.com..... | 26 |
| Ilustración 13. | Molino pompeyano. Fuente: pablomajluf.mx | 27 |
| Ilustración 14. | Rueda hidráulica romana de Riotinto. Fuente: huelvabuenasnoticias.com ... | 28 |
| Ilustración 15. | Catapulta de torsión. Fuente: pelandintecno.blogspot.com..... | 30 |
| Ilustración 16. | Catapulta de tensión. Fuente: Wikipedia.com..... | 30 |
| Ilustración 17. | Balista. Fuente: Wikipedia.com | 31 |



| | |
|--|----|
| Ilustración 18. Onagro. Fuente: antiguerincon.com | 32 |
| Ilustración 19. Muscolo. Fuente: beacon.by..... | 32 |
| Ilustración 20. Plúteo. Fuente: Wikipedia.com | 33 |
| Ilustración 21. Torre de asedio. Fuente: Wikipedia.com | 33 |
| Ilustración 22. Grúa Romana con torre de elevación Fuente: cults3d.com | 35 |
| Ilustración 23. Modelo a seguir para el diseño de la grúa. Fuente: viajes.elpais.com | 40 |
| Ilustración 24. Herramienta "Circular" para la creación de la rueda. Fuente: Elaboración propia..... | 43 |
| Ilustración 25. Subconjuntos de la grúa. Fuente: Elaboración propia..... | 43 |
| Ilustración 26. Subconjunto 1: Base Cruciforme. Fuente: Elaboración propia..... | 44 |
| Ilustración 27. Subconjunto 3: Esqueleto Móvil. Fuente: Elaboración propia | 45 |
| Ilustración 28. Subconjunto 4: Soporte de rueda. Fuente: Elaboración propia | 45 |
| Ilustración 29. Subconjunto 4.3: Freno. Fuente: Elaboración propia | 46 |
| Ilustración 30. Subconjunto 5: Rueda. Fuente: Elaboración propia..... | 46 |
| Ilustración 31. Subconjunto 6: Pasadores. Fuente: Elaboración propia..... | 47 |
| Ilustración 32. Base Cruciforme. Fuente: Elaboración propia | 48 |
| Ilustración 33. Husillo. Fuente: Elaboración propia | 49 |
| Ilustración 34. Esqueleto Móvil. Fuente: Elaboración propia..... | 51 |
| Ilustración 35. Soporte y Freno de Rueda. Fuente: Elaboración propia | 52 |
| Ilustración 36. Rueda. Fuente: Elaboración propia | 54 |
| Ilustración 37. Pasadores. Fuente: Elaboración propia | 55 |
| Ilustración 38. Ensamblaje de Grúa Completa. Fuente: Elaboración propia | 55 |
| Ilustración 39. Ejemplo de plano. Fuente: Elaboración propia | 57 |
| Ilustración 40. Ejemplo de filamento para impresora 3D. Fuente: es.rs-online.com | 62 |
| Ilustración 41. Madera de pino. Fuente: www.istockphoto.com | 63 |
| Ilustración 42. Madera de Iroko. Fuente: maderasacuna.com | 64 |
| Ilustración 43. Impresora 3D Bambu Lab P1S. Fuente: Elaboración propia..... | 67 |
| Ilustración 44. Taladro Bosch. Fuente: Elaboración propia..... | 67 |
| Ilustración 45. Sierra de calar Black+Decker. Fuente: Elaboración propia | 68 |
| Ilustración 46. Segueta. Fuente: Elaboración propia | 68 |
| Ilustración 47. Torno empleado para crear eje. Fuente: Elaboración propia | 69 |
| Ilustración 48. Sierra de cinta. Fuente: Elaboración propia..... | 70 |
| Ilustración 49. Fresadora CNC. Fuente: Elaboración propia | 71 |
| Ilustración 50. Grabadora Láser. Fuente: Elaboración propia | 72 |
| Ilustración 51. Software Bambu Studio. Fuente: Elaboración propia..... | 72 |
| Ilustración 52. Parámetros de Calidad. Fuente: Elaboración propia..... | 73 |
| Ilustración 53. Parámetros de Fuerza. Fuente: Elaboración propia..... | 74 |
| Ilustración 54. Parámetros de Soporte. Fuente: Elaboración propia | 74 |
| Ilustración 55. Simulación de impresión. Fuente: Elaboración propia | 75 |
| Ilustración 56. Soportes de Rueda en madera. Fuente: Elaboración propia | 75 |
| Ilustración 57. Esqueleto móvil ensamblado. Fuente: Elaboración propia | 76 |
| Ilustración 59. Ensamblaje de base cruciforme. Fuente: Elaboración propia | 77 |
| Ilustración 58. Ensamblaje de la rueda. Fuente: Elaboración propia..... | 77 |
| Ilustración 60. Grúa montada. Fuente: Elaboración propia | 78 |
| Ilustración 61. Freno sin accionar (eje con libre giro). Fuente: Elaboración propia | 79 |
| Ilustración 62. Freno accionado. Fuente: Elaboración propia | 79 |
| Ilustración 63. Grabado en madera mediante láser. Fuente: Elaboración propia | 80 |
| Ilustración 64. Grúa a escala completa. Fuente: Elaboración propia | 81 |



1. FINALIDAD Y METODOLOGÍA DE TRABAJO

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado (en adelante TFG) es la recreación 3D a escala reducida, pero fielmente reproducida, del “Polyspasto”, grúa romana que se empleaba en el antiguo Imperio Romano desde el 27 a.C. hasta el 476.

Previamente a esta recreación de podrá en contexto mediante la explicación histórica y teórica de la ingeniería y tecnología de la época tanto en la Península Ibérica como en Europa.

2. INTRODUCCIÓN

Es de importancia remarcar que estas líneas de investigación principalmente se han desarrollado por historiadores, pero pocas por un Ingeniero desde el punto de vista más técnico.

El desarrollo de este tipo de mecanismos es de vital importancia tanto histórica como tecnológicamente, ya que con este estudio se puede apreciar de forma precisa el estilo a la hora de diseñar y crear un tipo de mecanismo en el Imperio Romano, además del posterior desarrollo y mejora que este experimenta a lo largo de los años.

Otro punto a favor para este desarrollo es la poca información que se encuentra sobre los mecanismos de esta época siendo “Los Diez Libros de Arquitectura” de Marco Lucio Vitruvio Polion, uno de los pocos documentos oficiales donde desarrolla el estudio de la arquitectura del Imperio Romano.

3. ANTECEDENTES

3.1. Contexto Histórico Romano

3.1.1. Situación histórica en Europa

Sin importar el tamaño o las habilidades de sus ejércitos o de las capacidades de sus líderes, todos los imperios - los Babilonios, los Asirios, los Egipcios, los Persas - terminaron cayendo en la ruina. Una de las muchas razones para este declive final



era la vasta extensión del imperio, crecieron tanto para ser admirarlos que eran susceptibles a fuerzas internas y externas. (Donald L. Wasson, 2016) [\[2\]](#)

Es conocido que uno de los más grandes imperios fue el imperio Romano. A través de los siglos creció desde una pequeña ciudad italiana hasta controlar las tierras a lo largo de Europa, los Balcanes, el Medio oriente y el norte de África (Ilustración 1).

En el comienzo, antes de la República, la ciudad de Roma tenía una población estimada de unos miles de habitantes. Roma se convertía en un imán para artistas, mercaderes y en general para las personas de todos los estilos de vida que estaban en busca de fuentes de trabajo. (Donald L. Wasson, 2016) [\[2\]](#)

El Imperio creció de 4.063.000 habitantes en el año 28 a.C. a 4.937.000 habitantes en el año 14 a.C. Este dato fue un punto de gran orgullo para el emperador. (Donald L. Wasson, 2016) [\[2\]](#)

Desde una ciudad pequeña en el extremo occidental de Italia, Roma - o el imperio - creció para incluir un territorio desde el Mar del Norte a la mayoría de la región que circunda el Mar Mediterráneo. Hacia el norte estaban Britania, Germania y Galia. Al occidente y alrededor del norte de África el imperio incluía a Hispania, Mauritania y Numidia. Hacia el oriente y en el Medio oriente estaban Egipto, Judea, Siria, Partia y Asia menor. Cerca de Italia y hacia el este estaban Macedonia, Grecia, Mesia y Dacia. También habría que incluir las islas de Córcega, Cerdeña y Sicilia. A lo largo del imperio existían ciudades de entre 100.000 y 300.000 habitantes - Alejandría, Cartago, Antioquía, Pérgamo, Éfeso, y Lyon. Sin embargo, como todos los que lo antecedieron, el imperio Romano no pudo resistir y finalmente cayó ante una invasión desde el norte en el año 476 a.C. Para comprender la extensión de este gran imperio, es necesario remontarse a los comienzos en el inicio del siglo sexto a.C. (Donald L. Wasson, 2016) [\[2\]](#)



Ilustración 1. Expansión del Imperio Romano en el 117 d.C. Andrei Nacu (Abril 2012).

3.1.2. Situación histórica en la Península Ibérica

Se conoce como Hispania romana a los territorios de la península ibérica y las islas Baleares durante el periodo histórico de dominación romana.

Este periodo se encuentra comprendido entre 218 a. C. (fecha del desembarco romano en Ampurias) y los principios del siglo v (cuando, tras la caída del Imperio romano de Occidente, en 476, entran los visigodos en la Península, sustituyendo a la autoridad de Roma). A lo largo de este extenso periodo de algo más de seis siglos, tanto la población como la organización política del territorio hispánico sufrieron profundos e irreversibles cambios, y quedarían marcadas para siempre con la inconfundible impronta de la cultura y las costumbres romanas. [3]

Restos romanos en España hay muchísimos, siendo los principales:

El acueducto de Segovia, (Ilustración 2) que lleva en pie desde principios del siglo II d.C. y su función era la de transportar agua desde el arroyo de la Fuenfría, a 17 km de la ciudad. Su arcada mide casi 30 metros de alto y los sillares de granito están simplemente superpuestos uno sobre otro. [5]



La Torre de Hércules de Coruña, (Ilustración 3) siendo unos de los faros romanos más antiguos del mundo, y que además sigue estando en funcionamiento a día de hoy. Fue construida en el siglo I d.C. [5]

Puente Romano de Alcántara en Cáceres, (Ilustración 4) ubicado sobre el río Tajo y construido por Cayo Julio Lácer, en el siglo II d.C. La obra arquitectónica reúne las cualidades que se buscaban en las construcciones romanas: utilidad, robustez y firmeza y belleza. Y es que no están reñidas estas cualidades de utilidad y belleza, aunque parezca que hoy en día la tendencia sea otra en algunos ámbitos del interiorismo y la arquitectura. En el puente puede leerse una inscripción que dice en latín “El puente que permanecerá en pie por los siglos del mundo”. [5]

La civilización romana era sin duda una civilización que creía en los valores de la firmeza, la fortaleza y a la vez la filosofía, el arte y la belleza.



Ilustración 2. Acueducto de Segovia. Fuente: tickets.turismodesegovia.com



Ilustración 3. Torre de Hércules. Fuente: [O'Rincón de Galicia \(2021\)](#)

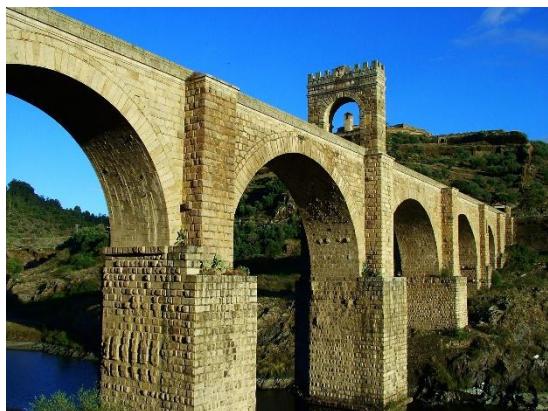


Ilustración 4. Puente de Alcántara. Fuente:
[turismocaceres](http://turismocaceres.es)

3.2. Ingeniería y tecnología en la época

El imperio romano fue una de las civilizaciones más desarrolladas tecnológicamente de la antigüedad, con algunos de sus conceptos e invenciones más avanzados. [6]

La tecnología desarrollada por la civilización estaba limitada por las fuentes de energía disponibles, valiéndose de la fuerza humana, de los animales de tiro, de las corrientes de agua y del viento que impulsaba su flota. Con estas limitadas fuentes, los romanos consiguieron construir estructuras impresionantes, que, en muchos casos, como los mencionados anteriormente, se han conservado hasta la actualidad, siendo un testimonio a sus superiores destrezas de ingeniería e ingenio. [6]

Los logros de la ingeniería romana generaron mucha riqueza y prosperidad, lo que mejoró la vida diaria de los romanos y ayudaron a Roma a mantener su dominio en Europa y el Mediterráneo.

La antigua Roma consiguió logros tecnológicos notables, pero algunos de estos avances fueron abandonados durante la Edad Media. A pesar de ello, algunos de estos inventos resurgieron durante los siglos XIX y XX que se dividieron en varias categorías según el oficio.

Los avances tecnológicos romanos más destacables son:



- Acueductos: los acueductos ya existían en el Cercano Oriente desde siglos antes, pero los romanos introdujeron muchas innovaciones que les permitieron construir acueductos a una escala sin precedentes. Los acueductos romanos usaban la gravedad, no las bombas, con una leve pendiente para que el agua fluyera. (Victor Labate, 2016) [\[7\]](#)
- Puentes: Los constructores romanos comenzaron con el uso del hormigón a mediados del siglo II a.C. y también fueron los primeros en entender completamente las ventajas estructurales de un arco. Tales estructuras arqueadas hacían a los puentes más fuerte y permitían vanos más grandes, como anteriormente hemos comentado, el puente de Alcántara, todavía sigue en pie y tiene una longitud de 182 metros, con arcos de 29 metros de ancho y enormes *voussoirs* que pesan hasta ocho toneladas cada una. [\[8\]](#)
- Calzadas Romanas: En la época romana se construyeron en la Península Ibérica unos 10.000 kilómetros de calzadas, muchas de ellas precursoras de las actuales vías. Existían dos tipos: las principales, que comunicaban las ciudades más importantes, y las secundarias, que comunicaban el resto de núcleos de población.

Los puertos y la existencia de yacimientos minerales determinaron enormemente la configuración de la red. Además, como las principales ciudades romanas se situaban en la periferia, la red de calzadas (Ilustración 5) se conformó de esa forma. Sin embargo, también se construyeron vías importantes que circulaban por el interior, como la que comunicaba Emérita Augusta (Mérida) y Cesar Augusta (Zaragoza). [\[19\]](#)



Ilustración 5. Calzadas Romanas. Fuente: [Atlas Didáctico \(Gobierno de España\)](#)



Las vías principales eran:

- Vía Augusta: Fue la más extensa de la Península: unos 1.500 kilómetros que conectaban la Bética con el norte de Hispania bordeando el Mediterráneo; aunque la ruta difiere en función de la fuente. Según el Itinerario Antonino y cogiendo como referencia la nomenclatura adoptada por el arqueólogo Eduardo Saavedra, esta era la vía II, y transcurría desde el Summus Pyrenaeus, en el Pirineo catalán, hasta Cástulo (Linares), pasando por Tarraco (Tarragona), Saguntum (Sagunto) o Carthago Nova (Cartagena). En los Vasos de Vicarello, la ruta gira hacia el interior al pasar Valentia (Valencia) y discurre por Saltigi (provincia de Albacete), Corduba (Córdoba) e Híspalis (Sevilla) hasta finalizar en Gades. [\[20\]](#)
- Vía de la Plata: esta vía unía Itálica con Astúrica Augusta (Astorga), o lo que es lo mismo, el Sur con el Norte y que era una importante ruta por sus yacimientos de oro, plata, hierro y cobre, de ahí su nombre. [\[19\]](#)

3.3. Vitruvio

Hace poco más de 2.000 años, un soldado e ingeniero jubilado escribió el que es probablemente el libro más influyente en la historia de la arquitectura. [\[10\]](#)

Marco Vitruvio Polión o Marcus Vitruvius Pollio (c. 90 – c. 20 a.C.), mejor conocido como Vitruvio o Vitruvius, (Ilustración 6) fue un ingeniero y arquitecto militar romano que escribió *De Architectura* (Sobre arquitectura) también conocida como “Los Diez Libros de Arquitectura”, un tratado que combina la historia de la ingeniería y arquitectura antiguas con la experiencia personal del autor y consejos sobre la materia. (Mark Cartwright, 2015) [\[9\]](#)

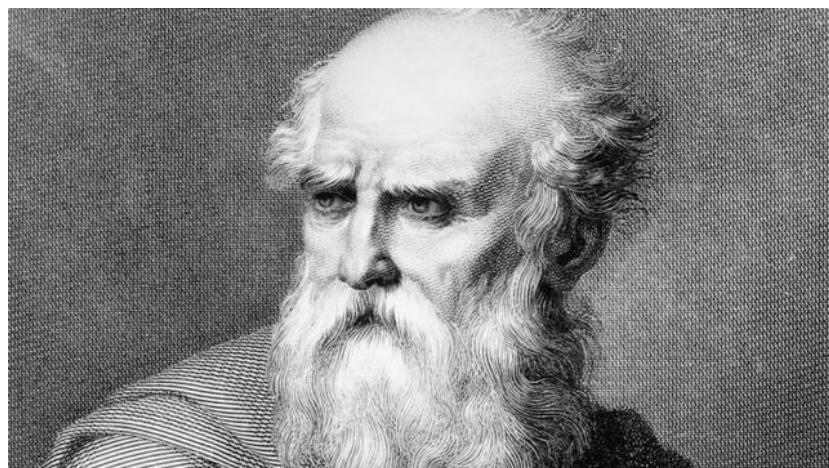


Ilustración 6. Marco Vitruvio Polión. Fuente: [BBC.com](#)

Este libro no solo incluye consejos prácticos para el diseño y construcción de viviendas, sino también una gama fascinante de información sobre ingeniería romana y tecnología, siendo este, la tesis principal de este documento, incluyendo maquinarias de guerra, acueductos y relojes de agua.

Todas las estructuras del arquitecto italiano Andrea Palladio, como las villas, basílicas y puentes en Venecia, otros edificios de tipo palladiano de épocas posteriores, desde el Salón de Banquetes del Palacio de Whitehall en Londres, hasta la Casa Blanca en Estados Unidos, están en deuda con Vitruvio. [\[10\]](#)

Su discusión sobre la relación entre proporciones perfectas de la arquitectura y el cuerpo humano inspiraron uno de los dibujos más famosos del Renacimiento, el "Hombre de Vitruvio" (Ilustración 7) de Leonardo da Vinci. [\[10\]](#)

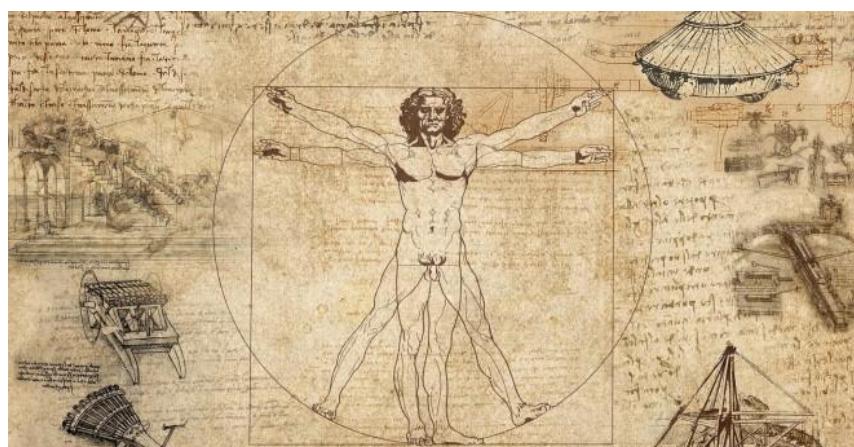


Ilustración 7. El "Hombre de Vitruvio" de Leonardo da Vinci. Fuente: [publico.com](#)



Se estima que Vitruvio nació entre 80-70 a.C. en la antigua Roma, y al no haber certidumbre sobre su primer y último nombre se le ha simplificado a Vitruvio. [\[10\]](#)

Vivió durante un período de turbulencia política. Después de décadas de guerras civiles, Roma estaba haciendo la transición de república a lo que hoy se conoce como el Imperio Romano y nuevos grupos sociales estaban emergiendo y adquiriendo puestos de poder a los que no habían tenido acceso. [\[10\]](#)

Combatío bajo Julio César en Galia y luego vio el ascenso del emperador César Augusto -hijo adoptivo del primero- a quién le dedicó su libro "De Architectura". [\[10\]](#)

En su obra deja entrever que fue un protegido de Octavia, la hermana de César Augusto, y que además de servir en el ejército construyó una basílica en Fano, en la costa adriática. También hay evidencia de que estuvo activo en algunas áreas de ingeniería y que probablemente inventó un calibrador de tuberías de acueducto. [\[10\]](#)

3.3.1. De Architectura

El contenido de *De Architectura* (Ilustración 8) revela el concepto mucho más amplio de los antiguos sobre lo que realmente es “arquitectura” y describe tópicos como la ciencia, las matemáticas, la geometría, la astronomía, la astrología, la tecnología, etc.



Ilustración 8. De Architectura. (Los diez libros de Vitruvio). Fuente: aldiapomer.wordpress.com

Originalmente, *De Architectura* también tenía ilustraciones que ayudaban a aclarar las descripciones de Vitruvio, particularmente aquellas de los dispositivos



técnicos. Estas constituyen en sí mismas un registro de valor incalculable y sus descripciones de máquinas tales como el odómetro, que medía distancias por medio de bolas que caían en un tambor, intrigaron a figuras notables tales como Leonardo Da Vinci, quien intentó sus propios diseños reconstructivos. (Mark Cartwright, 2015) [\[9\]](#)

Copiada y vuelta a copiar a través de la Edad Media, la transcripción más antigua que se conserva se remonta al siglo VIII y en 1486 se publicaron las primeras copias impresas en Roma. Hasta el siglo XX, las descripciones, ilustraciones y la misma importancia que Vitruvio le daba a ciertos temas por encima de otros influyeron no solo a los estudiantes de la materia, sino que definieron por largo tiempo los que se consideraron componentes primarios de la arquitectura occidental. (Mark Cartwright, 2015) [\[9\]](#)

Además, Vitruvio incorporaba en este libro una serie de láminas relacionadas con cada libro para hacer más clara y obvia la explicación, tanto de métodos matemáticos como diseños. Estas láminas fueron de gran ayuda para su posterior traducción del latín, puesto que Vitruvio utilizaba palabras muy técnicas, algunas inventadas por él porque en esta época aun no existían estos tecnicismos.

Resumen de De Architectura:

Libro I: sobre la educación ideal de un arquitecto, los principios y las divisiones de la arquitectura, las fortificaciones, los principios de la planificación urbana y donde es mejor construir un templo. (Mark Cartwright, 2015) [\[9\]](#)

En conclusión, la ciencia de la arquitectura es tan compleja, tan esmerada, e incluye tan numerosos y diferenciados conocimientos que, en mi opinión, los arquitectos no pueden ejercerla legítimamente a no ser que, desde la infancia, avanzando progresiva y gradualmente en las ciencias citadas y alimentados por el conocimiento nutritivo de todas las artes, lleguen a alcanzar el supremo templo de la arquitectura. (Libro 1, cap. 1.11)

Libro II: sobre los orígenes de los edificios y los diferentes materiales usados para su construcción tales como ladrillos, arena, piedra y madera, además de los diferentes tipos de muros. (Mark Cartwright, 2015) [\[9\]](#)



Construya muros de dos pies (medio metro) de espesor con hiladas de piedra roja tallada, ladrillo cocido o piedra dura ordinaria en la cavidad: luego, las fachadas exteriores deberían estar unidas a estas con abrazaderas de hierro y plomo. De esta manera, el muro, que no se construyó con solo un apilamiento de material sino en capas, durará indefinidamente. (Libro 2, cap. 8.4)

Libro III: sobre las matemáticas y las proporciones correctas de las columnas y los templos. (Mark Cartwright, 2015) [\[9\]](#)

Los diámetros superiores de las columnas deberían agrandarse para compensar las distancias que aumentan para la mirada del ojo mientras se mira hacia arriba. Porque la vista busca la belleza. (Libro 3, cap. 3.13)

Libro IV: sobre los órdenes arquitectónicos (dórico, jónico y corintio) y los diversos tipos de templos y altares. (Mark Cartwright, 2015) [\[9\]](#)

Si los templos sagrados de los dioses se encuentran a lo largo de vías públicas deberían orientarse de tal manera que los transeúntes puedan verlos y hacer sus saludos en frente de ellos. (Libro 4, cap. 5.2)

Libro V: sobre diversos edificios romanos tales como la basílica, el mejor diseño de los teatros para conseguir la mejor acústica y recomendaciones sobre las edificaciones portuarias. (Mark Cartwright, 2015) [\[9\]](#)

Los antiguos arquitectos, tomando el ejemplo de la naturaleza, diseñaban las gradas de los teatros con base en sus investigaciones en cuanto a la elevación de la voz y trataban, con la ayuda de los principios matemáticos y la teoría musical, idear las maneras en las cuales cualquier voz pronunciada en el escenario llegara de forma más clara y agradable a los oídos de los espectadores. (Libro V, cap. 4.8)

Libro VI: sobre el efecto del clima en el carácter y los mejores cimientos y diseños para viviendas particulares. (Mark Cartwright, 2015) [\[9\]](#)

Los dormitorios y las bibliotecas deberían orientarse hacia el este ya que su función requiere la luz matutina y, de nuevo, para que los libros en las bibliotecas no se pudran. (Libro 6, cap. 4.1)



Libro VII: sobre los pavimentos, las bóvedas y las pinturas murales, incluyendo los mejores colores, sus orígenes e historia de uso. (Mark Cartwright, 2015) [\[9\]](#)

El púrpura tiene el mayor valor y la más hermosa y extraordinaria apariencia de todos estos colores. Se extrae del crustáceo marino del cual se fabrica el tinte púrpura, que es tan increíble para el observador como cualquier otra cosa en la naturaleza. (Libro 7, cap. 8.1)

Libro VIII: se refiere al agua, sus fuentes y su conducción por medio de los acueductos. (Mark Cartwright, 2015) [\[9\]](#)

Hay un manantial en la isla de Cea y aquellos que imprudentemente beben de él pierden la razón; allí está inscrito un epigrama que dice que beber del manantial es delicioso, pero quien beba de él terminará con el cerebro de una piedra. (Libro 8, cap. 3.22)

Libro IX: sobre el estudio de la astronomía y su relevancia para las arquitecturas y la medición de los tiempos usando relojes de sol y de agua. (Mark Cartwright, 2015) [\[9\]](#)

Arquímedes saltó extasiado de la bañera sin demora y corrió a su hogar, completamente desnudo, anunciando a máxima voz que había conseguido lo que buscaba, pues mientras él corría gritaba repetidamente en griego "Eureka, Eureka". (Libro 9, Introducción)

Libro X: describe diversas máquinas y dispositivos tales como aparatos para la medición de distancia, máquinas impulsadas por agua y armas como catapultas, ballestas y máquinas para asedio. (Mark Cartwright, 2015) [\[9\]](#)

Esta trata de detallar paso por paso de la construcción de los instrumentos y los materiales a utilizar, trata también de poder construirlos si en caso fuere el trabajo más arduo y con qué sería necesario mover los pesos de diferentes dimensiones, las poleas y la utilización entre otras maquinarias.

Las sogas se tensan de igual manera por medio de picas o palancas de mano y molinetes hasta que suenan igual. De esta forma, al mantener el dispositivo tensado



con cuñas, las catapultas son "afinadas" al tono adecuado mediante prueba musical.
(Libro 10, cap. 12.2)

Para el tema que nos acontece, este último libro es en el que entraremos en detalle puesto que, en él, Vitruvio se centró en los mecanismos y máquinas de la época como, catapultas, ballestas, etc. Estas, serán un tema a tratar posteriormente.

3.3.1.1. Libro X

El libro X de *De Architectura* se compone de trece capítulos:

- Capítulo 1: Máquinas y Órganos
- Capítulo 2: Máquinas de tracción
- Capítulo 3: La tracción rectilínea y circular
- Capítulo 4: Máquinas para elevar agua
- Capítulo 5: Las norias
- Capítulo 6: Cóclea para elevar agua
- Capítulo 7: La máquina de Ctesibio para elevar agua
- Capítulo 8: Órganos de agua
- Capítulo 9: Como medir las distancias
- Capítulo 10: Las catapultas
- Capítulo 11: Las ballestas
- Capítulo 12: Preparación de las ballestas y de las catapultas
- Capítulo 13: Máquinas de ataque.

En el Libro Décimo de "Los Diez Libros de Arquitectura" de Vitruvio, se aborda el tema de las máquinas y sus principios, vitales en la ingeniería y la construcción de la época. Vitruvio comienza describiendo una ley en la ciudad de Éfeso que establece que los arquitectos deben presentar un presupuesto antes de comenzar una obra pública. Si los costos finales no exceden el presupuesto en más de una cuarta parte, el arquitecto es honrado. De lo contrario, debe cubrir el excedente con sus propios bienes.

A continuación, se detallan diversos tipos de máquinas. Se discuten tanto máquinas de tracción, usadas para mover grandes pesos, como dispositivos para elevar agua. Se describen en detalle las norias, que son ruedas hidráulicas utilizadas



para elevar agua, y la cóclea, un tornillo diseñado por Arquímedes para el mismo propósito.

El texto también menciona las máquinas de Ctesibio, ingeniero conocido por sus avances en la hidráulica, y su invención para elevar agua usando la presión del aire. Además, se exploran los órganos de agua, que funcionan con principios hidráulicos para producir música.

Vitruvio dedica parte del libro a explicar cómo medir distancias de manera precisa, (Ilustración 9) lo cual es fundamental para la planificación y ejecución de obras. Se incluyen también descripciones detalladas de armas de asedio, como catapultas y ballestas, destacando su importancia en la defensa de las ciudades.

En resumen, el décimo libro de Vitruvio proporciona un compendio de conocimiento técnico y práctico (Ilustración 10) sobre las máquinas utilizadas en la antigüedad, mostrando su relevancia tanto en la construcción civil como en el ámbito militar.



LAMINA LII.

Figura 1.

Duplicacion de una superficie cuadrada, inventada por Platon. Vitruvio Lib. IX, Cap. 1.

A. Cuadrado de diez pies de lado, y ciento de superficie.

B. Cuadrado doble en superficie que el antecedente, formado sobre su diagonal C D.

Figura 2.

Triángulo rectángulo hallado por Pitágoras. Vitruvio en dicho Libro IX, Cap. 2.

Figura 3.

Aplicacion de dicho triángulo rectángulo á los tramos de las escaleras.

A B. Perpendiculo desde la contignacion al suelo, dividido en tres partes.

B D. Linea del suelo ó base del triángulo, dividida en quattro partes desde el perpendiculo B hasta la parte interior D del pie del escapo C, *ad interiores calces scaporum*.

Veanse las Notas 3 y 4 al Cap. 2, pag. 211.

Figura 4.

Delineacion del analema para la construccion de relojes solares antiguos, ó sea de horas desiguales. La explicacion va en el texto de Vitruvio Lib. IX, Cap. 8, Num. 35.

Figura 5.

Círculo en grande del locótomo, donde se ve la longitud de la sombra del gnomon en todos los meses del año; aunque Vitruvio solo describe las dos solsticiales A T solsticial de Capricornio, y A R solsticial de Cancer. Así, en Roma el dia del solsticio ibernal ó bruma, que es á 21 de Diciembre, llega á T la sombra del gnomon B A. El 21 de Noviembre y de Enero llega á D. El 21 de Octubre y de Febrero llega á E. El 21 de Setiembre y de Marzo con poca diferencia llega á C. El 21 de Agosto y de Abril llega á L. El 21 de Julio y de Mayo llega á I. Y el 21 de Junio llega á R.

Figuras 6, 7 y 8.

Tenazas para subir las piedras en los edificios. Vitruv. X, 2.

Figura 9.

Máquina llamada *anisocelos*, segun el mismo Libro, Cap. 1 y Nota 5.

Ilustración 9. Lámina LII. Fuente: Los diez libros de Vitruvio

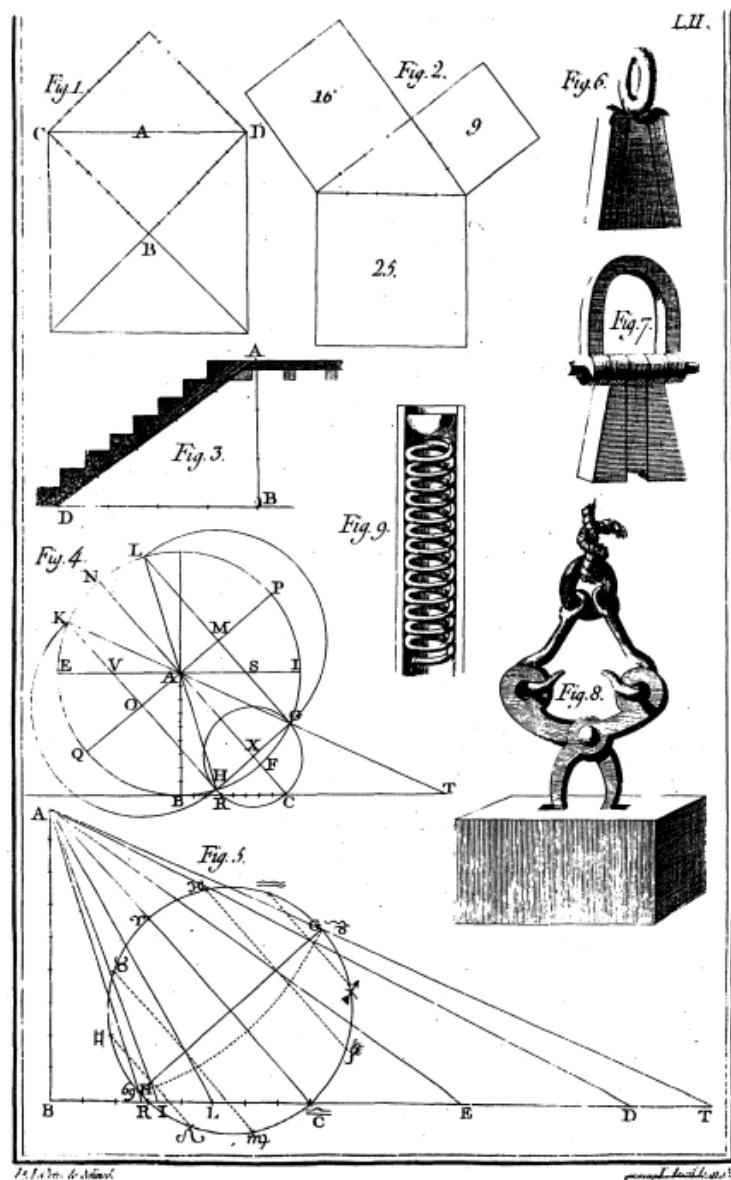


Ilustración 10. Continuación Lámina LII. Fuente: Los diez libros de Vitruvio

3.4. Máquinas

3.4.1. Máquinas de tracción

Vitruvio en aquella época, hablaba de máquina de tracción como las máquinas que son precisas disponer para la construcción de templos y para la ejecución de obras públicas.

Estas máquinas serán dos troncos de madera adecuados al peso que van a soportar, si hay necesidad de preparar máquinas para mover grandes pesos, los



maderos han de ser más largos y más gruesos. Estos maderos se unirán en la parte superior mediante unas abrazaderas mientras que la parte inferior se dispondrá de forma separada y se levantarán colocándolos de forma vertical. (Vitruvio, 15 a.C.) [\[18\]](#)

Luego en lo más alto se suspende un aparejo de poleas que algunos denominan "rechamus" y por el interior de la polea más elevada se hace pasar la cuerda principal. (Vitruvio, 15 a.C.) [\[18\]](#)

Los maderos deberán ser fijados con dos piezas de apoyo con un orificio en las que se colocan las cabezas de rodillos, con el fin de que giren los ejes sin dificultad. (Vitruvio, 15 a.C.) [\[18\]](#)

El nombre de este dispositivo mecánico es "tripastos", ya que gira mediante tres poleas. Cuando tiene dos poleas en el apparejo inferior y tres poleas en el superior, se llama "pentapaston"

Vitruvio en el Capítulo 2 de su décimo libro definió lo que era una máquina de tracción, explicando además las distintas variedades y su principal finalidad, siendo esta el levantar objetos pesado para la creación de edificios públicos.

Si fuera necesario mover pesos de enormes dimensiones en las obras, de ningún modo podemos fiarnos de un simple rodillo o torno; será preciso sujetar un eje que posea en medio un gran tambor, que algunos gustan llamar «rueda», los griegos «amphieren» y otros «perithecium». En esta clase de máquinas las poleas se disponen de una manera completamente distinta. Veamos: tanto en la parte superior como en la inferior se ajustan dos órdenes de poleas. La cuerda, que se utiliza de guía, se introduce en el orificio de la palanca inferior cuidando que los dos cabos de la cuerda queden iguales, cuando la tensemos; se hace pasar la cuerda bordeando y abrazando la polea inferior y sus dos extremos deberán quedar bien sujetos de modo que no se desvíen ni hacia la izquierda ni hacia la derecha. A continuación, se hacen llegar los extremos de la cuerda hasta la polea superior del apparejo, por la parte de fuera y luego se bajan rodeando las poleas inferiores; desde aquí se llevan los extremos hasta el apparejo inferior. Se hacen pasar desde la parte interior rodeando las poleas de este apparejo; así, salen por la derecha y por la izquierda y se llevan de nuevo hasta lo más alto, rodeando las poleas superiores. (Vitruvio, 15 a.C.) [\[18\]](#)



Dentro de la tracción, en esta época ya se diferenciaba entre el movimiento rectilíneo, en griego “eutheiam”, y otro, el movimiento circular, en griego “cycloten”. Ahora bien, ni el movimiento rectilíneo sin el circular, ni el movimiento circular sin el rectilíneo pueden lograr el levantamiento de los pesos. (Vitruvio, 15 a.C.) [\[18\]](#)

Ventaja Mecánica

Hacia finales del siglo XIX, poco antes de que la energía de vapor monopolizara la industria, los dispositivos de elevación accionados por humanos llegaron a ser tan elaborados que un hombre podía levantar un carro de 15 toneladas con una sola mano. Cualquier dispositivo de elevación empezaba a cumplir con un requisito mínimo, la ventaja mecánica (mA), factor que define la capacidad de multiplicar la fuerza de entrada para una mayor fuerza de salida. [\[12\]](#)

En la teoría, la ventaja mecánica (mA) = cociente de velocidad (VR), de modo que en una máquina con una ventaja mecánica de 2:1, la fuerza de la entrada es la mitad de la fuerza de salida, pero se debe ejercer sobre el doble de distancia para poder maniobrar. Se puede apreciar este tipo de proporciones en las ilustraciones de la ingeniería civil en la construcción de acueductos, por ejemplo, donde se ven cómo las cuerdas de sujeción y manipulación se encuentran a distancias que duplican, como mínimo, la altura máxima de la grúa. [\[12\]](#)

La ventaja mecánica de las grúas fue evolucionando como cualquier tecnología: añadiéndole nuevos elementos. Alrededor del siglo IV a.C. se incorporó la polea compuesta, (Ilustración 11) que aún se utiliza hoy en día. Se trata de la combinación de poleas en un mismo bloque, y proporciona una ventaja mecánica igual a la cantidad de poleas usadas. Así, al ejercer una fuerza de 50N sobre una polea triple nos encontramos con una fuerza de elevación final de 150N (proporción 3:1), pero a su vez hay que tener en cuenta que esta proporción se aplica también a la cantidad de cuerda necesaria, ya que se triplicaría la distancia a recorrer, luego la cuerda sería tres veces más larga. [\[12\]](#)



Sobre todo, este tema entraremos más en detalle a la hora del desarrollo del mecanismo escogido para este proyecto "La grúa romana".

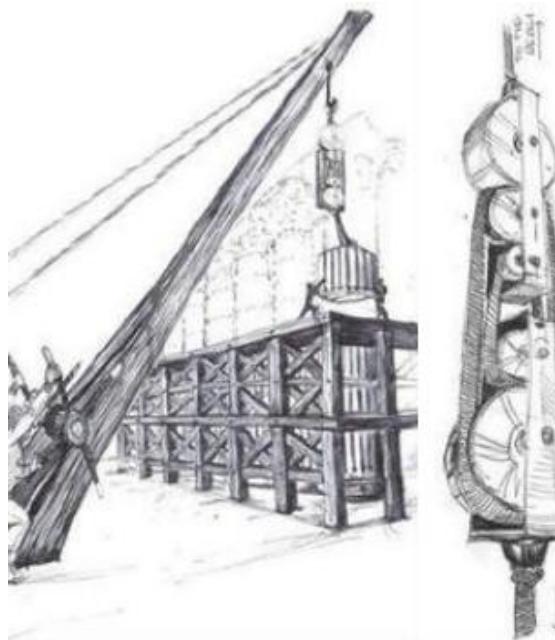


Ilustración 11. Penstaspastos en uso. Fuente:
Los diez libros de Vitruvio.

3.4.2. Máquinas para elevar agua

Los órganos ideados durante el Imperio Romano para extraer el agua fueron el "tympano", tambor, (Ilustración 12) este mecanismo no eleva el agua a gran altura, pero si conseguía un gran caudal de agua en breves momentos.

El tambor era fabricado mediante un eje reforzado en sus extremos con láminas de hierro y rodeando su parte central se coloca un tambor, de ahí su nombre, hecho con tablas transversales desde el eje hasta la circunferencia del tambor, dividiendo este en espacios iguales.

Si la finalidad fuera elevar el agua a mayor altura, se trabajará de forma análoga, pero aumentando el diámetro de la rueda.

En el perímetro circular de la rueda se fijarán unas cubetas. Cuando la rueda comience a girar por la acción de los hombres que la voltean con sus pies, las cubetas llenas de agua, elevándose hacia lo alto y descendiendo hacia la parte más baja, derramarán en el depósito la cantidad de agua que hayan recogido. Pero, si se tuviera que suministrar agua a lugares más elevados, se colocará en torno al eje de la misma rueda una doble cadena de hierro, que llegue hasta el nivel más bajo, y se colgarán



en la cadena unas cubetas de bronce, con una capacidad de un congio (equivale aproximadamente a 3'3 litros). Así, al ir girando la rueda enrollará la cadena en torno al eje, lo que provocará la elevación de las cubetas hacia lo alto, y cuando alcancen el eje, forzosamente se darán la vuelta y derramarán en el depósito el agua que hayan elevado. (Vitruvio, 15 a.C.) [18]

3.4.3. Molinos

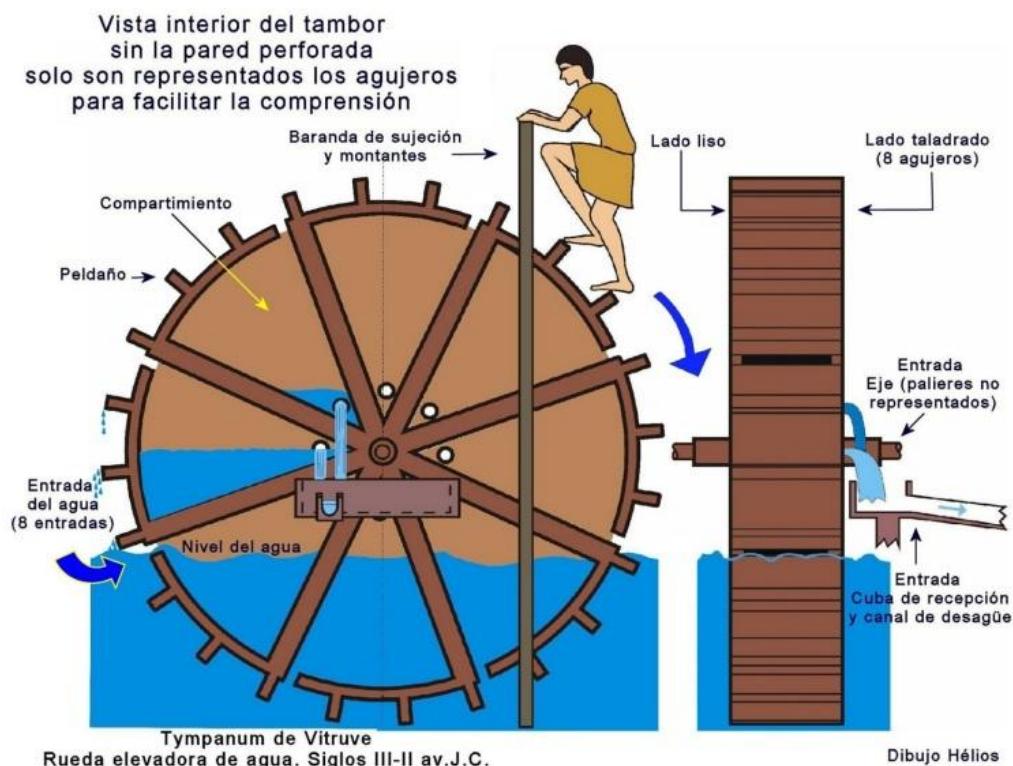


Ilustración 12. Tambor (tympano). Fuente: infraestructurasromanaspruebaticum.wordpress.com

Los romanos construyeron molinos para utilizar en la agricultura, la minería y la construcción. Consta que alrededor del siglo III a.C. se usaron los primeros molinos para moler grano. (Víctor Labate, 2016) [13]



El molino de tracción animal (Ilustración 13) fue una mejora sobre el molino de Olinto, ya que las manivelas se podían enganchar a una bestia para moler. Este tipo de molinos apareció en Italia alrededor del siglo III a.C., siendo uno de los mejores ejemplos el molino pompeyano, que era impulsado por dos asnos enjaezados a un armazón de madera. (Víctor Labate, 2016) [\[13\]](#)

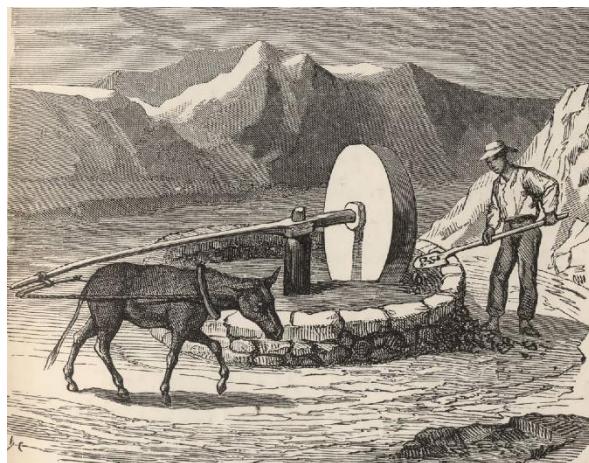


Ilustración 13. Molino pompeyano. Fuente: [pablomajluf.mx](#)

Norias o molinos hidráulicos

En torno a su parte frontal se fijan unas paletas, que, al ser empujadas por la corriente del río, inician un movimiento progresivo provocando el giro de las ruedas (Ilustración 14); sus cubetas van sacando el agua que la elevan hacia la parte más alta, sin la presencia y sin el esfuerzo de operarios; sencillamente, al girar por el impulso de la corriente del río, suministran el agua que se necesite. (Vitruvio, 15 a.C.) [\[18\]](#)

El movimiento de las norias (molinos de agua) se basa en los mismos principios, excepto en que llevan un tambor dentado en un extremo del eje. El tambor está colocado verticalmente y gira al mismo tiempo que la rueda. Junto a este tambor se halla un segundo tambor mayor, colocado horizontalmente a lo largo del anterior con el que está engarzado. Así, los dientes del tambor ajustado al eje, al empujar los dientes del tambor horizontal provocan el movimiento circular de las muelas. (Vitruvio, 15 a.C.) [\[18\]](#)

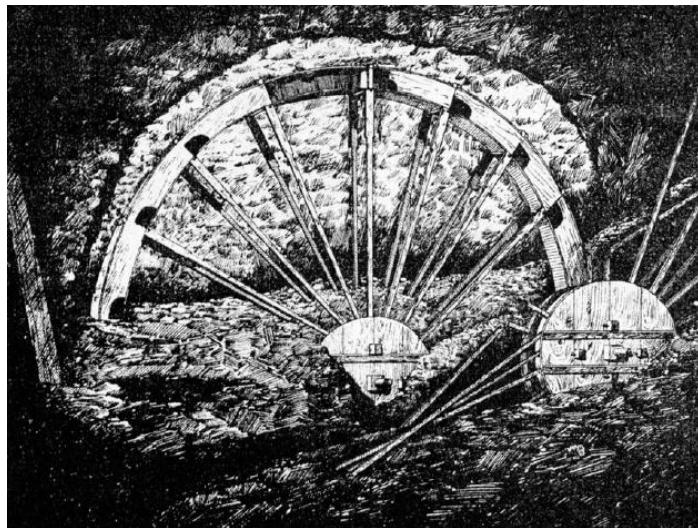


Ilustración 14. Rueda hidráulica romana de Riotinto. Fuente: huelvabuenasnoticias.com

3.4.4. Catapultas

Comenzaremos hablando de unas de las máquinas más utilizadas en el Imperio Romano para proteger ante los peligros y para satisfacer las necesidades defensivas.

Las proporciones o dimensiones de estas máquinas están condicionadas al tamaño del proyectil que se deseaba lanzar.

El tamaño del agujero, en el travesaño, medirá una novena parte de la longitud de la flecha; a través de unos agujeros se tensan las cuerdas retorcidas, que deben mantener los brazos de la catapulta. La altura y la anchura de ese travesaño depende del diámetro de los agujeros. Las piezas de madera, situadas encima y debajo del travesaño —denominadas «peri treta»— tendrán el grosor del diámetro del agujero y la anchura de un diámetro más tres cuartas partes; en sus extremos, un diámetro y medio. Las pilastras (se refiere a las piezas verticales de apoyo) a derecha e izquierda —sin contar las mechas o espigas— tendrán una altura de cuatro diámetros (del agujero) y una anchura de cinco diámetros; las espigas, de medio diámetro (En todo el capítulo el diámetro es el del agujero del travesaño. Se toma como módulo. La dificultad del texto latino es extraordinaria pues Vitruvio usa unos signos que han sido interpretados de muy diversas maneras. Nosotros seguimos la tabla de equivalencias de E. Schramm («Erlauterung der Geschützbeschreibung bei Vitruvius,» pág. 719). Desde la pilastra hasta el agujero habrá una separación de medio diámetro y desde el agujero hasta la pilastra central $\frac{3}{4}$ del diámetro. La anchura de la pilastra central



será de un diámetro más 3/16 partes y su grosor de un diámetro. La concavidad donde se coloca la flecha en el pilar central medirá 1/4 del diámetro. Los cuatro ángulos que se forman en los laterales y en los frentes se asegurarán con piezas de hierro, o bien con agujas de bronce y clavos. La longitud del canalito —en griego «*syrinx*»— medirá diecinueve diámetros. La longitud de las regletas —que algunos denominan «labios, bordes»— clavadas a derecha e izquierda del canalito será de diecinueve diámetros; su altura y su anchura, simplemente de un diámetro. Además, se clavarán dos regletas, sobre las que se colocará un rodillo de una longitud de tres diámetros y una anchura de medio diámetro. El grosor del «*labio*» que queda fijado a las espigas con abrazaderas de madera —llamado también «cofre o caja»— es de un diámetro y su altura de medio diámetro. La longitud del rodillo es de cuatro diámetros y su grosor, de nueve. (Vitruvio, 15 a.C.) [\[18\]](#)

La longitud de la parte cóncava donde entra la flecha es de 3/4 de diámetro y su grosor de 1/4. Lo mismo miden las «empuñaduras». El disparador tiene una longitud de tres diámetros y su anchura y grosor es de 3/4. La longitud del fondo del canal es de dieciséis diámetros, su anchura 1/4 y su altura 3/4. La base de la columnita tiene ocho diámetros de longitud en el suelo y la anchura del plinto donde se apoya es de 3/4, su grosor es de 5/8. La longitud de la columnita hasta la espiga es de doce diámetros, su anchura de 3/4 y su grosor también de 3/4. Los tres cabríos sostenes de la columnita miden nueve diámetros de longitud, su anchura es de medio diámetro y su grosor de 7/16. La longitud de la espiga es de un diámetro y la del capitel de la columnita, de dos; la anchura del «apoyo del plinto» (antefixa) es de 3/4 y su grosor, un diámetro. (Vitruvio, 15 a.C.) [\[18\]](#)

Estas catapultas de la época románica fueron heredadas de la Grecia helenística y había dos tipos principales, la llamada “balista”, basada en la tensión y la “lithobolos” basada en la torsión. (Vitruvio, 15 a.C.) [\[18\]](#)

La catapulta de tensión (Ilustración 16) es aquella que funciona gracias a almacenar su energía en un arco de metal, madera o cuerno tensado. Estas catapultas fueron las primeras en aparecer. (Archundia Rivera et al., 2017) [\[15\]](#)



La catapulta de torsión (Ilustración 15) es accionada al torcer, una madeja de cuerdas, tendones o crin de caballo. Los romanos fueron los encargados en perfeccionar este tipo de catapultas. (Archundia Rivera et al., 2017) [15]



Ilustración 16. Catapulta de tensión.
Fuente: [Wikipedia.com](#)

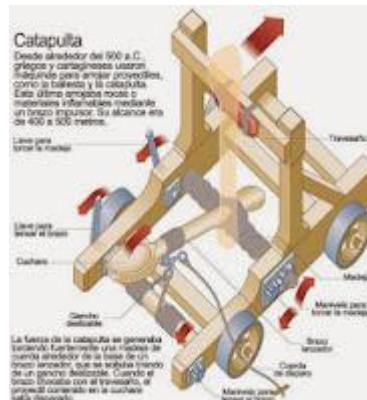


Ilustración 15. Catapulta de torsión. Fuente:
[pelandintecno.blogspot.com](#)

3.4.5. Ballestas

La estructura de las ballestas es muy variada, con claras diferencias, pero todas proporcionan el mismo efecto. Algunas ballestas son operativas mediante palancas y rodillos, otras mediante aparejos de poleas, otras mediante árganas o cabrestantes y las hay que poseen unos tambores. Las ballestas se construyen teniendo como punto de referencia el tamaño real del peso de la piedra que deben lanzar; en consecuencia, la estructura de ellas no es accesible a cualquier persona, sino solamente a quienes dominan la ciencia de los números y de las multiplicaciones, por tener nociones de geometría. (Vitruvio, 15 a.C.) [18]

Estas actualmente, llamadas ballestas recibían el nombre de “Balista o Ballista” (Ilustración 17) y conseguían lanzar proyectiles a más de cien metros de distancia. Utilizaban dos palancas que ofrecían una energía potencial mediante las cuerdas o tendones trazados en forma de madejas retorcidas.

Debido al gran tamaño de estas balistas debían sostenerse sobre un trípode y era manejada por varios hombres encargados de poner los proyectiles, tensar la máquina por el mecanismo de torsión y liberar finalmente el proyectil. [16]



Fue un arma fundamental durante el Imperio Romano, también existieron los carrobalistas, que básicamente era una ballista sobre un carro tirado por caballos. Vitruvio hizo una gran aportación incorporando un nuevo tipo de mordaza que logra aumentar el tamaño del nervio del resorte, aumentando así, su potencia. [\[16\]](#)

Dexo explicada la construcción, partes y proporciones de las catapultas. Las de las ballestas son varias y diferentes, aunque todas para un efecto mismo: porque unas operan con palancas y ejes, otras con polispastos, otras con órganos, y algunas también con tímpanos: pero ninguna ballesta se construye sino con la debida proporción á la piedra que debe arrojar: por lo qual no es para toda su construcción, sino solo para los prácticos en Aritmética, á lo menos en el numerar y multiplicar. Porque se hacen en los capiteles los agujeros por donde pasan las maromas de cabello principalmente mujeril, ó de nervio, las cuales se proporcionan en resistencia á la gravedad de la piedra que hubiere de tirar la ballesta; como en las catapultas se toma de la longitud del dardo. Pero para que aun aquellos que ni supieran Geometría ni Aritmética puedan construirlas, y en tiempo de hostilidad no se hallen embarazados en calculaciones, pondré lo que tengo experimentado yo mismo en la práctica, y lo que en parte me enseñaron mis maestros; reduciendo las notas de los pesos Griegos á los nuestros. (Marco Vitruvio, De architectura. Libro I. Capítulo XVI: De la construcción de las ballestas. Página 256.)

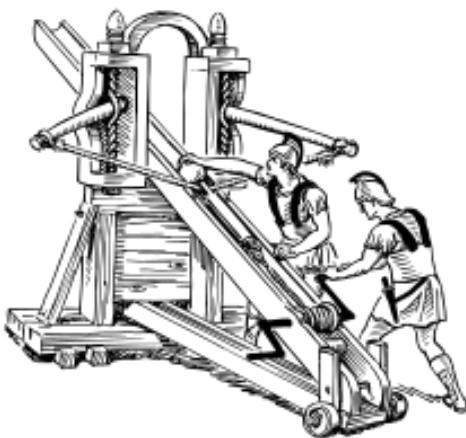


Ilustración 17. Balista. Fuente:
[Wikipedia.com](#)



3.4.6. Máquinas de ataque

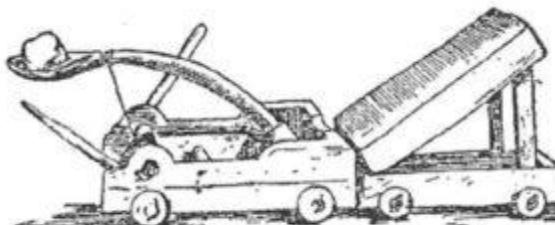
Ariete

El comienzo de estas máquinas, en concreto del ariete de ataque, fue, según dicen, cuando los cartagineses habían fijado un campamento para iniciar el ataque a Cádiz e intentaron demoler por otros medios una fortaleza, pero fue en vano, fue, entonces cuando tomaron un madero, y sosteniéndolo con sus manos, golpearon con la punta múltiples veces la parte superior del muro.

Tiempo después, un artesano de Tiro, llamado Pefrasmeno, puso en vertical un mástil y colgó de él otro madero atravesado, llevándolo hacia adelante y hacia atrás, con golpes violentos derribó todo el muro de Cádiz. (Vitruvio, 15 a.C.) [\[18\]](#)

Onager

Era una maquinaria de madera que presentaba una extremidad central a modo de cuchara (Ilustración 18) donde se depositaba la piedra que iba a ser lanzada mediante la distensión de las cuerdas que sujetaban con dureza. Su principal desventaja era su gran retroceso y su movilidad, además de que necesitaban hombres fornidos para colocar grandes cargas. (Tito Batán, s.f.) [\[17\]](#)



Onagro.

Ilustración 18. Onagro. Fuente: antiguorincon.com

Muscolo

Era una estructura cubierta por todos los flancos, incluida la posesión del techo para evitar el ataque de armas arrojadizas enemigas lanzadas desde las murallas



Ilustración 19. Muscolo. Fuente: beacon.by



(Ilustración 19). Es una máquina que nos podría recordar ahora a un cobertizo con ruedas, pero estas estaban fabricadas con un material refractario de arcilla para evitar ataques de agua hirviendo o de brea encendida. (Tito Batán, s.f.) [17]

Plúteo

Este utensilio (Ilustración 20) consistía básicamente en una pared móvil de madera recubierta de piel que resguardaba de ataques frontales a los soldados romanos que avanzaban contra el enemigo, siendo poco pesado y de facilidad de empuje. (Tito Batán, s.f.) [17]

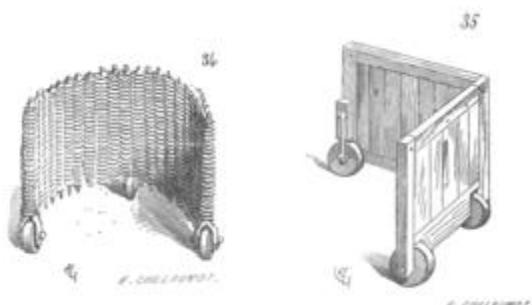


Ilustración 20. Plúteo. Fuente: [Wikipedia.com](#)

Torre de asedio

Esta torre (Ilustración 21) era una estructura creada para la invasión de una ciudad, formada por un considerable número de pisos colocados unos encima de otros comunicándose por escaleras y dando lugar a una colossal figura de varios metros de altura. Muchas de estas torres eran cubiertas, tanto la tela y la madera, por hierro para evitar la quema por brea o flechas incendiarias. (Tito Batán, s.f.) [17]

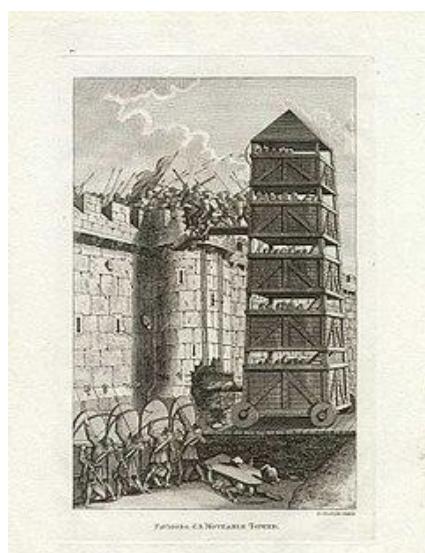


Ilustración 21. Torre de asedio.
Fuente: [Wikipedia.com](#)



3.5. Grúa Romana “Magna Rota Cuadrípode o Monopode”

3.5.1. Origen y evolución

Las primeras grúas fueron creadas en la antigua Grecia, accionadas por hombres o animales. Estas grúas eran utilizadas principalmente para la construcción de edificios altos. [\[21\]](#)

Los primeros vestigios del uso de las grúas aparecen en la Antigua Grecia alrededor del siglo vi a. C. Se trata de marcas de pinzas de hierro en los bloques de piedra de los templos. Se evidencia en estas marcas (cortes distintivos c. 515 a. C.)⁷ su propósito para la elevación ya que están realizadas en el centro de gravedad o en pares equidistantes de un punto sobre el centro de gravedad de los bloques.

La primera evidencia literaria inequívoca para avalar la existencia del sistema compuesto de poleas aparece en los ejercicios mecánicos (Mech. 18, 853a32-853b13) atribuido a Aristóteles (384-322), pero quizás elaborado en una fecha poco posterior. [\[21\]](#)

El apogeo de la grúa en épocas antiguas llegó antes del Imperio Romano, cuando se incrementó el trabajo de construcción en edificios que alcanzaron dimensiones enormes. Los romanos fueron los encargados de adoptar la grúa griega y desarrollarla.

El Trispastos, es la grúa romana más simple, que consistía en una horca de una sola viga, un torno, una cuerda, y un bloque que contenía tres poleas, de ahí el nombre. Esta máquina tenía una ventaja mecánica 3:1.

Tras esta grúa simple, llegaron los Pentaspastos ofreciendo 5 poleas en vez de 3 haciendo posible levantar 5 veces el peso máximo que un hombre podía ejercer. Los Polyspastos, siendo estas las más grandes, con un sistema de tres por cinco poleas, con dos, tres o cuatro mástiles, torno, pudiendo levantar hasta 3000 kg si asumimos que la fuerza máxima de un hombre es de 50 kg ($3 \text{ cuerdas} \times 5 \text{ poleas} \times 4 \text{ hombres} \times 50 \text{ kg} = 3000 \text{ kg}$).



Se asume que los ingenieros romanos lograron levantar semejantes bloques por dos medios: primero, según lo sugerido por Heron, una torre de elevación fue instalada, cuatro mástiles fueron arreglados en la forma de un cuadrilátero con los lados paralelos, no muy diferente a una torre, pero con una columna en medio de la estructura. En segundo lugar, una multiplicidad de cabrestantes fue colocada en la tierra alrededor de la torre (Ilustración 22).



Ilustración 22. Grúa Romana con torre de elevación Fuente: cults3d.com

3.5.2. Uso de las grúas

Las grúas romanas representaron un avance significativo en la ingeniería y construcción de la antigüedad. Conocidas como "trispastos" y "pentaspastos", estas grúas eran esenciales en la construcción de edificios, acueductos, y monumentos del Imperio Romano. La grúa trispasto, por ejemplo, utilizaba un sistema de poleas triples que permitía una ventaja mecánica considerable, permitiendo a los trabajadores levantar cargas pesadas con menor esfuerzo. El pentaspasto, que empleaba cinco poleas, ofrecía aún más ventaja, facilitando la elevación de pesos de hasta varios miles de kilogramos. Estas grúas eran operadas manualmente, a menudo por equipos



de esclavos o trabajadores, utilizando sistemas de cabrestantes y ruedas para aplicar la fuerza necesaria. [\[23\]](#)

El diseño de las grúas romanas se basaba en principios fundamentales de la mecánica, como la palanca y la polea, que multiplicaban la fuerza aplicada por los operadores. Además de las poleas, algunas grúas también incorporaban ruedas de andar, donde los trabajadores caminaban dentro de una gran rueda para generar potencia. Esta innovación fue crucial para la construcción de grandes edificaciones y monumentos, como el Coliseo y los acueductos romanos, que requerían la elevación de bloques de piedra masivos. [\[25\]](#)

Con el paso del tiempo, el diseño y la tecnología de las grúas continuaron evolucionando. Durante la Edad Media y el Renacimiento, las grúas se hicieron más sofisticadas. La introducción de la rueda de andar permitió a los trabajadores generar más fuerza y levantar cargas más pesadas. Esta tecnología fue fundamental en la construcción de las catedrales góticas, como la Catedral de Notre Dame en París, que requerían la elevación de enormes piedras a grandes alturas. Las grúas de esta época se construían utilizando principalmente madera y eran operadas manualmente, pero los principios mecánicos básicos seguían siendo los mismos que en las grúas romanas. [\[24\]](#)

El siglo XIX trajo consigo la Revolución Industrial, que marcó un punto de inflexión en el diseño de las grúas. Con la introducción del acero y la energía a vapor, las grúas se volvieron más robustas y potentes. Las grúas móviles y las grúas de puerto, capaces de manejar cargas mucho más pesadas que sus predecesoras, comenzaron a aparecer en la escena industrial. Sin embargo, la verdadera revolución en el diseño de grúas llegó en el siglo XX con la invención de la grúa de torre. [\[22\]](#)

La grúa de torre, desarrollada a principios del siglo XX, se convirtió rápidamente en un elemento indispensable en la construcción moderna de rascacielos y otras estructuras altas. Estas grúas están compuestas por una base fija, una torre vertical, un brazo horizontal (pluma) y un contrapeso. El diseño permite levantar y mover cargas pesadas a grandes alturas y distancias, ofreciendo una flexibilidad y capacidad sin precedentes. La grúa de torre puede girar 360 grados, lo que facilita la colocación precisa de materiales en el sitio de construcción. [\[22\]](#)



El uso de grúas de torre ha permitido la construcción de algunos de los edificios más emblemáticos del mundo, como el Burj Khalifa en Dubái y la Torre Eiffel en París. Estas grúas han transformado la manera en que se construyen los edificios altos, permitiendo una mayor eficiencia y seguridad en el proceso de construcción. Además, las grúas de torre modernas están equipadas con sistemas electrónicos avanzados para controlar el movimiento y la carga, lo que mejora aún más su precisión y seguridad. [\[22\]](#)

La evolución de las grúas desde simples sistemas de poleas en la antigüedad hasta las sofisticadas grúas de torre modernas refleja el avance tecnológico y las crecientes demandas de la industria de la construcción. La constante innovación en materiales, diseño y tecnología sigue mejorando la eficiencia y la capacidad de estas máquinas, permitiendo la creación de estructuras más altas y complejas que nunca antes. [\[22\]](#)

En resumen, las grúas han sido fundamentales en la evolución de la construcción desde la antigua Roma hasta la era moderna. El desarrollo continuo de esta tecnología ha permitido a los ingenieros y constructores superar desafíos cada vez mayores, llevando la arquitectura y la ingeniería a nuevas alturas.

3.5.3. Principio de funcionamiento de la grúa

Para explicar el funcionamiento de la grúa, nos fijaremos Ilustración 22. Esta grúa se basa en principios mecánicos fundamentales, incluyendo la palanca y el sistema de poleas, para levantar objetos pesados.

Componentes Principales

1. Brazo: es la estructura horizontal que se extiende desde la base de la grúa. El brazo se utiliza para soportar la carga y está conectado al punto de pivote.
2. Polea: ubicada en el extremo del brazo, la polea permite que la cuerda se desplaza suavemente, reduciendo la fricción y facilitando el levantamiento de la carga
3. Cuerda o Soga: pasa a través de la polea y se conecta a la carga en un extremo y al cabrestante en el otro.
4. Rueda de Andar (Treadwheel): es una rueda grande en la que los trabajadores caminan para general la fuerza necesaria para levantar la carga.



Al caminar dentro de la rueda, los trabajadores aplican fuerza que se transmite a través de un eje al sistema de poleas.

5. Cabrestante: utilizado para enrollar y desenrollar la cuerda, permitiendo controlar la elevación y el descenso de la carga.
6. Base: proporciona estabilidad a toda la estructura de la grúa.

Principio de Funcionamiento

El funcionamiento de la grúa se basa en la aplicación de dos principios mecánicos: la palanca y el sistema de poleas.

El brazo de la grúa actúa como una palanca. Según el principio de la palanca, el momento (torque) generado por una fuerza aplicada en un punto se puede calcular como:

$$T = F \cdot d$$

Donde:

T = momento (torque)

F = fuerza aplicada

d = distancia desde el punto de aplicación de la fuerza hasta el punto de pivote

En esta grúa, la fuerza aplicada por los trabajadores que caminan en la rueda de andar se multiplica por la distancia desde la rueda hasta el punto de pivote del brazo, permitiendo levantar cargas pesadas con menos esfuerzo.

El uso de un sistema de poleas múltiples reduce aún más la cantidad de fuerza necesaria para levantar una carga. En un sistema de tres poleas, como el de la Ilustración 22, la fuerza requerida para levantar un peso W se reduce en una cantidad proporcional al número de segmentos de cuerda que soportan la carga.

$$F = \frac{W}{n}$$

Donde:

F = fuerza necesaria

W = peso de la carga

n = número de segmentos de cuerda que soportan la carga



4. OBJETIVOS

Como objetivo principal en este trabajo, se estudia el mecanismo de funcionamiento de una de las más importantes estructuras empleadas durante el Imperio Romano para la construcción de sus majestuosos edificios, siendo este, la grúa romana magna rota.

5. MODELADO GEOMÉTRICO

Llegados a este punto del proyecto se abordará una de las partes más características de este, el modelado de cada elemento y generación del conjunto del mecanismo con el programa Autodesk Inventor Professional 2025. La decisión de emplear este programa se debe a que es capaz de asistir en el diseño, facilitar la creación de planos del mismo y además generar simulaciones de piezas y conjuntos sin necesidad de fabricar un prototipo real, aunque posteriormente se proceda a la construcción de una maqueta a escala.

5.1. Consideraciones iniciales

Para el dimensionado de la maqueta se ha tenido en cuenta el tamaño genérico de las grúas romanas, ya que dentro de estas había diversos modelos y dimensiones, por lo que se empleará una escala 1:10, dicha escala es la conveniente para poder crear luego la maqueta de tamaño adecuado.

En todo momento se ha intentado representar lo más fielmente posible el diseño original de las grúas romanas (Ilustración 23), teniendo en cuenta sus proporciones, de igual forma, se ha intentado plasmar el movimiento natural que estas poseían al ser empleadas.

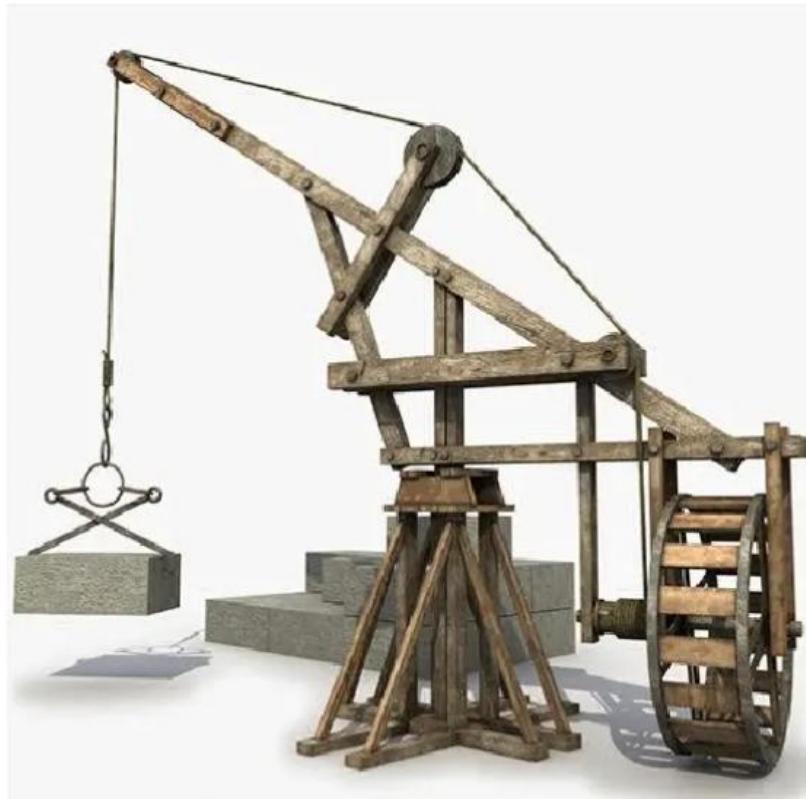


Ilustración 23. Modelo a seguir para el diseño de la grúa. Fuente: viajes.elpais.com

5.2. Software y Hardware

- Software de diseño asistido por ordenador, mayormente conocido por las siglas **CAD**, que provienen del inglés Computer-Aided Design, es un software para crear y editar modelos bidimensionales y tridimensionales de objetos físicos.

Existen 2 tipos de software CAD, el 2D y el 3D. El primero de ellos, CAD 2D trabaja con dibujos técnicos bidimensionales simples que suelen ser la base para otros proyectos mayores, en cambio el 3D permite crear dibujos tridimensionales con mayor precisión y detalle y que además muestran el espacio de trabajo y la profundidad, por lo que ofrece una visión más real de los objetos. [\[26\]](#)

- Software CAM (Computer-Aided Manufacturing): Generalmente, la fabricación asistida por ordenador (CAM) consiste en el uso de



aplicaciones de software de control numérico (NC) con el objetivo de crear instrucciones detalladas (código G) que impulsen las máquinas herramienta de control numérico por ordenador (CNC) para las piezas de fabricación. [\[27\]](#)

- Software CAE o ingeniería asistida por computadora es el uso de software informático en una amplia gama de industrias para simular el rendimiento basado en la física para mejorar los diseños de productos o ayudar en la resolución de problemas de ingeniería. Esto incluye la simulación, validación y optimización de productos, procesos y herramientas de fabricación. [\[28\]](#)

Para desarrollar este proyecto se ha recurrido al software CAD, *Inventor Professional 2025*, un producto diseñado por Autodesk, dentro de su gama *Product Design Collection*. Este software tiene la capacidad de trabajar con T-Splines, una herramienta que nos permite trabajar en superficies complejas con más facilidad.

En el apartado del hardware en la realización de este proyecto se ha utilizado un PC portátil, con un sistema operativo Windows 11 Pro 64 bits, con un procesador Intel Core i7-8750H a una velocidad de 2,2 GHz, con 16 Gb de memoria RAM, además de una tarjeta gráfica Nvidia Geforce GTX 1050. Se mencionan estas especificaciones de trabajo ya que para poder mover los diferentes softwares de diseño y simulación se necesita una buena capacidad de recursos, y aunque este dispositivo portátil ha sido suficiente para poder trabajar con fluidez ha necesitado casi toda la capacidad de memoria del PC. Debido, además, a varios atajos que dispone el software Inventor para ahorrar el uso de memoria, hemos sido capaces de hacer una reconstrucción virtual estática de la máquina, además de una versión dinámica en la que podemos mover el mecanismo y podemos ver cómo funcionaría virtualmente. Este último dato es complementario ya que con el modelado en 3D de la máquina se observará perfectamente su funcionamiento.

5.3. Dimensionado y Diseño

Debido a la falta de datos a la hora del diseño y dimensionado, ya que solo se dispone de un renderizado 3D, para diseñar y dimensionar la grúa, se ha tomado como referencia a una persona de estatura media, en torno a 1,6-1,8 metros de altura. Lo



que permite que personas de diferentes alturas utilicen la rueda encargada en elevar y bajar las cargas cómodamente.

La altura de la polea más alta, y, por consiguiente, la altura máxima a la que podía llegar las cargas gracias a la grúa, se ha pensado teniendo en cuenta el uso que este mecanismo tenía en aquella época y la altura de la más usual de los edificios que requería el uso de esta, siendo 6,2 metros. La base cruciforme, encargada de soportar la parte móvil de la grúa y en mantener una posición estable tiene una altura de 2,8 metros.

El dimensionado de nuestra maqueta y anteriormente, modelado en 3D, se ha tenido en cuenta tomando como referencia las medidas anteriormente nombradas, por lo que la escala más idónea para emplear en este diseño será 1:10. Utilizando esta escala obtendremos una maqueta de tamaño considerable pero fácil de manejar, además de como de construir con cualquier tipo de material, eligiendo para nuestro caso, madera.

5.4. Metodología de diseño

Para el modelado de cada una de las piezas que componen la grúa se ha seguido la misma metodología de diseño, ya que la muchos de los elementos siguen la misma estructura, siendo bloques rectangulares de cierta medida, incluyendo, algunos, pasadores por donde pasan otras piezas.

Para conseguir la creación de la grúa, primeramente, nos hemos centrado en crear la base cruciforme, cada uno de los elementos de esta base han sido creados mediante un boceto 2D para posteriormente extruirlo con las dimensiones deseadas. Siguiendo este procedimiento, somos capaces de crear tanto, la base, el esqueleto móvil, el husillo, el soporte de la rueda y por último los pasadores.

La rueda si ha sido pieza de más estudio, ya que requería dividir una circunferencia en partes iguales para poder acoplar los radios y luego mediante otra división más números poder hacer los tablones por donde ha de andar el operario.



Estas divisiones son sencillas de crear mediante la herramienta llamada “Circular” dentro de “Patrón” (Ilustración 24) que a su vez se encuentra dentro de las herramientas al iniciar un boceto 2D.

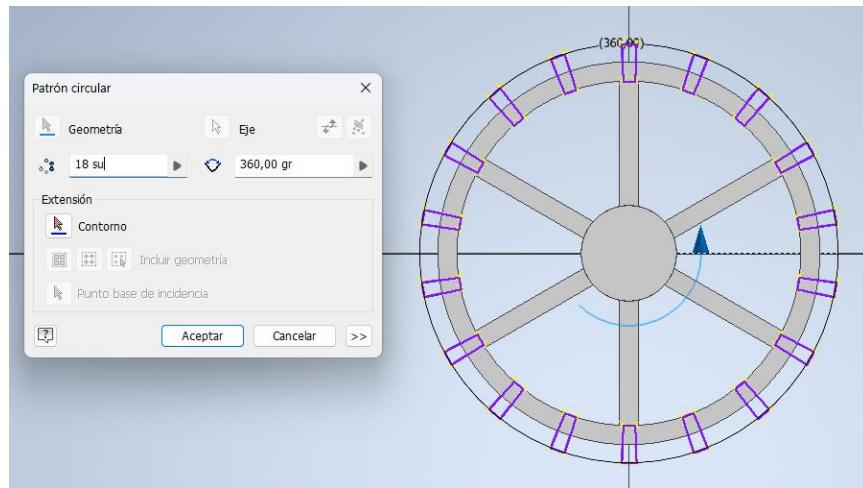


Ilustración 24. Herramienta “Circular” para la creación de la rueda. Fuente: Elaboración propia.

5.5. Partes de la Grúa Romana “Magna Rota Cruadrípode”

A continuación, observaremos los subconjuntos que forman la grúa, (Ilustración 25) además de desglosar cada uno de ellos detalladamente para indicar las piezas que los forman, estando extraídas estas imágenes del modelado de Inventor.

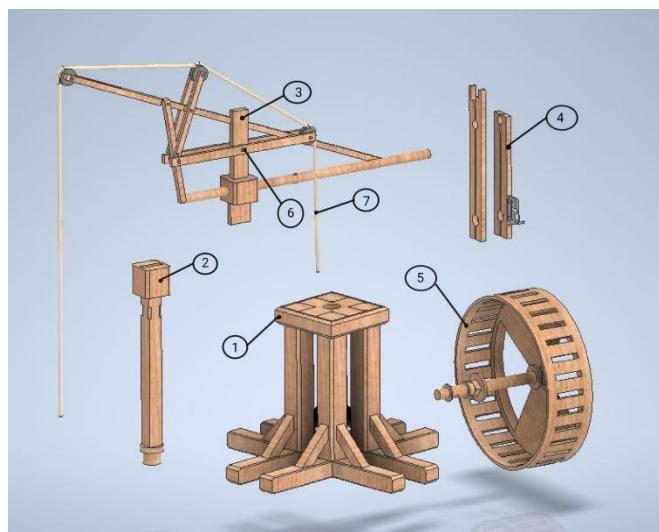


Ilustración 25. Subconjuntos de la grúa. Fuente: Elaboración propia.

1. Base Cruciforme
2. Husillo
3. Esqueleto móvil



4. Soporte y freno de rueda
5. Rueda
6. Pasadores
7. Cuerda

Los subconjuntos 1 (Ilustración 26), 3 (Ilustración 27), 4 (Ilustración 28), este subconjunto contiene otro conjunto, el freno de la rueda (Ilustración 29), 5 (Ilustración 30), y 6 (Ilustración 31) se componen a su vez por distintos elementos. Estos elementos vienen nombrados y enumerados en las siguientes imágenes:

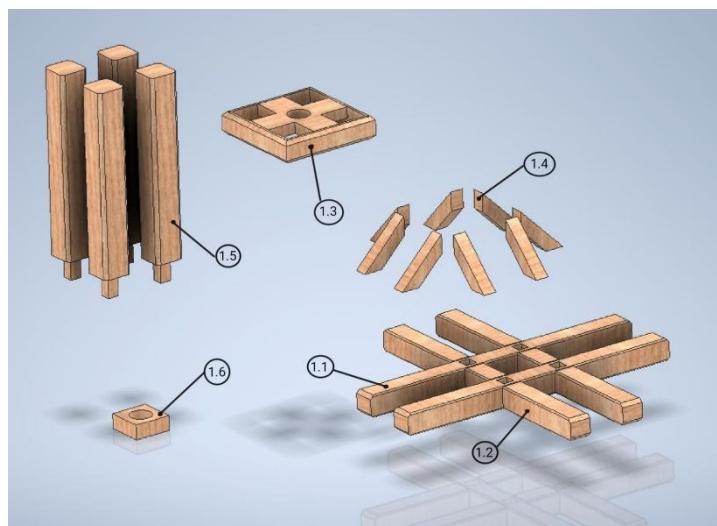


Ilustración 26. Subconjunto 1: Base Cruciforme. Fuente:
Elaboración propia.

- 1.1. Barras A
- 1.2. Barras B
- 1.3. Soporte superior husillo
- 1.4. Vigas de refuerzo diagonales
- 1.5. Columnas



1.6. Soporte inferior husillo

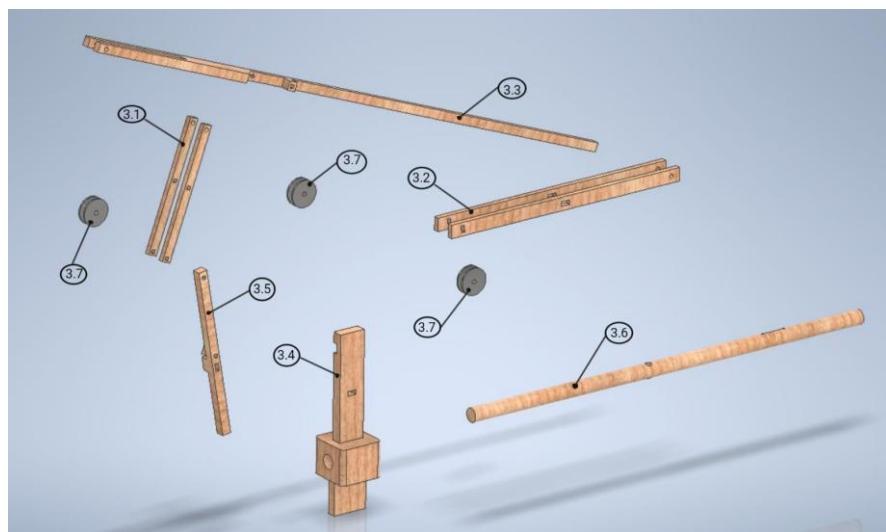


Ilustración 27. Subconjunto 3: Esqueleto Móvil. Fuente: Elaboración propia

- 3.1. Barras polea intermedia
- 3.2. Barras horizontales
- 3.3. Viga diagonal principal (mástil)
- 3.4. Husillo parte superior
- 3.5. Barra de refuerzo
- 3.6. Viga horizontal principal
- 3.7. Poleas

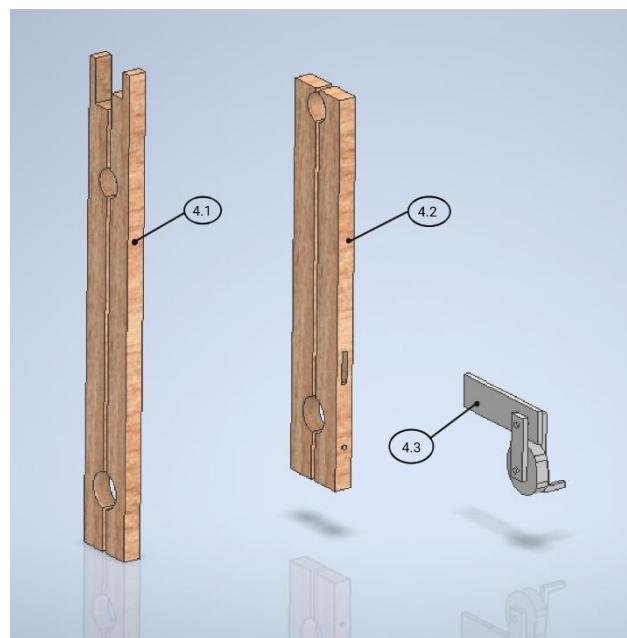


Ilustración 28. Subconjunto 4: Soporte de rueda.
Fuente: Elaboración propia.



- 4.1. Soporte inicial
- 4.2. Soporte intermedio de eje
- 4.3. Freno

Como podemos observar el elemento 4.3 está compuesto por distintas piezas, formando en su conjunto el freno.

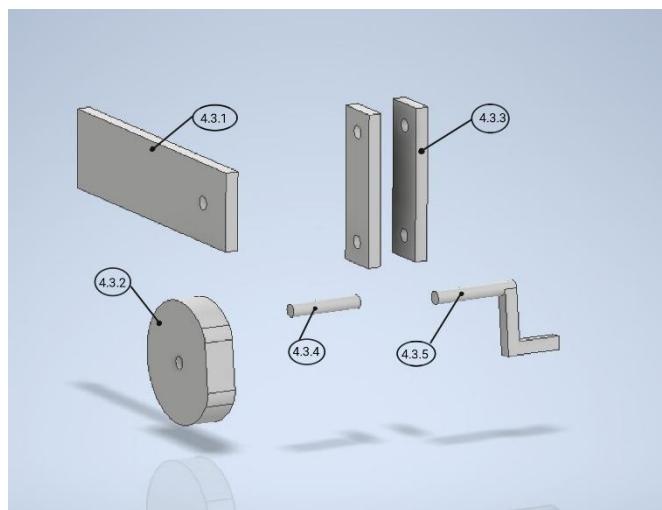


Ilustración 29. Subconjunto 4.3: Freno. Fuente: Elaboración propia

- 4.3.1. Pasador (Viga de freno)
- 4.3.2. Rueda de freno
- 4.3.3. Placas (columnas de freno)
- 4.3.4. Pasador de placas
- 4.3.5. Manivela

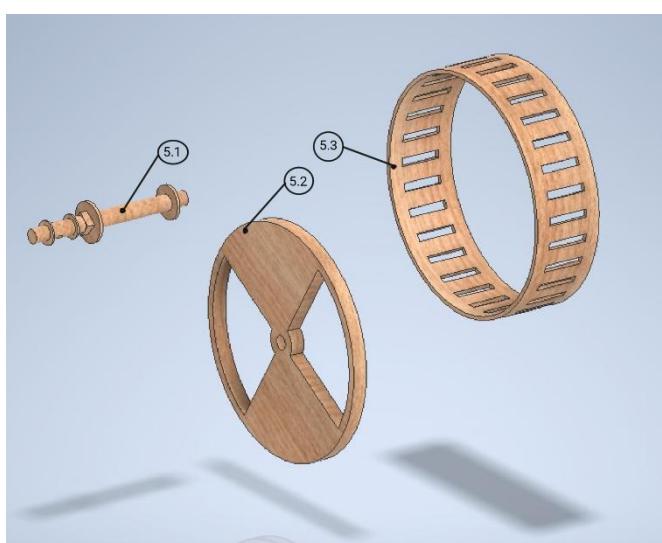


Ilustración 30. Subconjunto 5: Rueda. Fuente: Elaboración propia



- 5.1. Eje de rueda
- 5.2. Radio y soporte de rueda con eje
- 5.3. Circunferencia de rueda

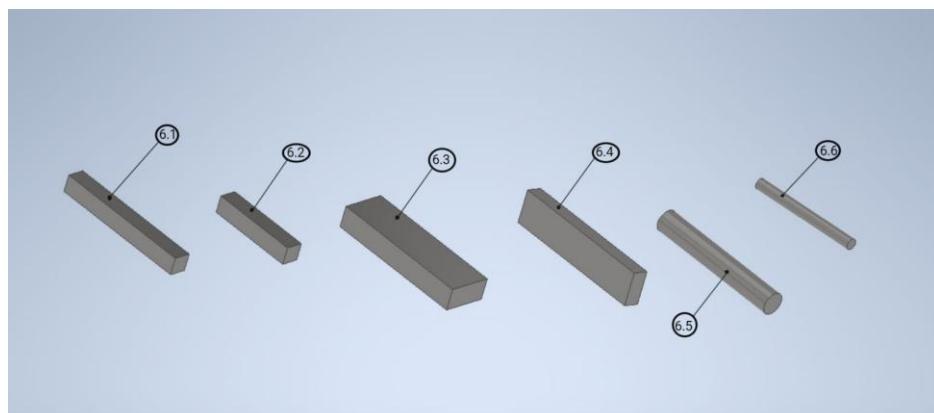


Ilustración 31. Subconjunto 6: Pasadores. Fuente: Elaboración propia.

- 1.1. Pasador Cuadrado 32mm
- 1.2. Pasador Cuadrado 20mm
- 1.3. Pasador Husillo Central
- 1.4. Pasador Rombo
- 1.5. Pasador Poleas
- 1.6. Pasador Soportes

Una vez predefinidas todas las piezas con sus nombres, se procederá a explicar el método constructivo y de diseño de cada subconjunto.

5.5.1. Subconjunto 1: Base Cruciforme

La base cruciforme es el elemento de apoyo principal de la grúa, diseñado para distribuir de manera uniforme las cargas verticales hacia el suelo y proporcionar estabilidad durante las operaciones de levantamiento. Su configuración en forma de cruz asegura una resistencia adecuada frente a los momentos flectores y las tensiones generadas durante el uso de la grúa, permitiendo que el centro de masas se mantenga estable incluso cuando se manipulan cargas pesadas. Las dimensiones de la base son cruciales para evitar que la estructura se vuelque o deslice bajo condiciones de carga máxima.



Esta base (Ilustración 32) se fabricaba generalmente a partir de madera maciza, debido a su excelente capacidad para soportar esfuerzos de compresión y flexión. Las cuatro patas que componen la base se ensamblan mediante técnicas como el uso de espigas y ranuras, que aportan robustez a las uniones. Además, la longitud de las patas y su disposición en forma de cruz permiten que la grúa mantenga el equilibrio incluso bajo grandes tensiones.



Ilustración 32. Base Cruciforme. Fuente: Elaboración propia.

Las medidas principales de la base son las siguientes:

Altura de la base: 280 mm

Ancho de las patas: 30 mm

Longitud de las patas: 400 mm

Es importante destacar que la base también incluye refuerzos diagonales entre las patas, que sirven para contrarrestar posibles deformaciones laterales, proporcionando una mayor rigidez y evitando el pandeo de la estructura.



5.5.2. Subconjunto 2: Husillo

El husillo es una pieza fundamental de la grúa romana, cuya función principal es transmitir el movimiento rotacional necesario para girar la grúa en torno a su eje vertical. Se trata de un eje cilíndrico de madera que conecta la base cruciforme con el esqueleto móvil, permitiendo que la parte superior de la grúa gire mientras permanece firmemente anclada a la base. Este husillo está diseñado para resistir tanto las fuerzas de torsión como las de compresión que se generan durante el levantamiento de cargas.

El husillo se inserta en un orificio central de la base, lo que garantiza que su rotación sea suave y controlada. La longitud del husillo debe ser suficiente para permitir que el esqueleto móvil quede elevado sobre la base, dejando un espacio adecuado para la libre rotación sin interferencias con el suelo. Además, el diámetro del husillo es crítico para garantizar que sea capaz de soportar las tensiones mecánicas a las que estará sometido, en especial cuando la grúa esté manipulando cargas pesadas. Las dimensiones clave del husillo son las siguientes:

Longitud del husillo: 350 mm

Diámetro del husillo: 30 mm

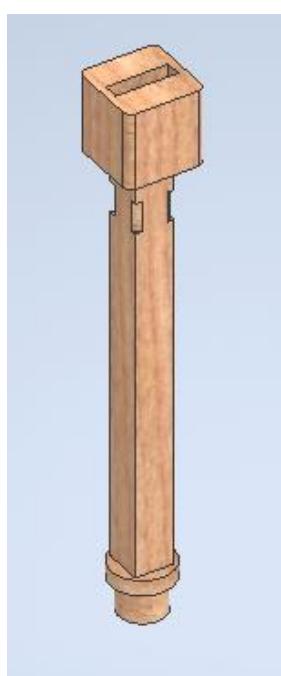


Ilustración 33. Husillo. Fuente: Elaboración propia.



En la parte superior del husillo (Ilustración 33) se encuentra una cuña tallada directamente en la madera, que se acopla con precisión al esqueleto móvil. Esta cuña es fundamental, ya que permite que el esqueleto siga el movimiento del husillo, garantizando que ambos giren de manera sincronizada cuando se hace rotar la grúa. El diseño de esta cuña asegura una transmisión de movimiento eficiente y evita deslizamientos o pérdidas de energía durante la rotación. Además, al estar la cuña integrada en el husillo, se evita la necesidad de piezas adicionales, simplificando el ensamblaje y mantenimiento de la grúa.

5.5.3. Subconjunto 3: Esqueleto Móvil

El esqueleto móvil es una de las partes más dinámicas de la grúa romana, diseñado para transmitir el movimiento rotacional del husillo hacia el sistema de elevación de cargas. Esta estructura se compone de un conjunto de brazos o barras, dispuestos de manera que forman un armazón que soporta el sistema de cuerdas y poleas encargado de levantar las cargas. Los brazos están ensamblados entre sí mediante pasadores, que permiten un ajuste seguro, pero a la vez lo suficientemente flexible como para permitir el movimiento articulado necesario durante la operación.

Cada brazo del esqueleto móvil está conectado tanto al husillo como a otros brazos mediante estos pasadores, lo que facilita el montaje y desmontaje de la grúa. Los pasadores permiten que las barras se mantengan firmemente en su lugar mientras permiten el movimiento relativo necesario entre las diferentes partes de la estructura, garantizando que el esqueleto siga el movimiento de rotación del husillo. Este sistema de ensamblaje mediante pasadores también permite cierto grado de movimiento en los puntos de unión, lo que es importante para distribuir de manera uniforme las tensiones generadas durante el izado de cargas pesadas.

El material de los brazos del esqueleto móvil suele ser madera de buena resistencia, lo que asegura que puedan soportar las tensiones a las que estarán sometidos. Además, el diseño de la estructura asegura que las cargas se distribuyan uniformemente a lo largo de los brazos, minimizando los puntos de concentración de esfuerzo y reduciendo el riesgo de fallo estructural. Las principales dimensiones de los brazos del esqueleto móvil son:

Longitud de brazo principal (mástil): 700 mm



Diámetro de los pasadores: 5 mm

En la parte superior del esqueleto, (Ilustración 34) los brazos están diseñados para acoplarse a la cuña situada en la parte superior del husillo. Esto asegura que, al rotar el husillo, el esqueleto móvil gire de manera sincronizada, permitiendo que la grúa oriente la carga en la dirección deseada. Este mecanismo garantiza un movimiento controlado y preciso, esencial para la manipulación segura de cargas.

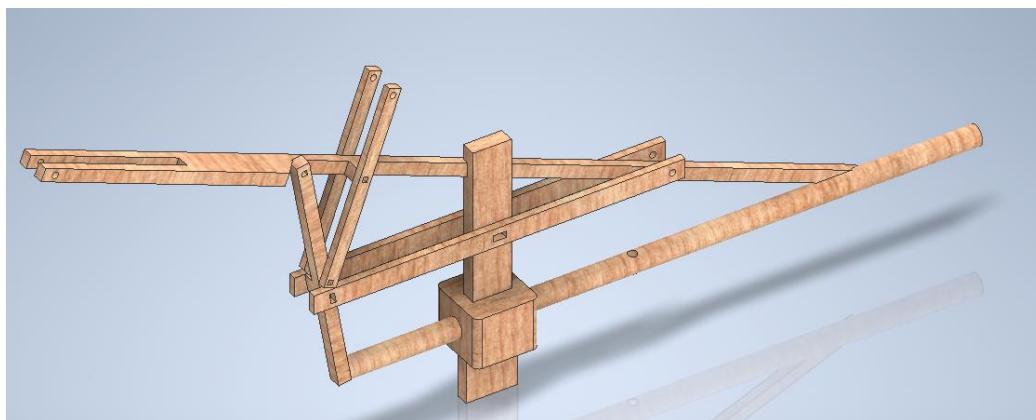


Ilustración 34. Esqueleto Móvil. Fuente: Elaboración propia.

5.5.4. Subconjunto 4: Soporte y Freno de Rueda

El subconjunto 4, (Ilustración 35) que incluye los soportes y los frenos de la rueda, es esencial para controlar el movimiento de la grúa. Los dos soportes, situados a ambos lados de la rueda, garantizan su correcta alineación y permiten su giro fluido sobre el eje. Además, cada soporte está equipado con un freno en forma de cerrojo, diseñado para bloquear el movimiento de la rueda cuando sea necesario. Estos frenos, fabricados en acero para evitar deformaciones por torsión, se insertan en los radios de la rueda, proporcionando un bloqueo firme y seguro.

La presencia de dos frenos, uno en cada soporte, permite repartir de manera uniforme las tensiones y cargas generadas al frenar, evitando que un solo lado soporte todo el esfuerzo. Esta distribución no solo mejora la seguridad operativa, sino que también prolonga la vida útil del sistema al reducir el desgaste localizado. Las medidas más relevantes son:

Longitud de los soportes: 190 mm



Espesor de los soportes: 10 mm

Diámetro del eje de la rueda: 20 mm

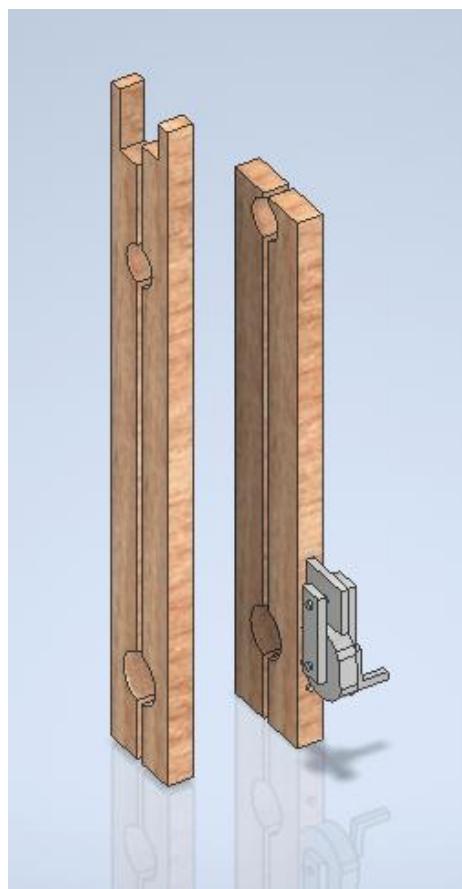


Ilustración 35. Soporte y Freno de Rueda.
Fuente: Elaboración propia.

En este conjunto, se encuentra el subconjunto 4.3, este está formado por varias piezas, las cuales componen el freno, como ya hemos mencionado anteriormente. El funcionamiento de dicho freno es sencillo, siendo el propio operario colocado en la rueda de la grúa el encargado de accionarlo en el momento deseado. Al accionar la manivela/palanca hacia abajo, esta hace girar la rueda del freno, la cual no llega a ser un cilindro perfecto, pues en el momento en el que el freno no se encuentra activo, esta tiene una mueca, posibilitando el giro del eje, al girar la rueda, comienza a hacer presión en la columna/sostén del eje juntando así sus dos partes y pinzando el eje.

Esto se consigue gracias a que el centro de la rueda está colocado a una distancia inferior al radio de la circunferencia completa. En los anexos se han incorporado varios, uno de ellos se muestra en detalle el funcionamiento de dicha rueda.



5.5.5. Subconjunto 5: Rueda

La rueda es uno de los componentes más emblemáticos de la grúa romana. Se trata de una gran rueda de andar en la que se desplazan los operadores, generando el movimiento necesario para elevar cargas. Este sistema es una forma primitiva pero efectiva de multiplicar la fuerza humana, ya que permite que una o más personas caminen dentro de la rueda, transmitiendo ese movimiento hacia el sistema de poleas a través de un eje central. La rueda está construida en madera, utilizando láminas delgadas para el borde exterior y radios que se conectan al eje central.

El tamaño de la rueda es crucial (Ilustración 36), ya que, a mayor diámetro, mayor es la fuerza que puede generarse con el mismo esfuerzo humano. Además, la anchura de la rueda debe ser suficiente para alojar a los operadores, pero no tan grande como para hacer que la estructura sea ineficiente o difícil de manejar. Las medidas clave de la rueda son:

Diámetro exterior de la rueda: 300 mm

Ancho de la rueda: 84 mm

Diámetro del eje central: 20 mm



Ilustración 36. Rueda. Fuente: Elaboración propia.

5.5.6. Subconjunto 6: Pasadores

Los pasadores (Ilustración 37) son los elementos de unión mecánica que permiten el ensamblaje y la articulación entre los distintos subconjuntos de la grúa. Estos componentes se insertan en los orificios de los soportes, el esqueleto móvil y el husillo, fijando temporalmente las piezas y permitiendo que ciertas partes del sistema se muevan o permanezcan estáticas. Están construidos generalmente en madera, aunque algunos pasadores críticos pueden estar reforzados con metal para soportar las cargas mecánicas y evitar el desgaste por fricción.

Los pasadores tienen un papel esencial en la operación de la grúa, ya que permiten que el operador ajuste la movilidad o fije las posiciones de ciertos subconjuntos según sea necesario. Las dimensiones más importantes son:

En muchos casos, los pasadores también se utilizan como pivotes, lo que permite el movimiento rotacional de los componentes conectados. Por tanto, es importante que los diámetros de los agujeros donde se insertan sean precisos y que los pasadores estén bien ajustados para evitar holguras que podrían afectar el rendimiento de la grúa.

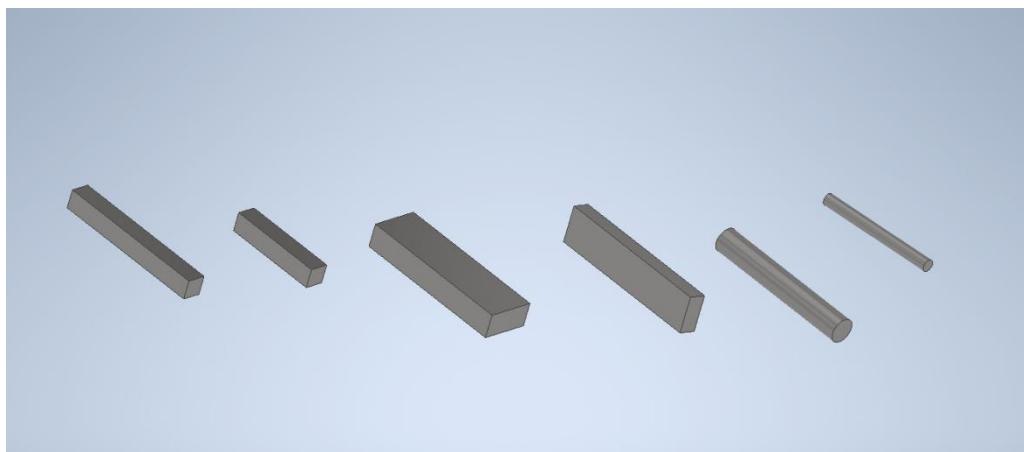


Ilustración 37. Pasadores. Fuente: Elaboración propia.

5.6. Ensamblaje

Una vez presentados todos los subconjuntos, estamos en disposición de realizar el ensamblaje de cada uno de ellos entre sí y así completar el modelado. Se han realizado determinadas restricciones y uniones en el programa para poder desde él simular los movimientos clave de la grúa, siendo estos, el giro de 360º del esqueleto móvil, el giro sobre los soportes del eje/rueda y el movimiento simulado del freno (Ilustración 38).

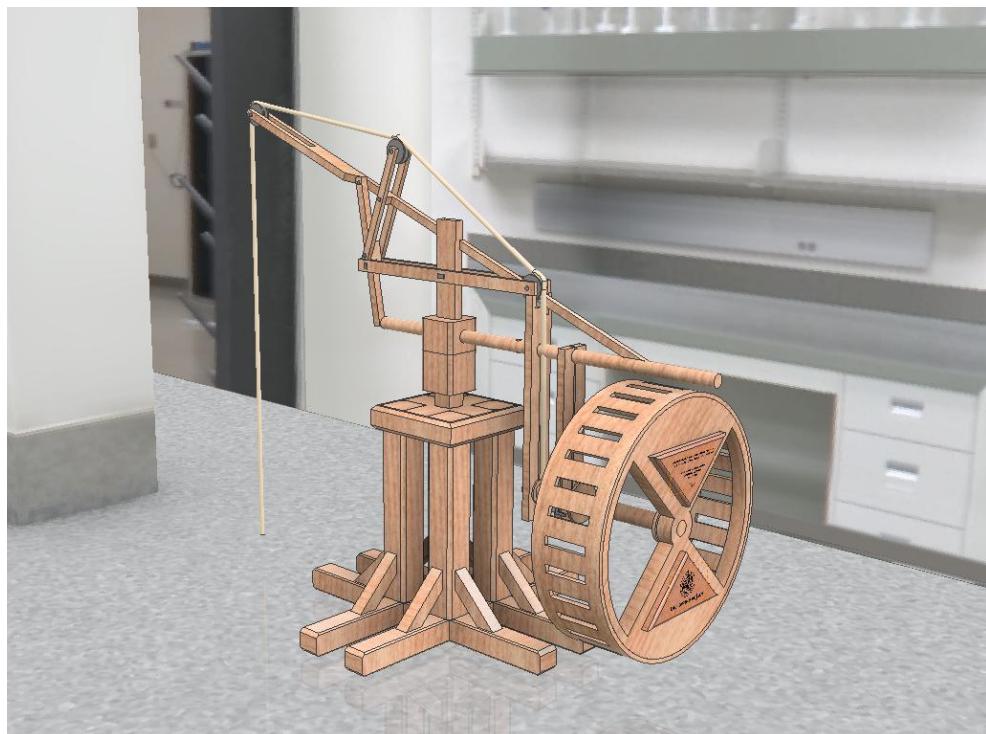


Ilustración 38. Ensamblaje de Grúa Completa. Fuente: Elaboración propia



5.7. Planos

Los planos han sido elaborados utilizando el software Autodesk Inventor Professional 2025, una herramienta avanzada y ampliamente utilizada en el campo del diseño y la ingeniería. Durante su creación, se ha tenido en cuenta el cumplimiento de toda la normativa técnica exigida para la presentación de planos industriales. Este detalle es crucial, ya que garantiza que los planos puedan ser interpretados y utilizados con precisión en un entorno técnico, permitiendo su posterior uso en la fabricación o estudio de los componentes.

En cuanto al formato, los planos de nuestra grúa romana han sido configurados en un tamaño DIN A3, uno de los más habituales en la presentación de proyectos técnicos, lo que facilita su manejo y lectura en cualquier fase del proceso de ingeniería. Además, se ha diseñado un formato de hoja personalizado, en el cual se incluye un cajetín que aporta información esencial sobre cada pieza representada. Este cajetín detalla el nombre de las piezas, la escala utilizada en el plano, el nombre del proyecto, así como el número de hoja, la fecha de realización y la escuela responsable del trabajo. Estos elementos son fundamentales para proporcionar una identificación clara del proyecto y asegurar una correcta trazabilidad en el desarrollo del mismo.

Asimismo, se han previsto apartados adicionales como "Revisado por", "Aprobado por" y "Fecha de aprobación", aspectos que son importantes para un eventual proceso de revisión o validación del trabajo. Esto refuerza la rigurosidad del proceso, asegurando que los planos puedan ser evaluados y aprobados conforme a los estándares profesionales exigidos.



Finalmente, los planos (Ilustración 39) correspondientes a este proyecto se pueden visualizar en el apartado de ANEXOS, donde se incluyen todos los documentos gráficos necesarios para su comprensión y posterior desarrollo.

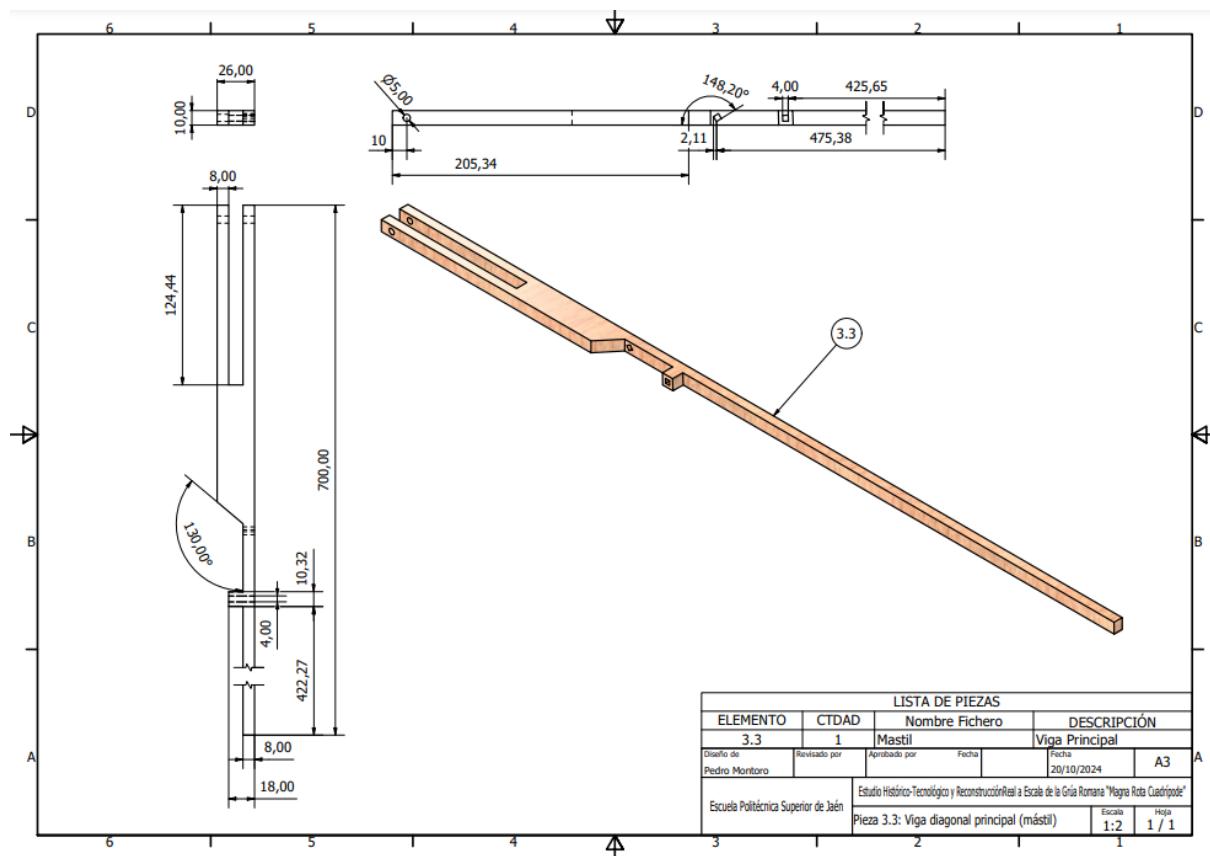


Ilustración 39. Ejemplo de plano. Fuente: Elaboración propia.

5.8. Consideraciones y dimensionado

5.8.1. Documentación Histórica y Usos de las Grúas Romanas

Contexto Histórico:

Las grúas romanas se utilizaban principalmente en construcción, destacando en obras públicas como acueductos, templos, teatros y anfiteatros. Estas estructuras representaban hitos tecnológicos en la ingeniería romana, permitiendo erigir edificaciones monumentales que aún hoy sorprenden por su tamaño y durabilidad. La implementación de las grúas no solo optimizaba el trabajo humano, sino que también permitía ejecutar tareas que serían imposibles solo con fuerza manual.

La grúa de rueda, conocida como "hamster wheel" en términos modernos, apareció en la antigüedad como una evolución de poleas simples y sistemas de



tracción animal. Estos dispositivos fueron descritos por autores como Vitruvio, quien documentó las máquinas de construcción utilizadas por los romanos, y también se mencionan en relieves y frescos que muestran su empleo en la construcción de grandes monumentos. La grúa romana multiplicaba la fuerza aplicada gracias al principio de la palanca y a la transmisión mecánica, siendo capaz de levantar bloques de piedra de varias toneladas de peso. Este mecanismo era indispensable para la construcción de acueductos como el de Segovia, templos como el Panteón de Agripa y anfiteatros como el Coliseo.

Innovación y Diseño:

El diseño de estas grúas incluía una rueda de gran tamaño operada por humanos, generalmente esclavos o trabajadores especializados. Al caminar dentro de la rueda, generaban un par que se transmitía al mecanismo de elevación mediante un eje y una cuerda. Este sistema no solo era eficiente, sino también seguro dentro de los estándares de la época. La movilidad y modularidad eran otros aspectos clave: las grúas podían desmontarse y trasladarse a diferentes ubicaciones, adaptándose a las necesidades de cada proyecto.

Ergonomía y Tamaño de las Personas:

En la época romana, la estatura media de un hombre adulto era de aproximadamente 1.65 metros. La rueda debía ser lo suficientemente amplia para albergar a una persona de estas dimensiones, con espacio adicional para maniobrar cómodamente. Se han elegido estas dimensiones porque permiten que una persona camine dentro de la rueda sin riesgos y con suficiente estabilidad, atendiendo a las necesidades humanas y técnicas de la época. Además, el diseño de la rueda garantizaba que la velocidad de giro fuera adecuada para un esfuerzo continuo, maximizando la eficiencia del trabajo y evitando lesiones o fatiga excesiva.



5.8.2. Justificación de las Medidas Seleccionadas

Dimensiones Generales:

Rueda Principal: La rueda tiene un diámetro adecuado para multiplicar la fuerza aplicada por el operario. Un diámetro grande incrementa la ventaja mecánica, permitiendo levantar cargas mayores con menos esfuerzo.

Se han elegido estas dimensiones porque un diámetro interior de 2.80 metros proporciona el equilibrio ideal entre ergonomía y eficiencia mecánica, garantizando que una persona pueda caminar en su interior con estabilidad y generar un par significativo en el eje.

Estructura Cuadrípode: El diseño de la base en forma de cuadrípode proporciona estabilidad, distribuyendo las fuerzas de forma uniforme al levantar una carga pesada.

Se han elegido estas dimensiones porque las barras principales tienen longitudes adecuadas para soportar los momentos flectores generados por la carga y la tensión de la cuerda en el eje, asegurando una distribución uniforme de las fuerzas.

Husillo y Poleas: Los husillos y poleas son esenciales para transmitir el movimiento de la rueda a la carga. Se han elegido estas dimensiones porque sus proporciones están optimizadas para resistir la tracción sin deformarse ni fallar.

Escala de Construcción:

Para la reconstrucción de esta grúa, se ha optado por utilizar una escala 1:10. Esta elección permite que la maqueta sea lo suficientemente pequeña para ser transportada con facilidad, pero no tan reducida como para complicar su construcción o provocar la pérdida de detalles importantes. La escala mantiene las proporciones originales, permitiendo realizar un análisis fiel del funcionamiento y la estética del diseño romano.

Materiales:

Aunque los materiales originales eran madera reforzada con elementos metálicos, en esta reconstrucción se incluyen detalles como piezas fabricadas en PLA



(plástico), utilizado para representar elementos no estructurales como frenos y pasadores. Esto facilita la fabricación y reduce el peso total de la estructura.

Consideraciones de Estabilidad y Transporte:

Además de las proporciones y materiales, las dimensiones se seleccionaron teniendo en cuenta la modularidad y el transporte. Cada pieza está diseñada para encazar con precisión, de manera que pueda ensamblarse y desmontarse rápidamente sin herramientas complejas. Esto refleja la naturaleza práctica de las grúas romanas originales, que también se transportaban de un sitio a otro en función de las necesidades de construcción.

5.8.3. Análisis de los Elementos Principales

a) Eje y Radios de la Rueda

Función: Transmiten el par generado por el operario al mecanismo de elevación.

Diseño: Se han elegido estas dimensiones porque los radios de madera están distribuidos uniformemente, garantizando la rigidez de la rueda y minimizando deformaciones. El eje central está dimensionado para soportar las cargas de tracción y compresión derivadas de la operación.

b) Poleas y Cuerdas

Función: Las poleas multiplican la fuerza aplicada, reduciendo el esfuerzo necesario.

Medidas: Se han elegido estas dimensiones porque permiten alojar cuerdas de materiales naturales como cáñamo, de aproximadamente 30 mm de diámetro, acorde a las tecnologías disponibles en la antigüedad, garantizando un funcionamiento suave y eficiente.

c) Base y Refuerzos

Función: Proporcionan estabilidad y seguridad durante el uso de la grúa.



Medidas: Se han elegido estas dimensiones porque las barras y columnas tienen espesores suficientes para soportar tanto las cargas estáticas como dinámicas generadas por la operación. Además, el uso de refuerzos diagonales previene pandeos y torsiones, aumentando la vida útil del sistema.

d) Frenos y Pasadores

Función: Aseguran la posición de la carga cuando no se está operando.

Materiales: Se han elegido estas dimensiones porque los frenos y pasadores, aunque fabricados en PLA en esta reconstrucción, reproducen fielmente las cuñas de madera o metal utilizadas en la antigüedad, ofreciendo una solución práctica y segura.

6. CONSTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA.

Una vez desarrollados los planos de nuestra grúa y desarrollado el modelado tanto de las piezas como del ensamblaje es el momento de realizar la construcción real a escala de nuestra máquina herramienta.

Se van a emplear distintos métodos de fabricación para la creación de cada una de las piezas que componen el conjunto.

6.1. Materiales

Se emplearán dos materiales principales para la realización de la maqueta, siendo madera de pino (material principal, constituyendo más de un 90%) y PLA (ácido poliláctico), para el restante por ciento.

Todos los elementos fijos van a ser de madera, algunos de madera de pino y algunos otros de madera de abeto. Nos hemos tenido que adaptar a los materiales que teníamos a disposición en nuestro caso en Leroy Merlin según su tamaño y forma.

Los elementos móviles, excepto la rueda, van a ser de PLA (ácido poliláctico), que es un material utilizado para realizar piezas en impresoras 3D. Los elementos



móviles se han realizado en impresión 3D ya que al ser piezas de dimensiones reducidas era más fácil y cómodo imprimirlas que realizarlas a mano en madera.

6.1.1. Propiedades de los materiales.

PLA, ácido poliláctico.

El PLA, conocido también como ácido poliláctico (Ilustración 40). Es un material termoplástico, compostable de origen natural, alifático, obtenido por la condensación del ácido láctico y de la polimerización de la apertura del anillo.



Ilustración 40. Ejemplo de filamento para impresora 3D. Fuente: es.rs-online.com

[29] El PLA tiene buenas propiedades mecánicas, si lo comparamos con las de los materiales termoplásticos estándar. Posee baja resistencia al impacto comparada con la que tienen los materiales termoplásticos estándar.

También, cuenta con muy baja resistencia al impacto, comparada con la del cloruro de polivinilo. Incluso tiene:

- Dureza, resistencia al impacto, rigidez y elasticidad.
- Buena resistencia a la torsión.
- Es permanente.
- De color claro brillante.
- Es inodoro.
- Se obtiene de los recursos renovables y naturales.

Propiedades físicas y mecánicas:



- Densidad 1,24 g/cm³.
- Resistencia a la tracción de 3309 MPa.
- El límite elástico es de 55 MPa.
- Resistencia a la compresión 66 MPa.
- Resistencia a la flexión de 485 MPa.
- Temperatura de deformación 55°C.
- Muy baja resistencia a la humedad.
- Elongación 3%.

Propiedades térmicas

- Punto de fusión 145°C.
- Temperatura de transición vítrea de 60°C.
- Mínima temperatura en servicio de 20°C.
- Calor específico ($1,18 \times 10^3 - 1,21 \times 10^3$) J/Kg*°C

Es un Buen aislante, con una máxima temperatura de servicio de 55°C y Conductividad térmica de 0,13 W/m*°C. [\[29\]](#)

Madera de Pino

La madera de pino es quizás la madera más usada y conocida (Ilustración 41). Se debe a varios factores entre los destacan su abundancia, su facilidad para trabajar y versatilidad. Presenta unos buenos índices en resistencia, contracción y flexión, e impregnabilidad. No destaca en ninguno de ellos, pero la combinación suele ser buena. [\[30\]](#)



Ilustración 41. Madera de pino. Fuente:
www.istockphoto.com



Características:

- Densidad: Aproximadamente 500 kg/m³ al 12% de humedad. Madera entre ligera y semi-pesada.
- Dureza (Monnin): 1,8 – 2,1 madera blanda.
- Durabilidad: Sensible al ataque de hongos e insectos.
- Estabilidad Dimensional: Coeficiente de contracción volumétrico: 0,44% madera medianamente nerviosa

Propiedades Mecánicas:

- Resistencia a la compresión: 434 kg/cm²
- Resistencia a flexión estática: 874 kg/cm²
- Módulo de elasticidad: 90.000 kg/cm²

Madera de Iroko

La madera de iroko (Ilustración 42) es una madera tropical muy apreciada en carpintería y construcción debido a su durabilidad, resistencia y atractiva apariencia. Proviene de árboles de la especie Milicia excelsa y Milicia regia, que crecen principalmente en África occidental y central. Por sus propiedades, se le conoce a menudo como el "teca africana", aunque no pertenece a la misma familia botánica que la teca. [\[32\]](#)



Ilustración 42. Madera de Iroko. Fuente:
maderasacuna.com

Propiedades Mecánicas: [\[33\]](#)

- Densidad media: 650 kg/m³
- Resistencia a la flexión estática: 960 kg/Cm²



- Resistencia a la compresión: 535 kg/Cm²
- Resistencia a la tracción paralela: 810 kg/Cm²
- Módulo de elasticidad: 107 000 kg/Cm²

6.2. Máquinas/Herramientas utilizadas.

Para la realización de piezas móviles (poleas, pasadores) se ha empleado una impresora 3D, facilitada por el profesorado especializado en esta área, D. Gustavo Medina Sánchez. Empleando en este caso, la impresora de marca BAMBU LAM y modelo P1S Combo.

Bambu Lab P1S Combo.

La Bambu Lab P1S (Ilustración 43) es una impresora 3D de alto rendimiento diseñada para ofrecer una experiencia de impresión rápida y de calidad. A continuación, se detallan sus principales características técnicas: [\[31\]](#)

Estructura y Diseño:

- Cuerpo Cerrado: La P1S cuenta con una carcasa completamente cerrada que mejora el rendimiento al imprimir con filamentos avanzados, permitiendo un control más preciso de la temperatura interna y reduciendo la emisión de olores y gases nocivos.
- Volumen de Construcción: Ofrece un volumen de impresión de 256 x 256 x 256 mm, adecuado para una amplia variedad de proyectos.

Velocidad y Precisión:

- Sistema CoreXY: Incorpora un sistema de movimiento CoreXY que permite aceleraciones de hasta 20,000 mm/s² y una velocidad máxima de 500 mm/s, garantizando impresiones rápidas sin comprometer la calidad.
- Compensación de Vibraciones y Avance de Presión: Utiliza algoritmos avanzados para minimizar las vibraciones y asegurar una extrusión precisa, resultando en superficies de alta calidad.

Extrusor y Hotend:



- Extrusor de Accionamiento Directo: Mejora el control sobre la extrusión y retracción de filamentos flexibles, proporcionando una extrusión precisa y consistente.
- Hotend All-Metal: Capaz de alcanzar temperaturas de hasta 300 °C, lo que permite la impresión con una amplia gama de filamentos, incluyendo materiales de alta temperatura como ABS y ASA.

Sistema de Enfriamiento y Filtración:

- Ventiladores con Control de Bucle Cerrado: Incluye ventiladores para la placa de control, regulación de temperatura de la cámara y enfriamiento auxiliar de las piezas, todos con control de velocidad para un rendimiento óptimo.
- Filtro de Carbón Activado: Ayuda a reducir los olores y emisiones durante la impresión con filamentos que pueden liberar compuestos volátiles.

Calibración y Nivelación:

- Nivelación Automática de la Cama (ABL): Un sensor integrado calibra y nivela automáticamente la plataforma de impresión, asegurando una primera capa perfecta en cada impresión.

Compatibilidad con Filamentos:

- Soporte Multimaterial: Compatible con filamentos como PLA, PETG, TPU, PVA, ABS y ASA, ofreciendo versatilidad para diversos proyectos.
- Capacidad Multicolor: Con la adición del Sistema Automático de Materiales (AMS), permite impresiones en hasta 16 colores, ampliando las posibilidades creativas.



Software y Conectividad:

- Integración con Bambu Studio y Bambu Handy: Permite controlar la impresora y monitorear las impresiones a través de software de escritorio y aplicaciones móviles, facilitando la gestión del proceso de impresión.



Ilustración 43. Impresora 3D Bambu Lab P1S.
Fuente: Elaboración propia.

Para fabricar el resto de piezas (de madera), se han empleado herramientas típicas de la carpintería/marquetería como pueden ser:

Taladro BOSCH eléctrico.

Taladro a batería (Ilustración 44) para realizar orificios de pequeño diámetro y precisión (donde se colocarán los pasadores), además se han empleado brocas de cobalto de distintas dimensiones (1,5mm, 2,5mm, 5mm, etc.).



Ilustración 44. Taladro Bosch. Fuente: Elaboración propia.



Sierra de calar Black+Decker.

Esta sierra (Ilustración 45) ha sido la herramienta principal (más usada) para hacer cortes en tablones de madera, y así adquirir cada pieza en bruto. Se ha empleado una hoja de corte fino Bosch, para poder hacer los cortes de manera precisa.



Ilustración 45. Sierra de calar Black+Decker. Fuente: Elaboración propia.

Segueta.

Esta herramienta de marquetería (Ilustración 46) ha sido muy útil para realizar distintos trazos, principalmente curvos, una vez que el bruto de la pieza se ha obtenido, consiguiendo así, prácticamente la pieza final deseada.



Ilustración 46. Segueta. Fuente: Elaboración propia.



Formón

El formón ha resultado muy útil para la creación de ciertas hendiduras/muescas de alguna de las piezas, además de ser de gran ayuda para adaptar y ajustar de forma precisa los cortes realizados de forma más basta con otras herramientas, como puede ser la sierra de calar.

Torno

Un torno para madera (Ilustración 47) es una herramienta mecánica diseñada para trabajar piezas de madera cilíndricas o de forma simétrica, como ejes, patas de muebles, cuencos o ruedas. Por este motivo, ha sido de necesaria empleabilidad para crear el eje de nuestra rueda “Magna Rota”, sin él no hubiera sido posible el tallado en madera y la obtención de una pieza con tanta calidad.

En anexos se incorporan varios videos de funcionamiento en el que creamos el eje de la rueda.



Ilustración 47. Torno empleado para crear eje.
Fuente: Elaboración propia



Sierra de cinta

La sierra de cinta para madera (Ilustración 48) es una máquina de corte versátil y eficiente utilizada en carpintería y ebanistería para cortar madera en líneas rectas, curvas y formas irregulares. Su diseño permite realizar cortes precisos y suaves, siendo ideal para trabajos que requieren tanto potencia como detalle. Ha sido utilizada principalmente para la creación de la base cruciforme, puesto esta está compuesta de tocones de madera de mayor grosor, impidiendo su corte con la sierra de calar.



Ilustración 48. Sierra de cinta. Fuente: Elaboración propia

Máquina CNC en madera

Una fresadora CNC para madera (Ilustración 49) es una herramienta fresadora CNC que crea objetos a partir de madera. CNC significa control numérico por computadora. El CNC trabaja con el sistema de coordenadas cartesianas (X, Y, Z) para el control de movimiento 3D. Se pueden diseñar partes de un proyecto en la computadora con un programa CAD/CAM y luego cortarlas automáticamente usando una fresadora u otros cortadores para producir una pieza terminada. La fresadora CNC es ideal para pasatiempos, creación de prototipos de ingeniería, desarrollo de productos, arte y trabajo de producción. [34]



El empleo de esta máquina ha sido de gran ayuda para la realización perfecta de la circunferencia que compone la rueda de nuestra grúa, sin ella, el proceso de fabricación hubiera sido tedioso y con posibilidad de rotura de pieza en varias ocasiones.

Sin embargo, al utilizar esta máquina (en anexos se encuentran varios videos de funcionamiento), con tan solo añadir al programa (software propio) un par instrucciones para crear tanto el radio externo como el interno mediante semicírculos, podemos optar a una pieza con gran calidad y presión.



Ilustración 49. Fresadora CNC. Fuente: Elaboración propia

Grabadora Láser

Por último, se ha empleado una grabadora láser (Ilustración 50) para la creación de un grabado personalizado y único, colocado en la parte externa de la rueda, en el



cual se añade el escudo de la Universidad de Jaén, el título de dicho proyecto, junto al autor fecha y firma.



Ilustración 50. Grabadora Láser. Fuente: Elaboración propia

6.3. Método de fabricación.

6.3.1. Impresión 3D

Primeramente, se ha procedido a realizar las piezas de impresión 3D, mediante la impresora descrita anteriormente. Para ello se ha utilizado el software creado para la impresora “Bambu Studio”, (Ilustración 51) en el cual se han incorporado las piezas a imprimir y se ha configurado para obtener una impresión adecuada.

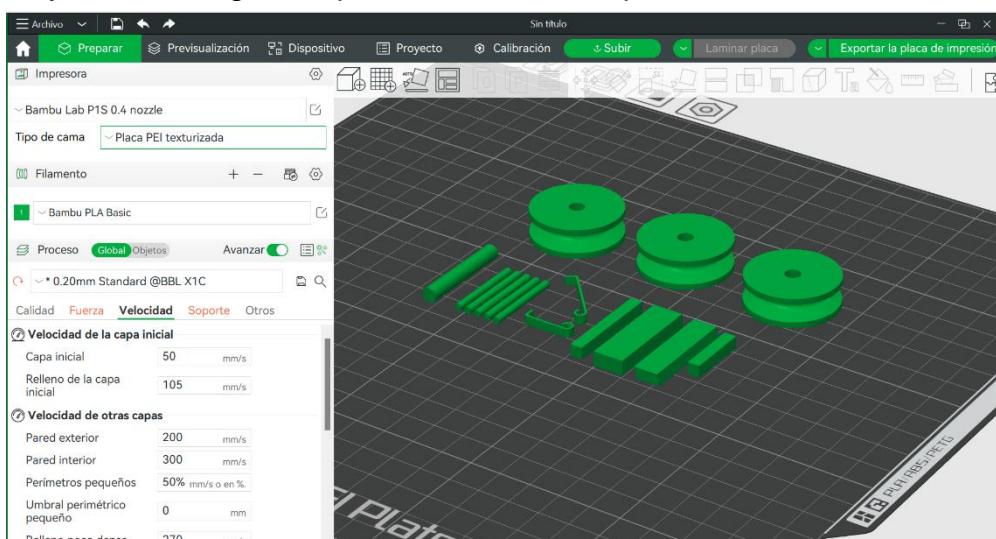


Ilustración 51. Software Bambu Studio. Fuente: Elaboración propia.



Una vez colocadas las piezas de manera óptima para impedir voladizos a la hora de la impresión, se configuran los siguientes parámetros:

En el apartado de calidad, (Ilustración 52) se han dejado los parámetros por defecto, pues las piezas a imprimir no requieren un gran detalle, siendo elementos sencillos.

The screenshot shows a software interface for 3D printing. At the top, there is a search bar with the text "* 0.20mm Standard @BBL X1C". Below the search bar, there are tabs: Calidad (selected), Fuerza, Velocidad, Soporte, and Otros. Under the Calidad tab, there are two sections: 'Altura de la capa' and 'Ancho de línea'. In the 'Altura de la capa' section, 'Altura de la capa' is set to 0,2 mm and 'Altura de la capa inicial' is also set to 0,2 mm. In the 'Ancho de línea' section, there are eight entries: 'Por defecto' (0,42 mm), 'Capa inicial' (0,5 mm), 'Pared exterior' (0,42 mm), 'Pared interior' (0,45 mm), 'Superficie superior' (0,42 mm), 'Relleno poco denso' (0,45 mm), 'Relleno sólido interno' (0,42 mm), and 'Soporte' (0,42 mm).

Ilustración 52. Parámetros de Calidad. Fuente:
Elaboración propia.

- En el apartado de fuerza, (Ilustración 53) se ha modificado la densidad de relleno, parámetro principal para aportar la rigidez y dureza necesaria a los pasadores, ya que estos, serán encargados de soportar las distintas tensiones y torsiones de la grúa.



Calidad **Fuerza** Velocidad Soporte Otros

Relleno poco denso

Densidad de relleno %

Patrón de relleno disperso Rejilla

Longitud del anclaje de relleno disperso mm or %

Longitud máxima del anclaje de relleno disperso mm or %

Avanzado

Superposición de relleno/pared %

Dirección del relleno °

Dirección del puente °

Umbral mínimo de relleno disperso mm²

Ilustración 53. Parámetros de Fuerza. Fuente: Elaboración propia.

- En el apartado de soporte, (Ilustración 54) se ha añadido tanto un soporte normal, que genera el propio software, como el llamado “balsa” para la impresión de los cilindros, puesto estos, por sí solos, no disponen de suficiente superficie de contacto con la cama de la impresora. Este último soporte se añadió en el segundo intento de impresión, pues a la primera, no se añadió y pudimos observar como la adhesión a la cama no fue la correcta, produciéndose el movimiento de los cilindros.

Soporte

Habilitar el soporte

Tipo

Estilo

Ángulo de umbral °

Sólo en la placa de impresión

Retire los voladizos pequeños

Balsa

Capas de balsa capas

Filamento de soporte

Soporte/base de balsa

Interfaz soporte/balsa

Ilustración 54. Parámetros de Soporte. Fuente: Elaboración propia.



Por último, observamos la creación de estos soportes en la simulación del programa (Ilustración 55) para comprobar que se imprimirá adecuadamente:

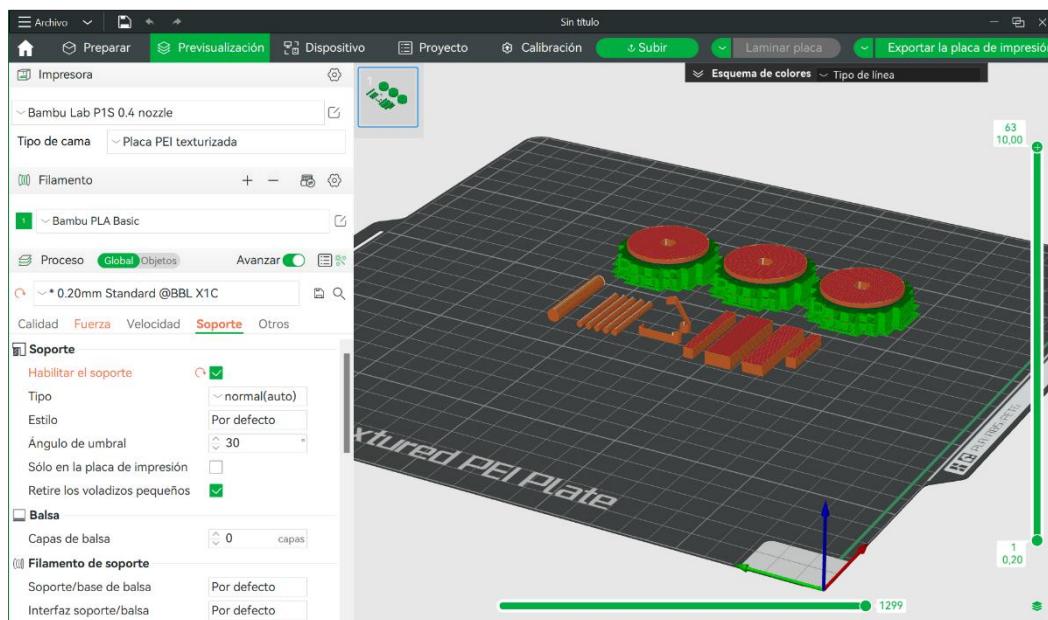


Ilustración 55. Simulación de impresión. Fuente: Elaboración propia.

6.3.2. Carpintería.

Se ha comenzado con la fabricación de las piezas que componen el esqueleto móvil, para ello, se utilizan las herramientas anteriormente mencionadas.

Procedemos con el corte mediante sierra de calar de los soportes de rueda (subconjunto 4), para posteriormente realizarle los orificios necesarios, según planos, donde se insertarán los pasadores encargados en unir ambos lados de cada soporte. (Ilustración 56)



Ilustración 56. Soportes de Rueda en madera. Fuente: Elaboración propia.



Una vez creados los soportes de rueda, el siguiente paso será elaborar las vigas principales donde se apoyan estos soportes y plantear las piezas para ir comprobando que encajan y cuadran entre ellas perfectamente (Ilustración 57).



Ilustración 57. Esqueleto móvil ensamblado. Fuente: Elaboración propia

Tras esto, es necesario el uso del torno industrial para poder fabricar el eje. (videos ilustrativos adjuntados en anexos), una vez creado el eje, observamos que los soportes de la rueda han de ser más robustos pues no es posible hacer un eje con las dimensiones primeramente pensadas. Esto nos obliga a modificar varios parámetros y medidas en el diseño del software Autodesk Inventor, pero sin mayor problema, puesto era previsible el tener que modificar varios elementos.

Se han de hacer varios intentos para obtener el eje definitivo, ya que, al emplear herramientas de grandes potencias, la pieza no aguanta ocasionando su rotura.

Procedemos con la creación de la rueda, esta se hace mediante el mecanizado por control numérico, de esta forma, conseguimos las dos circunferencias principales que componen la rueda, para posteriormente mediante tablones de madera, y dejando un hueco entre ellos de 1 cm, conformamos la rueda. Se han utilizado un total de 30 tablones. Encajando los subconjuntos de la rueda obtenemos el resultado final (Ilustración 58).



Ilustración 59. Ensamblaje de la rueda.
Fuente: Elaboración propia

Por último, creamos todas las piezas que componen la base cruciforme, estas piezas no presentaron dificultad alguna, ya que su diseño es simple, realizando una serie de cortes ajustándose a las medidas del diseño se obtiene el resultado final. Previo al montaje, se ha de tener en cuenta que el husillo ha de girar libremente, por lo que se implemente cera, tanto en el husillo como en los soportes de este (Ilustración 59).



Ilustración 58. Ensamblaje de base cruciforme. Fuente:
Elaboración propia



Habiendo creado los subconjuntos principales, mediante los distintos métodos y herramientas, estamos en la disposición de hacer el montaje completo, ajustando ciertas piezas para que en su conjunto sea un bloque sólido y duradero (Ilustración 60).



Ilustración 60. Grúa montada. Fuente: Elaboración propia

Una vez comprobado que todo está creado tal y lo diseñado, siguiendo el mismo procedimiento anteriormente descrito con la impresora 3D, creamos el mecanismo del freno del eje de la rueda. Este es un simple mecanismo, el cual accionando una palanca (accionada por el operario sobre la rueda), se gira una rueda que ejerce presión a los soportes del eje, apretando así el mismo e impidiendo el giro de la rueda.

En las dos siguientes imágenes se muestra tanto el freno inoperativo (tanto el eje como la rueda tienen libre giro) (Ilustración 61) como el freno accionado, ejerciendo presión en el soporte más cercano de la rueda (Ilustración 62).



Ilustración 61. Freno sin accionar (eje con libre giro). Fuente: Elaboración propia



Ilustración 62. Freno accionado. Fuente: Elaboración propia

El grabado ha sido el último paso para la creación completa de la grúa. Se ha preferido implementarlo en la grúa y no en una placa aparte para que su traslado sea más cómodo y todo de una pieza (Ilustración 63).



**Ilustración 63. Grabado en madera mediante láser. Fuente:
Elaboración propia**



7. MAQUETA COMPLETA



Ilustración 64. Grúa a escala completa. Fuente: Elaboración propia



8. CONCLUSIONES

Como conclusiones, este trabajo de fin de grado ha sido un gran reto y un gran desafío. Me ha servido para poder aprender la historia y evolución de las máquinas herramientas desde tiempos prehistóricos hasta la actualidad. Se ha podido investigar sobre las diferentes máquinas herramientas de cada época las cuales, según los hechos históricos, el ser humano se iba adaptando y evolucionando mediante la tecnología y el desarrollo intelectual.

En el caso histórico se ha podido aprender de la evolución de las maquinas herramientas más importantes utilizadas como son los molinos, catapultas y principalmente la grúa, desde las primeras que surgieron hasta la actualidad. Han aparecido muchos inventores y muchos ingenieros de la época los cuales desarrollaban su intelecto y su desarrollo intelectual y hacían evolucionar dichas maquinas herramientas, destacando a Vitruvio, gran ingeniero y matemático que ayudo y plasmó en su gran libro el diseño y proceso de utilización y desarrollo de las máquinas más importantes del Imperio Romano.

En el caso de la parte tecnológica este trabajo me ha servido de gran aprendizaje y ha sido todo un reto. A partir del estudio de una máquina herramienta antigua concreta se ha podido realizar su análisis, su modelado y su construcción real a escala.

La parte experimental ha sido un desafío ya que todas las piezas y todo nuestro torno se ha hecho a partir de una imagen encontrada en internet (Ilustración 23). A partir de la estatura media de una persona se han podido sacar las dimensiones de algunas piezas y se han tenido que cuadrar para que todas se pudiesen ensamblar correctamente. La metodología utilizada durante el diseño y la construcción se ha basado en la ingeniería inversa, que consiste en observar proyectos o dibujos ya hechos y descubrir cómo funcionan e intentar reproducirlos y mejorarllos e ir aprendiendo a la vez que se va haciendo.

El montaje de la grúa romana “Magna Rota” real a escala me ha servido de gran aprendizaje a la hora de organizar las tareas y a la hora de organizar el montaje mediante los planos. También me ha servido para aprender procesos de fabricación



y aplicarlos en nuestro modelo y saber el funcionamiento de muchas máquinas herramientas las cuales se han utilizado en la construcción real a escala.

Por último, estos años de carrera me han servido para poder afrontar este desafío y gracias a los conocimientos aprendidos en el grado he podido enfrentarme a los problemas y dificultades a lo largo del transcurso del trabajo y he podido aprender de esos problemas y dificultades para sacar soluciones y buenos resultados.



9. REFERENCIAS

- [1] Romero, C. (2020, junio 10). *Polispastos: Las grúas de Roma*. Revista de Historia. <https://revistadehistoria.es/polispastos-las-gruas-de-roma/>
- [2] Wasson, D. L. (2016, enero 05). *La extensión del Imperio Romano [The Extent of the Roman Empire]*. (D. Cohen, Traductor). *World History Encyclopedia*. Recuperado de <https://www.worldhistory.org/trans/es/2-851/la-extension-del-imperio-romano/>
- [3] Conquista de Hispania. (2024, junio 7). En Wikipedia, la enciclopedia libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Conquista_de_Hispania
- [4] Hispania romana. (2024, enero 5). En Wikipedia, la enciclopedia libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Hispania_romana
- [5] Ruíz, R. (2023, octubre 3). *Imperio romano en España: 10 destinos para recordar la vieja Hispania*. elDiario.es. https://www.eldiario.es/viajes/imperio-romano-espana-10-destinos-recordar-vieja-hispania_1_9276937.html
- [6] Tecnología de la Antigua Roma. (2024, enero 23). En Wikipedia, la enciclopedia libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Tecnolog%C3%ADa_de_la_Antigua_Roma
- [7] Labate, V. (2016, marzo 01). *La ingeniería romana [Roman Engineering]*. (C. A. S. B, Traductor). *World History Encyclopedia*. Recuperado de <https://www.worldhistory.org/trans/es/1-12541/la-ingenieria-romana/>
- [8] Puente de Alcántara. (2024, mayo 23). En Wikipedia, la enciclopedia libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Puente_de_Alc%C3%A1ntara
- [9] Cartwright, M. (2015, abril 22). Vitruvio [Vitruvius]. (C. A. S. B, Traductor). *World History Encyclopedia*. Recuperado de <https://www.worldhistory.org/trans/es/1-12057/vitruvio/>
- [10] BBC News Mundo. (2022, julio 26). *Las causas de la escasez de chips en el mundo y cuándo podría terminar*. BBC. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-62321557>
- [11] Urbes Blog. (2016, septiembre 3). *Los diez libros de la arquitectura de Vitruvio*. <https://urbesblog.wordpress.com/2016/09/03/los-diez-libros-de-la-arquitectura-de-vitruvio/>
- [12] Simonetti González, A. (2019). *Reproducción de una grúa romana a escala mediante impresión 3D* (Trabajo Final de Grado, Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTECH). Jorge Martín Giménez (Director) y Rafael Weyler Pérez (Codirector). Grado en Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo de Producto.
- [13] Labate, V. (2016, junio 13). *Los molinos romanos [Roman Mills]*. (C. A. S. B, Traductor). *World History Encyclopedia*. Obtenido de <https://www.worldhistory.org/trans/es/2-907/los-molinos-romanos/>
- [14] Revista de Historia. (2015, junio 3). *Las catapultas romanas*. Revista de Historia. <https://revistadehistoria.es/las-catapultas-romanas/#:~:text=Las%20catapultas%20romanas%20era%20unas,lithobolos%2C%20basa%20en%20la%20torsi%C3%B3n.>
- [15] Archundia Rivera, T. A., Pantoja Hernández, M. G., & Peña Alcocer, B. V. (2017, octubre 9). *Reporte de equipo: Catapulta*. Instituto Tecnológico de Celaya.
- [16] Balista. (2024, enero 22). En Wikipedia, la enciclopedia libre. <https://es.wikipedia.org/wiki/Balista>
- [17] Batán T. (s.f.). *Armamento de las Legiones Romanas: Máquinas de Guerra (Parte IV)*. Revista de Historia. Recuperado de <https://beacon.by/revistadehistoria/revista-de-historia-especial-legiones-de-roma/6#/6>
- [18] Vitruvio Polión, M. L. (s.f.). *Los diez libros de arquitectura*. (Original work published ca. 15 B.C.)



- [19] Instituto Geográfico Nacional. (s.f.). *Condiciones de uso del mapa de transportes de España*. Instituto Geográfico Nacional.
https://www.ign.es/espmap/mapas_transporte_bach/TyC_Mapa_02.htm
- [20] Blanco, J. (2020, mayo 3). *Las cinco calzadas romanas más importantes de Hispania: más de 1.000 km de longitud que aún pasan*. El Español.
https://www.elespanol.com/cultura/historia/20200503/calzadas-romanas-importantes-hispania-longitud-pasaban/486951748_0.html
- [21] Grúa (máquina). (2024, junio 21). En *Wikipedia, la enciclopedia libre*.
[https://es.wikipedia.org/wiki/Gr%C3%A1fica_\(m%C3%A1quina\)#:%~:text=Las%20primeras%20gr%C3%A1ficas%20fueron%20creadas,la%20construcci%C3%B3n%20de%20edificios%20altos.](https://es.wikipedia.org/wiki/Gr%C3%A1fica_(m%C3%A1quina)#:%~:text=Las%20primeras%20gr%C3%A1ficas%20fueron%20creadas,la%20construcci%C3%B3n%20de%20edificios%20altos.)
- [22] Chondros, T. G., Tsarouhas, G., & Koumousis, V. K. (2011). Mechanical design evolution of tower cranes. International Journal of Mechanical Engineering Education, 39(4), 310-324.
- [23] Landels, J. G. (2000). *Engineering in the ancient world*. University of California Press.
- [24] Oleson, J. P. (1984). *Greek and Roman mechanical water-lifting devices: the history of a technology*. University of Toronto Press.
- [25] Wilson, A. (2002). Machines, Power and the Ancient Economy. *The Journal of Roman Studies*, 92, 1-32.
- [26] Integral PLM. (2019, agosto 20). ¿Qué es CAD? Integral PLM.
<https://integralplm.com/blog/2019/08/20/que-es-cad/?srstid=AfmBOoqKjfOLxPu4zpYRZjZDJ26qUluf6SzNwNa3KmDZkMby219AdcqI>
- [27] Siemens. (s.f.). *Computer-aided manufacturing (CAM)*. Siemens Software.
<https://www.sw.siemens.com/es-ES/technology/computer-aided-manufacturing-cam/>
- [28] Siemens. (s.f.). *Computer-aided engineering (CAE)*. Siemens Software.
<https://www.sw.siemens.com/es-ES/technology/computer-aided-engineering-cae/>
- [29] Plásticos Brello. (s.f.). *PLA (ácido poliláctico)*. Plásticos Brello. <https://plasticos-brello.com/material/pla-acido-polilactico/>
- [30] Maderea. (s.f.). *Madera de pino radiata: Propiedades y usos*. Maderea.
<https://www.maderea.es/madera-de-pino-radiata-propiedades-y-usos/>
- [31] Bambu Lab. (s.f.). *P1S 3D printer*. Bambu Lab. https://eu.store.bambulab.com/es-es/products/p1s?variant=49311572328796&skr=yes&qad_source=1&qclid=CjwKCAiAgoq7BhBxEiwAVcW0LM8kKTdkpSiPSHjy9WevRSeq7uJ867caHp2INQNi8mJijUYNSLk8MRoCTJlQAvD_BwE
- [32] Majofesa. (2016). *Madera de iroko*. Majofesa. <https://www.majofesa.com/tablones-de-madera/madera-de-iroko/>
- [33] Castor. (s.f.). *Iroko*. Castor. <https://www.castor.es/iroko.html>
- [34] Wikipedia. (2024 noviembre 16). *CNC wood router*. Wikipedia.
https://en.wikipedia.org/wiki/CNC_wood_router



10. ANEXOS

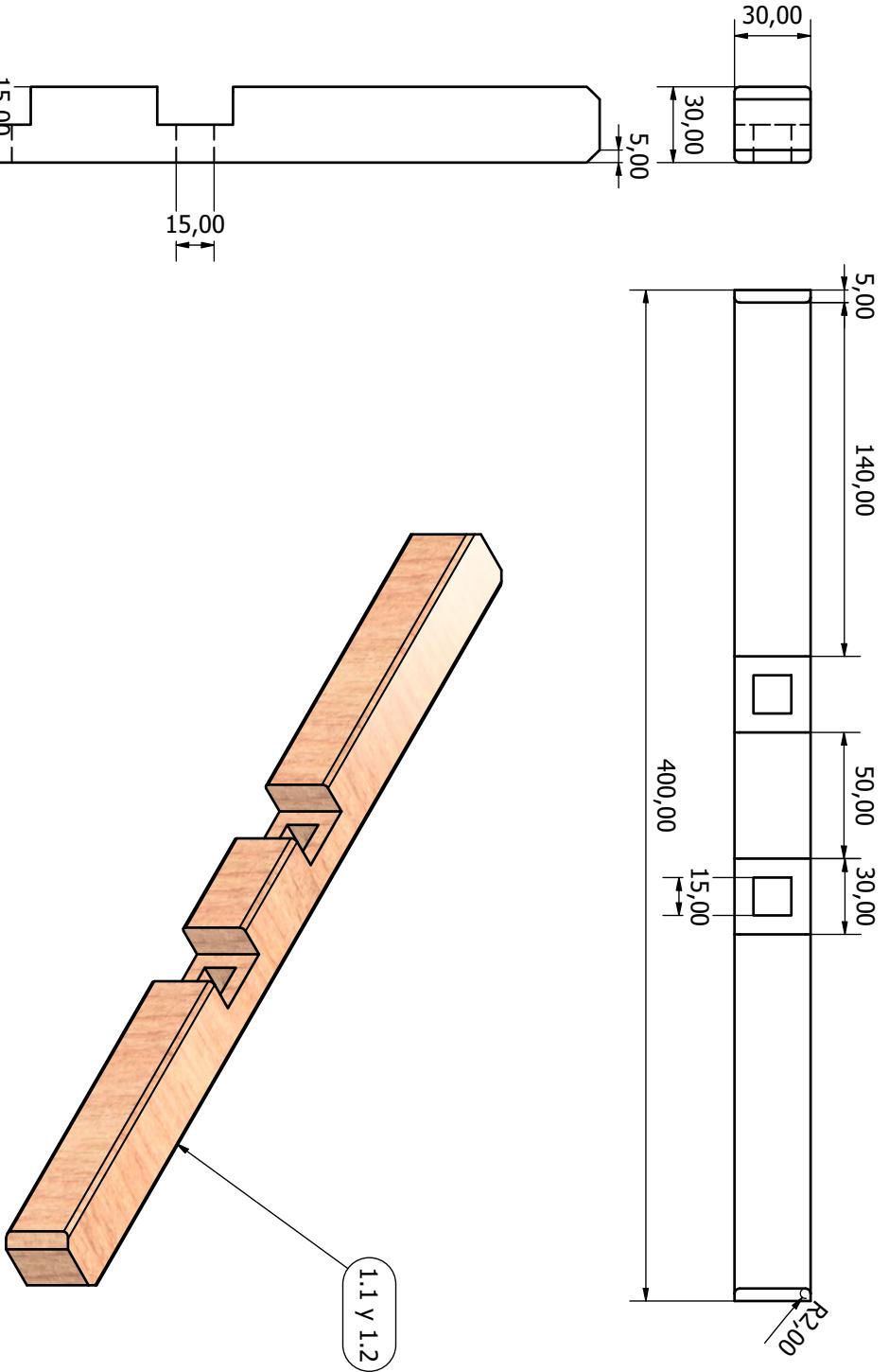
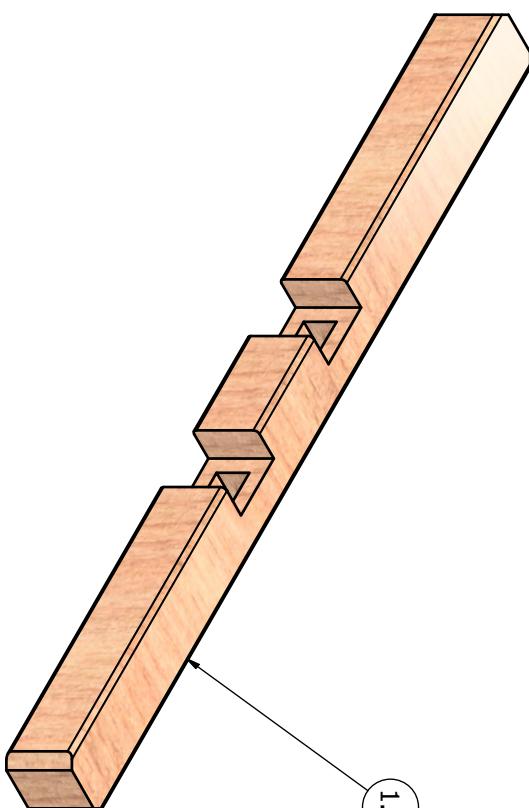
10.1. Reportaje videográfico.

Desde el siguiente enlace se puede acceder a los videos anteriormente mencionados que se encontraban en los anexos, concretamente a videos del proceso de torneado del eje y la utilización de la máquina/fresadora CNC para la creación de las circunferencias de la rueda.

Enlace: [pinche aquí](#).

10.2. Planos completos.

Los planos originales son en formato A3, pero para incorporarlos a la memoria de forma más sencilla se han pasado a formato A4.



LISTA DE PIEZAS

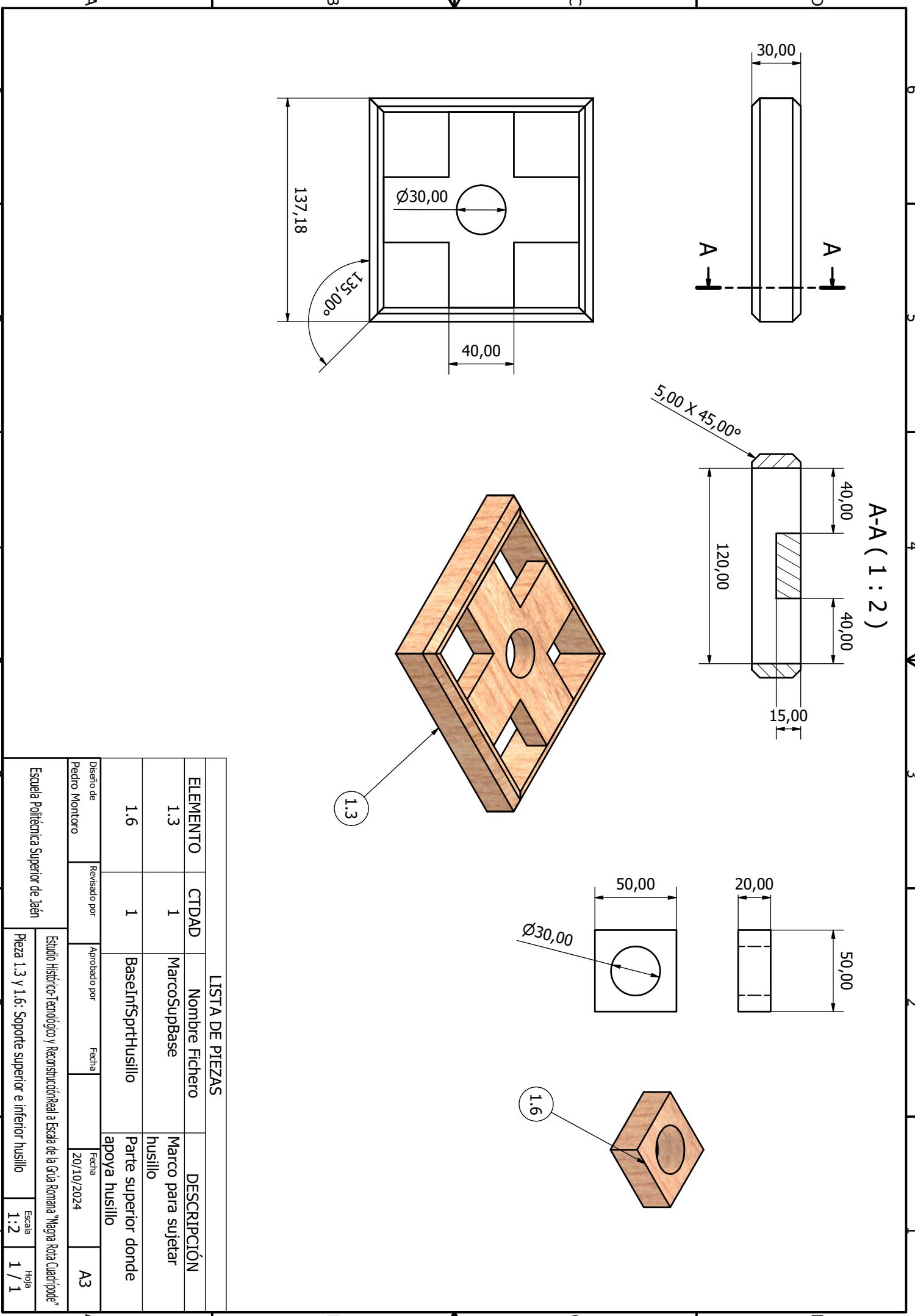
| ELEMENTO | CTDAD | Nombre Fichero | DESCRIPCIÓN |
|-----------|-------|----------------|------------------------------|
| 1.1 y 1.2 | 4 | Base1barra | Barras de base (Barra A y B) |

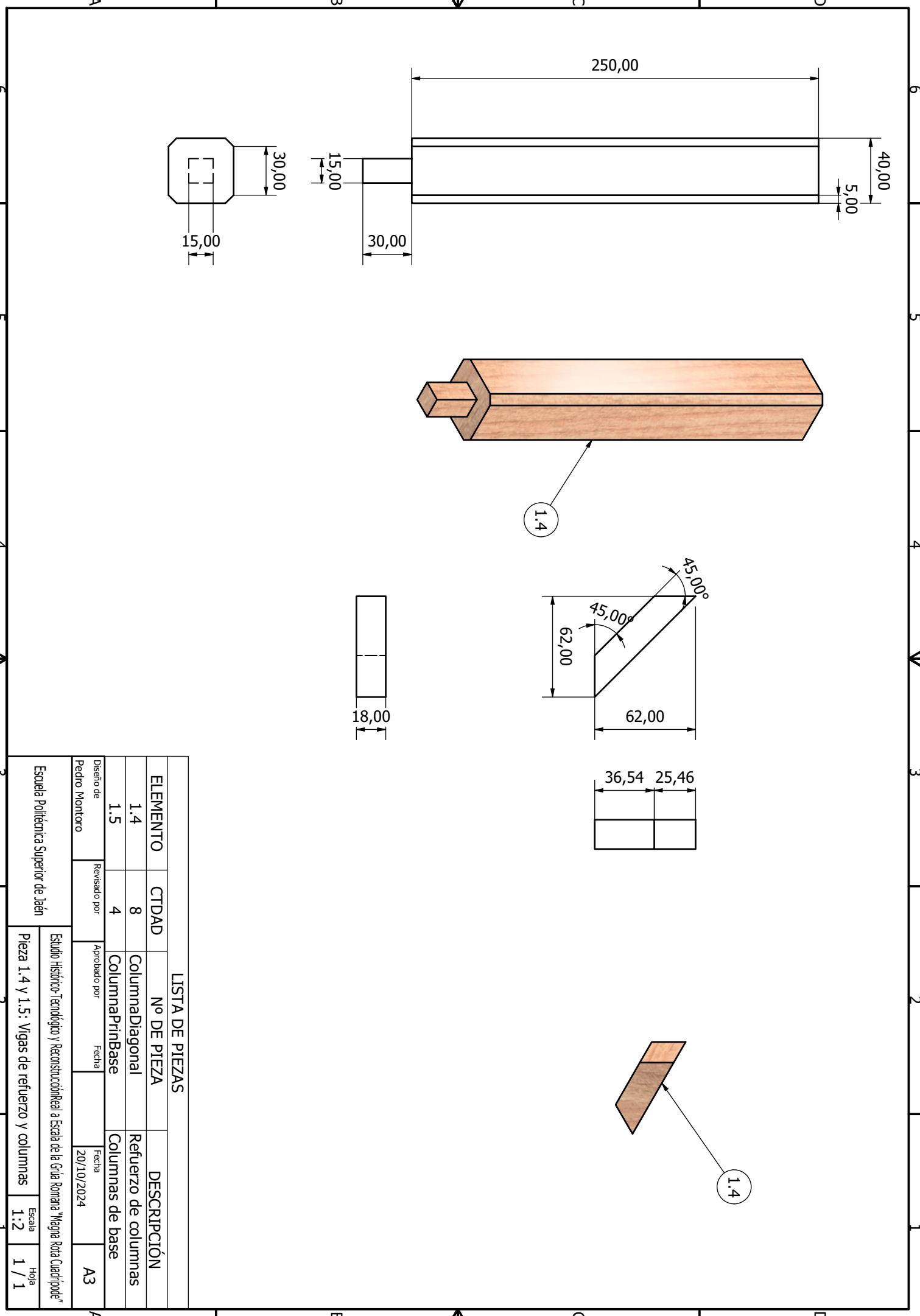
| Diseño de | Revisado por | Aprobado por | Fecha | Fecha | |
|---------------|--------------|--------------|-------|------------|----|
| Pedro Montoro | | | | 20/10/2024 | A3 |

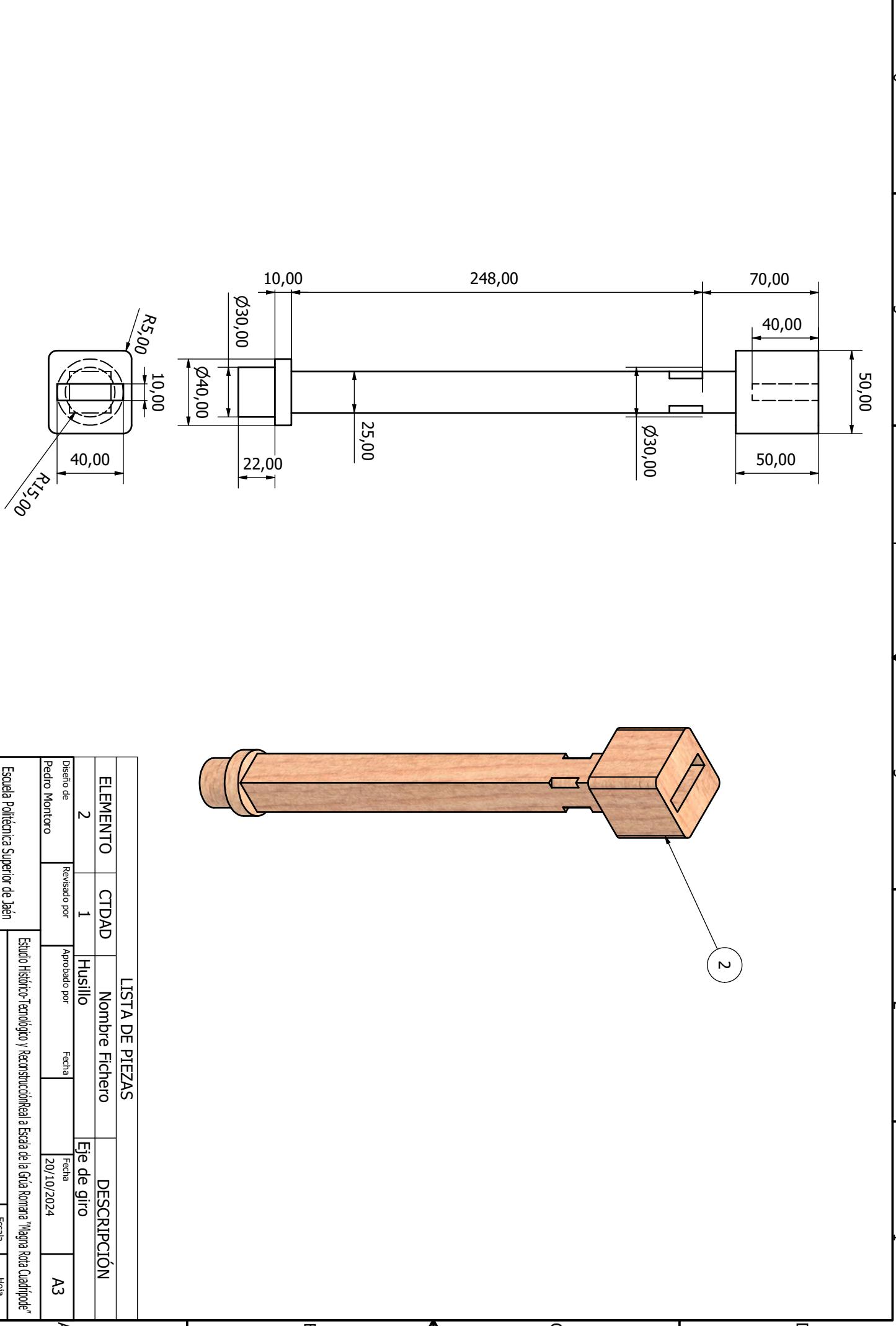
Escuela Politécnica Superior de Jaén

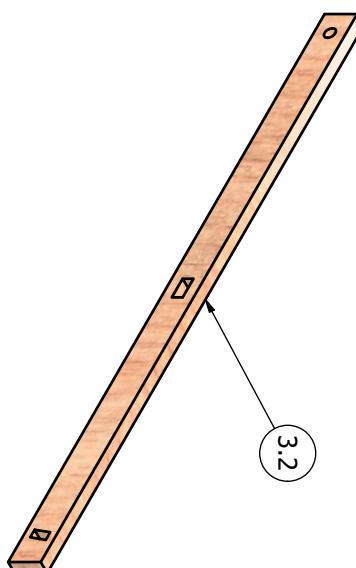
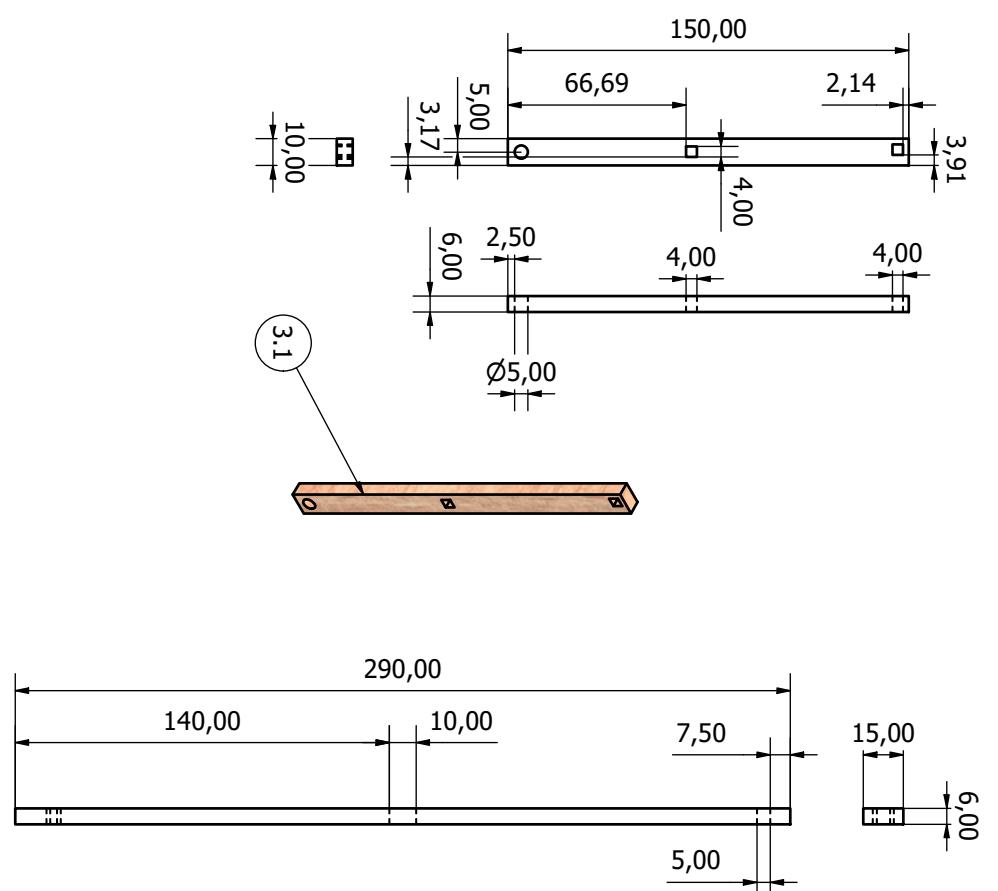
Estudio Histórico-Tecnológico y Reconstrucción Real a Escala de la Guía Romana "Magna Rota Claudivipole"

Pieza 1.1 y 1.2: Barras A y B Escala 1:2 Hoja 1/1









LISTA DE PIEZAS

| ELEMENTO | CTDAD | Nombre Fichero | DESCRIPCIÓN |
|----------|-------|-------------------|--|
| 3.2 | 2 | VigasPrimeraPolea | Vigas sujeción primera polea |
| 3.1 | 2 | PilarPoleaCentral | Pilares para soportar polea central |

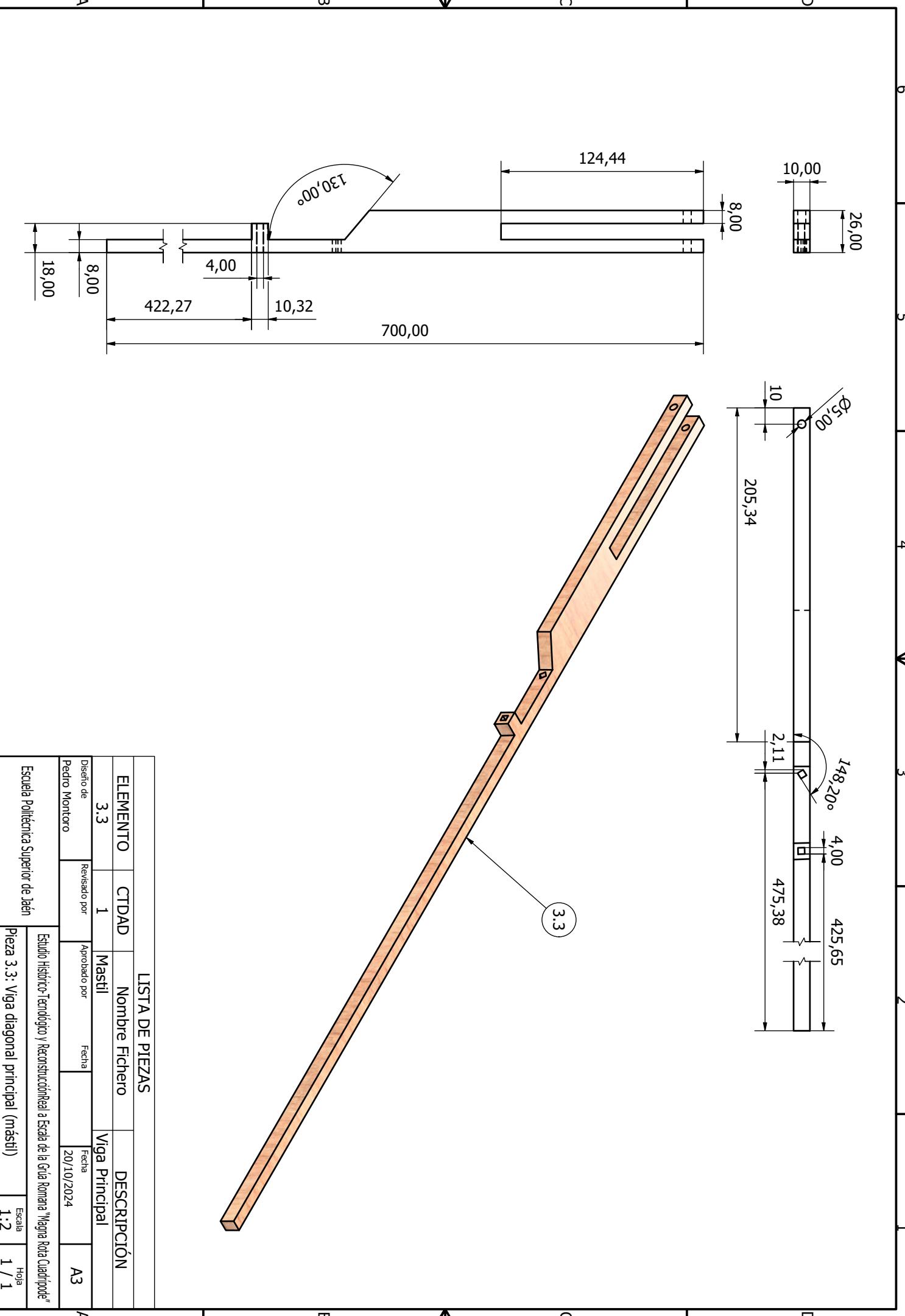
| | | | | | |
|--------------------------------------|--------------|--------------|-------|------------|----|
| Diseño de Pedro Montoro | Revisado por | Aprobado por | Fecha | Fecha | A3 |
| Escuela Politécnica Superior de Jaén | | | | 20/10/2024 | |

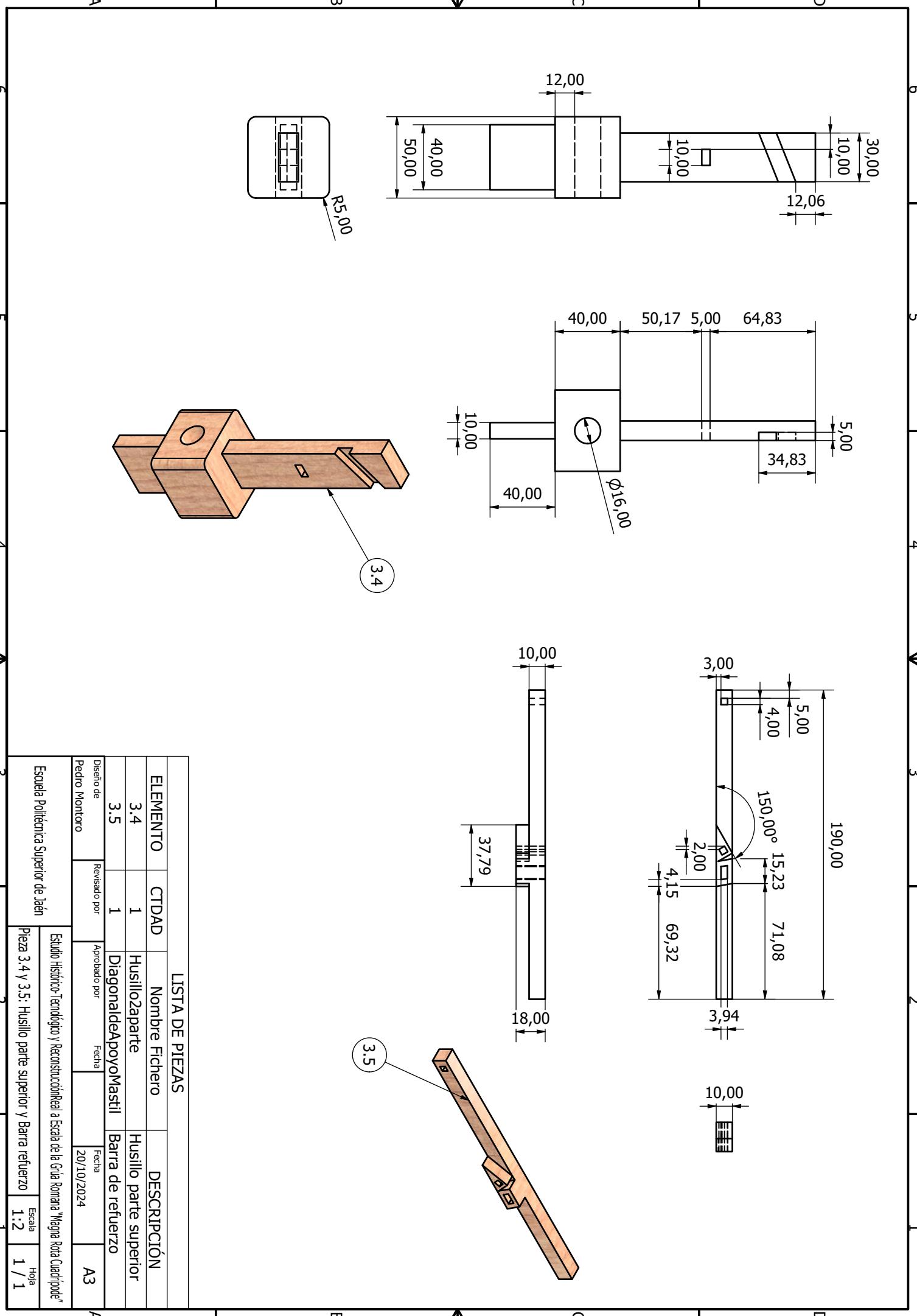
Estudio Histórico-Tecnológico y Reconstrucción Real a Escala de la Guía Romana "Magna Rota Claudiopóde"

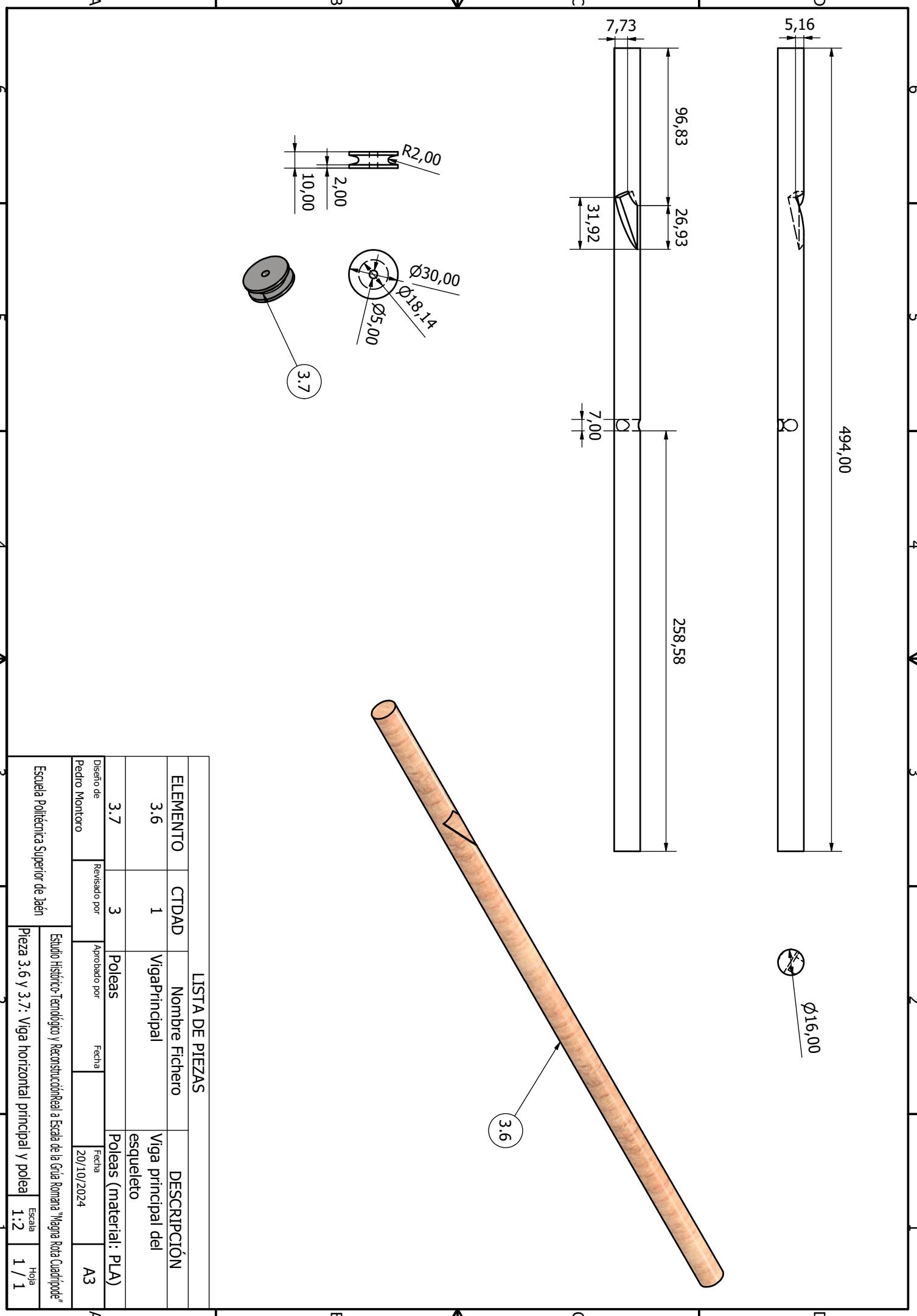
Pieza 3.1 y 3.2: Barras polea intermedia y Barras horizontales

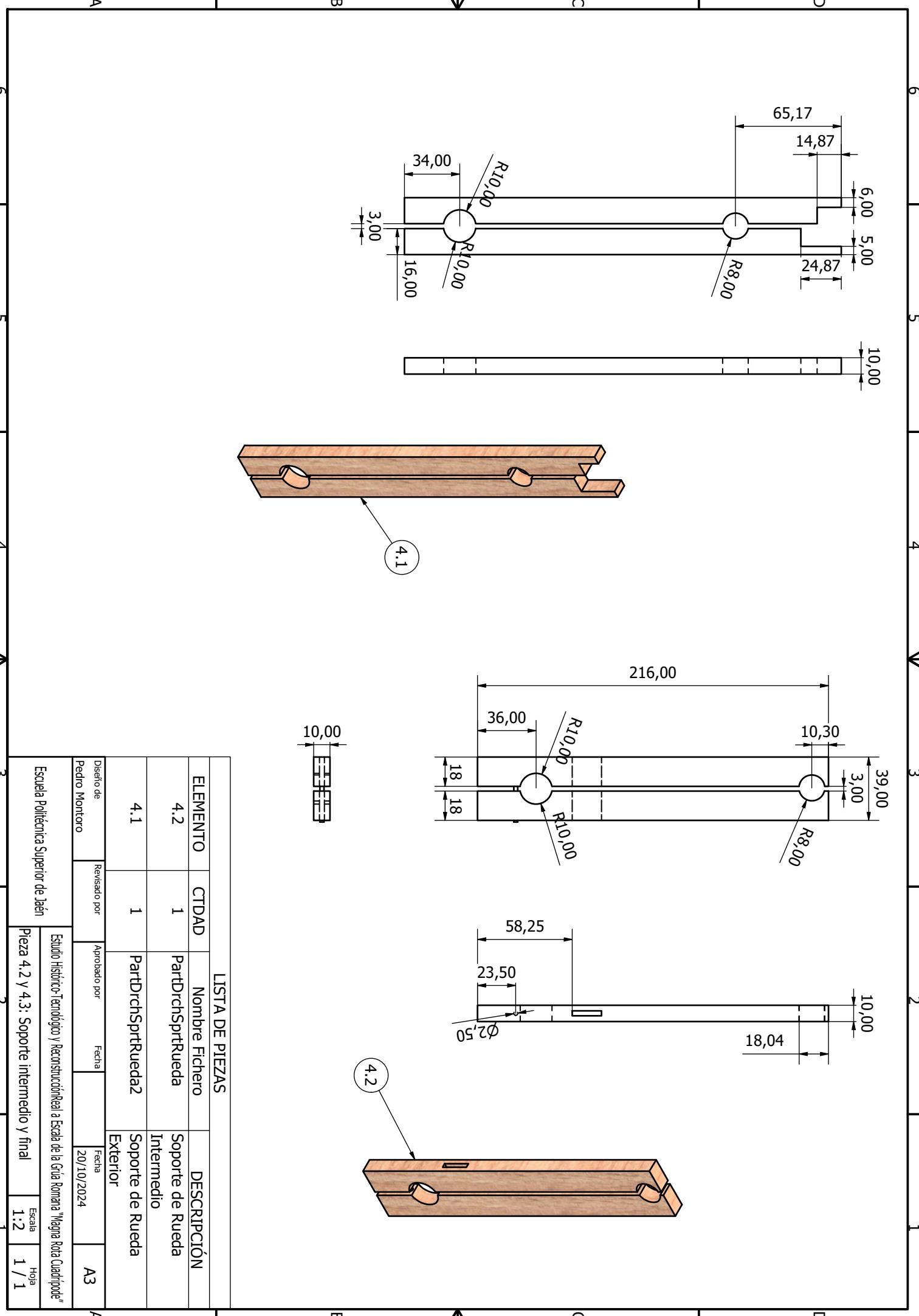
Escala 1:2

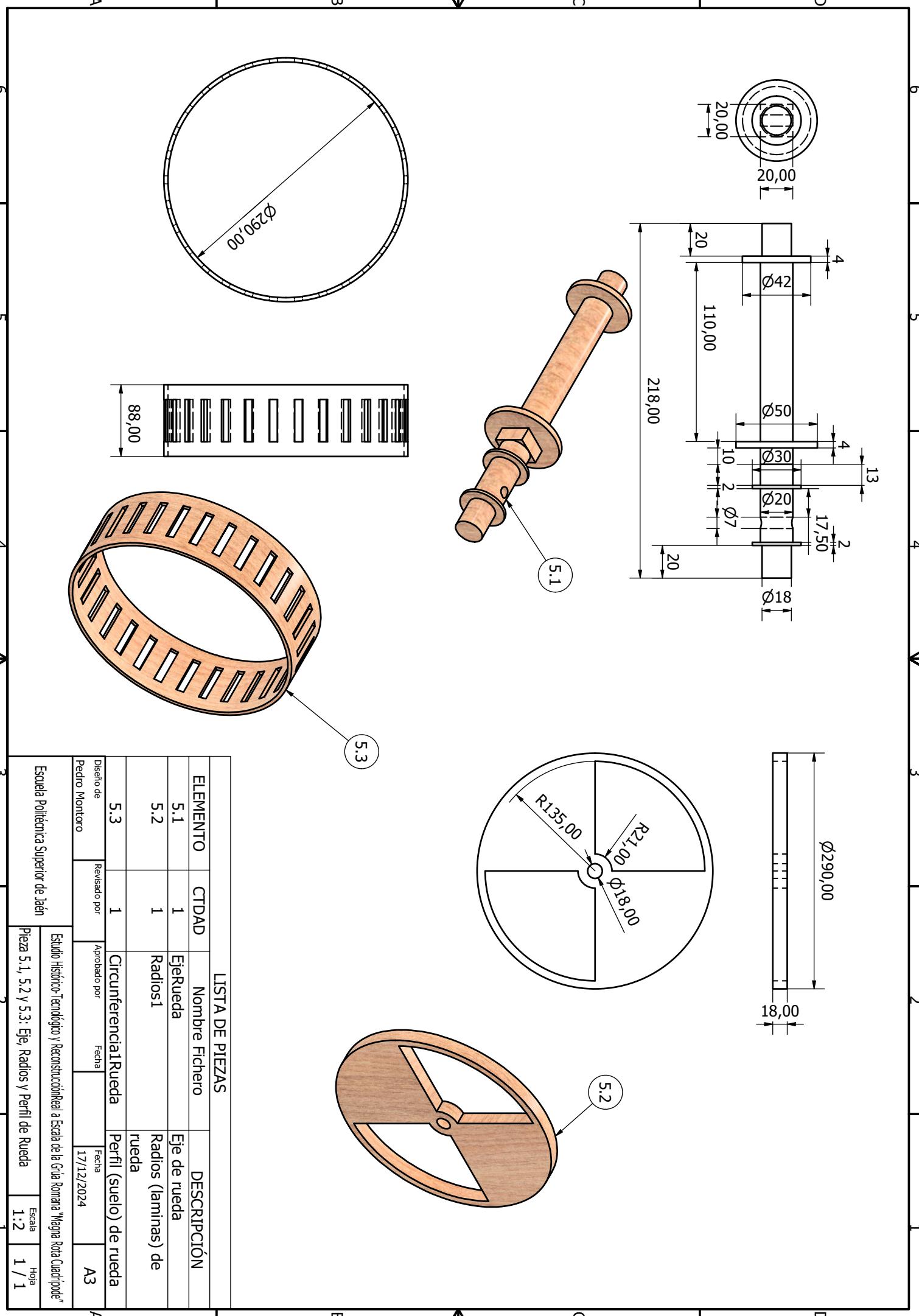
Hojas 1 / 1











6

5

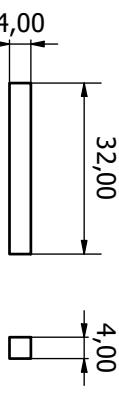
4

3

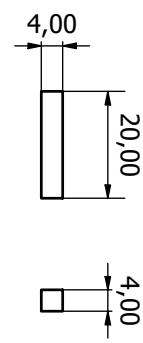
2

1

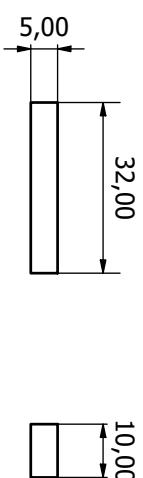
6.1: Pasador Cuadrado 32mm



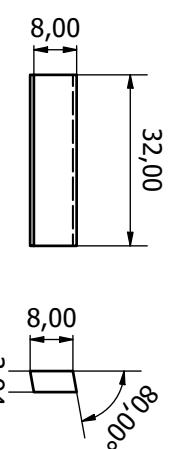
6.2: Pasador Cuadrado 20mm



6.3: Pasador Husillo Central



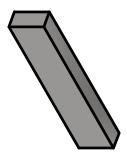
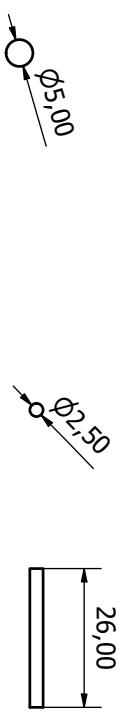
6.4: Pasador Rombo



6.5: Pasador Poleas



6.6: Pasador Soportes



LISTA DE PIEZAS

| ELEMENTO | CTDAD | Nº DE PIEZA | DESCRIPCIÓN |
|----------|-------|-----------------------|-------------------------|
| 6.1 | 2 | PasadorCuadrado32mm | Pasador (material: PLA) |
| 6.2 | 1 | PasadorCuadrado20mm | Pasador (material: PLA) |
| 6.3 | 1 | PasadorHusilloCentral | Pasador (material: PLA) |
| 6.4 | 1 | PasadorFormaRombo | Pasador (material: PLA) |
| 6.5 | 3 | PasadorPoleas | Pasador (material: PLA) |
| 6.6 | 5 | PasadorSoportes | Pasador (material: PLA) |

Diseño de
Pedro Montoro

Revisado por

Aprobado por

Fecha

Fecha

A3

A3