



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

**ESTUDIO TÉCNICO, ANÁLISIS
MECÁNICO, MODELADO Y
RECONSTRUCCIÓN 3D DE DOS
ARTEFACTOS MEDIEVALES DEL
INGENIERO AL-MURĀDĪ**

Alumno: Jorge M. Moreno Buesa

Tutores: Prof. D. Gustavo Medina Sánchez
Prof. D. Rafael López García

Depto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Área: Ingeniería de los Procesos de Fabricación

Junio, 2019



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera
(Ingeniería de los Procesos de Fabricación)

D. Gustavo Medina Sánchez y D. Rafael López García, tutores del Trabajo Fin de Grado titulado “Estudio técnico, análisis mecánico, modelado y reconstrucción 3D de dos artefactos medievales del ingeniero Al-Murādī”, que presenta Jorge M. Moreno Buesa, autorizan su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Linares.

Jaén, junio de 2019

El alumno

Los tutores

Jorge M. Moreno Buesa

Gustavo Medina Sánchez

Rafael López García

ÍNDICE

0. OBJETIVO Y METODOLOGÍA DEL TRABAJO	1
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1 Transmisión escrita del saber en la antigüedad	2
1.1.1 <i>Tablillas</i>	2
1.1.2 <i>Rollos</i>	3
1.1.3 <i>Códices</i>	4
2. CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN EL MUNDO ÁRABE	6
3. EL LIBRO DE LOS SECRETOS	8
4. DISEÑO Y MODELADO DIGITAL	11
4.1. Software y hardware	11
4.2. Demoledor de Fortalezas	14
4.3. Pozo Mágico	25
5. IMPRESIÓN 3D	31
5.1. Introducción a la impresión 3D	31
5.1. Software y hardware	32
5.2. Proceso de impresión	38
6. MONTAJE	44
6.1. Demoledor de Fortalezas	44
6.2. Pozo Mágico	49
7. CÁLCULOS	51
7.1. Demoledor de fortalezas	51
7.2. Pozo Mágico	55
8. CONCLUSIONES	58
9. BIBLIOGRAFÍA	59
ARCHIVOS Y PLANOS	60

0. OBJETIVO Y METODOLOGÍA DEL TRABAJO

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado (en adelante, TFG) ha sido recrear mediante impresión 3D y estudiar desde el punto de vista histórico y tecnológico, dos artefactos antiguos hallados en el manuscrito “Libro de los Secretos”, del ingeniero Alī Ibn Khalaf al-Murādī (*ca.* año 1000).

Para ello, se han realizado las siguientes tareas:

1. Se han recopilado datos de los mecanismos que son objetos de estudio y de otros mecanismos similares.
2. A partir de la documentación disponible se han diseñado los mecanismos que reproducen los movimientos de las máquinas originales, para llevar a cabo su posterior reconstrucción virtual.
3. Se ha realizado un estudio mecánico de los elementos móviles de ambos artefactos.
4. Utilizando impresión 3D, se ha hecho una reproducción funcional a escala de ambas máquinas.

1. INTRODUCCIÓN

Desde la invención de la escritura el ser humano ha querido dejar su huella en la historia para que las generaciones posteriores tuviéramos constancia de cómo se vivía en la antigüedad. Por ello se dio importancia a la transmisión de conocimientos en el tiempo a través de la palabra escrita. Y así como fueron evolucionando los conocimientos, el medio de transmisión fue a su vez evolucionando con ellos.

1.1. Transmisión escrita del saber en la antigüedad

A lo largo de la Historia, el conocimiento del ser humano y la transmisión de éste siempre han sido uno de los objetivos prioritarios para el desarrollo de las sociedades. Este conocimiento fue almacenado ya desde la antigüedad en bibliotecas. Quizá la primera biblioteca de la que se tiene noticias como conjunto organizado de libros y documentos es la del rey asirio Asurbanipal, descubierta al excavar en la ciudad de Nínive. En ella aparecieron unos treinta mil fragmentos de tablas de arcilla enterradas entre los restos del Palacio Real. Posteriormente, fueron famosas las bibliotecas de Alejandría, Pérgamo y diferentes bibliotecas romanas. Desde aquellos tiempos hasta el advenimiento de la imprenta (Johannes Gutenberg, 1440), los soportes fundamentales de los que se tiene constancia para dicha transmisión son las tablillas, los rollos y los códices [1].

1.1.1. Tablillas

Según el diccionario de la Real Academia Española (RAE), una tablilla es una pequeña placa barnizada o encerada en la que antiguamente se escribía con un punzón.

La tablilla era un elemento utilizado ya desde la época antigua en Roma, donde los niños aprendían a escribir con ella. Era, básicamente, una tablilla de madera de forma rectangular rellena con cera, normalmente de abeja, que, en ocasiones, podía tener dos o más hojas unidas por una tramilla de cáñamo. Se escribía en ella mediante un punzón de madera o metal, denominado *stylus* (fig 1.1).

La necesidad del uso de las tablillas viene de la mano de la necesidad de contar la Historia de forma verídica, ya que no siempre se ha transmitido de forma objetiva. Así pues, el uso mismo de las tablillas simboliza la honestidad de la evolución de la civilización para el desarrollo de la objetividad y la crítica histórica, además de la divulgación del pensamiento [2].



Figura 1.1 Una tablilla sumeria: fragmento de la epopeya de Gilgamesh, narración acadia en verso sobre las peripecias del rey Gilgamesh (<http://tablilladecera.com/informacion-autor/>)

1.1.2. Rollos

Según la RAE, un rollo es un papiro u otro material laminado que, enrollado, constituía el libro en la antigüedad. Los rollos manuscritos en la antigüedad aparecieron en el antiguo Egipto con la necesidad de almacenar los papiros manuscritos en los diferentes templos y bibliotecas, dentro de vasijas de barro, cajas de madera o estuches de cuero. Se obtenían de la planta *Cyperus papyrus*, muy abundante en Egipto, la cual se cortaba en pequeñas tiras que posteriormente se maceraban y pegaban, superponiéndose las diferentes capas cortadas hasta formar el tejido final del que se constituían [2].



Figura 1.2 Un rollo de papiro: La Torah (<http://lapiedradesisifo.com/2017/04/23/asi-nacio-una-nueva-forma-de-transmitir-el-conocimiento-el-libro/rollo-de-papiro/>)

Uno de los manuscritos más famosos, que actualmente todavía se maneja en forma de rollo es la Torah, texto que contiene la ley y el patrimonio identitario del pueblo israelita (fig. 1.2).

1.1.3. Códices

La tercera forma histórica del libro es el llamado código. Según la RAE, un código es un libro manuscrito anterior a la invención de la imprenta. Aunque frecuentemente los términos “código” y “manuscrito” se consideran sinónimos, esto no es absolutamente cierto ya que si bien todos los códigos son manuscritos, no todos los manuscritos son códigos. Los códigos son uno de los formatos previos del libro tal y como lo conocemos actualmente, estando constituidos por un conjunto de papiros o pergaminos plegados y encuadernados [3]. Fueron el elemento empleado para la conservación manuscrita y la divulgación histórica desde la Edad Media que, gracias a la mejora de las técnicas de fabricación empleadas, empezaron a elaborar las portadas de los códigos con materiales preciosos como el oro; asimismo, el interior, especialmente las letras capitulares y los llamados *marginalia*, también fueron realizados muy artísticamente con ricos materiales (fig 1.3).



Figura 1.3 Libro de Horas de María de Navarra (Biblioteca Nazionale Marciana, Venecia; Ms. Lat. I 104/12640)

Para la producción de códigos, existía, sobre todo en los monasterios, una sala dedicada a ello denominada *scriptorium*, en la que los *amanuenses*, también llamados *copistas* o *escribas*, se dedicaban a copiar códigos por encargo, prestados usualmente por otras bibliotecas. Según describe Umberto Eco en *El nombre de la rosa* [4], la dinámica habitual cuando un monasterio copiaba un manuscrito por encargo para algún noble, incluía la realización simultánea de una copia para la biblioteca del propio monasterio.

En las figuras 1.4 y 1.5, se muestran otros dos códices. El primero de ellos, llamado *Splendor Solis*, es quizá el códice sobre Alquimia más bellamente iluminado y el segundo, *Theatrum Sanitatis*, es una copia de las muchas existentes del *Tacuinum Sanitatis* (Taqwim al-sihha, (ةحصلا ميوقت) o tablas de salud, compendios de consejos para una vida saludable tanto en lo corporal como en lo espiritual.



Figura 1.4 *Splendor Solis* (British Library, Ms. Harley 3469)

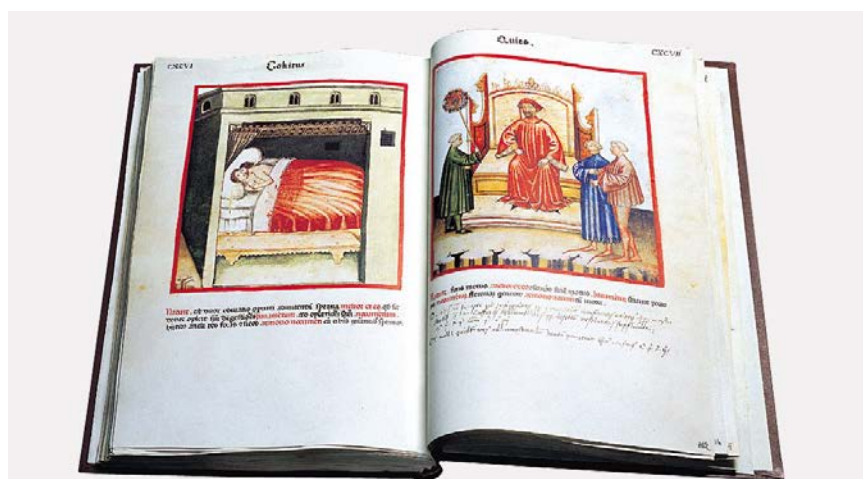


Figura 1.5 *Theatrum Sanitatis* (Biblioteca Casanatense, Roma, Ms. 4182)

2. CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN EL MUNDO ÁRABE

Las primeras ciencias que atrajeron la curiosidad de los doctos musulmanes fueron astronomía y las matemáticas ya que su carácter práctico les condujo a dedicarse principalmente a las ciencias exactas. Así, se construyeron observatorios en los centros más o menos importantes del imperio islámico; de entre ellos, los de Bagdad, El Cairo, Córdoba, Toledo y Samarcanda adquirieron fama bien merecida, atribuyéndoseles el diseño de algunos astrolabios (fig 2.1).

Junto a la astronomía, las matemáticas fueron la ciencia más favorecida por los árabes. Muchos principios básicos de aritmética, geometría y álgebra, fueron descubiertos por eruditos musulmanes. En aritmética, todavía utilizamos los números y el método de contar inventado por los árabes. La invención del álgebra, es atribuida a los árabes. De entre los autores más afamados, Al-Khwarizimi, una de las mejores mentes científicas del Islam, es sin duda el hombre que ejerció mayor influencia sobre el pensamiento matemático durante toda la Edad Media.



Figura 2.1 Astrolabio (www.qantara-med.org/public/show_document.php?do_id=1379&lang=es)

También los árabes hicieron importantes aportaciones a la física y la química, de entre las que podemos destacar las realizadas en el campo de la óptica por Hassan-Ali-Aitan. En química, descubrieron la destilación y fueron ellos los primeros en usar los métodos de sublimación, cristalización, coagulación y copelación para extraer y mezclar sustancias.

Después de las matemáticas y de la química, la medicina fue la ciencia que más atrajo a los musulmanes. Durante los primeros siglos de la Hégira, era parte integral de una completa educación. Por esos el número de médicos famosos y de tratados es considerable. Los

médicos musulmanes desempeñaron un papel decisivo en la ciencia médica de occidente. Durante varios siglos, los trabajos de Rhases, Ibn-Sina, Abul-Cassis e Ibn-Zohar fueron la base de los estudios médicos en todas las universidades europeas. También se interesaron por la agronomía debido a tu interés en lo que hoy conocemos como “medicina tradicional” a base de plantas.

Una de las características de la época Taifa es el interés que se despertó por las ciencias aplicadas. En la obra de alquimia Rutba, se mencionan ciertos métodos de separación del oro y la plata de las gangas por las que están acompañadas. El mago del que se habla en el libro es lo que sería el predecesor del ingeniero. Posiblemente en tiempo de los Taifas, se escribe el primer tratado de ingeniería por Al-Murādī, (kiteb al-asrar); este libro se tratará en el siguiente punto con más detenimiento. Este manuscrito será el primer eslabón de una tradición mecánica islámica occidental que se verá continuada en el norte de África y en Europa. Se caracterizará por el uso de mecanismos rudos y poderosas máquinas frente a la mecánica oriental, la cual destaca por sus mecanismos y controles delicados [5].

3. EL LIBRO DE LOS SECRETOS

En el presente apartado vamos a hacer una breve reseña del contenido de *El Libro de los Secretos Resultantes de las Ideas* (كِتَابُ الرِّسَالِ رَاسُ الْبَاتِكِ, *kitab al-asrar al'afkar alnnatija*), usualmente llamado “Libro de los Secretos” (fig. 3.1), un códice en el que se recogen más de treinta artefactos atribuidos al ingeniero Alī Ibn Khalaf al-Murādī, que vivió en Andalucía -probablemente en Córdoba o en Granada- a principios del siglo XI de nuestra era.

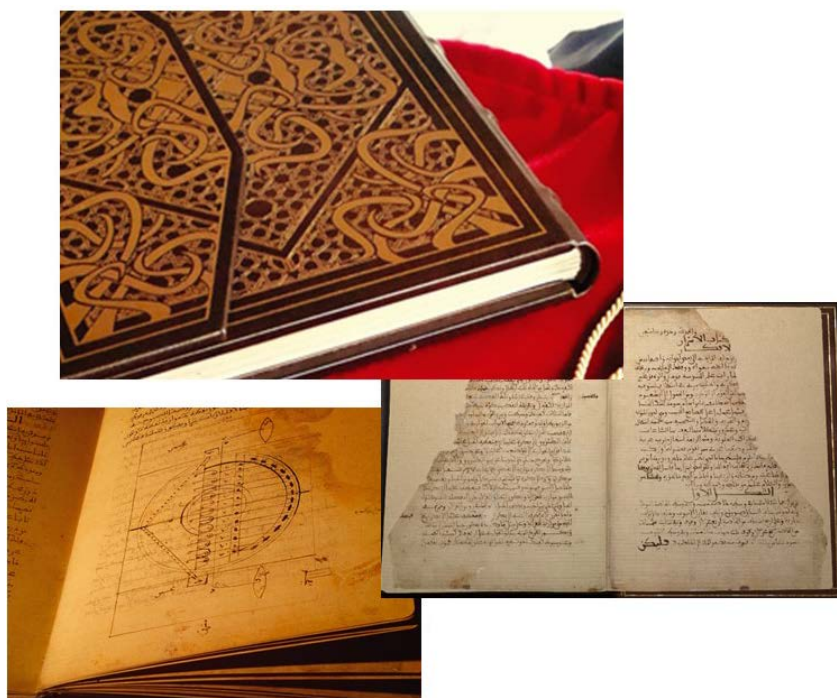


Figura 3.1 Páginas de la edición facsímil del Libro de los Secretos [6]

En este manuscrito se encuentran dibujados los primeros testimonios escritos de mecanismos de la época con precisión compleja. No obstante, sus dibujos no fueron interpretados hasta el siglo XXI. El códice se ha conservado durante siglos en la Biblioteca Medicea Laurenziana de Florencia.

La existencia de este manuscrito fue puesta de manifiesto por el ingeniero e historiador Donald Routledge Hill alrededor de 1970 y no se les prestó mucha atención hasta pasados unos treinta años. Fue entonces cuando, gracias a la colaboración del emir de Qatar, Sheikh Hamad bin Khalifa Al Thani, quién dotó económicamente el proyecto, se llevó a cabo la reproducción facsímil del manuscrito [6], su estudio tanto desde el punto de vista

tecnológico como historiográfico [7] así como la reproducción de dos de las invenciones recogidas, el *Demoledor de Fortalezas* y el *Reloj con Tres Personajes*, para ser expuestas en el Museo de Arte Islámico de Doha, en Qatar.

Entre los ingenios descritos, se encuentran cinco autómatas a modo de “teatrillo”, dos calendarios -uno zodiacal y otro astronómico-, cuatro artefactos de guerra, dos mecanismos para sacar agua de un pozo y, sobre todo, hay relojes. Los útiles más usados para crear los mecanismos eran cuerdas, poleas, depósitos con agua y contrapesos. En el presente TFG, hemos centrado la atención en recrear un artefacto de guerra (*Demoledor de Fortalezas*) y el mecanismo de poleas de un pozo (*Pozo Mágico*). Los tres ingenios más destacados entre el conjunto son la *Clepsidra de las Gacelas*, el *Reloj con Tres Personajes* y el *Demoledor de Fortalezas* (véase fig. 3.2). Para una mejor ilustración del trabajo, describiremos, primeramente, la *clepsidra* y el *reloj*, ya que el *demoledor* es una de las máquinas objeto de este TFG y será ampliamente descrito más tarde.



Figura 3.2 De izqda. a dcha., la *Clepsidra de las Gacelas*, el *Reloj con Tres Figuras* y el *Demoledor de Fortalezas* [7]

La *Clepsidra de las Gacelas* es un teatro (fig. 3.2, izqda.) cuyo motor funciona con agua; en este artefacto se ve una muchacha que sale al jardín para mirar a las gacelas mientras beben de un estanque de mercurio. Un hombre escondido en el pozo se asoma para espiar a la muchacha, pero inmediatamente salen víboras para defenderla. Las gacelas levantan la cabeza y dejan de beber, la chica vuelve dentro, el criado se mete en el pozo y las serpientes se ocultan.

El *Reloj con Tres Personajes* es un reloj (fig. 3.2, centro) con autómatas que gracias a un sistema mecánico basado en tornos, poleas y agua hace que saga una bola de la boca de la mujer, la deposite en la mano del hombre y éste se desplace hasta la jarra y la deje caer en

ella. En el Museo de Arte Islámico de Doha se puede encontrar una recreación del ingenio junto con el *Demolador de Fortalezas*.

4. DISEÑO Y MODELADO DIGITAL

En este apartado se tratará todo lo referente al diseño y montaje virtual de los ingenios mediante ordenador. En primer lugar, se hará una referencia al software y hardware utilizados para este trabajo y, posteriormente se describirá en detalle el proceso de diseño y modelado digital de las diferentes piezas necesarias para construir modelos funcionales a escala de los dos artefactos elegidos, el *Demolador de Fortalezas* y el *Pozo Mágico*.

Los datos de los que se parten para poder hacer un modelo en 3D de estos artefactos se encuentran en el tomo de estudio del código mencionado anteriormente [7]. Los dibujos originales no ofrecen mucha información debido al deterioro que el tiempo ha provocado en el manuscrito original [6]; debido a ello, ha sido mucho más útil la interpretación que hicieron los ingenieros en la traducción del mismo [7].

En el citado estudio [7], se recogen unas simulaciones en video de los diferentes artefactos funcionando, de las cuales hemos tenido que hacer posteriores reinterpretaciones, ya que hay cuestiones en los ingenios que no se entiende muy bien cómo funcionan. De la traducción se obtiene poca información a causa de que en ella se hace referencia a los dibujos del manuscrito y estos no se ven con suficiente claridad.

4.1. Software y hardware

Los softwares que hay en ingeniería se dividen en tres grupos:

- Software CAD (diseño asistido por computadora) (fig. 4.1): Reemplaza al papel y al lápiz. Estos programas informáticos permiten al usuario dibujar planos sin necesidad de los útiles de dibujo tradicionales.

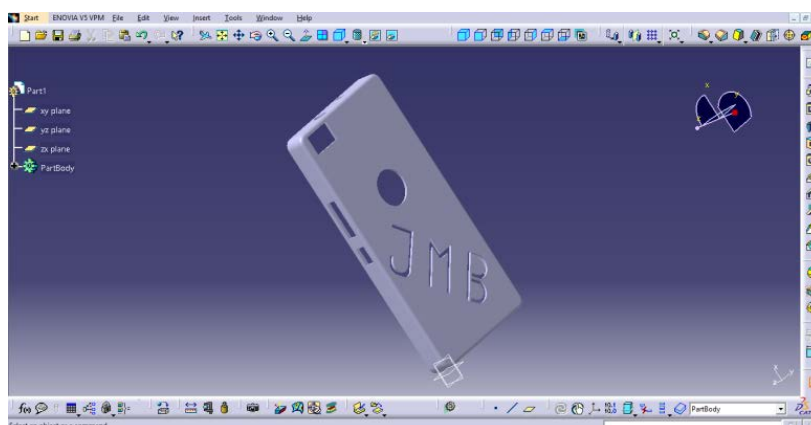


Figura 4.1 Ejemplo de software CAD

- Software CAM (manufactura asistida por computadora) (fig. 4.2): hace referencia al proceso de fabricación de un producto sin necesidad de intervención humana.

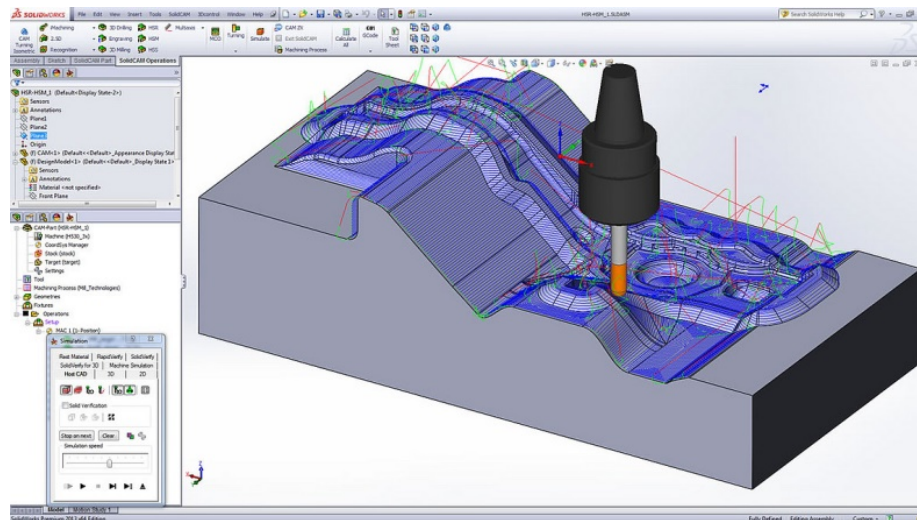


Figura 4.2 Ejemplo software CAM (tomada de www.solidcam.com/es/soluciones-cam/cam-modules/hsm-3d-high-speed-machining/)

- Software CAE (ingeniería asistida por computadora) (fig. 4.3): tiene muchas variantes según el área en el que se utilice ya que las siglas son muy generales. Básicamente hace alusión a la capacidad del programa de analizar fuerzas, temperaturas, presiones y demás pruebas que se le quiera hacer a una pieza o instalación. Es usado para hacer simulaciones y ver el comportamiento de la pieza a analizar evitando así los costes de producción inherentes a los ensayos.

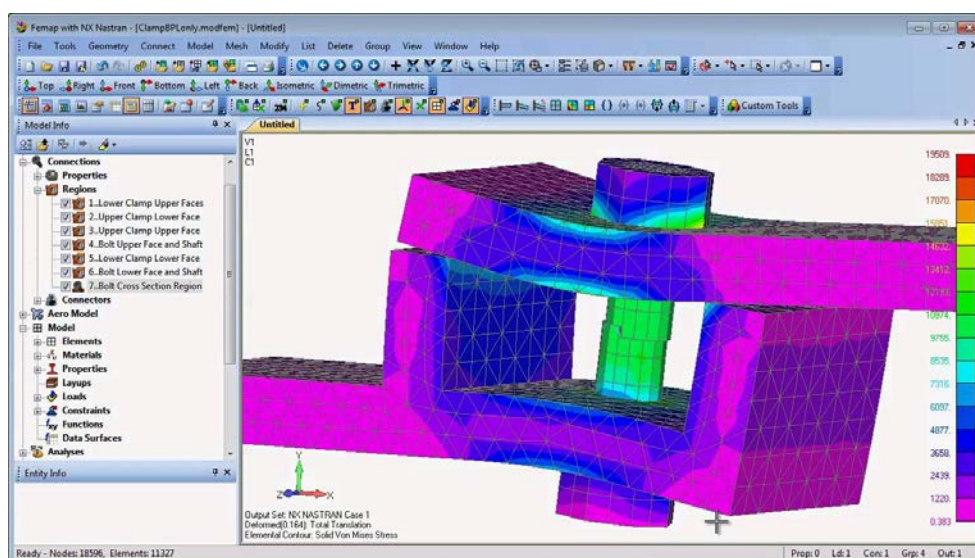


Figura 4.3 Ejemplo software CAE (tomada de www.edgeplm.com.au/solutions/cae/)

Para este trabajo es necesario el uso de un software CAD. En este caso se ha usado CATIA (Computer-Aided Three-dimensional Interactive Application) [8] (fig. 4.4), desarrollado por Dassault Systèmes SE, que es actualmente uno de los programas más usados en la industria debido a que contiene los tres grupos de softwares en su código, además de muchas otras funciones. En este trabajo se utilizará el entorno de diseño de piezas, el de ensamblaje y, para algún renderizado, el estudio fotográfico.

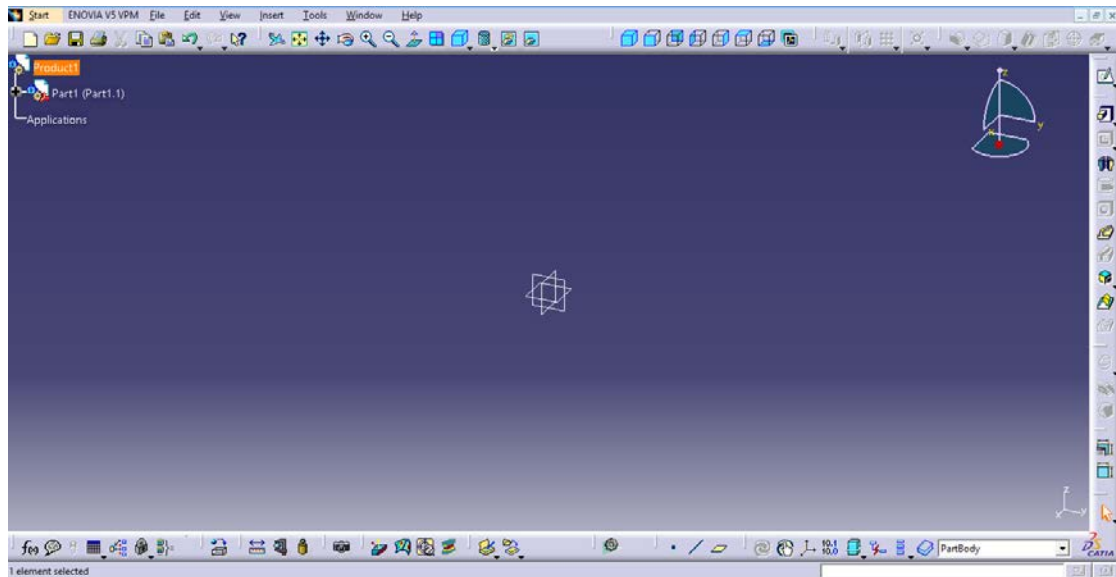


Figura 4.4 Entorno de CATIA

En cuanto al hardware, se ha utilizado durante todo el proceso de modelado y ensamblaje virtual un PC portátil (fig. 4.5) que trabaja con Windows 10, provisto de un procesador ASUS F555L Intel i7, 12 Gb de memoria RAM y una tarjeta gráfica NVIDIA GEFORCE 820.



Figura 4.5 Ordenador portátil Asus F555L (tomada de outlet-pc.es/port%C3%A1tiles/12362-00006566.html)

Es importante mencionar estas especificaciones porque, pese a ser relativamente potentes, se han quedado cortas a la hora de realizar algunas simulaciones que se tenía pensado hacer para este proyecto. A la hora de hacer el ensamblaje, los mecanismos, con sus correspondientes restricciones para su correcto funcionamiento, se mueven como lo harían en la realidad. El problema es que, a medida que se le añaden piezas al artefacto, más le cuesta al ordenador hacer los movimientos hasta que llega un momento que deja de hacerlos. Debido a esa limitación, sólo se ha hecho la reconstrucción virtual estática. No obstante el diseño de los mecanismos se ha hecho para que, tras su impresión y montaje, sean funcionales.

4.2. Demoledor de Fortalezas

El *Demoledor de Fortalezas* es una máquina de guerra muy parecida al típico ariete. El ariete (fig. 4.6) servía para destruir las partes bajas de las murallas o las puertas de estas y abrir brechas en las defensas del enemigo



Figura 4.6 Ariete (tomada de www.tienda-medieval.com/es/miniaturas/8351-miniatura-ariete-medieval-movil.html)

El ingenio de estudio se diferencia del ariete en que el primero, con objeto de poder derribar la parte alta de las murallas o torres, iba montado sobre una plataforma que se elevaba varios metros de altura mediante un mecanismo de tijera, que era manejado por cuatro parejas de hombres en cuatro tornos (fig. 4.7).

Cuando el ariete está a la altura deseada, dos hombres en el piso de abajo tiran de dos cuerdas y mediante una polea el ariete se desplaza hacia atrás (fig. 4.8) para posteriormente volver a su posición original ocasionando un fuerte impacto sobre la estructura enemiga a la que estuviese enfrentado.

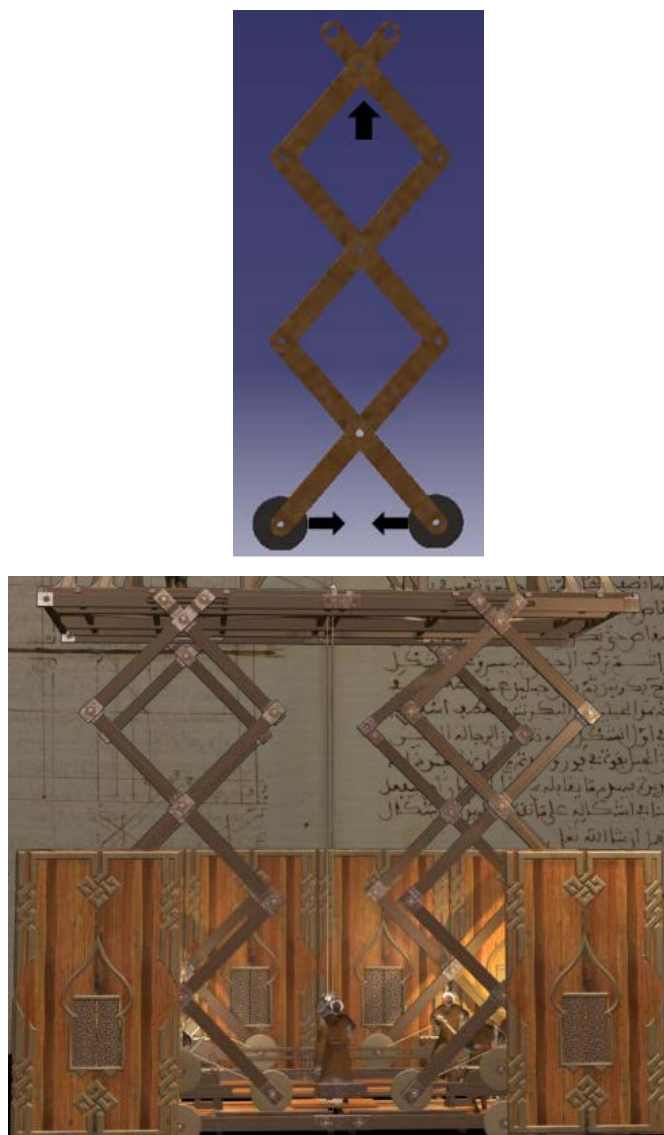


Figura 4.7 (arriba) Mecanismo de tijera; (abajo) Integración del mecanismo en la máquina [7]

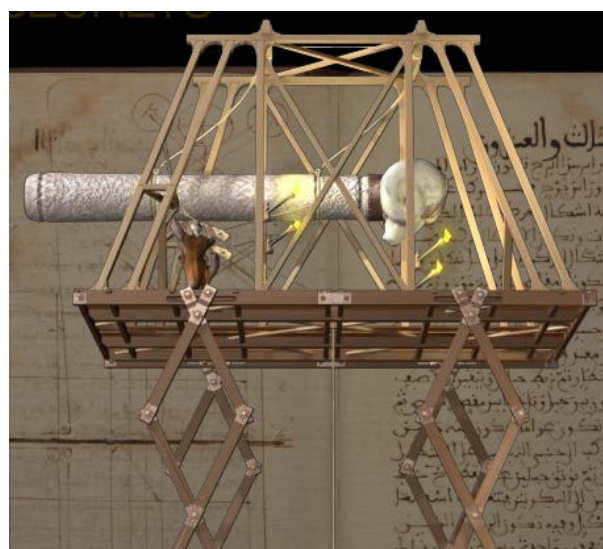


Figura 4.8 Desplazamiento hacia atrás del ariete [7]

Para diseñar el *Demoledor de Fortalezas*, se partió de dos premisas para hacerlo lo más grande y proporcionado posible. La primera premisa fue la limitación de impresión de la placa de la impresora, ya que ésta no puede imprimir más de 200 mm de longitud (véase apartado 5.1). La segunda premisa se obtuvo de otro mecanismo similar al que hace referencia el manuscrito del Libro de los Secretos, el mecanismo 22, llamado la *Torre Mecánica* (fig. 4.9).

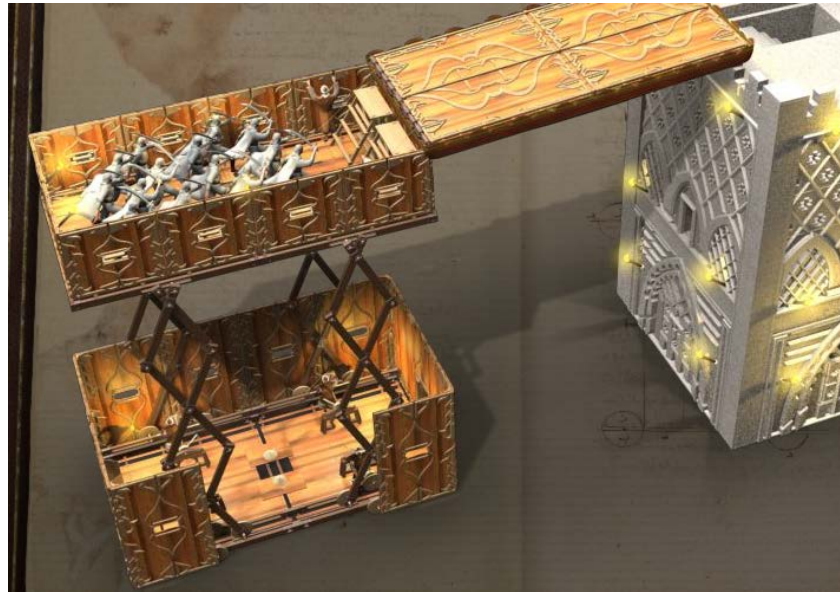


Figura 4.9 La Torre Mecánica [7]

En dicho mecanismo tras su interpretación se dedujo que la plataforma se elevaba desde una altura de tres metros hasta una altura de once metros. De ahí se dedujo que la escala sería en torno a 1/70. Posteriormente se hizo un diseño del mecanismo de tijera basado en esas medidas, adaptado a la escala a la que se iba a reproducir y se fueron haciendo el resto de elementos proporcionales al mecanismo de tijera inicial.

A continuación, para ejemplificar el proceso de diseño, se va a explicar paso a paso como hacer el diseño de una pieza, en este caso la base de la máquina (fig. 4.10), en CATIA. Primeramente se hace uso del material que se dispone para replicar el suelo (fotos tomadas de El Libro de los Secretos, videos y datos que aporta el manuscrito [7]).

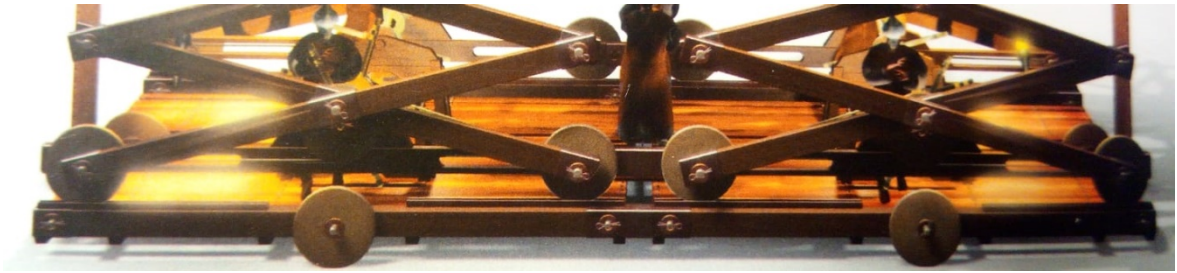


Figura 4.10 Base del Demoledor de Fortalezas [7]

Tras hacer un pequeño croquis mental de cómo llevar a cabo el diseño original al ordenador se procede a abrir el programa y comenzar el diseño de la pieza.

Las operaciones básicas de modelado en CAD son el croquizado, la extrusión y el vaciado. Estas pueden realizarse mediante diferentes variantes, dependiendo de la naturaleza, geometría y dificultad de la pieza y es ahí precisamente donde el diseñador demuestra realmente su pericia manejando el programa.

Para diseñar la base, lo primero que hay que hacer es un croquis (fig. 4.11) en el que se delimitará el área del suelo.

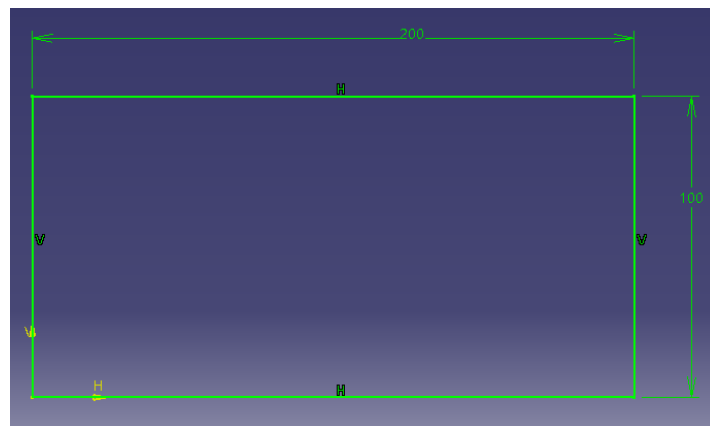


Figura 4.11 Croquis del suelo

Ese croquis posteriormente se extruye (fig. 4.12) para obtener una pieza maciza que poder moldear con las diferentes herramientas que ofrece CATIA.

Se vuelve a hacer otro croquis para añadirle los travesaños y después se extruyen (fig. 4.13).

Para hacer la maqueta más realista, se croquizan unas pequeñas hendiduras a lo largo del suelo para simular los tablones de madera, que después se protruyen (fig. 4.14).

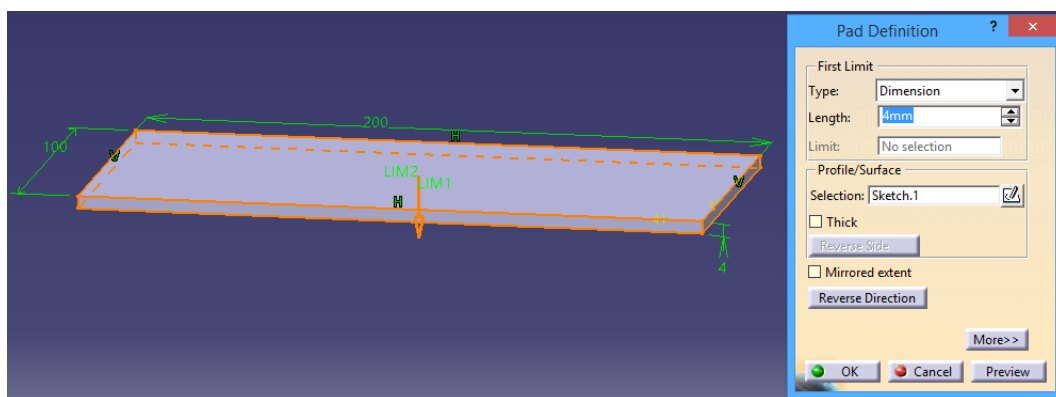


Figura 4.12 Extrusión del croquis

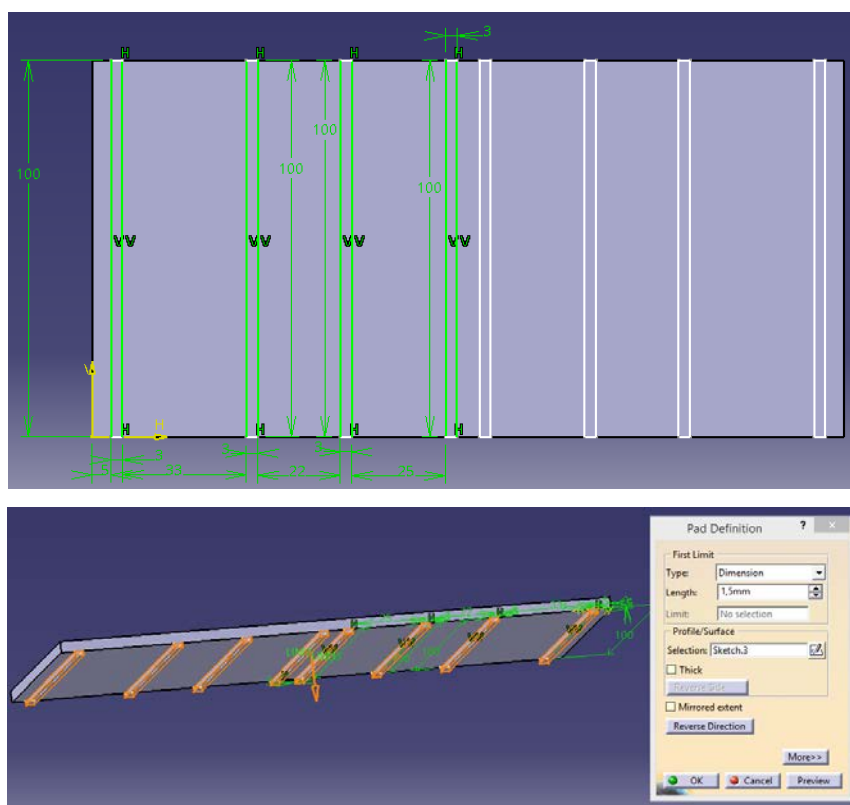


Figura 4.13 (arriba) Croquis de los travesaños; (abajo) extrusión del croquis

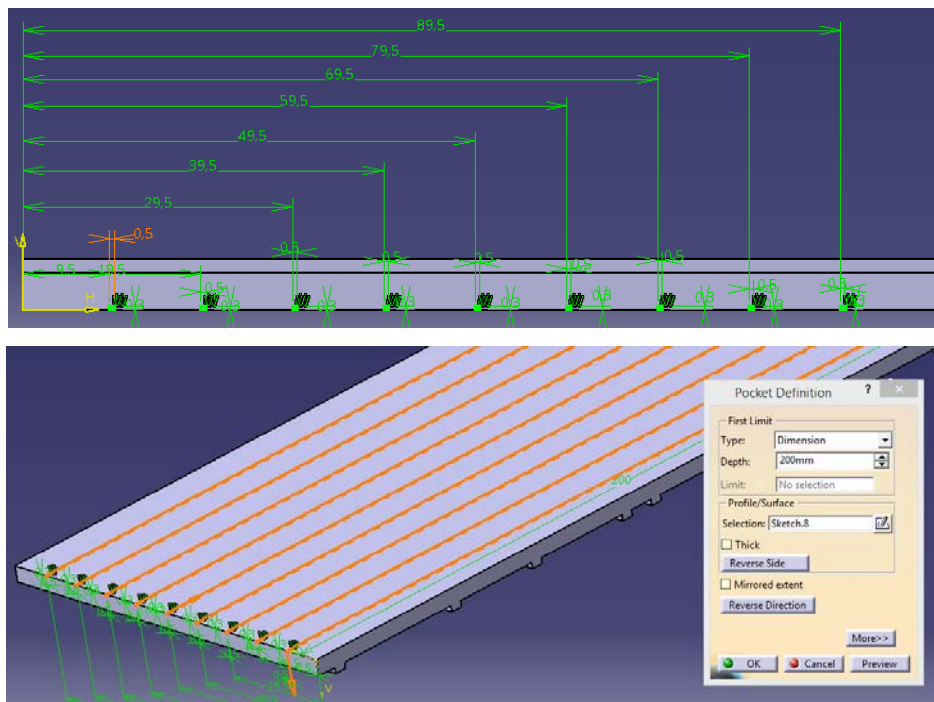


Figura 4.14 (arriba) Croquis hendiduras; (abajo) vaciado del croquis

Tal y como se ve en las imágenes recogidas en el tomo de estudio [7], se hace un hueco en medio a lo largo del suelo (fig. 4.15).

Para encajar el eje de las ruedas se hizo otro croquis con su correspondiente vaciado (fig. 4.16).

De cara al posterior ensamblaje, tras la impresión de la maqueta, se hicieron unos agujeros donde poder encajar una guía para poder acoplar la viga exterior donde se moverían las ruedas del mecanismo de tijera (fig. 4.17). Se hacen unos agujeros en la parte superior del suelo para que sirvan como guía a la hora del montaje de la maqueta tras la impresión (fig. 4.18).

Finalmente, opcionalmente se puede dar un aspecto visual a la pieza para más realismo en el montaje virtual (fig.4.19).

Ese es el proceso que se ha seguido para diseñar todas las piezas de cada modelo, cada una con su dificultad correspondiente.

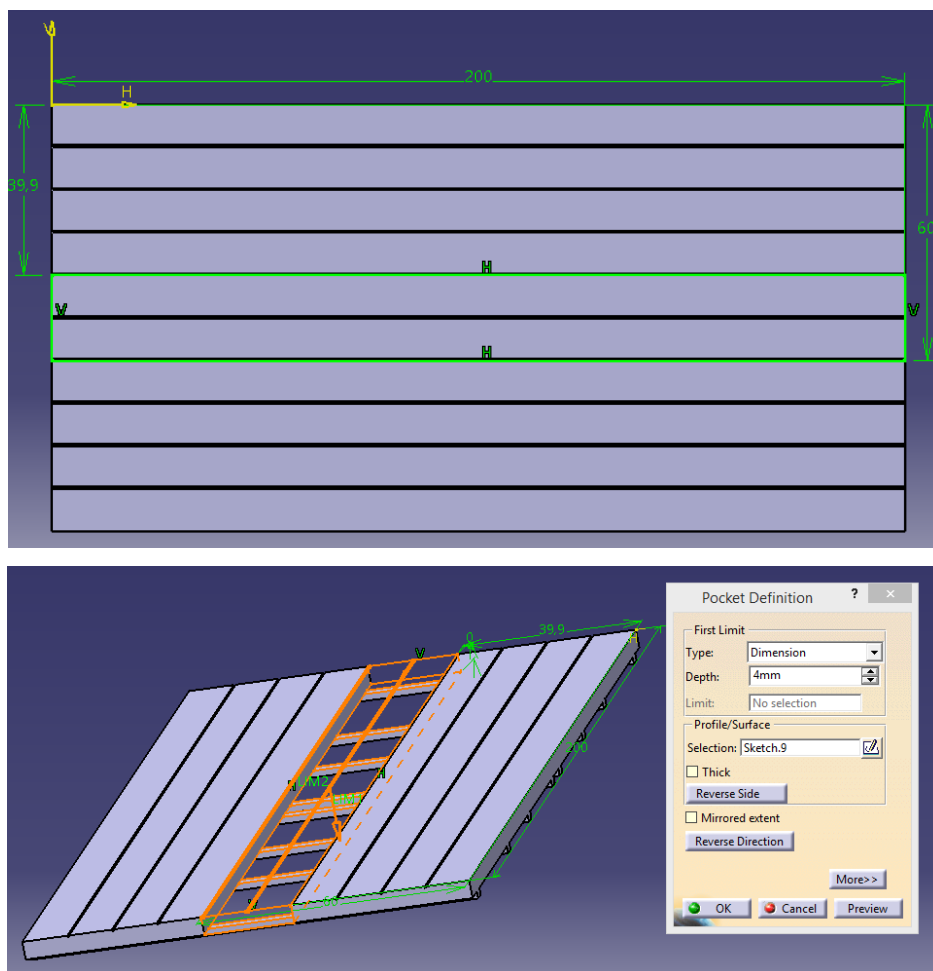


Figura 4.15 (arriba) croquis hueco; (abajo) vaciado del croquis

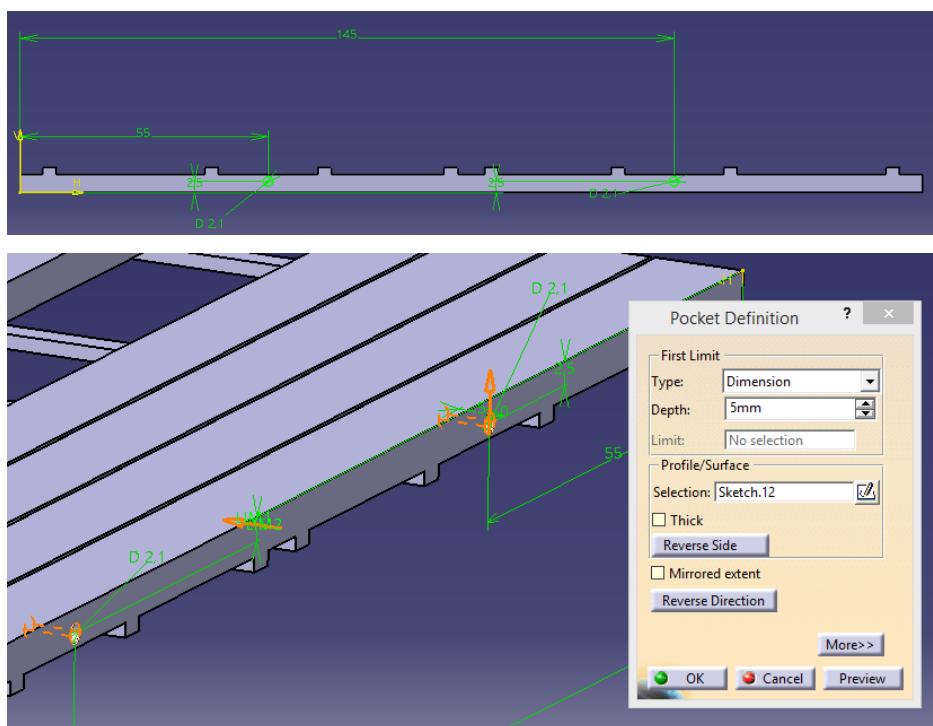


Figura 4.16 (arriba) Croquis de los ejes; (abajo) Vaciado del croquis

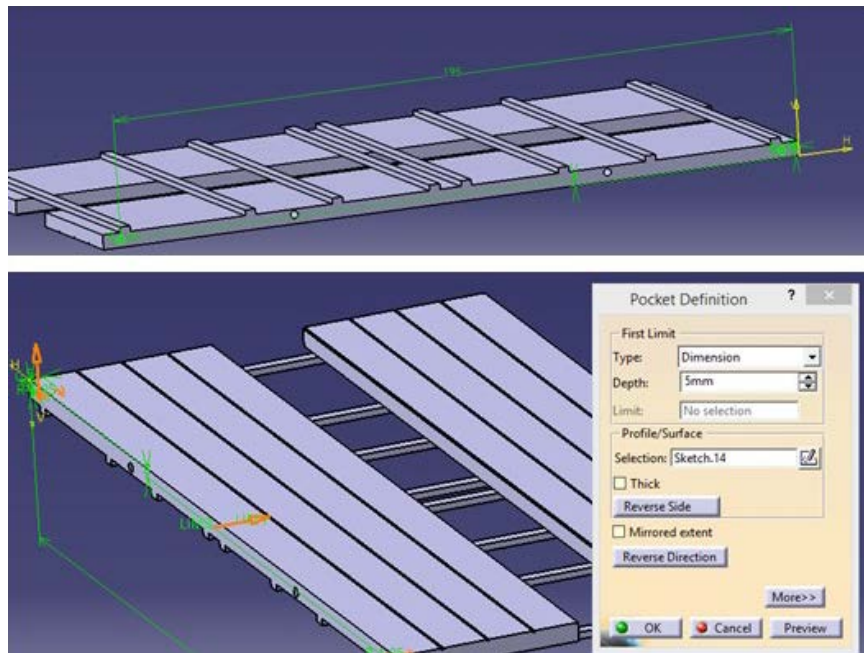


Figura 4.17 (arriba) croquis del agujero de la guía; (abajo) vaciado del croquis

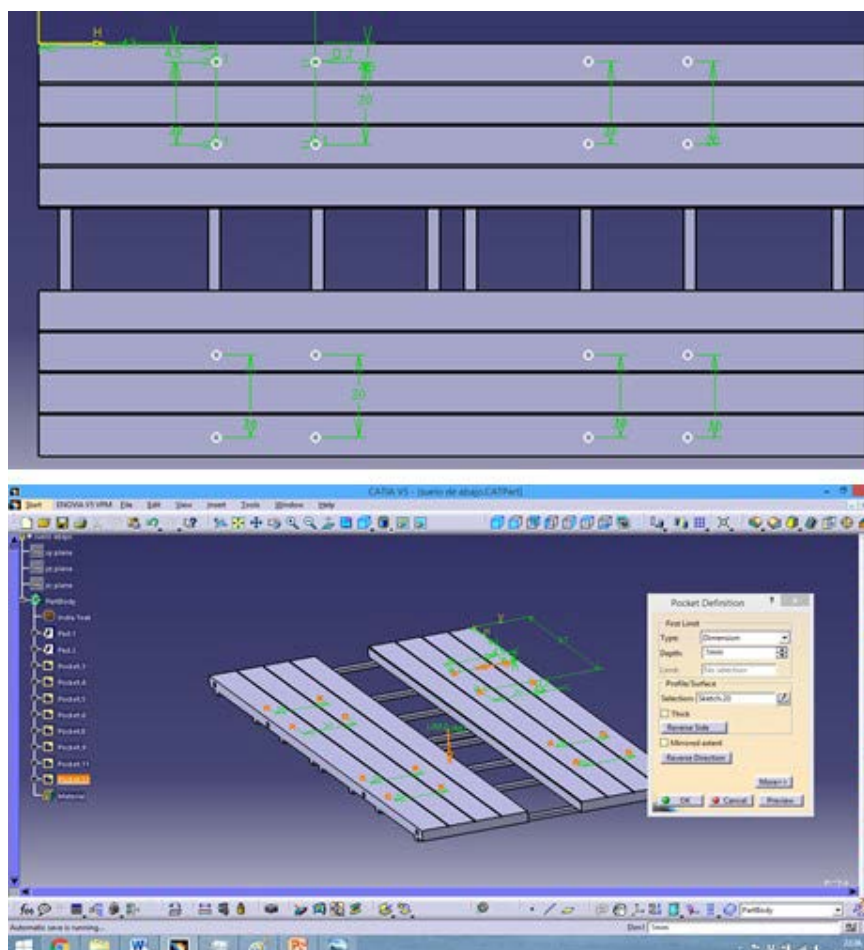


Figura 4.18 (arriba) croquis de los agujeros; (abajo) vaciado del croquis

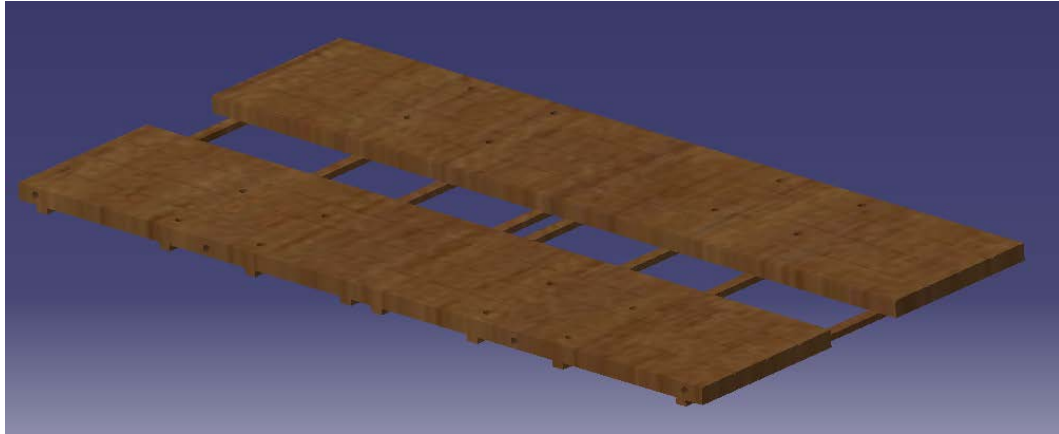


Figura 4.19 Base de la máquina de madera

Tras haber diseñado todas las piezas, llega la fase del ensamblaje en CATIA, para comprobar que no hay fallos de diseño antes de empezar a imprimir. En esta fase, las operaciones básicas es ponerle restricciones a las diferentes piezas para que se acomoden en el lugar que les corresponde, colocando como referencia una pieza la cual nunca se podrá mover en el espacio. Las restricciones que más se han usado en este proyecto son las de contacto entre superficies y la concentricidad entre circunferencias.

Para ensamblar una pieza lo primero es, como se ha dicho anteriormente, colocar una pieza de referencia para que el mecanismo no pueda moverse libremente por el espacio y pueda cumplir su función. Tras eso hay que ir colocando poco a poco todas las piezas con sus respectivas restricciones. Se empieza montando el suelo de abajo, los caballetes para los ejes de las poleas, las poleas, las manivelas y los cuatro mecanismos (fig. 4.20).

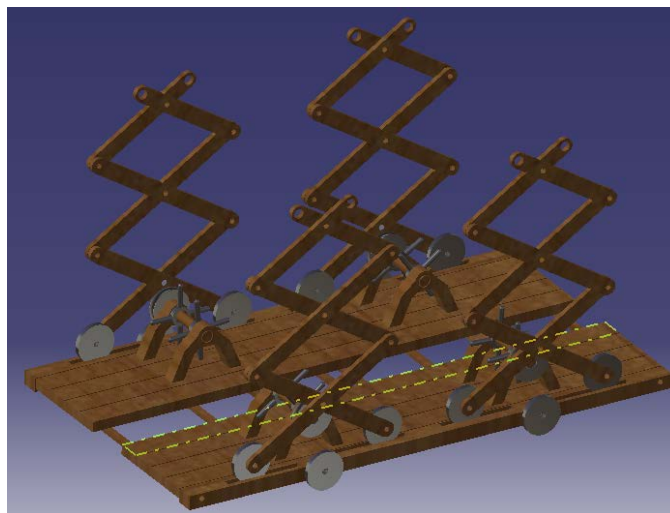


Figura 4.20 Recreación virtual del mecanismo de subida

Después de haber comprobado que toda la parte de abajo está correctamente ensamblada y no hay ningún fallo de diseño se monta con el suelo de arriba y la estructura que sujetará al ariete (fig. 4.21).



Figura 4.21 Ensamblaje de la plataforma que transportará el ariete

Se continúa colocando el ariete en su lugar con cuerdas (fig. 4.22).

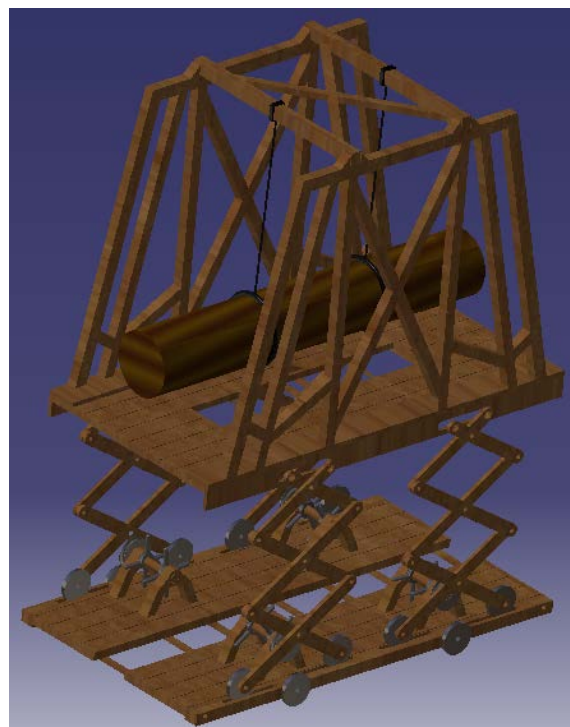


Figura 4.22 Colocación del ariete

Finalmente, se colocan las paredes que protegerían a los soldados servidores del ingenio (fig. 4.23).



Figura 4.23 Colocación de las paredes

Para dar mayor realismo a la pieza realizada, CATIA ofrece la opción de renderizar con una herramienta de *photostudio*; tras dicho proceso, la vista final del *Demoledor de Fortalezas* puesto en su ambiente podría ser algo como lo mostrado en la fig. 4.24.



Figura 4.24 El Demoledor de Fortalezas

Se ha procurado en todo momento hacer la reproducción lo más fiel posible al modelo original. Pero debido a que este diseño era para ser posteriormente impreso, ha habido que tener en cuenta en todo momento las limitaciones de la impresora empleada. Eso quiere decir que las tolerancias que ofrece esta máquina, de la que se hablará en puntos posteriores, han hecho que el diseño virtual no ajuste perfectamente. También hay que mencionar que se ha hecho una modificación del diseño inicial a causa de que este mecanismo estaba pensado para manejarlo desde dentro por diez hombres. Esto significa que en la maqueta, al tener que ser manejada por fuera y solo con dos manos, hubo que prolongar los ejes que mueven las poleas para poder ser manejados desde fuera (fig. 4.25). El artefacto se modeló siempre pensando en su posterior impresión, para procurar que tuviera el mejor acabado superficial.



Figura 4.25 Modificación (en azul) del diseño original para posibilitar el manejo desde fuera

4.3. Pozo Mágico

Este ingenio es simplemente un mecanismo de varias poleas cuya finalidad es que, recogiendo una pequeña porción de cuerda, se pueda levantar una carga (en este caso un cubo) varios metros (fig. 4.26).

El propósito del ingenio se cita textualmente en la traducción del código: “queremos coger agua de un pozo, cuya profundidad es de ocho metros, recogiendo sólo un metro de cuerda” [6,7]. Sabiendo la profundidad del pozo y que la maqueta, por razones técnicas, no puede superar los 170 mm de alto se obtiene una escala de 1/47.



Figura 4.26 Pozo Mágico [7]

En este caso, igual que en la máquina anterior, partimos de las fotos y videos que ofrece el estudio publicado sobre El Libro de los Secretos [7]. Pero en este caso, hay más información acerca de este mecanismo; para que el cubo haga el recorrido correctamente hay que colocar los puntos de anclaje de las cuerdas en el lugar correspondiente así como la longitud de las cuerdas ha de ser la correcta. Gracias a la interpretación proporcionada por el libro moderno sabemos que este mecanismo se basa en el principio de bloqueo y abordaje. Se hace pasar una cuerda por una polea y se amarra a un sitio fijo. El otro extremo de la cuerda de sujeta al elemento que se quiera elevar. Se tira de la polea hacia arriba y se obtiene un mecanismo de doble efecto que hace que los objetos suban recogiendo la mitad de cuerda (fig. 4.27).

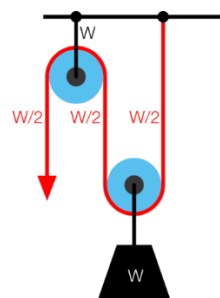


Figura 4.27 Principio de bloqueo y abordaje (tomada de wordpress.mrreid.org/2014/07/16/what-is-the-point-of-a-pulley/)

Sin embargo, este mecanismo, debido a las disposiciones de las poleas en los dibujos, no es exactamente igual que el mostrado en la figura 4.27 y en los cálculos se comprobará que no es tan útil como parece, ya que hay que hacer ocho veces la fuerza necesaria para una polea. En el manuscrito original [6] no dice la posición de anclaje de las cuerdas, ni la longitud de las mismas. Tras la traducción e interpretación, en el tomo de estudio [7] se indica que la longitud de las cuerdas tiene una secuencia de 1-2-4 para poder llevar el cubo desde el fondo del pozo hasta el brocal del mismo (fig. 4.28).

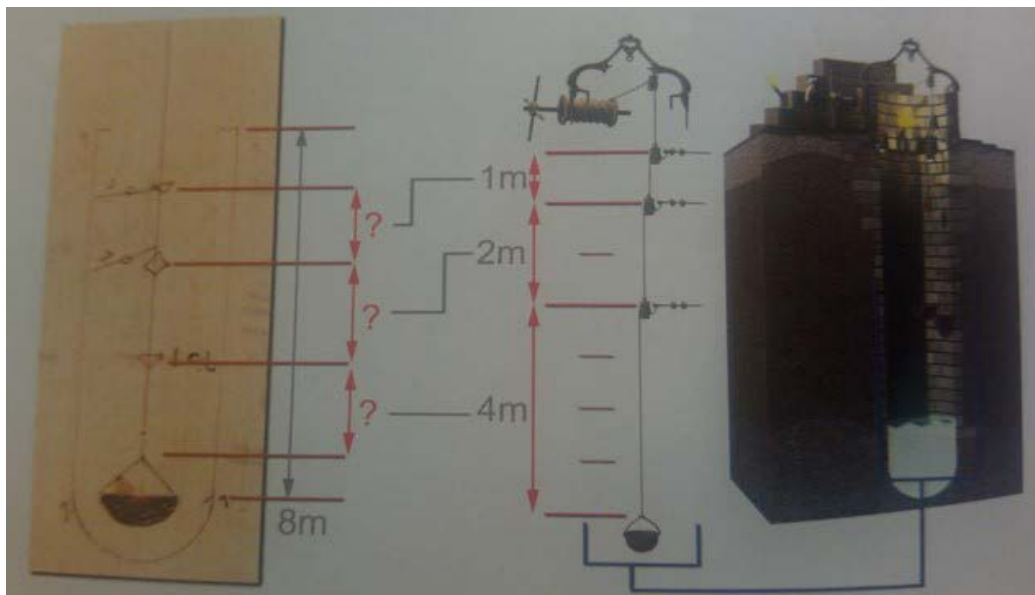


Figura 4.28 Correcciones en las medidas del pozo [7]

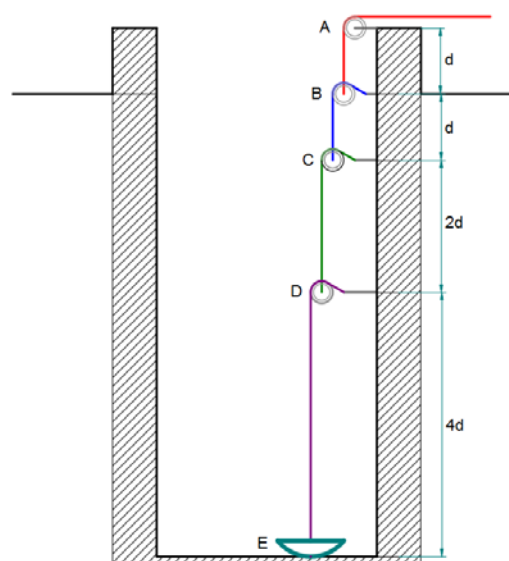


Figura 4.29 Generalización del mecanismo de poleas del Pozo Mágico

Podemos generalizar el funcionamiento de este sistema de la siguiente forma (fig. 4.29). La ley general que rige el funcionamiento de esta máquina se basa en la distancia que tiene que haber entre los apoyos de las poleas B, C y D y la distancia que tiene que haber al fondo; estos segmentos (BC, CD y DE), para que la máquina sea efectiva tienen que estar en relación geométrica de razón 2 ($BC=1$, $CD=1 \times 2=2$, $DE=1 \times 2 \times 2=4$). Como se ha comentado anteriormente, este entorno obliga a emplear una fuerza ocho veces mayor al peso que se quiere elevar; por tanto, aplicando la ley de oro de la Mecánica (“lo que se pierde en fuerza, se gana en espacio”), si se quiere emplear una fuerza de potencia que sea igual a la de resistencia, habrá que usar para tirar de la cuerda un torno de radio igual a la profundidad del pozo.

Por tanto, podemos decir que si se tira de d metros de cuerda usando n poleas (sin contar la de la superficie, polea A), para subir $2^n d$ metros de profundidad, los apoyos de las poleas habrá que fijarlos a $2^m d$ metros cada uno del siguiente, valiendo m -para cada apoyo de profundidad creciente- desde 0 (polea C, segmento BC) hasta $n-1$ para el último. Paralelamente, la fuerza de potencia a realizar, con un torno de radio igual al de las poleas, será 2^n veces mayor que el peso a elevar. Por ejemplo, para elevar 1 kg de agua desde 32 m de profundidad (2^5) tirando de 1 m de cuerda, habría que emplear, además de la polea del borde (A), cinco poleas más (B-F) situadas a 0 (B), 2^0 (C), 2^1 (D), 2^2 (E) y 2^3 (F), que quedaría a 2^4 m del fondo. La fuerza de potencia a aplicar, si el radio de la roldana es igual al de las poleas, sería de 32 kgf; dicho en otras palabras, si se quiere ejercer una fuerza de 1 kgf, habría que usar una roldana de 32 m de radio.

Hay dos interpretaciones para que en el manuscrito original no se den las indicaciones correctas para la colocación de las poleas. La primera es que el dibujo es una interpretación del texto, la cual nunca fue revisada por alguien que estudiara el sistema. La segunda es que nunca se quisieran dar a conocer las medidas exactas para que el pozo pudiera conservar su carácter “mágico”.

Tras haber escalado las medidas disponibles (la profundidad del pozo) se modelaron las diferentes piezas como se ha explicado en el apartado anterior para el *Demolador de Fortalezas*, quedando ensamblado como se muestra en la fig. 4.30.



Figura 4.30 Ensamblaje del pozo

Al tener un número relativamente reducido de piezas, se puede utilizar la herramienta “explosión” para ver de manera individual todas las piezas que componen el artefacto (fig. 4.30). En el caso del *Demoledor de Fortalezas*, el número de piezas es tan grande que la vista “explotada” las mostraría en un tamaño demasiado pequeño para ser correctamente visualizadas fuera de CATIA.

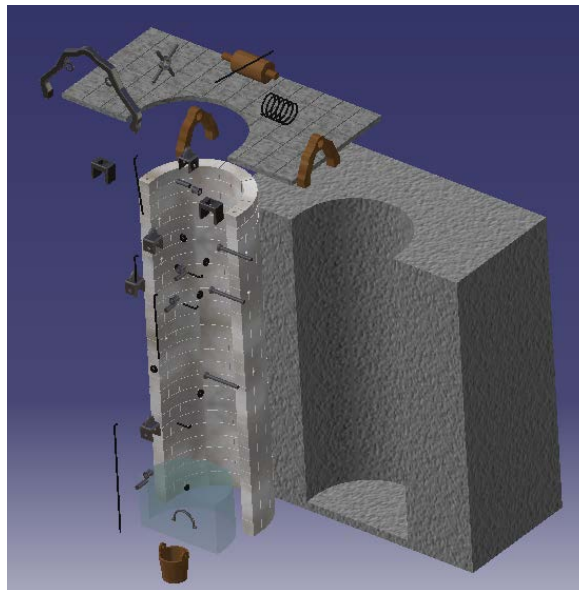


Figura 4.30 Vista en “explosión” del ensamblaje

Opcionalmente y para obtener una vista más realista de la máquina, se puede, igual que el modelo anterior, pasar el diseño por el estudio fotográfico de CATIA, obteniéndose la vista que se recoge en la fig. 4.31.



Figura 4.31 Renderizado del Pozo Mágico

5. IMPRESIÓN 3D

5.1. Introducción a la impresión 3D

En este apartado, se va a describir todo el proceso que se ha seguido para imprimir en 3D las diferentes piezas diseñadas mediante CATIA.

La impresión 3D a día de hoy es uno de los métodos de manufactura más baratos y novedosos que se pueden encontrar. Si bien tenemos conocimientos de diseño en programas de CAD podemos imprimir nuestros propios diseños. Dado actualmente es muy sencillo hacerse con una máquina doméstica hay páginas webs en las que se encuentran modelos hechos por otros diseñadores y una persona que no sepa diseñar pueda imprimir.

En el mercado hay nueve tipos de impresoras 3D:

- Modelado por deposición fundida (FDM).
- Estereolitografía (SLA).
- Procesamiento digital de luz (DLP).
- Sinterizado selectivo por láser (SLS).
- Fusión selectiva por láser (SLM).
- Fusión por haz de electrones (EBM).
- Fabricación mediante laminado de objetos (LOM).
- Inyección de aglutinante (BJ).
- Inyección de material (MJ)/Moldeo a la cera perdida.

La más común de todas es la de modelado por deposición fundida y de la que se hablara en este TFG dado que se ha usado. Hay de todo tipo de precios debido al gran abanico que ofrece el mercado. Pero la regla básica para la impresión 3D es que cuánto más cara sea la máquina que estemos usando, menos tendremos que saber acerca de su funcionamiento interno. Las impresoras FDM se basan en “fundir” un material y depositarlo, a través de una boquilla o *nozzle*, poco a poco, en capas. Al completar cada capa la máquina subirá el extrusor otro nivel y continuará añadiendo capas hasta que se complete la pieza.

A continuación, se muestra de forma resumida (fig. 5.1) la secuenciación general de cualquier proceso de impresión 3D siguiendo este método. Como se puede ver, el proceso global, que va desde la concepción de la idea a su aplicación, se podría diseccionar en ocho pasos de los cuales sólo el quinto corresponde al proceso de impresión propiamente dicho, debiendo hacer previamente el diseño CAD del objeto o pieza en cuestión (pasos 1 y 2) y la preparación del archivo de impresión (etapas 3 y 4); una vez realizada la impresión (paso 5) hay, normalmente, que postprocesar el resultado, empezando por la retirada de soportes si

los hubiera (pasos 6 y 7), para llegar, por último a la aplicación del objeto o pieza fabricado (paso 8).

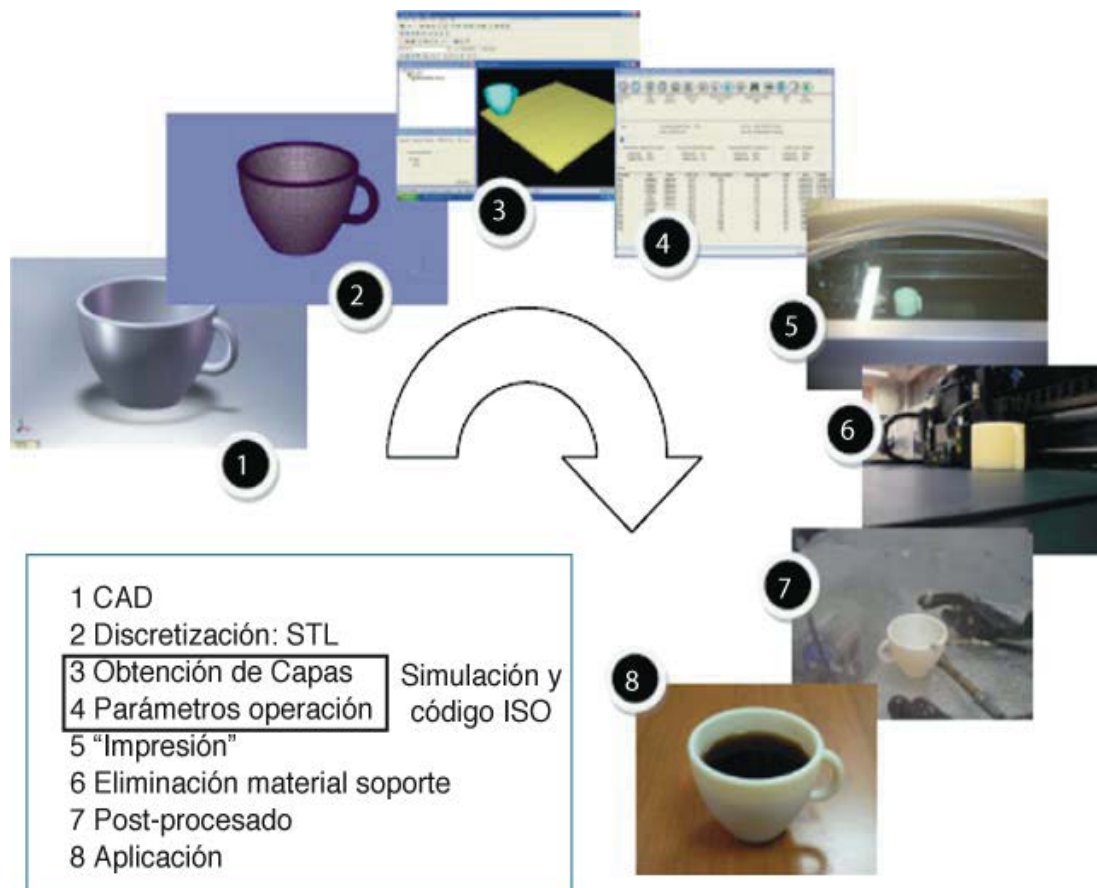


Figura 5.1 Desde la idea a la aplicación: Resumen del proceso de impresión 3D.

5.2. Software y hardware

Para que la máquina sepa qué pieza tiene que hacer y cómo hacerla, necesita un “traductor” que básicamente es un programa que secciona el modelo en capas para que la impresora pueda interpretar la pieza e imprimirla. Hay muchos softwares en el mercado pero el que se ha usado en este proyecto sobre todo por su simplicidad es CURA 3.6 [9]; este programa se distribuye de manera libre y está desarrollado por Ultimaker B.V. en cooperación con la comunidad. Es un software que ofrece muchas opciones a la hora de la impresión, las cuales veremos a continuación. Pero sobre todo destaca porque su interfaz (fig. 5.2) es bastante intuitiva.

El hardware utilizado para la impresión ha sido el portátil descrito en el apartado 4.1, *PLA* y la impresora.

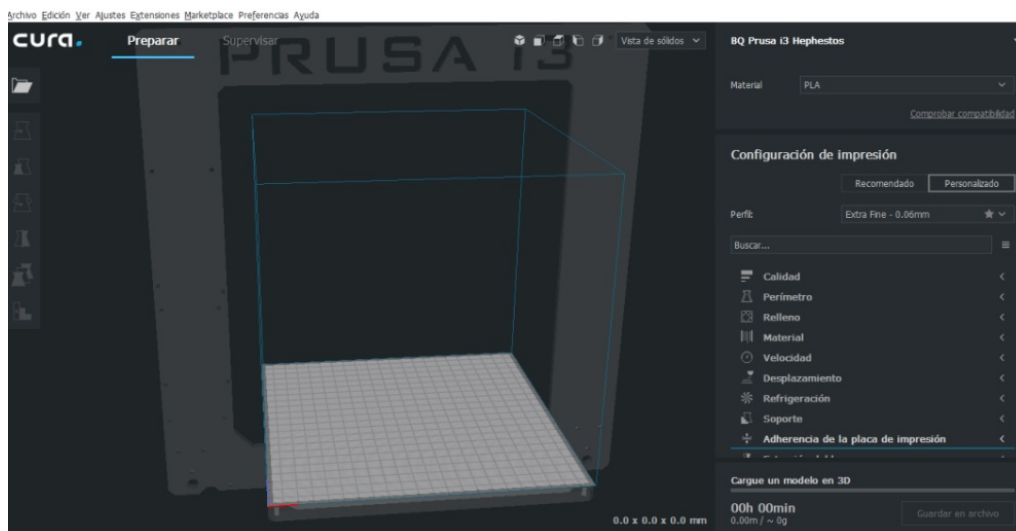
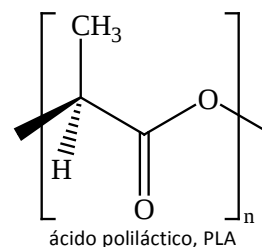
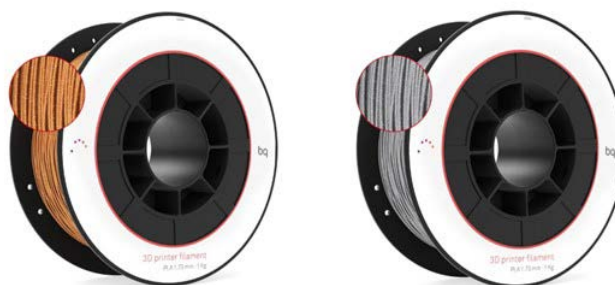


Figura 5.2 Interfaz de CURA

El PLA (ácido poliláctico) es un polímero muy común en la impresión por deposición de material. Se trata de un termoplástico biodegradable que se obtiene del almidón de maíz. En este caso se ha usado una bobina de filamento de color gris y otra marrón de la marca BQ (fig. 5.3) cuyas características son:



- Temperatura recomendada de impresión: 200/220°C
- Temperatura de flexión bajo carga: 56°C (ISO 75/2B)
- Temperatura de fusión: 145/160°C (ASTM D3418)
- Temperatura de transición vítrea: 56/64°C (ASTM D3418)
- Densidad: 1,24 g·cm⁻³
- Diámetro de filamento: 1,75 mm

Figura 5.3 Bobinas de PLA marrón y gris (tomado de store.bq.com/es/bobina-pla-glitter-bq)

La impresora usada ha sido una ANET A8, que es una copia de la PRUSA I3 de BQ (fig. 5.4), suministrada en piezas para ser montada por el usuario (*do it yourself*).

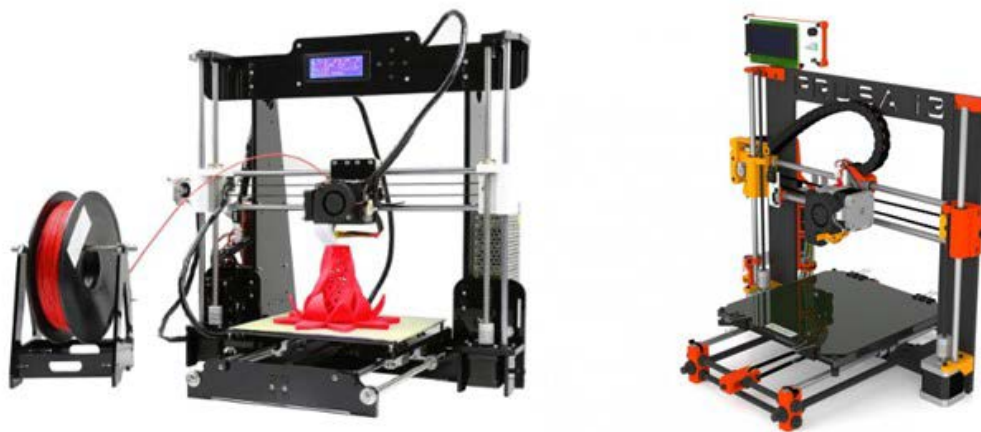


Figura 5.4 (izquierda) ANET A8 (tomado de es.gearbest.com/3d-printers-3d-printer-kits/pp_991324.html?wid=1433363¤cy=EUR&vip=14489724&gclid=Cj0KCQjw4qvIBRDIArIsAHme6osfGF29ErEvrlbeNRGQ4bsdsqssExyDxFPfZFv6kPU3v_mIz2KO2HQaAiqfEALw_wcB); (derecha) PRUSA i3 (tomado de www.andorrafreemarket.com/prusa-i3-hephestos-r-bq.html)

A esta impresora se le han hecho varias modificaciones para mejorar los resultados de impresión debido a que, por su bajo costo (140 euros), la calidad obtenida con el modelo original no es todo lo buena que sería deseable.

La diferencia más importante respecto a la original es la modificación del tipo de extrusión. En esta clase de impresoras se puede tener una extrusión directa o indirecta (tipo *bowden*). La extrusión directa tiene el motor del extrusor sobre el mismo carro que hay en la barra del eje x y justo debajo estaría la punta caliente o *hotend* -que es lo que hace que se caliente el filamento- y la boquilla o *nozzle* (fig. 5.5 izqda.). La extrusión indirecta no tiene el motor encima del carro, con lo que se aligera peso y se evitan vibraciones indeseadas, sino que el motor está fijado al armazón de la impresora y mediante un tubo de teflón se lleva el filamento hasta la entrada del *hotend* (fig. 5.5 dcha.). Para ello, como se puede ver en la fig. 5.5 (dcha.), se imprimió un carro nuevo más ligero que se acomodara al nuevo extrusor (fig. 5.6) tipo *bowden*.

También se cambiaron los rodamientos de bolas lineales que traía de serie la máquina para efectuar los desplazamientos según x y z por unos rodamientos lineales *igus* (fig. 5.7). Estos rodamientos no tienen bolas ya que tienen una superficie con muy bajo coeficiente de fricción, lo cual minimiza las vibraciones y el ruido.

Se le añadió además un MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) por seguridad, porque esta impresora en concreto trabaja con *cama caliente* para mejorar la adherencia de las piezas a la superficie de impresión y evitar un fenómeno conocido en

impresión 3D como *warping* (sucede cuando se despegan los bordes de las piezas y se comban hacia arriba). Para calentar dicha *cama caliente* es necesaria mucha intensidad de corriente y, por seguridad, para evitar que dicha intensidad llegue a la placa base, se usa el MOSFET (fig. 5.8).



Figura 5.5 (izqda.) extrusión directa (tomada de portachiavi.es/producto/impresora-anet-a8-con-mejoras/); (dcha.) extrusión indirecta



Figura 5.6 Extrusor V6 (tomada de inven.es/impresoras-3d/54-hotend-extrusor-directo-e3d-v6-con-ventilador-175mm-04mm.html)



Figura 5.7 Rodamientos *igus* (tomada de www.amazon.es/Igus-DryLin%C2%AE-RJ4JP-01-08-Rodamientos-deslizamiento/dp/B01M328GIR/ref=sr_1_1?keywords=rodamientos+igus&qid=1554758887&s=gateway&sr=8-1)



Figura 5.8 MOSFET

El armazón de la impresora es de metacrilato. Para darle rigidez se le añadió una estructura paralela al eje x para evitar que el metacrilato pudiera doblarse debido a la tensión ocasionada por la correa del eje y (fig. 5.9). Se añadió asimismo un tornillo para poder tensar la correa según fuera conveniente.

Como última reforma, y dado que la impresora iba a estar muchas horas seguidas trabajando, se mejoró la refrigeración de la máquina añadiendo un ventilador delante de la placa base y otro delante de la fuente de alimentación (fig. 5.10).

Finalmente, la impresora quedó montada como se muestra en la fig. 5.11 para poder hacer frente a muchas horas de impresión y sacar adelante este proyecto.

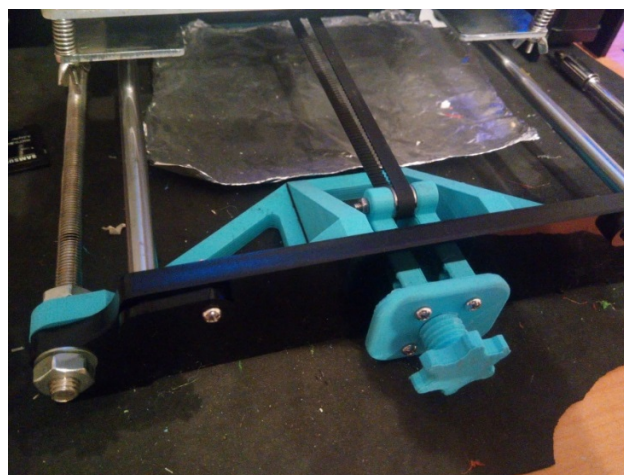


Figura 5.9 En azul, estructura de refuerzo con el tornillo de tensado de la correa que proporciona la coordenada y

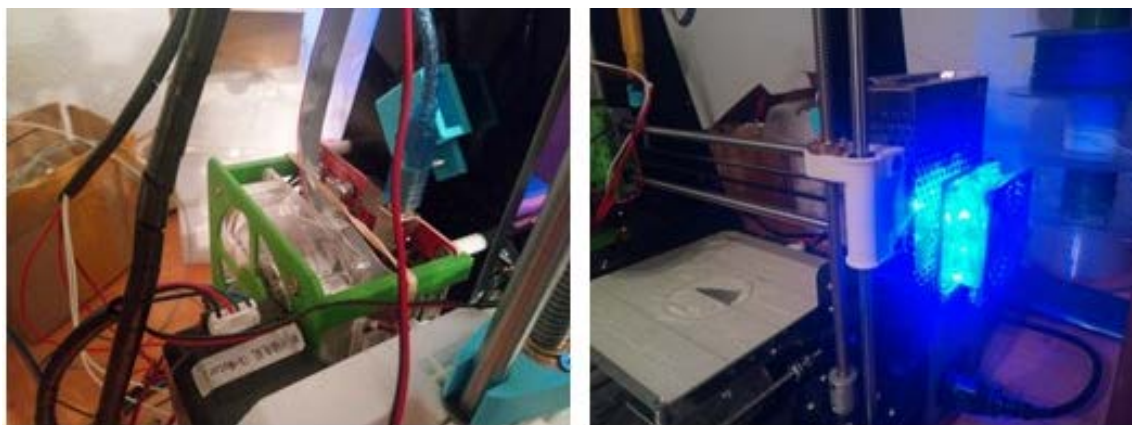


Figura 5.10 Refrigeración

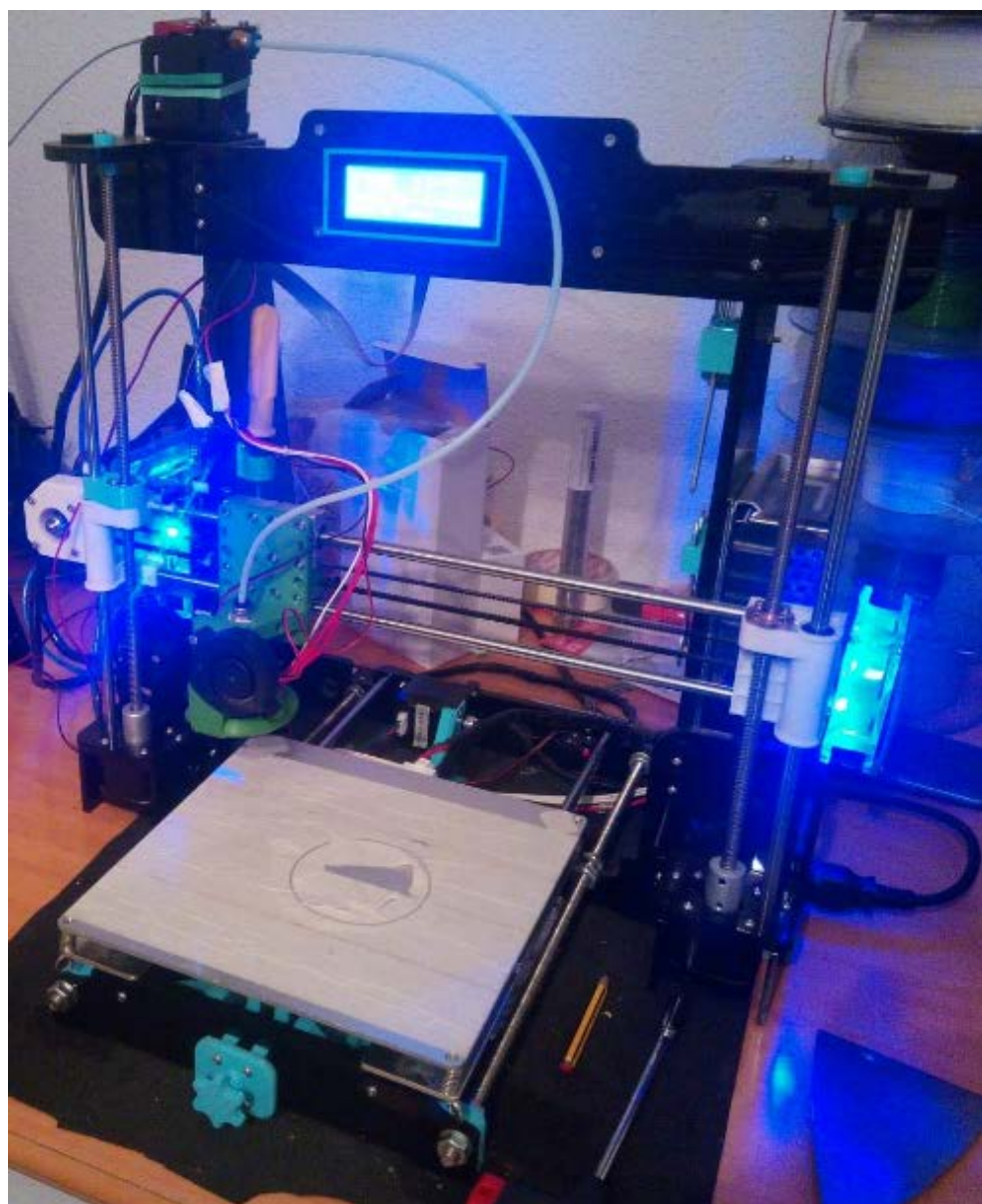


Figura 5.11 Impresora Anet A8 personalizada

5.3. Proceso de impresión

Para ilustrar el proceso de impresión, se va a proceder a explicar los diferentes parámetros que hay que introducir en el programa ULTIMAKER CURA 3.6 [9] y las precauciones que hay que tomar antes de que la máquina empiece a imprimir.

Previamente antes de cargar cualquier archivo en el programa, se ha de configurar el CURA con los parámetros de la impresora disponible (fig 5.12).

Tras haber diseñado la pieza, se carga el archivo con el modelo en el programa CURA, en este caso el suelo del que se explicó su diseño anteriormente (fig 5.13), para que podamos ver virtualmente como quedaría tras su impresión.

A continuación, seleccionaremos el perfil “extra fine-0.06 mm” y modificaremos algunas de las opciones. Estas opciones, situadas en la parte derecha de la pantalla como se muestra en la figura anterior, modifican muchos parámetros a la hora de la impresión que afectan sobre todo a la velocidad de impresión y al acabado superficial para poder hacer la impresión más eficiente. En este caso se mostrarán los que se han modificado, dejando el resto de parámetros fijados por defecto en el perfil seleccionado.

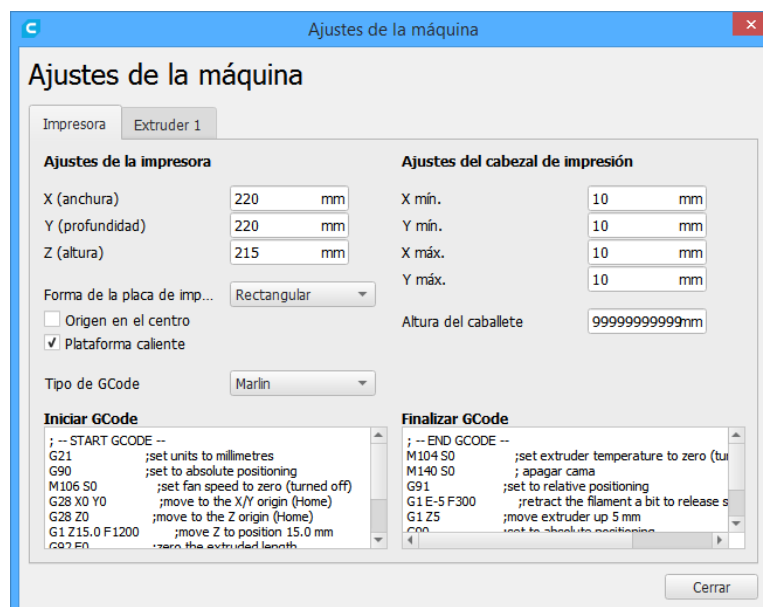


Figura 5.12 Parámetros de la impresora

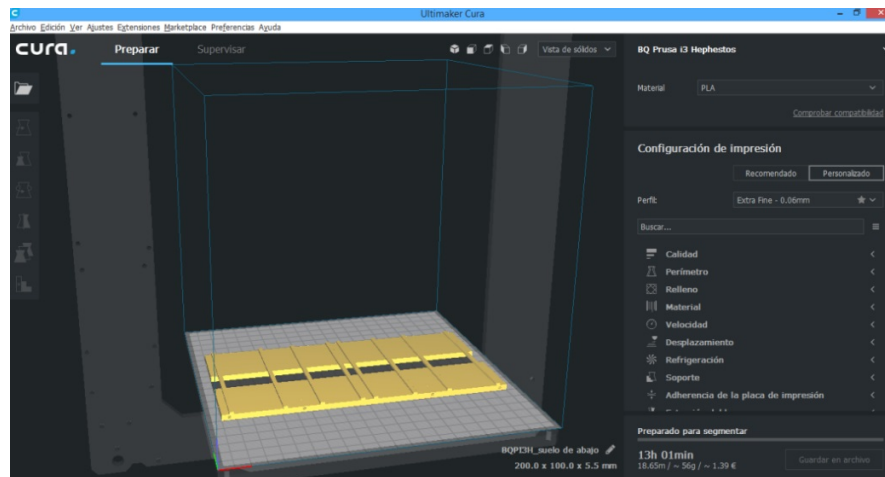


Figura 5.13 Pieza cargada

En el apartado de calidad (fig 5.14), el primero que se modifica es la altura de capa. La altura de capa, como bien indica su nombre, es la altura que van a tener las diferentes capas en la pieza que se va a imprimir. Cuanto menor sea la altura de capa, mejor acabado tendrá la pieza pero, a cambio, tardará más en imprimirse; esto depende en gran medida del tipo de geometría que vayamos a imprimir, ya que cuantas más curvas haya en la dirección z, más habrá que reducir la altura de capa si queremos un buen acabado. Por eso, es necesario llegar a un compromiso entre calidad y tiempo de impresión. El otro parámetro que se va a modificar es la altura de capa inicial. Esto sólo afecta a la adherencia a la capa de impresión y al acabado de la primera capa. Cuanto más bajo sea el valor, mejor acabado tendrá la primera capa, siempre teniendo en cuenta que hace falta una altura mínima que permita salir el *PLA* fundido por el *nozzle*.

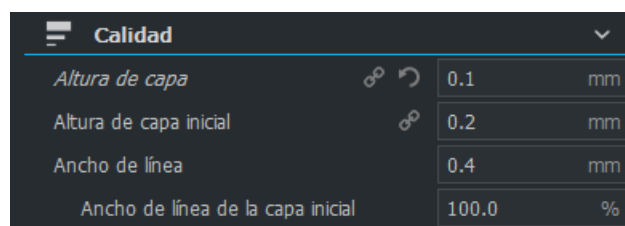
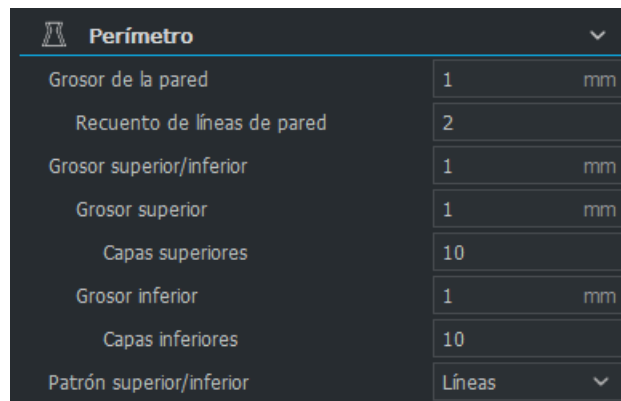


Figura 5.14 Parámetros de calidad

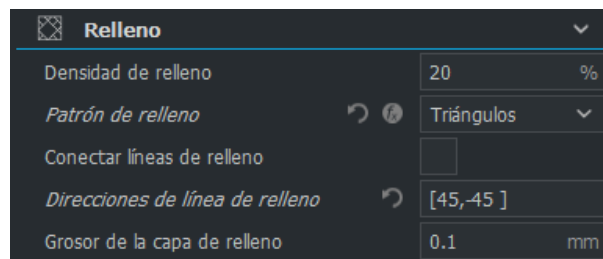
El apartado de perímetro (fig 5.15) permitirá dar grosor a las paredes laterales, la parte de debajo de la pieza y la superior ya que el interior de la pieza no es maciza. Solo habrá que modificar el grosor de la pared y grosor superior/inferior ya que el programa cambia el resto de valores automáticamente.



Perímetro		
Grosor de la pared	1	mm
Recuento de líneas de pared	2	
Grosor superior/inferior	1	mm
Grosor superior	1	mm
Capas superiores	10	
Grosor inferior	1	mm
Capas inferiores	10	
Patrón superior/inferior	Líneas	▼

Figura 5.15 Parámetros de perímetro

En el apartado de relleno (fig 5.16), se indicarán las opciones que hacen referencia al interior de la pieza (lo que no se ve). En las piezas voluminosas tener más o menos porcentaje de relleno es algo que puede afectar mucho a un aumento de tiempo de impresión. Más relleno significa más robusto, por lo que esa pieza podrá aguantar mayores esfuerzos sin romperse. Por tanto, se debe conocer para qué está destinada la pieza, qué hace, para darle más o menos robustez (y tiempo de impresión). En el caso de este suelo, dado que es muy delgado, este parámetro no afectará mucho. Lo usual para piezas que no deban soportar un esfuerzo excesivo es programar un 20% de relleno con un patrón triangular para aguantar mejor los esfuerzos.



Relleno		
Densidad de relleno	20	%
Patrón de relleno	Triángulos	▼
Conectar líneas de relleno	☐	
Direcciones de línea de relleno	[45,-45]	
Grosor de la capa de relleno	0.1	mm

Figura 5.16 Parámetros de relleno

En el siguiente apartado, nos encontramos las opciones del material (fig 5.17). Para hacer modificaciones aquí, debemos saber qué tipo de material estamos usando y hacer caso a las especificaciones del fabricante si las hubiera. Aquí se modifica la temperatura de impresión (varía según el material). La temperatura afecta sobre todo al acabado superficial. El fabricante recomienda 205°C pero, tras varias pruebas hechas al material, dadas las características de esta máquina, la temperatura óptima son 210°C. La cama caliente sirve para que se adhiera mejor el material (no todas las impresoras la tienen).

Material	
Temperatura de impresión	210 °C
Temperatura de la placa de impresión	60 °C
Flujo	100 %
Flujo de capa inicial	100 %
Habilitar la retracción	☒
Retracción en el cambio de capa	☐
Distancia de retracción	4 mm
Velocidad de retracción	25 mm/s

Figura 5.17 Parámetros del material

El siguiente apartado, la velocidad, es el que más afecta al tiempo de impresión (fig 5.18). Cuanto mayor sea la velocidad de impresión, menos tardará la tarea, pero peor acabado se obtendrá, pudiendo dar lugar a fallos en la impresión. Por simplicidad, se ha modificado el valor general de la velocidad y el resto de parámetros fueron modificados automáticamente por el programa. A continuación, se modificó la velocidad en la primera capa para proporcionar así mejor adherencia y acabado.

Velocidad	
Velocidad de impresión	60 mm/s
Velocidad de relleno	80 mm/s
Velocidad superior/inferior	20 mm/s
Velocidad de soporte	60 mm/s
Velocidad de desplazamiento	120 mm/s
Velocidad de capa inicial	20 mm/s

Figura 5.18 Parámetros de velocidad

El apartado de soportes (fig 5.19) es importante debido a que, cuando hay piezas que tienen zonas en las que hay que imprimir “en el aire”, el programa automáticamente crea una estructura de soporte donde poder imprimir y se ve desde la vista de capas (fig 5.20). Según lo firme que se haga el soporte, más o menos difícil será retirarlo después del modelo impreso pero, si se hace muy endeble, puede que en mitad de la impresión se caiga y no cumpla correctamente su función. También es necesario decir que un buen soporte permite un acabado mejor pero sigue estando el problema de que luego es difícil retirarlo y aumenta considerablemente el tiempo de impresión. En este caso no fue necesario el uso de soportes debido a que el diseño se hizo pensando en su posterior impresión.

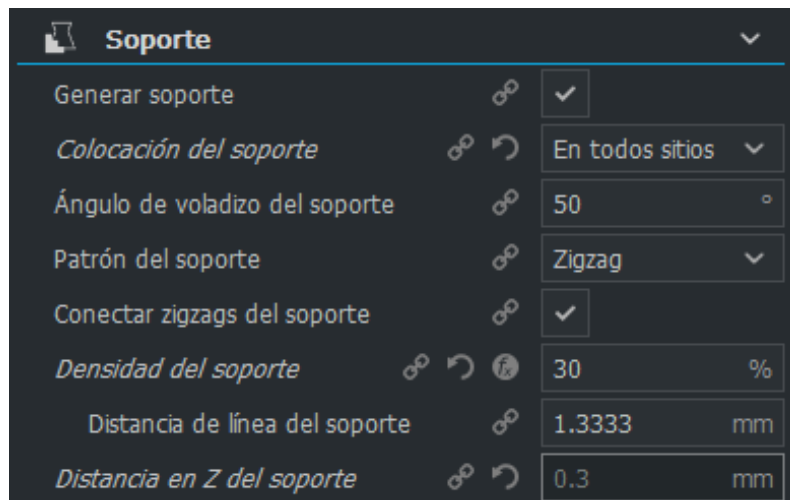


Figura 5.19 Parámetros de soporte

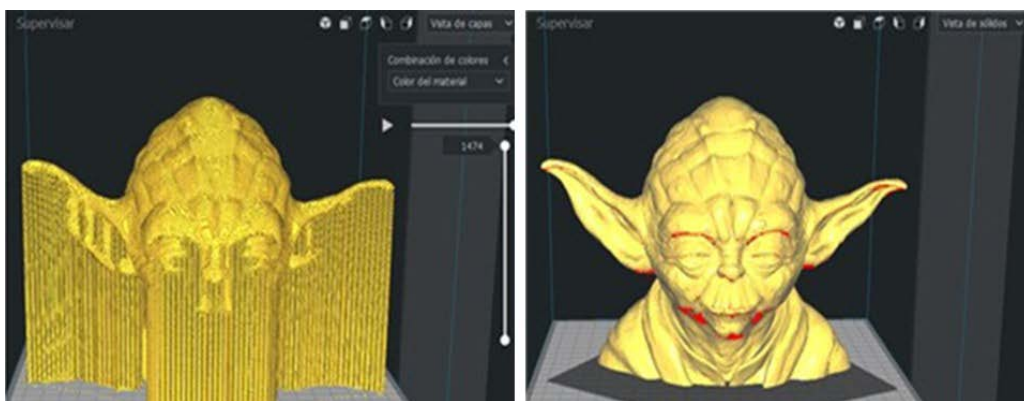


Figura 5.20 La misma pieza mostrada con y sin soportes

Tras haber configurado correctamente los parámetros de impresión en el programa, toca ir a la máquina. Hay que precalentar el *nozzle* y la *cama caliente* (190 y 60°C por defecto) y después nivelar la superficie de impresión con los cuatro tornillos que tiene en sus esquinas. A continuación, se carga el filamento plástico introduciéndolo por el tubo de teflón y se comienza a imprimir (fig 5.21). Por seguridad, para que no ocurra *warping*, antes de imprimir siempre se aplica una capa de pegamento de barra a la zona de impresión.

Durante el proceso de impresión hubo algunos contratiempos pero el más común fue el atasco del *nozzle* debido a las impurezas superficiales que pudiera tener el filamento de *PLA*. Cuando el *nozzle* se atasca, deja de extruir pero hay un periodo de tiempo transitorio en el que va menguando el flujo de plástico, ocasionando piezas fallidas como la que se muestra en la figura 5.22.

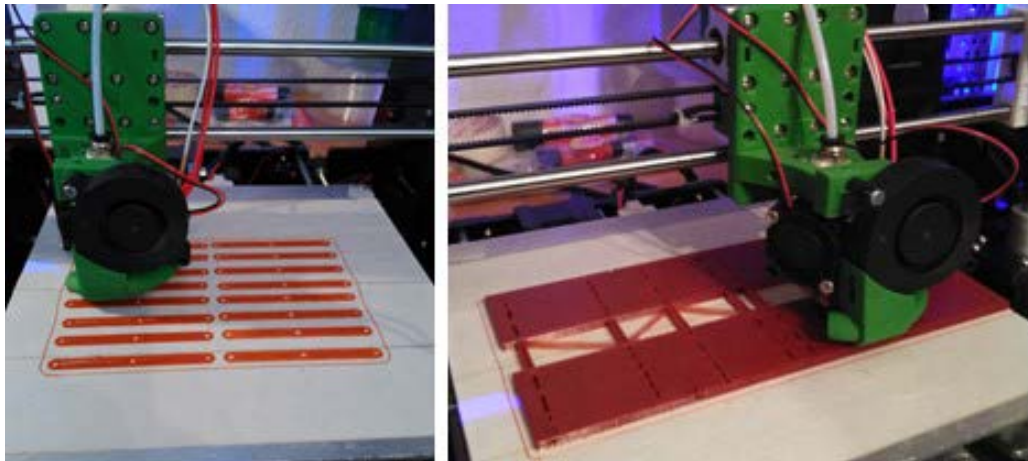


Figura 5.21 Impresión de (izqda.) vigas del mecanismo de tijera y (dcha.) base del Demoledor de Fortalezas



Figura 5.22 Pieza fallida

6. MONTAJE

En este apartado se explicará brevemente el proceso de montaje que se ha seguido para ambos artefactos. El método de unión entre piezas se ha realizado mediante pegamento de cianoacrilato, ya que el resultado en PLA es muy satisfactorio.

6.1. Demoledor de Fortalezas

En este artefacto aparte de haber usado pegamento en determinadas piezas se ha atravesado los agujeros (previamente diseñados) de ciertas partes con un pedacito de PLA a modo de eje para así poder facilitar el montaje (fig 6.1).



Figura 6.1 Ejes-guías

Otro uso que se le ha dado a esos ejes ha sido el facilitar el movimiento del mecanismo de tijera, ya que si se hubiera usado pegamento nunca se habría movido. Para ello se introducía el eje y con la punta de una pistola de silicona caliente se le aplanaba la punta al eje a modo de remache (fig 6.2).

Conforme se fueron imprimiendo las piezas, se fueron añadiendo al artefacto. Muchas de ellas hubo que repetirlas debido a las tolerancias de la máquina, ya que en el eje X e Y oscila entre ± 0.8 mm dependiendo si es un agujero o un saliente. El eje Z sin embargo no tiene este problema ya que la precisión es (con los parámetros de impresión antes mencionados) una décima de milímetro.

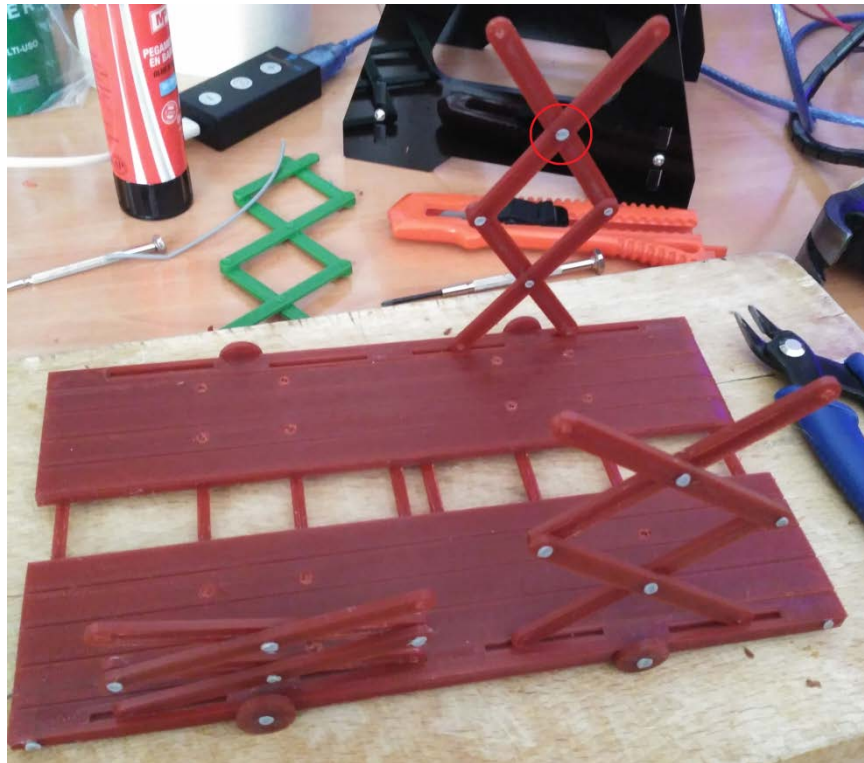


Figura 6.2 Remaches

Una parte crucial en el montaje fue el momento de añadir los ejes para poder manejar el artefacto. Primero hubo que alinear perfectamente los ocho caballetes que sujetan el eje, cuatro a cuatro, procurando que quedaran centrados respecto al mecanismo y fijarlos con pegamento (fig 6.3).

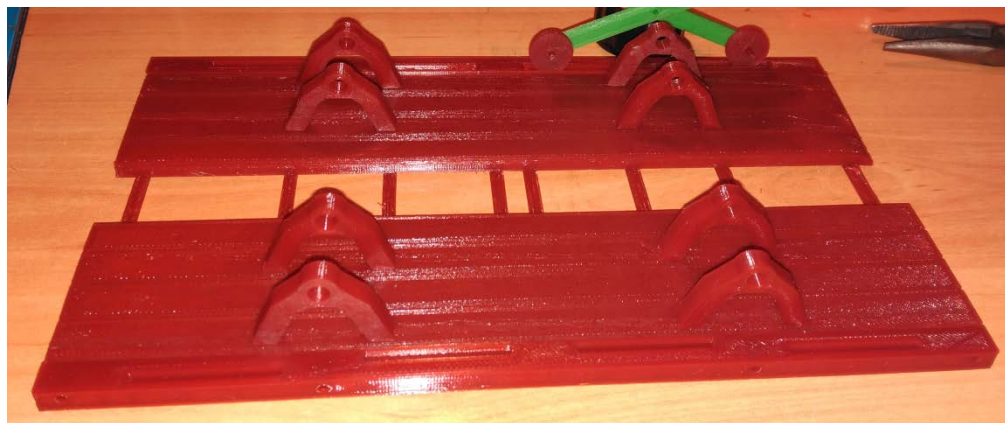


Figura 6.3 Soportes de los ejes principales

Después se colocaron los ejes con las poleas, las manivelas, las cuerdas en orden y se añadieron con pegamento las guías por donde deben de ir los ejes de las ruedas del mecanismo de tijera para evitar que se salgan de su recorrido (fig 6.4). Debido a que los

nudos de las cuerdas eran grandes comparándolo con la escala a la que se había diseñado la maqueta se ha procurado centrarlo, en la medida de lo posible.

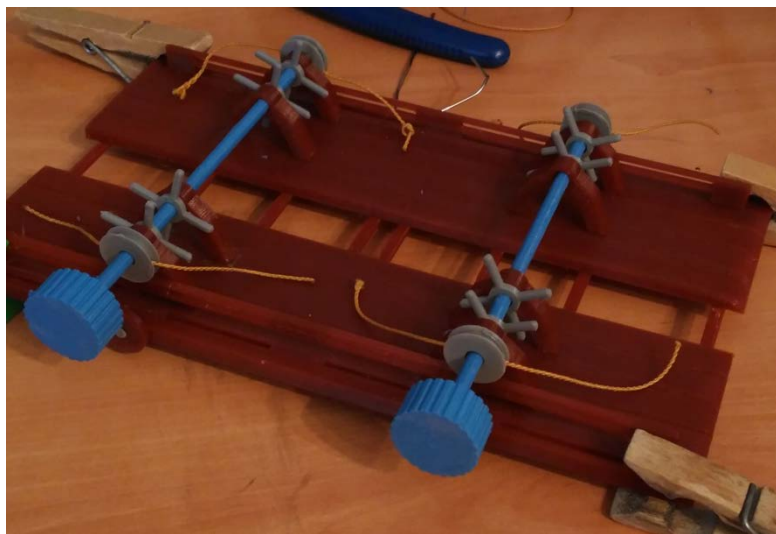


Figura 6.4 Montaje de los ejes principales

Se añadieron los cuatro mecanismos de tijera y se comprobó que funcionaban correctamente sincronizados (fig 6.5).

Finalmente, para terminar de montar y probar el mecanismo de elevación se añadió el piso de arriba con la estructura que sujeta al ariete (fig 6.6), añadiéndole el peso total que tiene que elevar. Aquí se descubre un problema insalvable, debido a la naturaleza de los materiales usados; la cuerda no es totalmente rígida sino que tiene cierta elasticidad, con lo cual los movimientos de giro del eje y los de elevación no son totalmente precisos. A eso se le suma que el PLA es un material relativamente flexible y eso supone que al ejercer fuerza para que gire el eje este flexiona a torsión. Esto se traduce en que el mecanismo de tijera más próximo reaccionará antes y hará el movimiento de elevación antes que el que está más lejano haciendo que la plataforma se levante descompensada de un lado y se tuerza.

A continuación se procedió al montaje del ariete con el sistema de cuerdas para hacer que se moviera desde el piso de abajo. Para darle más veracidad a la maqueta se imprimió la cabeza de un carnero (www.alamy.es/imagenes/bighorn-vector-vectors.html) y se pegó al tronco del ariete (fig 6.7).

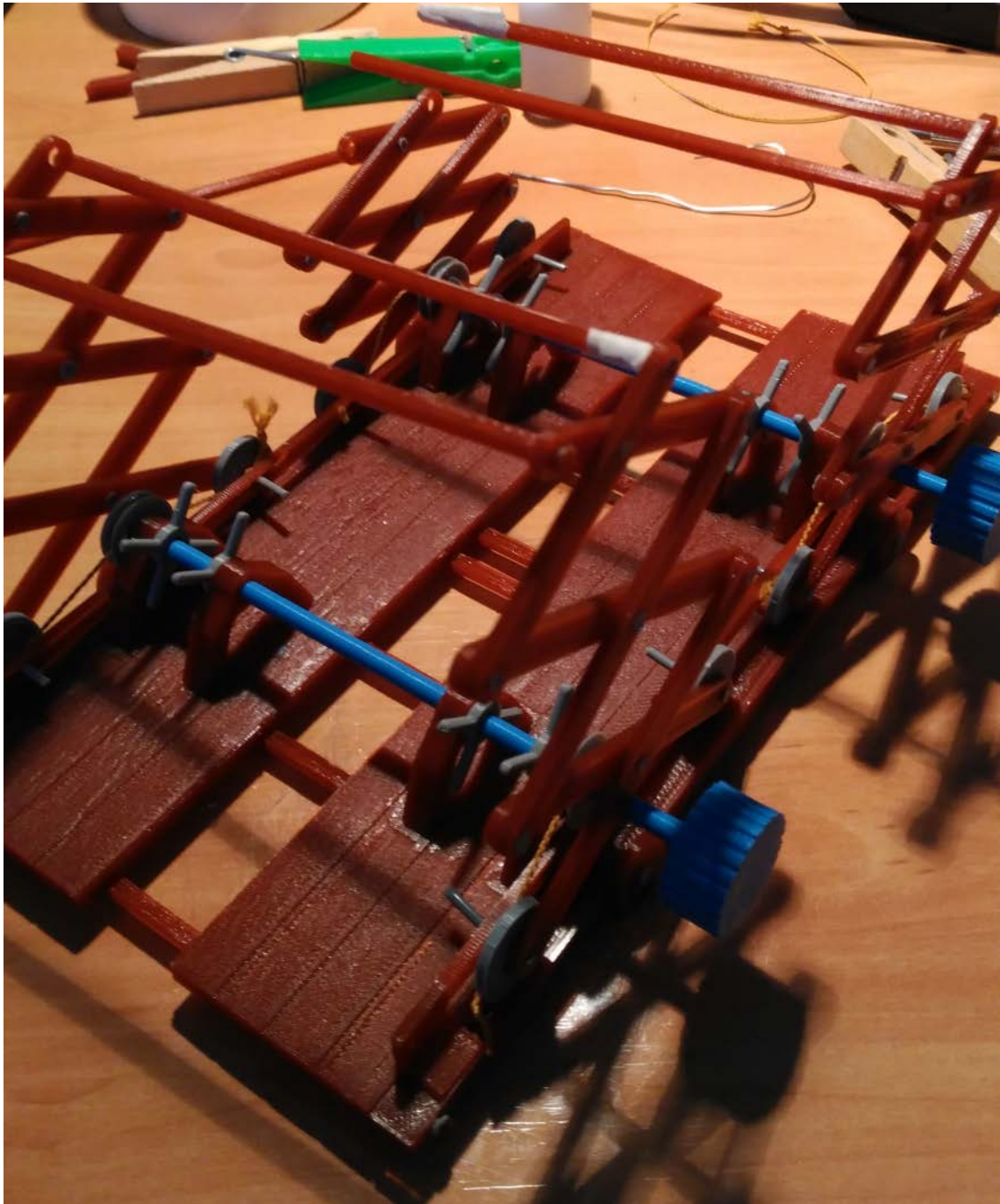


Figura 6.5 Montaje de los mecanismos de tijera

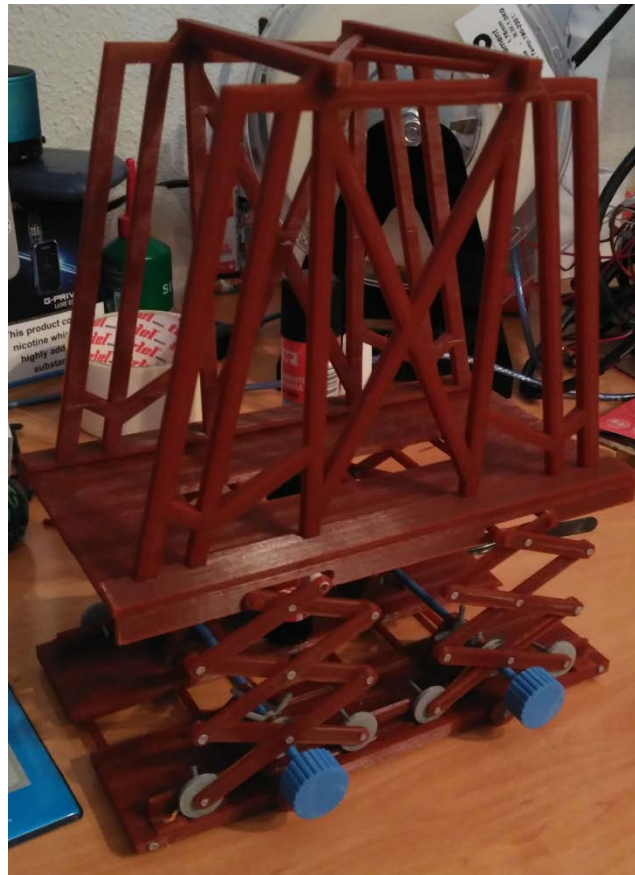


Figura 6.6 Montaje plataforma superior



Figura 6.7 Ariete

Por último, se le añadieron las paredes que son las que protegería a los soldados del enemigo cuando se estuvieran acercando a la fortaleza para demolerla (fig 6.8).



Figura 6.8 Demoledor de Fortalezas

6.2. Pozo Mágico

El montaje del pozo ha sido más sencillo debido a que la única complejidad de este mecanismo radicó en averiguar la longitud de las cuerdas. Para ello se hizo una simulación física antes de imprimir, con un listón de madera y cuatro cáncamos a los que se les ataron las cuerdas y se fue variando su longitud hasta llegar a la solución que más se acercaba a la realidad (fig 6.9). Digo la que más se acercaba y no la exacta porque debido a que la máquina

no fue capaz de imprimir las poleas por su pequeño tamaño, hubo que usar poleas suministradas por Playmobil®. Téngase en cuenta que si se siguen las proporciones del pozo se obtendría (con estas poleas de Playmobil®) una polea a escala real de un diámetro de aproximadamente entre medio metro y un metro. Teniendo en cuenta que son 3 poleas que no llegan a solaparse bien en la maqueta, serían entre dos y tres metros hasta llegar al dintel en la realidad. Con lo que, debido a la escala, el cubo nunca llega al dintel del pozo.



Figura 6.9 Listón de pruebas

Para que el resultado final fuera más vistoso se imprimió en varios colores y se pegaron con pegamento. Las cuerdas, igual que en la otra maqueta, se ataron con la mayor precisión posible (fig 6.10).



Figura 6.10 Pozo Mágico terminado

7. CÁLCULOS

En el presente apartado, vamos a presentar algunos cálculos acerca de la mecánica de los dos artefactos recreados a lo largo de este TFG. Estos cálculos deberían de arrojar datos sobre la usabilidad real de ambas máquinas, aunque siempre habrá que tener en cuenta que en el proceso de reproducción de los mecanismos ha habido que a hacer una gran cantidad de suposiciones ya que, en el manuscrito original, ni aparecen planos suficientemente claros y exactos para describir los artefactos, ni se habla en absoluto de los materiales que, potencialmente, pudieran ser usados para su construcción. En realidad, en el tomo de estudio [7], se reflejan en alguna ocasión severas dudas sobre si estos aparatos realmente fueron contruidos y ensayados o, simplemente, quedaron en una idea.

7.1. Demoledor de fortalezas

En el caso del demoledor de fortalezas se harán dos cálculos importantes, la velocidad de ascenso y la velocidad de impacto del ariete. Los cálculos se harán respecto de la máquina a escala real.

La velocidad de ascenso se hará suponiendo una velocidad de giro constante en el torno y un ángulo concreto respecto al suelo, ya que a medida que el mecanismo sube, disminuye su velocidad de ascenso. En la figura 7.1 se puede ver el diagrama cinemático de la mitad del mecanismo, dado que es un mecanismo simétrico, y se procederá a hacer el cálculo de la velocidad de ascenso según un ángulo de 30 grados respecto al suelo y una velocidad angular de giro del torno de 1 radian por segundo.

Sabiendo la velocidad angular del torno podemos calcular la velocidad lineal con la que se acerca el punto 1 al eje de simetría.

$$v = \omega_R \cdot \frac{D}{2} = 0.5 \text{ m/s}$$

Sabida esa velocidad se calcula la velocidad angular del punto 2, que es la velocidad angular a la que giran todos los puntos.

$$v_t = \cos(180 - 90 - \alpha) \cdot v = 0.32 \text{ m/s}$$

$$\omega = \frac{v_t}{2.3m} = 0.14 \text{ rad/s}$$

Ahora que tenemos la velocidad angular de la barra se puede calcular la velocidad de ascenso haciendo uso del diagrama del segmento 1-2 (fig 7.2). Dado que el punto 1 tiene su movimiento restringido en horizontal y el punto 2 en vertical la velocidad de ascenso del punto 2 será igual a la que tendría de descenso el punto 1.

$$v_s = v_t \cdot \cos \alpha = 0.24 \text{ m/s}$$

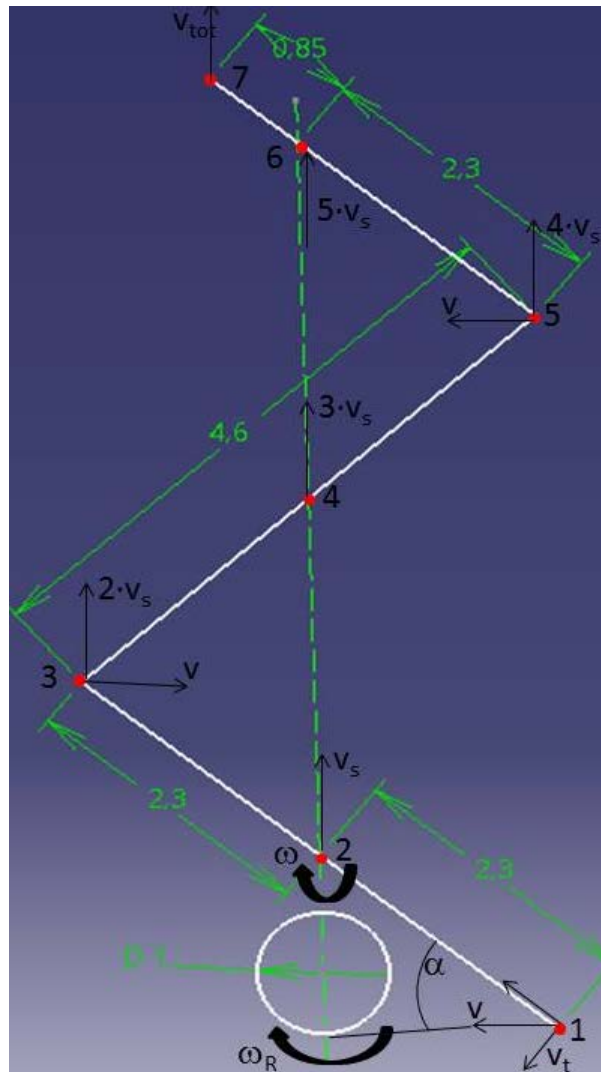


Figura 7.1 Diagrama cinemático

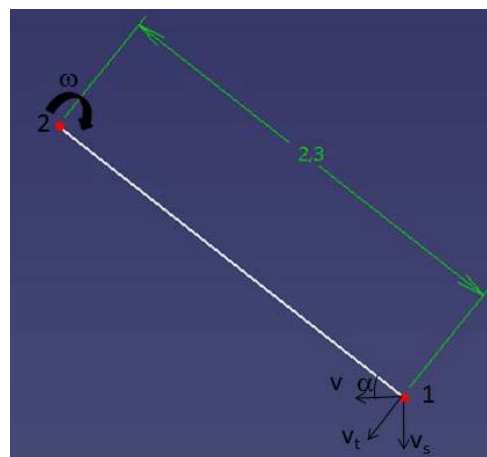


Figura 7.2 Diagrama cinemático del segmento 1-2

Por simetría en los segmentos 2-3, 3-4, 4-5, 5-6 se calcularía exactamente igual por separado. Pero dado que están unidos uno detrás de otro la velocidad del punto siguiente será la suya calculada por separado más la que tendría el punto anterior. Por lo que la velocidad de ascenso del punto 6 sería cinco veces la velocidad del punto 2, es decir **1.225 m/s**.

Finalmente para calcular la velocidad de ascenso de la plataforma superior solo hay que saber a velocidad asciende el punto 7. Para ello se vuelve a hacer uso de los diagramas cinemáticos y se representa el del segmento 6-7 (fig 7.3) para calcular su velocidad por separado.

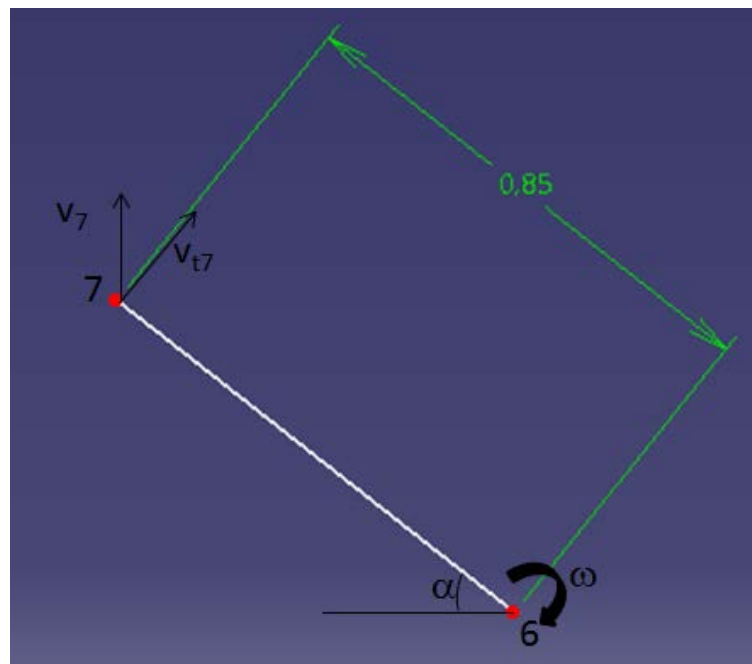


Figura 7.3 Diagrama cinemático del segmento 6-7

$$v_{t7} = \omega \cdot 0.85m = 0.12 \frac{m}{s}$$

$$v_7 = v_{t7} \cdot \text{sen}(90 - \alpha) = \mathbf{0.09 m/s}$$

Ya que tenemos todas las velocidades necesarias la velocidad de ascenso total en ese instante es:

$$v_{tot} = 1.225 \frac{m}{s} + \frac{0.09m}{s} = \mathbf{1.315 m/s}$$

El otro cálculo que se va a realizar es la velocidad máxima que alcanza el ariete dependiendo del ángulo de la cuerda que lo sujeta respecto a la vertical como se muestra en el diagrama (fig 7.4) en este caso será de 45 grados.

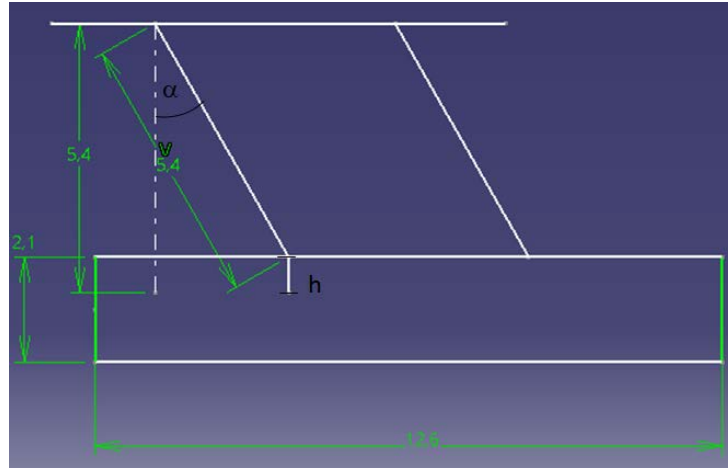


Figura 7.4 Diagrama cinemático del ariete

La forma de calcularlo es como si fuera un péndulo ya que es un movimiento simétrico. Se desprecia el rozamiento con el viento y esto nos permite aplicar el teorema de la conservación de la energía mecánica en el centro de gravedad del tronco. El cual nos dice que, en ausencia de rozamiento, la energía potencial se convierte en energía mecánica y viceversa.

Con lo cual si queremos saber la velocidad solo hay que saber que altura sube el tronco respecto al estado de reposo. Para ello usamos un diagrama parecido al anterior pero simplificado para el centro de gravedad y mediante trigonometría obtenemos el valor de h (fig 7.5).

$$\beta = \frac{180 - \alpha}{2}$$

$$\gamma = 90 - \beta = 90 - \frac{180 - \alpha}{2} = \frac{180 - 180 + \alpha}{2} = \frac{\alpha}{2}$$

$$x = \sqrt{5.4 + 5.4^2 - 2 \cdot 5.4^2 \cdot \cos \alpha} = \sqrt{2 \cdot 5.4^2 \cdot (1 - \cos \alpha)}$$

$$h = \sqrt{2 \cdot 5.4^2 \cdot (1 - \cos \alpha)} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}$$

Tras deducir el valor de h en función de α se procede a ejecutar el teorema de la conservación de la energía mecánica. Sustituyendo el valor de h se obtiene una ecuación general y para calcular la velocidad máxima que alcanza el ariete tras moverlo 45 grados solo hay que sustituir α en dicha ecuación:

$$m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \rightarrow v = \sqrt{2 \cdot g \cdot \sqrt{2 \cdot 5.4^2 \cdot (1 - \cos \alpha)} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} = 5.57 \text{ m/s}$$

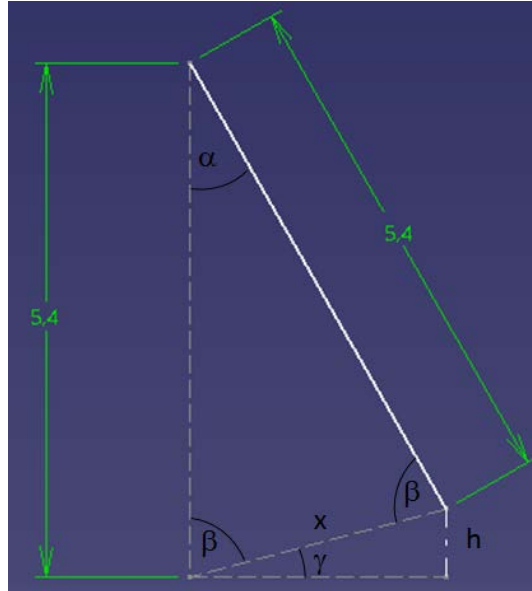


Figura 7.5 Diagrama para la obtención de h.

No es una velocidad muy grande pero si tenemos en cuenta el volumen del tronco que es de 43.64 m^3 , multiplicando por la densidad de la madera que se suele usar en construcción, que está alrededor de los 400 kg/m^3 , (<http://normadera.tkknika.net/es/content/densidad>) se obtiene una masa de 18656 kg . Eso se traduce en que el impulso ejercido por el tronco en el punto de impacto, sin que rebotara después del choque, es de unos:

$$\text{Impulso} = m \cdot v = 18656 \text{ kg} \cdot 5.57 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 103913 \text{ N} \cdot \text{s}$$

7.2. Pozo Mágico

En el caso del pozo, ya sabemos que por la disposición de las cuerdas se consigue levantar el cubo ocho metros solo tirando de un metro de cuerda. Pero a continuación se va a hacer un cálculo de la fuerza que sería necesaria para elevar el cubo. Para ello se realiza el cálculo de las tres poleas por separado, con su correspondiente diagrama de fuerzas (fig 7.6), (considerando que no tienen ni radio ni masa) desde abajo hasta la de arriba del todo donde se obtendrá la fuerza total necesaria para elevar el cubo, el cual se considera que no tiene masa. El volumen de agua del cubo de la maqueta a escala real es de 0.15 m^3 y multiplicando por la densidad del agua (1000 kg/m^3) se obtiene una masa de agua de 150 kg con el cubo lleno hasta el borde.

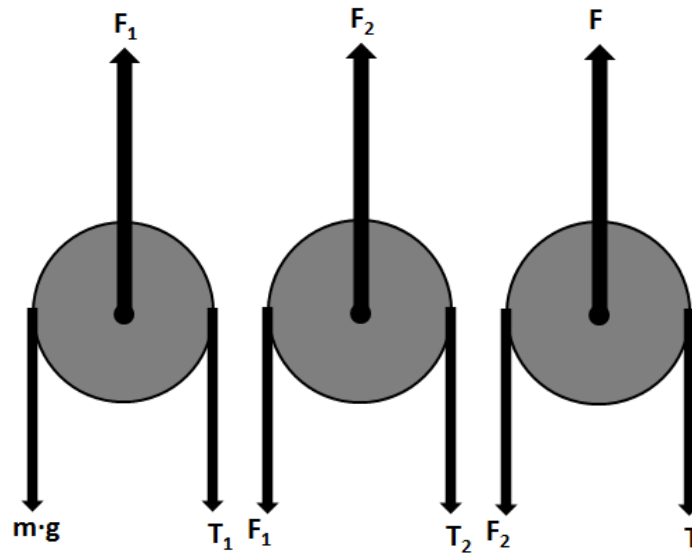


Figura 7.6 (izqda.) primera polea; (centro) segunda polea; (dcha) tercera polea

El cálculo es el mismo en las tres poleas variando los resultados según se obtengan en la polea anterior. Al considerar que la polea no tiene ni masa ni radio las fuerzas que apuntan hacia abajo deben ser iguales ($m \cdot g = T_1$, $F_1 = T_2$ y $F_2 = T$). Por igualación de fuerzas verticales se obtiene.

$$F_1 = m \cdot g + T_1 \rightarrow F_1 = 2943 \text{ N}$$

$$F_2 = F_1 + T_2 \rightarrow F_2 = 5886 \text{ N}$$

$$F = F_2 + T \rightarrow F = \mathbf{11772 \text{ N}}$$

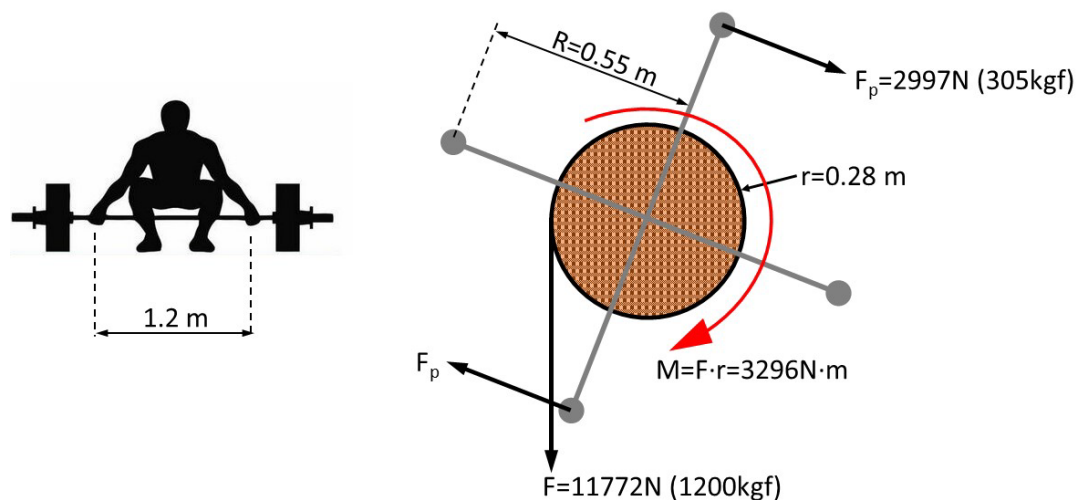


Figura 7.7 Diagrama de momentos en el torno del Pozo Mágico ($F \cdot r = 2F_p \cdot R$)

El momento ocasionado por esa fuerza sobre el torno ($M=F \cdot r$), teniendo en cuenta que el torno tiene un radio de 0.28 m, es de 3296 N·m (fig. 7.7). Este artefacto, según la maqueta (fig 4.26), era usado para subir el cubo por un solo hombre contrarrestando ese momento por aplicación de un par de fuerzas sobre la manivela de 0.55 m de radio (fig. 7.7). Este par de fuerzas se resuelve igualando los momentos sobre el eje de giro del torno:

$$Fr = 2F_p R$$

$$M = R \cdot F_p + R \cdot F_p = 2R \cdot F_p \rightarrow F_p = 2997 \text{ N (305kgf)}$$

Es una fuerza excesivamente grande para que la haga solo un hombre, por lo que para que esto fuera posible, habría que reducir el radio del torno. Por ejemplo, para $r=0.1$ m, el momento sería de **1177 N·m** y la fuerza que tendría que aplicar el hombre sería de **$F_p=1070$ N (109 kgf)**. No obstante, sigue siendo una fuerza demasiado grande y no hay que olvidar que no se puede disminuir el radio del torno sin que se vea comprometida la integridad estructural del mismo. Si, paralelamente, aumentáramos la longitud de la manivela, por ejemplo, a $R=0.75$ m, la fuerza a aplicar sería sólo de **$F_p=785$ N (80 kgf)**, pero ya, por razones de envergadura de la propia manivela, probablemente serían necesarios dos hombres para manejar el torno.

8. CONCLUSIONES

A partir del trabajo expuesto en la presente Memoria, se han podido alcanzar las siguientes conclusiones:

- Primera.** A la vista de lo expuesto, se puede concluir, de manera general que se han alcanzado de manera satisfactoria todos los objetivos propuestos para el TFG, tanto desde el punto de vista formativo, como tecnológico.
- Segunda.** Así, se han recopilado datos de los mecanismos objeto de este TFG (*Demolador de Fortalezas y Pozo Mágico*) y de otros mecanismos similares descritos en el código conocido como “Libro de los Secretos” del ingeniero andalusí Al-Murādī.
- Tercera.** Utilizando como software de diseño el *CATIA*, se han diseñado los mecanismos que reproducen los movimientos de las máquinas originales y se ha llevado a cabo su posterior reconstrucción virtual.
- Cuarta.** Se ha descrito el montaje “do it yourself” de una impresora 3D, junto con una serie de modificaciones realizadas sobre el modelo original para aumentar su usabilidad.
- Quinta.** Utilizando impresión 3D y a partir de los archivos generados con el software *Ultimaker CURA*, se ha obtenido una reproducción funcional a escala de ambas máquinas, ateniéndonos siempre a las limitaciones de tamaño y precisión de la impresora empleada. Este último proceso ha permitido constatar que el PLA, como polímero de impresión, no ofrece la rigidez necesaria para que los ejes del mecanismo de elevación del *Demolador de Fortalezas* funcionen de forma absolutamente correcta, todo ello también debido a la adaptación que ha habido que hacer para manejar desde fuera un artefacto que está inicialmente concebido para ser manejado desde su interior. Por otro lado, el modelo del *Pozo Mágico* tampoco alcanza con total exactitud la finalidad deseada, debido al desajuste en escala tanto de las poleas empleadas como de los nudos realizados.
- Última.** Se ha realizado un estudio mecánico de los elementos móviles de ambos artefactos haciendo numerosas suposiciones debido a la imprecisión de las descripciones que aparecen en el código de Al-Murādī. Los resultados obtenidos, junto a algunos comentarios al respecto recogidos en la bibliografía, arrojan dudas razonables de si estos mecanismos llegaron a ser realmente contruidos y/o empleados o se quedaron en un mero proyecto.

9. BIBLIOGRAFÍA

- 1.- H. ESCOLAR *Historia de las bibliotecas*. Fundación Germán Sánchez Ruipérez, 1990.
- 2.- J. MARTÍNEZ DE SOUSA *Pequeña historia del libro* (4ªed.). Trea, 1999.
- 3.- S. DAHL *Historia del libro*. Alianza Universidad, 1983.
- 4.- U. ECO *El nombre de la rosa*. Lumen, 1984.
- 5.- J.M. VIGUERA (coord.) Y OTROS *Los reinos de Taifas. Al-Andalus en el siglo XI. Historia de España Menéndez Pidal, vol. VIII-1*. Espasa Calpe, 1994.
- 6.- Alī Ibn Khalaf al-Murādī (principios del siglo XI) راسا باتك (kitab 'asrar al'afkar alnnatija, *El Libro de los Secretos Resultantes de las Ideas*), código conocido como “Libro de los Secretos”. Edición facsímil, Leonardo3 (www.leonardo3.net).
- 7.- VARIOS AUTORES *The Book of Secrets in the Results of Ideas. Incredible Machines from 1000 Years Ago from Alī Ibn Khalaf al-Murādī* (Tomo de estudio). Leonardo3 Pub., 2008.
- 8.- *Computer-Aided Three-dimensional Interactive Application (CATIA)*, Dassault Systèmes SE, 2016 (v2).
- 9.- Cura 3.6, Ultimaker B.V., 2018.

ARCHIVOS Y PLANOS

Los archivos resultantes del modelado en CATIA, así como los empleados en CURA para la impresión 3D de las distintas piezas que constituyen los modelos se pueden consultar previa petición al autor.

Los planos de los modelos se recogen a continuación:

Plano 1: Demoledor de Fortalezas: Plataforma inferior

Plano 2: Demoledor de Fortalezas: Mecanismo de tijera para elevar la plataforma superior

Plano 3: Demoledor de Fortalezas: Plataforma superior

Plano 4: Demoledor de Fortalezas: Soporte para el ariete

Plano 5: Demoledor de Fortalezas: Plataforma superior con soporte y ariete

Plano 6: Pozo Mágico: Vista general de la construcción y fijación del sistema de poleas

Plano 7: Pozo Mágico: Torno

