



UNIVERSIDAD DE JAÉN  
*ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JAÉN*

Trabajo Fin de Grado

**ESTUDIO HISTÓRICO-  
TECNOLÓGICO Y  
RECONSTRUCCIÓN REAL  
A ESCALA DE PROCESOS,  
MÁQUINAS O  
MECANISMOS ANTIGUOS:  
EL *TREBUCHET***

**Alumno:** José Luis Ródenas Vigil

**Tutor:** Prof. D. Rafael López Garcia

**Dpto:** Ingeniería Mecánica y Minera

**Jaén, a junio de 2021**



**UNIVERSIDAD DE JAÉN**

**ESTUDIO HISTÓRICO-TECNOLÓGICO Y  
RECONSTRUCCIÓN REAL A ESCALA DE  
PROCESOS, MÁQUINAS O MECANISMOS  
ANTIGUOS:  
*EL TREBUCHET***

**Alumno: José Luis Ródenas Vigil**

**Junio de 2021**

## **Resumen**

Las catapultas son instrumentos de guerra que se han utilizado durante siglos, no se sabe con certeza el autor de la primera catapulta, aunque muchos historiadores coinciden en que su primera aparición pudiera darse en China.

Al principio todas ellas se accionaban con la fuerza humana, con cerca de una docena de hombres, que tiraban de una cuerda para accionar el mecanismo.

Al tiempo aparece el *trebuchet*, invento atribuido a *Mardi Ibn Ali al-Tarsusi*, un tipo de catapulta que utiliza la energía potencial de un contrapeso para lanzar el proyectil más lejos y con más potencia que con las antiguas catapultas.

En la actualidad, podemos encontrar diversos mecanismos que utilizan el mismo principio que el del *trebuchet*.

En este trabajo se realiza un diseño asistido por ordenador del mismo, así como la reproducción a escala en un modelo de madera. También se estudian las distintas propiedades físicas que intervienen en su funcionamiento.

## **Palabras clave**

Contrapeso, proyectil, catapulta, guerra de asedio, *trebuchet*, diseño asistido por ordenador, modelado geométrico, análisis físico, reconstrucción a escala.

## **Abstract**

Catapults are war instruments that have been used for centuries; the author of the first catapult is not known with certainty, although many historians agree that their first appearance could have occurred in China.

At first, all of them were operated by human force, with about a dozen men, who pulled a rope to operate the mechanism.

At the same time the *trebuchet* appears, an invention attributed to Mardi Ibn Ali al-Tarsusi, a type of catapult that uses the potential energy of a counterweight to launch the projectile further and with more power than with the old catapults.

At present, we can find various mechanisms that use the same principle as the *trebuchet*.

On this work, a computer-aided design of the device is carried out, as well as the scale reproduction in a wooden model. The different physical properties involved in its operation are also studied.

## **Key words**

Counterweight, projectile, catapult, siege warfare, trebuchet, computer aided design, geometric modelling, physical analysis, scale reconstruction.

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2. ANTECEDENTES</b> .....	<b>2</b>
2.1. Contexto histórico medieval .....	2
2.1.1. Situación histórica en Europa .....	2
2.1.2. Situación histórica en la Península Ibérica .....	3
2.2. Ingeniería y tecnología en la época.....	4
2.3. Principales ingenieros del siglo XII .....	5
2.3.1. Mardi Ibn Ali al-Tarsusi: “Inventor” del trabuquete de contrapeso.....	5
2.3.2. Yaqub Ibn Sabir Baghdadi Manjaniqi .....	7
2.3.3. Yusuf Ibn Urunbugha al-Zaradkash .....	7
2.4. Maquinaria de guerra de la época .....	7
2.4.1. Guerras de asedio en la antigüedad .....	8
2.4.2. Ballestas, arcos y otras armas de la época .....	9
2.5. Trabauquetes .....	10
2.5.1. Origen y evolución .....	10
2.5.2. Objetivo del uso de los trabauquetes.....	13
2.5.3. Principio de funcionamiento del trabuquete .....	13
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
<b>4. MATERIAL Y MÉTODOS</b> .....	<b>15</b>
4.1. Construcción de la maqueta del trabuquete de contrapeso .....	15
4.1.1. Consideraciones iniciales .....	15
4.1.2. Diseño asistido por ordenador .....	16
4.1.3. Simulación con elementos finitos.....	23
4.1.4. Construcción del modelo .....	24
4.2. Propiedades físicas .....	32
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>37</b>
<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	<b>43</b>
<b>7. ANEXOS</b> .....	<b>45</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>48</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

Como bien es sabido, de la necesidad de ataque y defensa que se produce en épocas de guerra, surgen grandes avances tecnológicos que tras su perfeccionamiento pasan a formar parte de la vida cotidiana. Ejemplo de ello pueden ser el internet, la energía nuclear o la penicilina (*Durán, 2013*).

El invento en el cual se centra este trabajo es en el trabuquete de contrapeso, el cual surge a raíz de las guerras de asedio producidas durante las Cruzadas del siglo XII (Bruhn, 1988).

Los ataques a ciudades y fortificaciones no son algo novedoso en el siglo XII. Sin embargo, es en esta época cuando se produce el mayor avance en esta modalidad bélica debido a que la aparición del trabuquete de contrapeso supuso una serie de avances técnicos que lo hacían más eficaz que otro tipo de trabuquetes. En comparación con las máquinas presentes en la época, es más preciso y más destructivo debido a su mayor capacidad de lanzamiento en cuanto al alcance y al peso del proyectil (*Suñé, 2013*).

No se conoce de manera exacta cuál es el origen o cual es el proceso de creación mediante el cual se ha alcanzado el desarrollo del trabuquete de contrapeso. Según los artículos de varios historiadores, se pueden interpretar dos puntos de vista sobre su aparición. Algunos de ellos defienden el desarrollo del trabuquete de contrapeso a partir de mecanismos de tensión como las hondas romanas, otros lo atribuyen a la evolución de pequeñas máquinas usadas para lanzar dardos mediante mecanismos de torsión.

Sin embargo, un hecho que no admite controversia es el autor a quien se atribuye este artefacto, *Mardi Ibn Ali al-Tarsusi*.

Tal es la influencia que ha producido el tipo de mecanismo de contrapeso que utilizaba el *trebuchet* que podemos encontrarlo en multitud de sistemas modernos. En la actualidad alguna aplicación de este mecanismo puede ser en ascensores y grúas, entre otros.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. Contexto histórico medieval

#### 2.1.1. Situación histórica en Europa

En el siglo XII Europa proviene de una sociedad completamente feudal y en la cual abundan las invasiones y reconquistas. El imperio normando poseía Inglaterra y el sur de Italia, los bizantinos se encontraban en clara decadencia y su retroceso era cada vez mayor, mientras que en Alemania y en el norte de Italia se empezaban a consolidar sus primeros estados.



Figura 1: Organización política territorial de Europa Occidental a mediados del siglo XII. Tomado de D. Cotts (2013).

Ya entrado el siglo XII comienza el declive del feudalismo debido a la desconfianza de los vasallos y empieza a ganar fuerza la burguesía, dotando la situación de cierto aire individualista. Ese individualismo se transforma en un vacío de poder el cual es ocupado de manera gradual por la iglesia, lo que da lugar a un feudalismo eclesiástico cuya principal consecuencia es la expansión del cristianismo (De Ayala, 2007).

En cuanto a las ciudades, a finales del siglo XI y principios del siglo XII la Europa Occidental experimenta el inicio de una notable etapa de crecimiento en numerosos

aspectos, tanto social, como demográfico y comercial, la cual se traduce en el surgimiento de un proceso de urbanización medieval (*González, 1993*).

Gran parte de las ciudades de la época se encontraban amuralladas con el fin de protegerse de posibles atacantes, además de crear un gran escalón entre el mundo burgués y el campesino. A pesar de esta separación de clases, tanto física como social, la reorganización de las ciudades y la división de los trabajos en distintos gremios permitió que se instaurara en ellas una gran sensación de libertad (*García, 1995*).

También cabe mencionar que es en la Edad Media, gracias a los distintos gremios, cuando parte de los ciudadanos empiezan a vivir de sus propios oficios u otros servicios y la agricultura deja de ser la única actividad comercial rentable. Por otra parte, los excedentes de la agricultura son vendidos en las ciudades, lo que, aparte de dar comienzo al comercio, hace que el mundo rural y urbano sigan estando vinculados (*González, 1993*).

### 2.1.2. *Situación histórica en la Península Ibérica*

Al inicio de la Edad Media, en el siglo VIII, se produce la gran expansión del islam en la península ibérica, dejando algunos núcleos cristianos aislados en la cornisa cantábrica. No es hasta el siglo XI que los reinos de taifas experimentan una gran decadencia política que los hispano-visigodos no dudan en aprovechar. El Califato Omeya sufre un imparable retroceso territorial, en el cual cabe destacar la decadencia de *Al-Andalus* y la desintegración del Califato de Córdoba (Ministerio de Defensa, 2006).

Por lo tanto, a inicios del siglo XII la Península Ibérica se encuentra en una fase de reconquista, en cuyo final se produce un incremento notable en el contexto económico, un desarrollo de una sociedad feudal y la reintegración hispano-cristiana.

Las ciudades en la península ibérica también se encontraban amuralladas, como en gran parte de Europa, otorgando también ese aire individualista y aspecto de fortaleza que se pretendía conseguir con ello. Además, en la península se instauraron los fueros, lo que, sumado a la aparición de los gremios como en el resto de Europa, hizo del mundo urbano un ámbito más liberal (*González, 1993*).

En cuanto al estudio, son realmente escasos los materiales arqueológicos procedentes de la época medieval, sin embargo, se facilita el conocimiento del armamento de la época gracias a la conservación de artes gráficas y literarias.

Algunos ejemplos de estas obras literarias que se conservan en la actualidad son: *la Biblia de Roda y la Biblia de Ripoll* del siglo XI (Bruhn, 1988).

## 2.2. Ingeniería y tecnología en la época

En la Edad Media el hombre todavía tenía una conexión estrecha con la naturaleza, las casas estaban hechas de madera, se calentaban e iluminaban con fuego, ya fueran hogueras o velas de resina o sebo (Carmona, 2001).

En cuanto a la guerra, tanto en el siglo XII como en épocas anteriores, la capacidad militar de los guerreros se veía definida, casi únicamente, por el alcance de sus armas. Durante la Alta Edad Media, la propulsión de proyectiles en las armas era puramente de carácter mecánico, donde la fuerza que se debía ejercer sobre el mecanismo provenía del esfuerzo humano.

Esta fuerza mecánica fue utilizada en arcos y ballestas, las armas más eficientes del siglo XI, seguidas de las hondas y jabalinas. Estas armas ligeras permitían un ataque móvil y la adopción de distintas formas de ataque. Sin embargo, tuvo más cabida en la época el resurgimiento de maquinaria griega y romana destinada a abatir muros, como es el *Trabuquete*. Esta última técnica de ataque requería un despliegue más técnico que táctico. (Soto, 2011).

Los trabuquetes llegaron a coexistir, a mediados del siglo XIII en la Europa Occidental, con las primeras armas que usaron pólvora (Sierra, 2014), incluso se tiene constancia de que estos fueron utilizados hasta bien entrado el siglo XV, en algunas ocasiones siendo complementados en sus ataques por la nueva artillería pirobalística (Ruiz y Rebollo, 2008).

El hecho de que los trabuquetes llegaran a coexistir con las primeras armas de fuego a pesar de haber aparecido en tiempos muy anteriores demuestra o evidencia que eran armas muy "cotizadas" en ese momento.

En el mismo siglo de su invención, pero anterior a la pólvora, hay constancia de que en Sevilla fue utilizado armamento de combustión química al que se le dio el nombre de <<fuego griego>>, sin embargo, éste tiene su origen en el siglo VII, durante los asedios a Constantinopla por parte de los bizantinos (Ministerio de Defensa, 2006).



## 2.3. Principales ingenieros del siglo XII

Una actividad determinante en el desarrollo de la historia en general, pero también de la guerra, es la escritura. Desde tiempos muy tempranos los escritores transmitían una imagen de gran sabiduría, la cual se veía reflejada en sus obras. Algunos de ellos tuvieron grandes influencias en actos bélicos, algunos por crear nuevas estrategias de ataque y otros por el diseño de maquinaria que pudiera ser utilizada en esos ataques.

Muchos de ellos son conocidos hoy en día, más que por sus obras literarias, por ser los “antiguos ingenieros bélicos” de mayor influencia (Coetzee, 2013).

### 2.3.1. *Mardi Ibn Ali al-Tarsusi*: “Inventor” del trabuquete de contrapeso.

*Mardi Ibn Ali al-Tarsusi* fue un escritor y experto en asuntos militares de la dinastía ayyubí del siglo XII. Sus escritos han resultado ser un recurso de valor incalculable para numerosos historiadores militares y medievales.

Considerando la influencia de numerosos escritores, tanto en el desarrollo de armas como de técnicas bélicas, nace el movimiento de los llamados “Filósofos de la Guerra”, considerados también como grandes pensadores militares. Entre ellos se encuentra *Mardi Ibn Ali al-Tarsusi*, quien escribió hasta 11 tratados militares, incluyendo un manual militar para Salah al-Din en el año 1187, titulado *Instruction of the Masters on the Means of Deliverance in Wars from Disaster, and the Unfurling of the Banners of Information: On Equipment and Engines which aid in Encounters with Enemies*. En él se puede encontrar el primer registro escrito de un trabuquete de contrapeso, es por ello que la invención de este tipo de trabuquete se atribuye a *al-Tarsusi* (Coetzee, 2013).

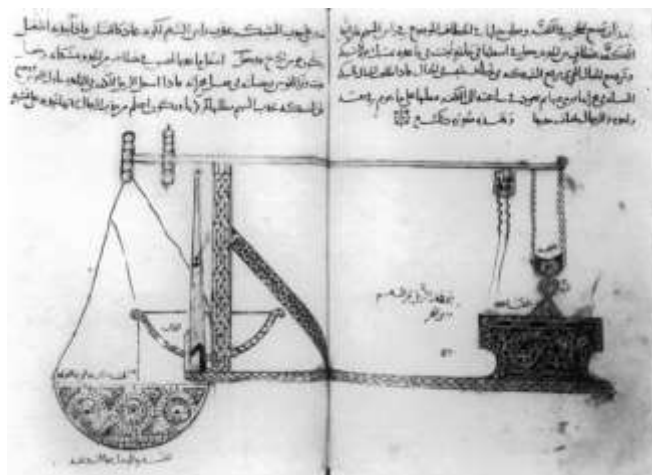


Figura 2: Trabuquete de Mardi Ibn Ali al-Tarsusi. Tomado de Chevedden (2002).

El trabuquete descrito por *al-Tarsusi*, hoy en día sería considerado un trabuquete híbrido. En el manual, *al-Tarsusi*, afirmaba que su diseño tenía la misma fuerza de lanzamiento que un trabuquete de tracción empujado por 50 hombres debido a que la fuerza de la gravedad actúa en una sola dirección, en cambio, en los de tracción, a pesar de que los hombres que ejercían la fuerza estuvieran muy bien alineados, siempre había una pequeña desviación que hacía perder eficiencia al mecanismo. *Al-Tarsusi* también asegura en su manual, que el uso de esta única fuerza [la gravedad] haría que el trabuquete tuviera un mayor alcance y fuera más preciso. Lo que resultó ser cierto y dotó de gran ventaja a este tipo de arma (*Coetzee, 2013*).

El diseño híbrido del trabuquete incluye una honda que da un efecto de látigo al proyectil (Figura 3), incrementando el alcance de este. Además, el trabuquete que diseñó *al-Tarsusi* tenía ruedas bajo su base, lo que permitió el desplazamiento de esta gran arma, que lo hizo todavía más formidable (*Coetzee, 2013*).

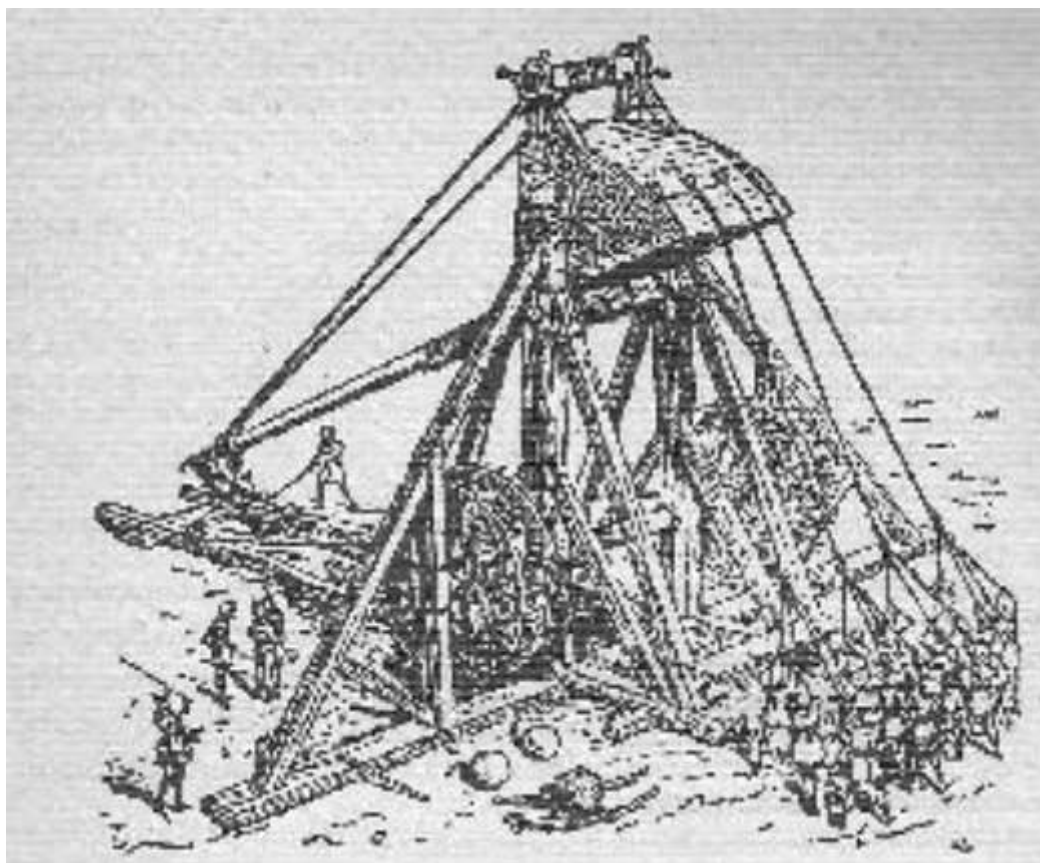


Figura 3: Representación de un posible trebuchet híbrido en el que se observa el efecto de honda realizado gracias a la fuerza humana. Tomado de: Soto (2011).

El trabuquete de *Mardi Ibn Ali Al-Tarsusi* fue probado en el asedio de la ciudad de Damietta, en Egipto, en el año 1218, se utilizó para lanzar rocas de unos 200 kilos a las murallas de la ciudad (*Coetzee, 2013*).

Como se ha mencionado anteriormente, el trabuquete de *al-Tarsusi* es considerado híbrido debido a que su contrapeso era de tamaño reducido. El “nacimiento” del trabuquete de contrapeso tal y como es conocido hoy en día se dio en las Cruzadas, cuando los ingenieros europeos decidieron aumentar la masa del contrapeso con el objetivo de aumentar la potencia del trabuquete híbrido (Coetzee, 2013).

### 2.3.2. *Yaqub Ibn Sabir Baghdadi Manjaniqi*

Baghdadi (1159-1229) fue un hombre con grandes conocimientos de matemáticas y experto en la construcción y uso de trabuquetes de contrapeso, por ello fue muy importante en la época ya que era capaz de calcular el alcance de la artillería y así los asentamientos de ataque se podían posicionar de una manera mucho más precisa para la ofensa. Gracias a su experiencia y conocimientos pudo participar satisfactoriamente en la defensa de distintos ataques a Bagdad. Tal fue su importancia en la construcción y uso de “*manjaniqs*” (trabuquetes de contrapeso) que se le otorgó su último nombre en señal de reconocimiento (Coetzee, 2013).

### 2.3.3. *Yusuf Ibn Urunbugha al-Zaradkash*

Posterior a *Ali al-Tarsusi*, en el año 1462, *Yusuf Ibn Urunbugha al-Zaradkash* escribió un libro sobre trabuquetes: “*Kitab aniq fi al-manajaniq*”, el cual se considera el tratado técnico conservado más importante sobre los trabuquetes. En él no solo se ofrece información operativa de esta máquina y se detallan los pasos para su construcción, sino que toda esa información se encuentra acompañada de gran cantidad de ilustraciones (Chevedden, 2002).

## 2.4. **Maquinaria de guerra de la época**

A grandes rasgos y, entre otras muchas clasificaciones, dentro de las armas utilizadas en la guerra se pueden encontrar aquellas con carácter defensivo, las cuales sirven para evitar o minimizar los daños provocados por los ataques de los contrarios, y las armas de carácter ofensivo, cuya finalidad es la de causar daños al enemigo en el enfrentamiento.

Debe conocerse, que la indumentaria defensiva de los guerreros medievales no consistía todavía, en piezas de metal enteras, sino que se protegían con piezas de

malla o acolchadas, incluso el casco se confeccionaba con piezas de cuero, en ocasiones reforzado con tiras de metal. Otra arma defensiva de gran importancia en la época es el escudo (Ministerio de Defensa, 2006).

Las armas ofensivas, en cambio, podían ser muy variadas; portaban cuchillos y espadas, incluso lanzas y cadenas para golpear a los adversarios cercanos, sin embargo, también estaban presentes instrumentos de tensión como ballestas y arcos para aquellos que se encontraran a mayor distancia (Ministerio de Defensa, 2006).

Como se ha mencionado anteriormente, el siglo XII y gran parte de la Edad Media, está definida por el enfrentamiento entre cristianos e islámicos, por ello cabe destacar dentro del ámbito bélico, que el armamento del ejército islámico era más ligero, lo que probablemente tuvo gran influencia en las batallas y dio ventaja, ya sea técnica o psicológica, al ejército cristiano.

#### 2.4.1. *Guerras de asedio en la antigüedad*

Como bien se dice en el artículo de *Suñé (2013)*, es sabido que la Edad Media destaca por la proliferación e importancia que en ella tuvieron los asedios tanto a castillos, ciudades o cualquier otro tipo de fortificaciones. Estos asedios se ven caracterizados por constar de fases de ataque bien definidas, entre las cuales se comprenden: el tanteo, la instalación del campamento, la instalación de la artillería y la toma de control mediante el bloqueo del lugar asediado. Esta “nueva” forma de ataque en la cual la artillería de gran tamaño adquiere un emplazamiento fijo, da pie a la aparición de una de las armas más utilizadas de la época, el *Trebuchet*.

Cabe mencionar que el uso de trabuquetes no solo es un hecho significativo en los asedios, sino que también tuvo una gran influencia en la arquitectura de la época ya que, una vez instaurados estos nuevos tipos de ataques, las murallas de las fortificaciones se empezaron a reforzar y a construirse de manera que fueran más resistentes (*Karlsson, 2018*).

Anterior a la “reaparición” de la maquinaria pesada para derribar muros, las técnicas utilizadas en los asedios consistían en el acercamiento a las murallas o fortificaciones y la destrucción de ellas desde la base. Como es lógico, este proceso era lento y arriesgado debido a que los defensores también poseían armas para su protección. Este tipo de ataque requería métodos para la protección de aquellos que se aproximaban a la estructura a atacar, para alcanzarla de la forma más segura

posible lo hacían en el interior de casetas móviles, las cuales recibieron el nombre de *mantas* o *gatas* (Ministerio de Defensa, 2006).

Es por la lentitud y el desgaste que suponían estos métodos de ataque, que se recurre a “las ideas de la Antigüedad, basadas en la neurobalística” (Soto, 2011).

Así es como se da el nacimiento de este nuevo tipo de guerra, estática, desgastante y dependiente de la capacidad de resistir de una fortaleza y la capacidad técnica de los atacantes (Soto, 2011).

#### 2.4.2. *Ballestas, arcos y otras armas de la época*

Como se menciona en el artículo de *Rovira y Casanovas (2006)*, se conoce con certeza que entre los años 1147 y 1149, durante las conquistas de Ermengol VI, por ejemplo, el armamento militar constaba de lanzas, jabalinas, escudos, ballestas, dardos y cuchillos.

Gracias a los hallazgos de distintas excavaciones realizadas en el norte de la península se ha conseguido definir la morfología de algunos tipos de cuchillos utilizados en la época, por ejemplo, se encontraron hojas de “*dorso recto, extremo aguzado y filo levemente convexo*”, una tipología coincidente con asentamientos de *al-Andalus* (Rovira y Casanovas, 2006).

Respecto a arcos y ballestas, no tuvieron una gran influencia en la Península Ibérica (excepto en la Reconquista y la rendición de Granada), pero sí en Tierra Santa, muy utilizadas por los musulmanes. Se pueden mencionar varios tipos de arcos como el turco, el árabe o el inglés, este último introducido en la península en el siglo XIV. Tanto Baleares como Córdoba tuvieron mucha importancia en cuanto a la construcción de arcos y ballestas. Las ballestas eran construidas con madera y cuerna de ciervo, las de lujo se encontraban ornamentadas con nácar, marfil o metales (Bruhn, 1988).

Así como en el siglo XII las armas de mano protagonistas fueron la lanza y el cuchillo, durante el siglo XIII y, sobretudo en la reconquista, la espada cobró un papel muy importante. Sus hojas solían ser rectas, con dos filos y con una canal en el centro donde, debido al gran impacto que tuvieron en la época, en ocasiones portaban inscripciones de hilo de cobre, latón o plata (Bruhn, 1996).

## 2.5. Trabuquetes

El término *trebuchet* es algo difuso, ya que hay autores que lo consideran sinónimo de catapulta o una variante más concreta de estas, otros autores creen que es el sucesor o “heredero” de las catapultas, o incluso simplemente se les llama trabuquete a todos aquellos mecanismos con una apariencia similar cuyo funcionamiento se rige por una acción parabólica.

### 2.5.1. Origen y evolución

Se considera que los trabuquetes tienen su origen en Oriente Medio y fueron utilizados en las guerras de Europa durante la época medieval (*de Souza, 2020*).

El origen del trabuquete no es conocido con entera certeza, sin embargo, son muchos los historiadores militares que afirman que esta arma de asedio es un ingenio que se deriva de la sucesión y evolución de diversos mecanismos utilizados en épocas muy anteriores a su aparición.

Para conocer, desde el inicio, la evolución de las armas que han dado lugar al trabuquete, se debe mencionar que ya en la época de los romanos se utilizaban hondas para atacar a los contrincantes. Estas hondas no eran más que una doble tira de materiales como pueden ser el cuero o las fibras vegetales, la cual el hondero hace girar por encima de su cabeza y al dejar de hacerlo, éste suelta uno de los extremos, haciendo que el proyectil salga propulsado a gran velocidad. En ocasiones se añadió un bastón en forma de Y a esta honda, creando un artefacto muy similar a lo que hoy en día es conocido como “tirachinas” (*Aranegui, 2003*).

En adición al uso de la honda, durante el imperio romano cabe destacar también, otros dos tipos de armas que se encuentran en el camino hacia el desarrollo del trabuquete de contrapeso, ingenios que fueron heredados del mundo griego helenístico. En primer lugar, utilizaron pequeñas máquinas cuya función era el lanzamiento de dardos. De ellas, destaca la alta precisión y las grandes distancias que estos dardos podían llegar a alcanzar, además de que su funcionamiento estaba basado ya, en mecanismos de torsión de haces de tendones.

En segundo lugar, cabe mencionar la artillería de mayor tamaño que estos empleaban para los asedios, la cual ya no solo tenía como finalidad el lanzamiento de dardos, sino que también era utilizada para arrojar rocas más pesadas (*Ministerio de Defensa, 2006*).

Una vez llegados los visigodos a la península ibérica, en el siglo V, estos pueblos germanos adquirieron los conocimientos para la construcción y uso de estas máquinas de asedio. En el texto del *Ministerio de Defensa* (2006) se dice que las armas que se usaron en el asedio de Nimes o Narbona fueron: “el ariete —máquina de guerra que consistía en una gran viga de madera, provista en uno de sus extremos de un recio y pesado remate de hierro fundido que, a veces, representaba una cabeza de carnero— ; la balista (Figura 4) —máquina que lanzaba, por medio de una rampa inclinada, piedras, flechas u otra clase de proyectiles de 50 a 100 kilogramos, a una distancia de 100 a 500 metros, servida por once hombres y empleándose en el combate y en los asedios de plazas—. Otra de las armas utilizadas eran catapultas móviles— esta máquina griega se empleaba para lanzar piedras o dardos. Se basaba en el principio de elasticidad de torsión de las cuerdas. [...], el escorpio —artilugio con forma de ballesta, que se utilizaba para lanzar flechas envenenadas”.

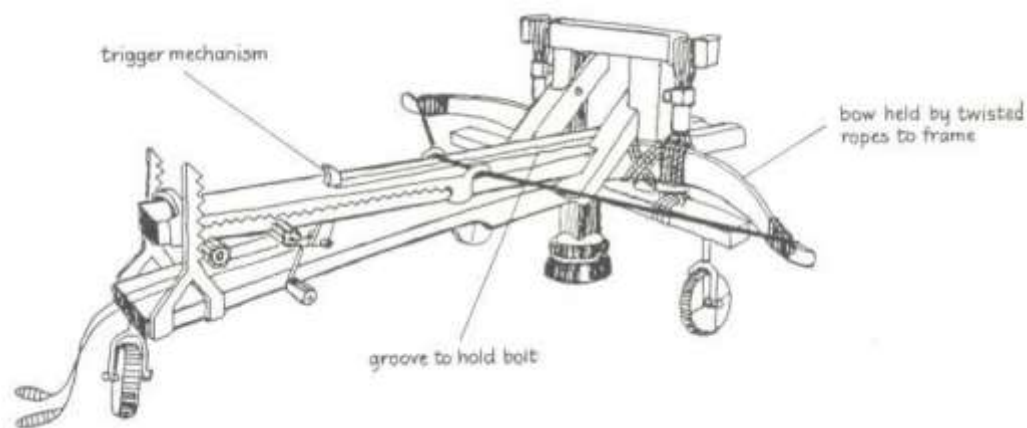


Figura 4: Dibujo de una balista. Tomado de: Dreger (2004).

Por otro lado, algunos historiadores consideran que la evolución hacia los trabuquetes de tensión (y, por ende, a los de contrapeso) tiene su origen en la honda con bastón mencionada anteriormente. Los trabuquetes de tensión fueron introducidos en la zona del Mediterráneo a finales del siglo VI (*Chevedden, 2002*).

*Ruiz y Rebollo*, en su obra *El Trabuco de Cortés* (2008), sugieren que la evolución hacia este tipo de *trebuchet* se origina en China, cuando se dotó de una base fija a la honda romana, dando lugar a un artefacto de pequeño tamaño, pero con una estructura ya muy parecida a los trabuquetes, llamado “*hou-palo*”.

Esta arma china puede ser considerada como una de las primeras catapultas de tensión, e incluso se puede pensar que de ellas derivarían las de torsión, como son el onagro (Figura 5) y el mangonel.

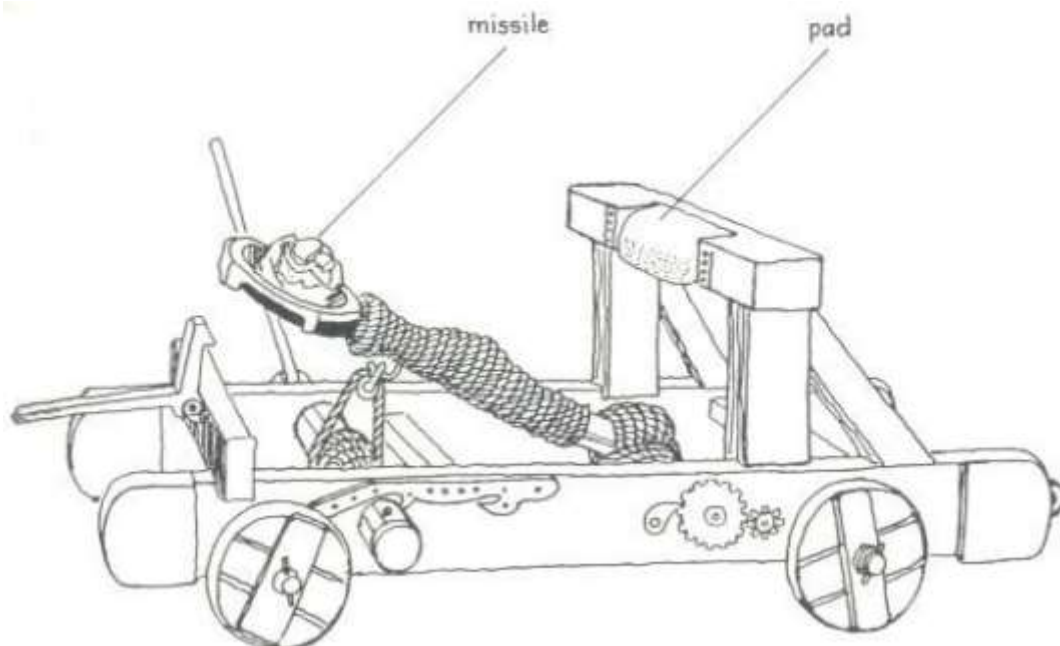


Figura 5: Dibujo de un onagro. Tomado de: Dreger (2004).

Este último era una versión mejorada del onagro en la Edad Media, fue introducido en Europa por los árabes en el siglo VI y hay constancia documental de su uso en la Península Ibérica en el año 1147, durante el asedio de Lisboa (Ruíz y Rebollo, 2008).



Figura 6: Dibujos del funcionamiento y uso del mangonel en asedios. Tomado de Ruiz y Rebollo (2008).

Dejando a un lado la incerteza del proceso evolutivo de los trabuquetes, ambas teorías confluyen en el hecho de atribuir la invención del trabuquete de contrapeso a *Al-Tarsusi*, por las ilustraciones ya mencionadas anteriormente.

El *trebuchet* fue una de las armas más importantes en numerosos enfrentamientos como la expansión del islam y los imperios mongoles, también se utilizó para propagar la epidemia de peste negra del siglo XIV, ya que los atacantes



solían lanzar cadáveres infectados al enemigo con el fin de acabar por enfermedad con el mismo a modo de guerra biológica. (*Chevedden, 2002*).

Otras ocasiones y lugares en los que hay constancia del uso del mangonel son la Segunda Cruzada, en el sitio de Aledo (Murcia) por los almorávides, así como en Andalucía, Levante e Ibiza (*Ruiz y Rebollo, 2008*).

### 2.5.2. *Objetivo del uso de los trabuquetes*

Los trabuquetes, o fundíbulos, destacaron en la época, no solo por su mayor alcance y capacidad de lanzar objetos más pesados, también lo hicieron por su exacta puntería (*Sierra, 2014*).

A pesar de existir distintos tipos de trabuquetes, todos ellos comparten una función principal, la cual es, sin duda, bombardear continua e intensamente los muros de las fortificaciones objetivo, para así, debilitar su estructura. No obstante, la función de estos no era únicamente la guerra física sino también la guerra psicológica. Fueron utilizados en numerosas ocasiones para realizar ofensivas con el fin de desmoralizar al enemigo mediante el lanzamiento de objetos que pudieran herir psicológicamente a aquellos que se encontraban en el interior, como por ejemplo cráneos u otras partes del cuerpo. Además, también se puede decir que los trabuquetes fueron utilizados para llevar a cabo guerras biológicas, ya que en ocasiones se usaron para introducir en las fortificaciones cadáveres en descomposición o con enfermedades contagiosas con la intención de propagarlas (*Suñé, 2013*).

Es importante saber que, así como los campamentos de asentamiento de los atacantes se disponían en lugares seguros y resguardados, los trabuquetes se encontraban al alcance de las armas utilizadas por los defensores, tanto es así que estas estructuras solían necesitar estructuras defensivas, llamadas *cledes*, las cuales se construían con ramas y postes de madera (*Suñé, 2013*).

### 2.5.3. *Principio de funcionamiento del trabuquete*

Se trata de un armazón en el que se apoya una palanca, en el brazo corto se sitúa el contrapeso y en el otro extremo, en el brazo largo, se coloca una honda en la que se sitúa el proyectil a lanzar (*Ruiz y Rebollo, 2008*).

Tal y como dice *Suñé* (2013), en el cuaderno de *Villard de Honnecourt* (1220-1240) se menciona la existencia de un dibujo de una máquina de asedio describiendo el funcionamiento: «*Observad los pies [soles] sobre los que se asienta en tierra. Ved*

delante los dos tornos de eje vertical [windas] y la cuerda desplegada con la que se tensa la vara. Podéis verlo en esta otra página. Hay que izar un gran peso, pues el contrapeso es muy pesado, y consiste en un canasto lleno de tierra».

En concreto esta descripción pertenece a un *trebuchet* de contrapeso, el cual constaba de una viga de madera que hacía de palanca con un brazo corto donde se ponía el contrapeso separado por un eje perpendicular del brazo más largo de donde se colocaba la munición a disparar en una honda que tenía dos cuerdas: una que estaba atada al final del brazo más largo, en su extremo y otra de la que colgaba una estaca de acero. Los anclajes de los que habla el texto de *Villard de Honnecourt* son dos armazones triangulares que contienen el eje del que pivota la viga que arrojará la carga. (Chevedden, 2011).

Una vez introducido el proyectil en la honda con su brazo situado en el punto más bajo, el cual se situaba en posición mediante el accionamiento mediante la fuerza animal o humana de los tornos de eje vertical. Después se liberaba el mecanismo dejando caer el contrapeso. Cuando la viga alcanzaba el ángulo correcto, se liberaba el lazo de la honda arrojando el proyectil (Figura 7).

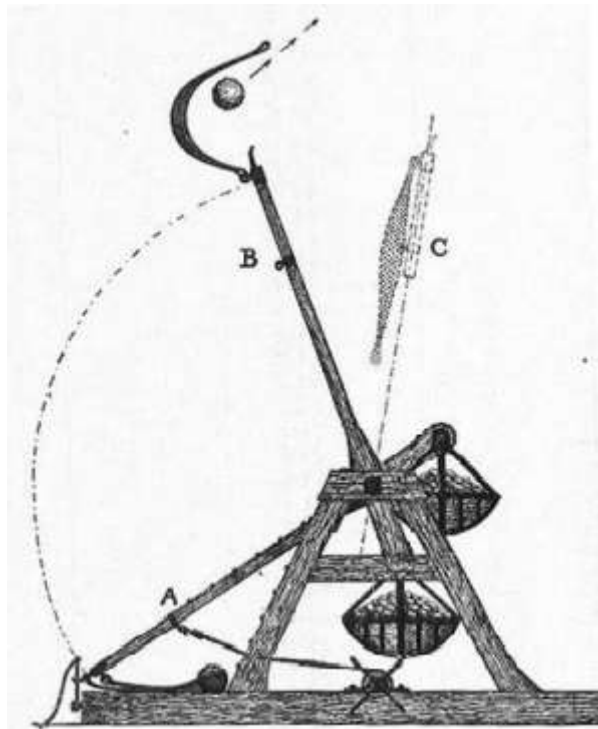


Figura 7: Dibujo del movimiento de lanzamiento de un trebuchet. Tomado de: Vieira et al. (2016).

“Experimentos modernos han demostrado la capacidad que tenía este aparato. En Inglaterra un trabuquete lanzó un peso de 476 kg a 80 metros de distancia con un contrapeso de 30 toneladas” (Chevedden et al., 1995).

### **3. OBJETIVOS**

El principal objetivo de este trabajo es estudiar y conocer el mecanismo de funcionamiento de una de las armas de guerra más utilizadas durante la Edad Media, el trabuquete de contrapeso.

Como objetivos específicos tenemos los siguientes:

- El estudio de la evolución de los instrumentos que dieron lugar a la aparición del trabuquete y sus usos en la historia.
- Obtención de los datos y cálculos para conocer el mecanismo de acción del trabuquete.
- Construcción de una maqueta a escala de un trabuquete de contrapeso para así conocer su alcance y su principio de funcionamiento.

### **4. MATERIAL Y MÉTODOS**

En este apartado se muestra, por un lado, el proceso de diseño de una maqueta de trabuquete de contrapeso realizado con el programa de diseño asistido *Catia*, de *Dassault Systems* y, por otro lado, se tienen en consideración todas las ecuaciones físicas que intervienen en el funcionamiento del mismo.

#### **4.1. Construcción de la maqueta del trabuquete de contrapeso**

##### *4.1.1. Consideraciones iniciales*

Para el diseño de la maqueta se han tenido en cuenta ciertos aspectos iniciales. El más importante de ellos es la escala resultando 1:10. Esta se ha determinado pensando en que el modelo sea manejable, a la vez que ilustrativo. También ha influido en el proceso de decisión el hecho de que la maqueta sea funcional de manera segura en cualquier entorno al aire libre.

En todo momento se ha intentado representar lo más fielmente posible el diseño original de los trabuquetes del siglo XII, teniendo en cuenta sus proporciones, de igual forma, se ha intentado plasmar el movimiento natural que estos poseían al ser accionados.

#### 4.1.2. Diseño asistido por ordenador

El diseño comienza con la estructura base, que contendrá todo el conjunto del mecanismo. Como se aprecia en la vista de planta de la Figura 8, consta de un diseño en cruz, con el extremo donde va situado el contrapeso de mayor longitud para compensar la inercia del lanzamiento cuando el brazo esté en su punto más alto. Los postes oblicuos de este lado tienen un ángulo de  $45^\circ$  con la horizontal; los del lado menor forman un ángulo de  $59,04^\circ$  con la horizontal. (Figura 8: A y C)

Todas las medidas indicadas a partir de este punto corresponden a la escala aplicada al modelo, siendo esta 1:10, como se ha indicado con anterioridad.

En cuanto a los apéndices laterales tienen una longitud de 250mm y sus postes oblicuos forman un ángulo de  $57,38^\circ$  con la horizontal, otorgándole así, estabilidad frente al vuelco. (Figura 8: B)

Los postes centrales, donde va anclado el eje de giro del brazo, tienen 600mm de altura con pasantes de 20mm. Además, están reforzados con un travesaño horizontal situado a 224mm de altura

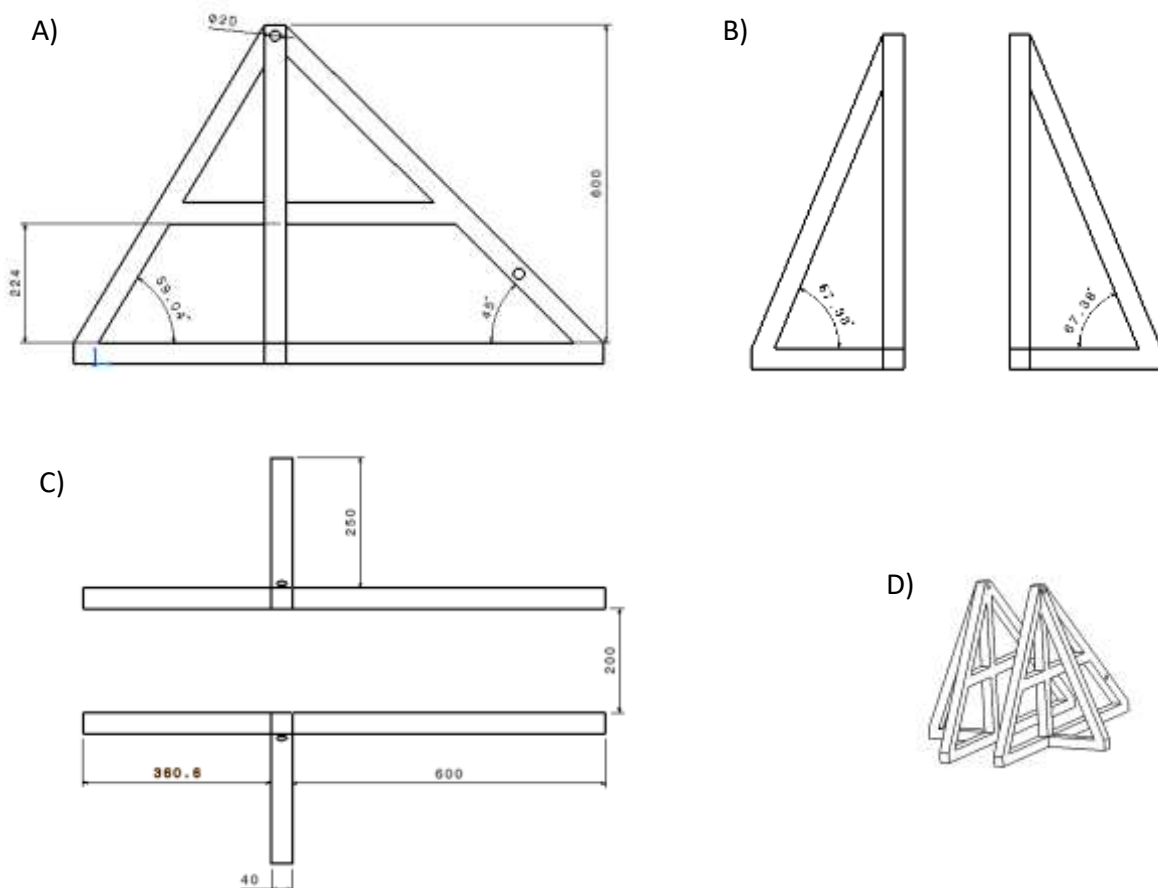


Figura 8: Estructura base. A) Vista frontal. B) Vista lateral izquierda. C) Vista de planta. D) Vista isométrica.

El brazo lanzador tiene un metro de largo con dos taladros pasantes de 20mm de diámetro perpendiculares al eje axial (Figura 9: B) y D)), donde se insertan los ejes de giro, a 300mm del extremo trasero, y del contrapeso detrás del mismo. Consta de un taladro ciego de 200mm de profundidad y 20mm de diámetro donde va instalada la barra que sostiene la honda (Figura 9: A)).

El brazo tiene un rebaje hacia la mitad del mismo, que continúa hasta la punta para aliviar peso en esta y así, el lanzamiento sea más efectivo

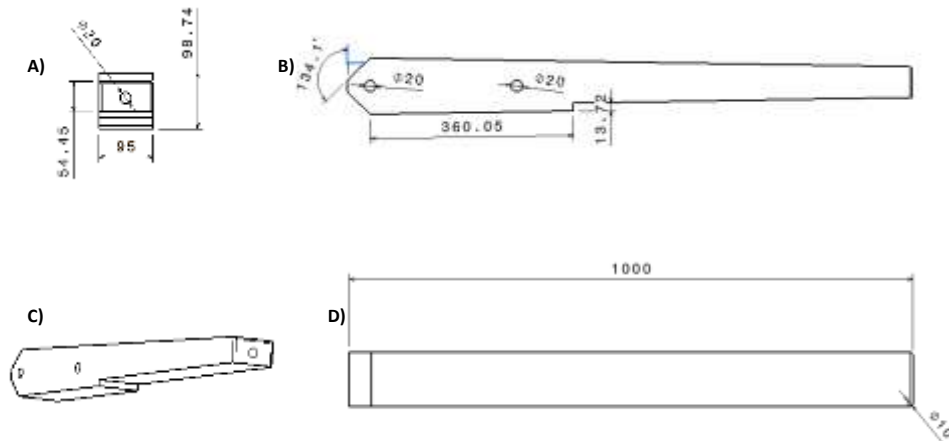


Figura 9: Brazo. A) Vista perfil derecho. B) Vista frontal. C) Vista isométrica. D) Vista de planta.

La puntera del brazo es un tubo de 20mm y 600mm de largo que va insertado en el mismo y que consta un taladro de 10mm donde se acopla la cuerda de la honda que contiene el proyectil. La puntera va embutida en el brazo 200mm.

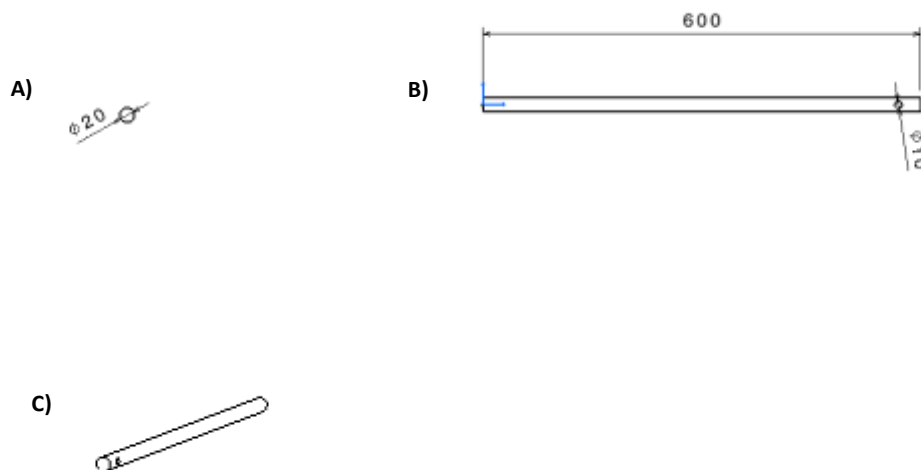


Figura 10: Puntera de lanzamiento. A) Vista perfil derecho. B) Vista Frontal. C) Vista isométrica

El contrapeso está diseñado como una “caja” cuadrada de 250mm, hueca con pared de 5mm de espesor y asimétrica. Esto último es la solución que se le ha dado para que el contrapeso no choque con el brazo cuando este esté en su punto más bajo.

El contrapeso cuenta con un pasante de 20mm donde se une con su eje de giro que lo une al brazo mediante dos bielas.

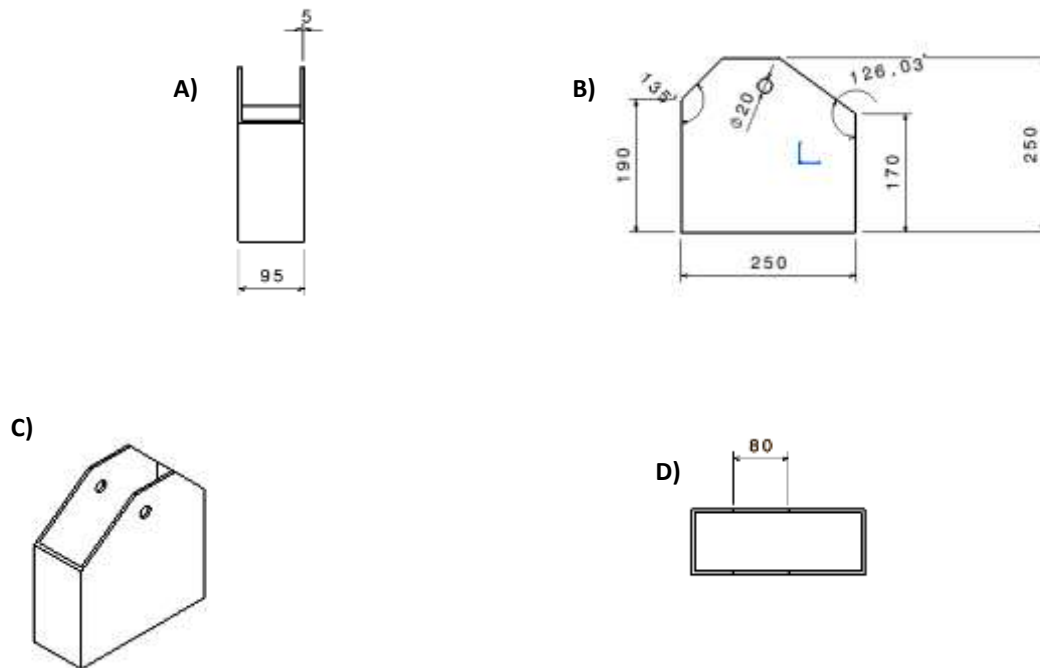


Figura 11: Contrapeso. A) Perfil derecho. B) Vista frontal. C) Vista isométrica. D) Vista de planta.

Las bielas que unen el contrapeso con el brazo tienen una longitud total de 150mm y una distancia entre taladros de 120mm, siendo estos de 20mm de diámetro. Cada biela tiene un espesor de 15mm.

Como se ha indicado anteriormente, estas bielas serán las encargadas de crear la unión articulada entre el contrapeso y el brazo.

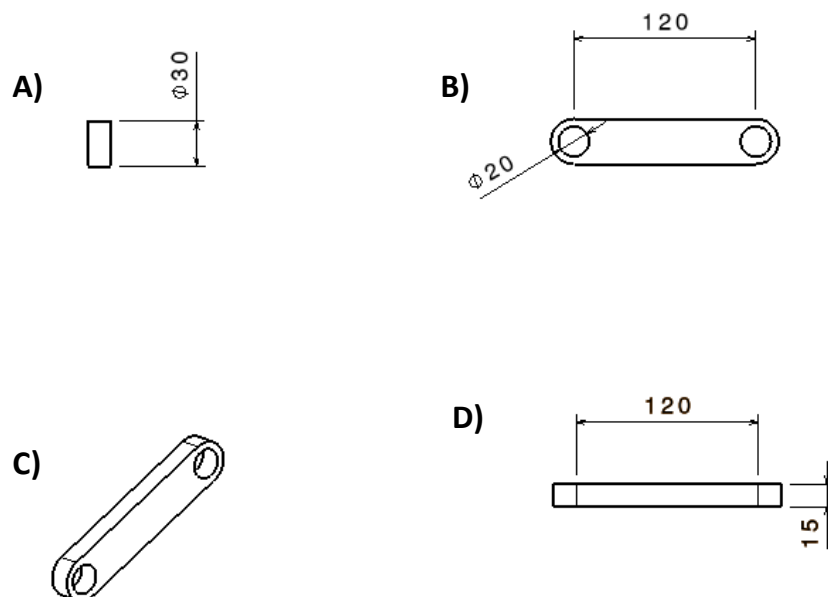


Figura 12: Biela que une el contrapeso al brazo. A) Perfil derecho. B) Vista frontal. C) Vista isométrica. D) Vista de planta.

El trabuquete se tensa mediante dos ruedas de tracción unidas entre si mediante un eje, al que se irá enrollando la cuerda que irá bajando la puntera de lanzamiento del brazo, elevando así el contrapeso y haciéndole ganar energía potencial.

Cada una de las ruedas consta de 10 radios y 12 mangos. Tienen un diámetro exterior de 200mm e interior de 40. Las mismas irán sujetas al eje mediante un casquillo.

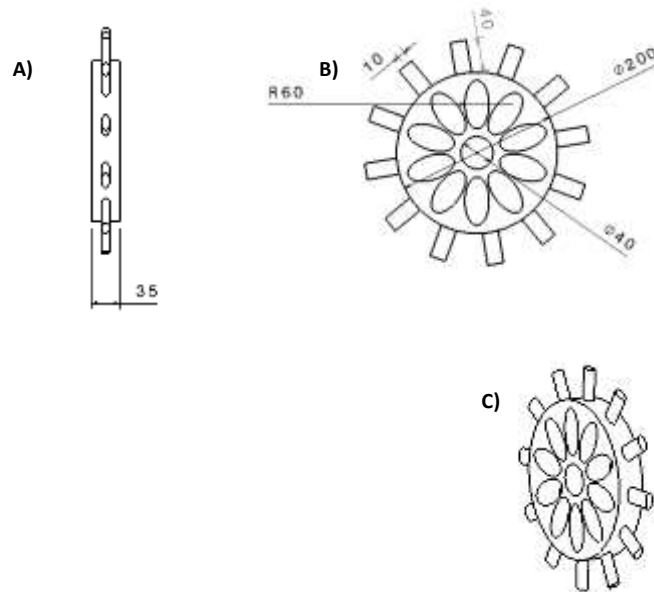


Figura 13: Rueda de tracción. A) Perfil. B) Vista frontal. C) Vista isométrica

El trabuquete cuenta, además, de una base de madera donde se apoya la honda con el proyectil cargado para que deslice sobre ella, de otra manera, la honda arrastraría por el piso irregular perdiendo potencia de disparo. Tiene como dimensiones 200mm de ancho por 800mm de largo

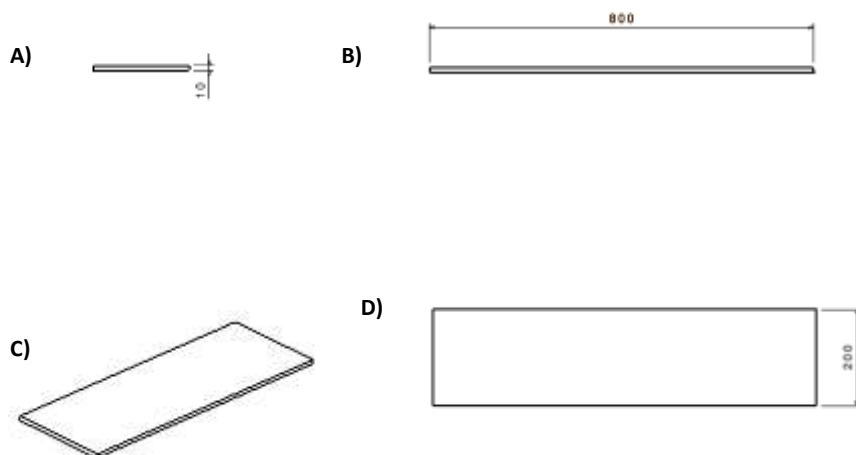
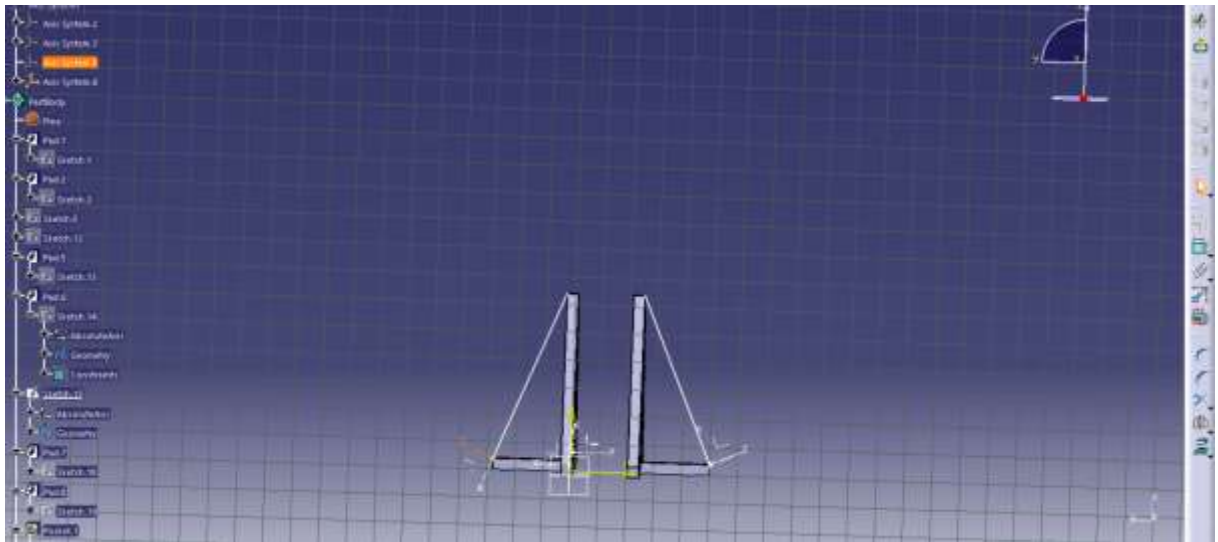


Figura 14: Base lanzadera. A) Perfil derecho. B) Vista frontal. C) Vista isométrica. D) Vista de planta

Una vez diseñados los componentes que forman la maqueta, se procede a su montaje y renderizado en Catia.

A continuación, se añade la explicación, con sus correspondientes Figuras, de algunos de los procesos más destacados llevados a cabo durante el diseño de las piezas y ensamblaje de las mismas en el modelo digital del trabuquete.

En la Figura 15 se muestran las líneas guía (color gris claro) que se han utilizado para hacer una extrusión en la dirección indicada por ellas. Esto se realiza creando un nuevo sistema de ejes en la cruz de la base, siendo el eje X la referencia de este nuevo sistema, encontrándose el nuevo eje X girado  $59,04^\circ$  respecto al sistema de ejes original, mostrado en color amarillo.



*Figura 15: Croquis de postes oblicuos en apéndices laterales usando nuevo sistema de ejes oblicuos.*

Para piezas como la rueda de tracción del brazo se ha utilizado la herramienta "Patern". Esta herramienta permite, a partir de un croquis, reproducir este mismo a lo largo de, en este caso, toda la parte exterior de la circunferencia de la rueda. En la Figura 16 se puede apreciar la ventana de definición del patrón, además del croquis ya extruido que aparece seleccionado en color naranja.





Figura 16: Patrón ya realizado de la extrusión.

Una vez diseñadas todas las piezas que compondrán el modelo con las herramientas mostradas anteriormente, entre otras, se procede al ensamblaje del conjunto. En la Figura siguiente se muestra el proceso principal para añadir componentes al mecanismo creado, en este caso, el trabaquete.

Mediante la acción “Insert” → “Existing Components” se seleccionan las figuras previamente diseñadas y guardadas.

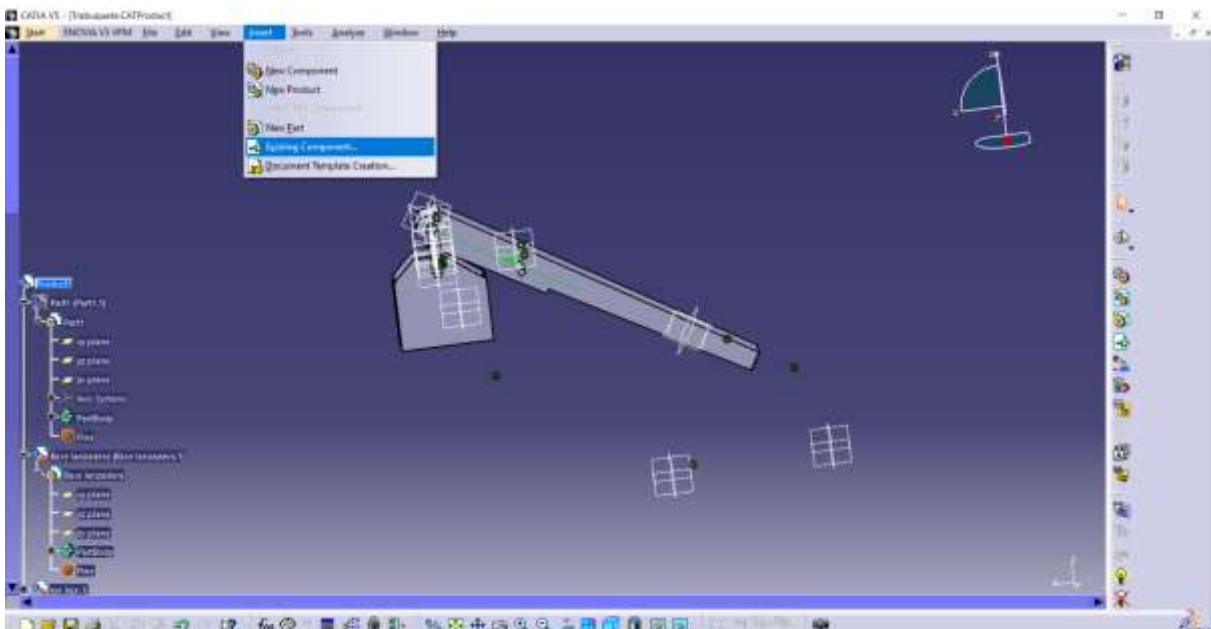


Figura 17: Selección de componentes.

Una vez insertados los componentes que se desean ensamblar se aplican distintas restricciones mediante la acción “Constraint Definition”. En el caso de la Figura 18 se

aplican restricciones de concentricidad entre el eje y el brazo. Además, se aplica un “Offset” de 40mm respecto a la cara interior de la estructura base.

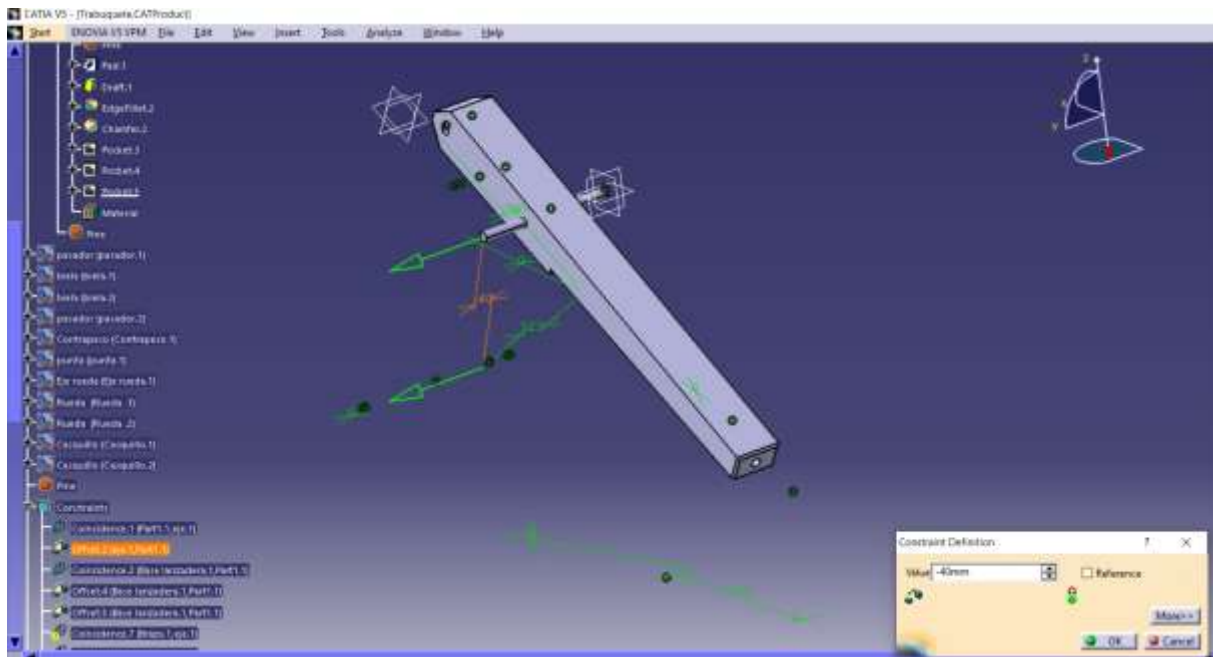


Figura 18: Ejemplo de aplicación de restricciones.

En la Figura 19 se puede apreciar el ensamblaje del mecanismo terminado, además de algunas de las restricciones aplicadas (color verde).

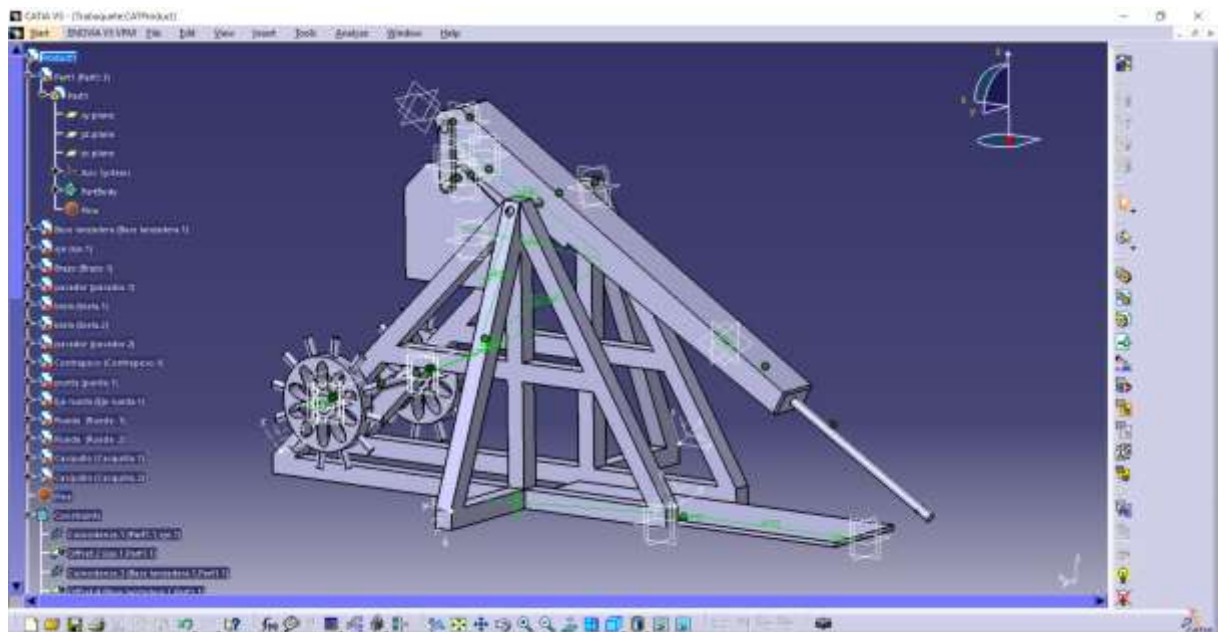


Figura 19: Ensamblaje completo con las restricciones.

En la siguiente Figura se observa el renderizado, en el cual se obvian los cordajes de tensión y la honda.



Figura 20: Renderizado de la maqueta

#### 4.1.3. Simulación con elementos finitos

Tras el montaje del modelo en Catia, se procede a un análisis con elementos finitos del mecanismo. Para simular la correspondencia de pesos entre el contrapeso y el proyectil, se escoge la ratio original, aproximadamente de 100:1. Por lo tanto para realizar el análisis del modelo se establecen las siguientes masas, que son las máximas que se consideran que lanzará el modelo: Carga del contrapeso de 10kg y masa del proyectil de 0.1kg. Se ejecuta el análisis en el momento en el que comienza el movimiento ascendente de la puntera del brazo.

En la simulación se considera tanto la fuerza peso del contrapeso y proyectil como el del propio mecanismo, siendo su material la madera de pino.

En las Figuras 21 y 22 se puede apreciar cómo ningún componente del modelo sufre apenas estrés con estas cargas. Se puede apreciar una zona de un azul más claro en la puntera del brazo, sin embargo, son deformaciones mínimas que no comprometen la rigidez estructural del modelo, por lo que es seguro fabricarlo y probarlo. En el apartado Anexos se adjunta el informe de la simulación.

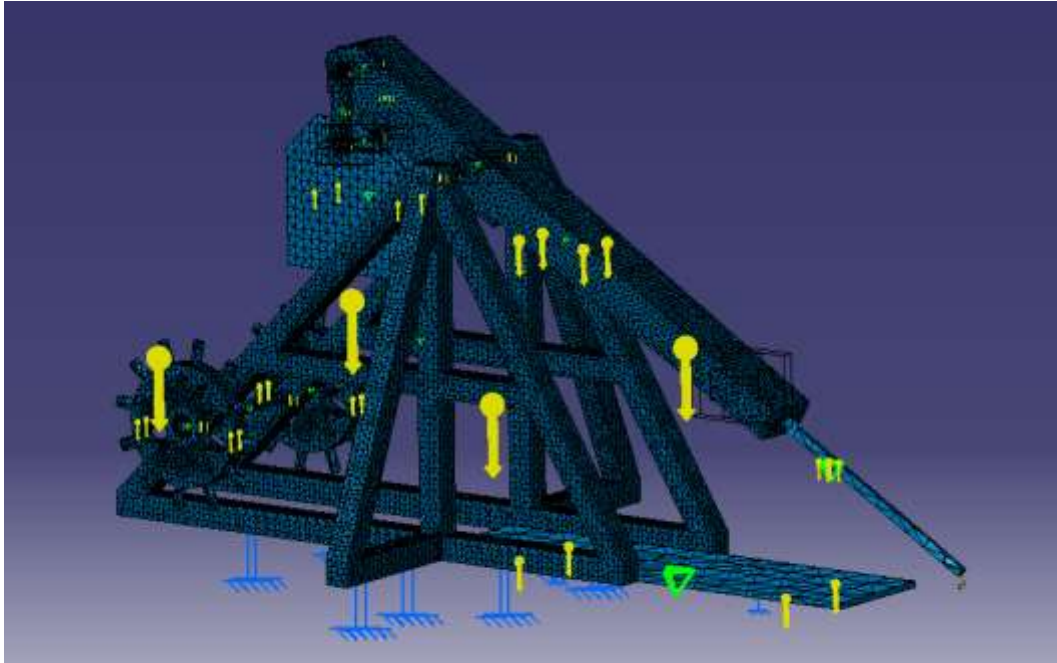


Figura 21: Vista 1. Mallado del modelo y resultado de deformaciones. En azul oscuro las que son 0, en azul claro las que son distintas de 0

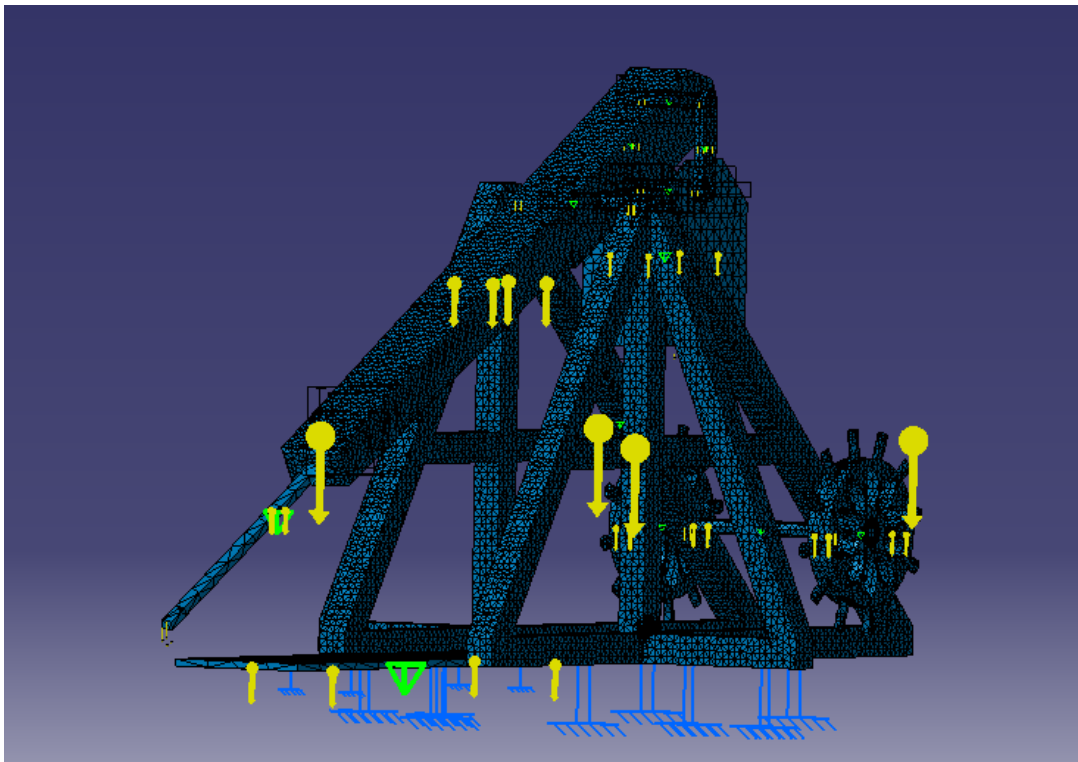


Figura 22: Vista 2. Mallado del modelo Mallado del modelo y resultado de deformaciones. En azul oscuro las que son 0, en azul claro las que son distintas de 0

#### 4.1.4. Construcción del modelo

El material elegido para la construcción de la estructura del modelo es la madera de pino puesto que es un material con unas propiedades mecánicas suficientes que

garantizan la seguridad del modelo. También se elige este material por fidelidad histórica, ya que en la Europa medieval abundaba este tipo de madera.

Para las uniones se utiliza cola de carpintero y tornillería de latón.



*Figura 23: Listón de madera de pino de 30x30mm*

Las herramientas utilizadas son una sierra caladora, un taladro atornillador, una broca de 5mm y una fresa para el taladro de 20mm.



*Figura 24: Herramientas y utensilios utilizados*

La estructura de la base se monta usando un haz de 4 de estos listones unidos entre sí con cola de contacto y tornillería de latón de 4,8mm, dos a dos.

Se crea en primer lugar la “cruz” de la base y posteriormente se le adhiere los montantes y las diagonales, siendo estas: dos diagonales laterales para aumentar la

resistencia a vuelco; dos diagonales mayores en la zona posterior, que es la zona más crítica donde el brazo alcanzará su mayor inercia; por último, dos diagonales menores en la parte de carga de proyectil y del brazo.

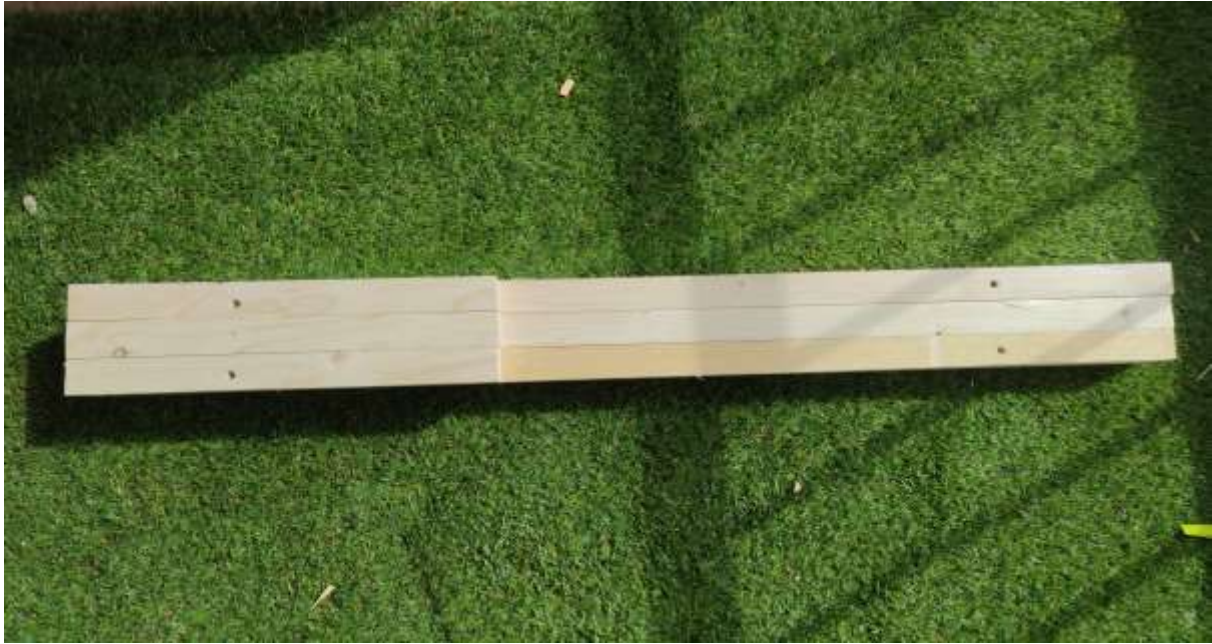


Figura 25: Base y montante



Figura 26: Diagonales laterales unidas a los montantes

Una vez montada la estructura de la base se procede a la construcción del brazo uniendo tres listones dispuestos horizontalmente y dos verticalmente, constando la pieza en total de 6 listones de un metro de largo. Se crea un refuerzo vertical adhiriendo tres listones de 300mm de longitud en la zona de los taladros creados para los ejes de giro del brazo y del contrapeso. Estos pasantes se crean con la fresa de 20mm mencionada anteriormente. Los ejes están fabricados con redondo macizo de madera de pino de 20mm de diámetro.



*Figura 27: Brazo en su vista inferior*



*Figura 28: Vista frontal del brazo. Vista de los pasantes y su refuerzo*

Una vez terminado el brazo se procede al montaje del conjunto estructura – brazo. En la *Figura 29* se puede apreciar las diagonales de refuerzo de la estructura del artefacto.



*Figura 29: Conjunto estructura - brazo montado*

Una vez montada la estructura principal se procede a montar el mecanismo que provocará el movimiento del conjunto, comenzando por el contrapeso. Éste se une al brazo por medio de un eje de madera de 20mm de diámetro y dos pletinas de madera que sirven de unión entre los ejes del contrapeso y el del brazo. Se fabrican toques con cuerda que evitan que las pletinas se salgan del eje con el movimiento.

El contrapeso se fabrica con planchas de madera laminada de pino, se elige este tipo de madera por su resistencia y capacidad de absorber los golpes que se puedan dar al bajar a gran velocidad. El contrapeso se refuerza en su interior con pequeños listones de madera de pino.





*Figura 30: Contrapeso*



*Figura 31: Unión entre el contrapeso y el brazo*



*Figura 32: Topes de cuerda*

La punta de lanzamiento se integra en el brazo realizando un agujero longitudinal en él. La punta de lanzamiento cuenta con un pasante en su extremo donde irá la cuerda de la honda. La punta está fabricada con el mismo redondo de 20mm de madera que se ha utilizado en los ejes



*Figura 33: Punta de lanzamiento*

El mecanismo de recogida de brazo cuenta con un eje taladrado que hará las veces de punto fijo, a partir del cual se enrolla la cuerda haciendo mover la rueda, que a su

vez mueve el eje citado. Una vez tensada la cuerda y estando la punta de lanzamiento en su posición más baja, se efectúa el disparo liberando el cierre de aldabilla, que se acciona tirando de una cuerda perpendicular a la que recoge el brazo.



Figura 34: Mecanismo de aldabilla para disparo



Figura 35: Mecanismo de bajada del brazo



Figura 36: Modelo terminado. A: Parte delantera en posición de disparo; B: Parte trasera en posición de disparo; C: Parte trasera tras el disparo; D: Parte delantera tras el disparo.

## 4.2. Propiedades físicas

En el funcionamiento del trabuquete actúan los principios físicos que se exponen en las siguientes líneas.

En la siguiente Figura se muestra un esquema simplificado de las fuerzas mecánicas esenciales y dónde actúan sobre el mecanismo.

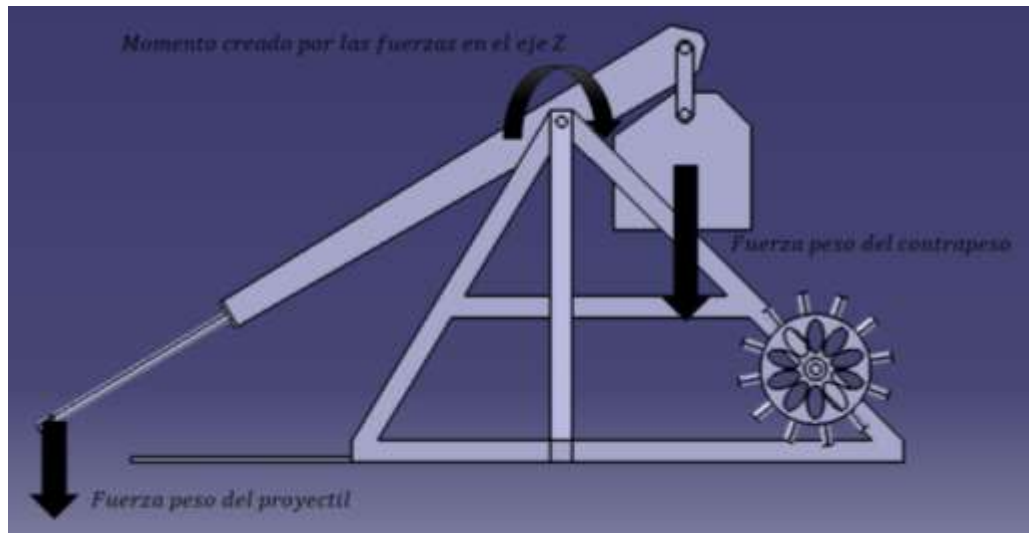


Figura 37: Esquema de las fuerzas esenciales que actúan sobre el mecanismo.

### Fuerza peso

La fuerza peso será utilizada para calcular la fuerza ejercida por la gravedad de la tierra sobre el proyectil, tanto antes como después del lanzamiento, así como la del contrapeso.

$$F = m \cdot g \text{ (N)} \rightarrow F = m \cdot a \quad (1)$$

Donde  $m$ = masa del objeto

$g$ = constante gravitacional

$a$ = aceleración

### Momento de una fuerza (Torque)

El momento es una magnitud física asociada a una fuerza sujeta a “un brazo” que provocará la rotación del mismo. El momento o torque se define como el producto de fuerza por la distancia que separa la aplicación de dicha fuerza respecto al punto a calcular. Con ello calculamos el momento que producirá el contrapeso sobre el proyectil.

$$M = F \cdot d \text{ (N} \cdot \text{m)} \quad (2)$$

$$M_z = F_1 \cdot d_1 - F_2 \cdot d_2$$

Donde:  $F_1$ = fuerza peso que se ejerce sobre el proyectil  
 $F_2$ = fuerza peso que se ejerce sobre el contrapeso.  
 $d_1$ = distancia del proyectil al eje del brazo  
 $d_2$ = distancia del contrapeso al eje del brazo

### Segunda ley de Newton

“La fuerza resultante que actúa sobre un cuerpo es igual al producto de la masa del mismo por su aceleración”.

$$F = m \cdot a \text{ (N)} \quad (3)$$

Donde:  $m$ = masa del objeto  
 $a$ = aceleración

Con esta ley podremos calcular la fuerza o aceleración en el momento del lanzamiento del proyectil.

### Velocidad media

La velocidad media se define como la distancia que recorre un cuerpo móvil partido por el tiempo que tarda el mismo en recorrer dicha distancia.

$$V_x = \frac{S}{\Delta t} \text{ (m/s)} \quad (4)$$

Donde:  $S$ = espacio recorrido  
 $t$  = tiempo

Esta fórmula será utilizada para calcular la velocidad media del proyectil (en el eje X).

### Lanzamiento oblicuo

Se utilizarán las fórmulas de lanzamiento oblicuo para conocer la posición del proyectil respecto al tiempo sabiendo, como se ha mencionado anteriormente, que el lanzamiento se realiza a 45°.

$$X = X_0 + V_{0x} \cdot t \text{ (m)} \quad (5)$$

Donde:  $X_0$  = Punto inicial en eje X

$V_{0x}$  = Velocidad inicial en eje X

$t$  = Tiempo

$$V_{0x} = V_0 \cdot \cos\sigma \text{ (m/s)} \quad (6)$$

Donde:  $V_{0x}$  = Velocidad media en eje x

$\sigma$  = Ángulo de lanzamiento del proyectil

$V_0$  = Velocidad tangencial inicial

$$V_{0y} = V_0 \cdot \sen\sigma \text{ (m/s)} \quad (7)$$

Para la altura:

$$Y = Y_0 + V_{0y} \cdot t - \frac{1}{2}g \cdot t^2 \text{ (m)} \quad (8)$$

$$V_y = V_0 \cdot \sen\sigma - g \cdot t \text{ (m/s)} \quad (9)$$

Donde  $Y_0$  = Altura de lanzamiento

$V_{0y}$  = Velocidad inicial en eje Y

$t$  = Tiempo

$g$  = Constante gravitacional

$V_y$  = Velocidad en el eje Y

### Energía cinética

La energía cinética de un cuerpo es aquella que éste posee debido a su movimiento relativo. Su fórmula es:

$$E_c = \frac{m \cdot v^2}{2} (J) \quad (10)$$

Donde:  $m$  = masa

$v$  = velocidad

Se utilizará esta ecuación para averiguar la energía cinética que posee el proyectil en el momento del lanzamiento.

### Energía potencial

La energía potencial es la energía que adquiere un cuerpo por el hecho de estar situado en un campo de fuerza. En este caso calculamos la energía potencial gravitatoria que adquiere el contrapeso en el momento en el que el *trebuchet* esté preparado para ser “disparado”, teniendo en cuenta que la altura del contrapeso en su punto superior es de 0.65m.

$$E_p = m \cdot g \cdot h (J) \quad (11)$$

Donde:  $m$  = masa

$g$  = constante gravitacional

$h$  = altura

### Trabajo de una fuerza

Se define el trabajo como una energía asociada a una fuerza que produce un desplazamiento.

$$W = F \cdot d (J) \quad (12)$$



Donde:  $F$  = fuerza  
 $d$  = distancia

### Potencia

Se denomina potencia al trabajo realizado partido por el tiempo utilizado para desarrollar dicho trabajo.

$$P = \frac{W}{t} \quad (w) \quad (13)$$

Donde:  $W$  = Trabajo  
 $t$  = Tiempo

## **5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### Fuerza peso

La masa del proyectil con el que se hacen las pruebas de lanzamiento es de 0.1kg y el modelo tiene un contrapeso al que se le añaden 2kg de masa. Con estos datos se procede a realizar los cálculos de las fuerzas peso que actúan en el lanzamiento.

$$F = m \cdot g \quad (N)$$

Proyectil:

$$F_1 = 0.1kg \cdot 9.81m/s^2 = 0.98N \quad (\downarrow)$$

Contrapeso:

$$F_2 = 2kg \cdot 9.81m/s^2 = 19.6N \quad (\downarrow)$$

### Momento de una fuerza (Torque)

Una vez obtenidas las fuerzas que actúan en el lanzamiento se procede a calcular los momentos que se dan. La distancia desde donde actúa la fuerza del proyectil al eje de rotación del brazo es de 1.08m y la distancia desde el punto donde ejerce la fuerza el contrapeso hasta el eje del brazo es de 0.3m.

Siendo:  $F_1 = 0.98N$  ( $\downarrow$ );  $F_2 = 19.6N$  ( $\downarrow$ );  $d_1 = 1.08m$ ;  $d_2 = 0.3m$

$$\begin{aligned}M_z &= F_1 \cdot d_1 - F_2 \cdot d_2 \\M_z &= 0.98N \cdot 1.08m - 19.6N \cdot 0.3m \\M_z &= -4.82N \cdot m\end{aligned}$$

Una vez obtenido el momento que se ejerce en el eje del brazo de lanzamiento, se procede a obtener la fuerza que se ejerce sobre el proyectil, denominando a la misma  $F_p$ .

$$\begin{aligned}M_z &= F_p \cdot d_1 \\-4.82N \cdot m &= F_p \cdot 1.08m \\F_p &= \frac{4.82N \cdot m}{1.08m} = 4.46N (\uparrow)\end{aligned}$$

### Segunda ley de Newton

Tras conocer la fuerza que actúa sobre el proyectil al ser lanzado se procede a calcular la aceleración que adquiere el mismo en el instante en el que el que el proyectil adquiere su aceleración máxima.

$$\begin{aligned}F &= m \cdot a (N) \\4.46N &= 0.1kg \cdot a \\a &= \frac{4.46N}{0.1kg} = 44.6m/s^2\end{aligned}$$

### Velocidad media (eje X)

Se procede a conocer la velocidad media a la que viaja el proyectil.

$$V_x = \frac{S}{\Delta t} (m/s)$$

Para obtener la velocidad media se realizan tres ensayos de disparo. Estos se efectúan a un ángulo de  $45^\circ$  respecto a la horizontal, obteniendo los siguientes resultados:

Distancias:

$$X_1 = 5.20m; X_2 = 4.85m; X_3 = 5.50m$$

Tiempos:

$$t_1 = 1.20s; t_2 = 1.1s; t_3 = 1.3s$$

La distancia y tiempo medio resulta:

$$X_m = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} = \frac{5.20 + 4.85 + 5.50}{3} = 5.18m$$

$$t_m = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3} = \frac{1.20 + 1.10 + 1.30}{3} = 1.20s$$

Con estos datos se calcula la velocidad media en el eje horizontal

$$X_m = V_{xm} \cdot t_m (m)$$

$$V_{xm} = \frac{5.18m}{1.20s} = 4.32m/s$$

### Lanzamiento oblicuo

Utilizando  $V_{xm}$  de la fórmula de la velocidad media en el eje X y teniendo en cuenta el ángulo con el que se ha lanzado el proyectil, se obtiene la velocidad tangencial respecto a la circunferencia que describe el movimiento del brazo y la honda .

$$X = X_0 + V_{0x} \cdot t (m)$$

$$V_{0x} = V_0 \cdot \cos\sigma (m/s)$$

$$4.32m/s = V_0 \cdot \cos(45^\circ)$$

$$V_0 = \frac{4.32m/s}{\cos(45^\circ)} = 6.11m/s$$

Una vez conocida  $V_0$  es posible calcular la velocidad que tendrá el proyectil en el eje Y,  $V_{0y}$ . En este caso  $V_{0y}$  será igual a  $V_{0x}$  puesto que el ángulo de lanzamiento es  $45^\circ$

$$V_{0y} = V_0 \cdot \text{sen } \sigma \text{ (m/s)}$$

$$V_{0y} = 6.11\text{m/s} \cdot \text{sen}(45^\circ)$$

$$V_{0y} = 4.32\text{m/s}$$

El proyectil se libera de la honda a 0.86m desde la base ( $Y_0$ ). Con el conocimiento de este dato y suponiendo que  $V_y = 0$  en el momento en que el proyectil deja de ascender, se calcula el tiempo que tarda el mismo en alcanzar su máxima altura:

$$0 = 4.32\text{m/s} - 9.81\text{m/s}^2 \cdot t$$

$$t = \frac{4.32\text{m/s}}{9.81\text{m/s}^2} = 0.44\text{s}$$

$$Y_{max} = 0.86\text{m} + 4.32\text{m/s} \cdot 0.44\text{s} - \frac{1}{2} \cdot 9.81\text{m/s}^2 \cdot 0.44^2$$

$$Y_{max} = 1.81\text{m}$$

### Energía cinética

A continuación, se calcula la energía que adquiere el proyectil en el momento de ser lanzado.

$$E_c = \frac{m \cdot v^2}{2} \text{ (J)}$$

$$E_c = \frac{0.1\text{kg} \cdot (6.11\text{m/s})^2}{2} = 1.87\text{J}$$

### Energía potencial

Se calcula la energía que posee el contrapeso cuando está en su punto superior, en el momento de comenzar el proceso de lanzamiento.

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

$$E_p = 2\text{kg} \cdot 9.81\text{m/s}^2 \cdot 0.65\text{m}$$

$$E_p = 12.75\text{J}$$

## Trabajo de una fuerza

$$W = F \cdot d \text{ (J)}$$

Proyectil:

Se calcula en primer lugar el trabajo que recibe el proyectil en su ascenso hasta llegar a la altura máxima de 1.81m, nombrando como  $W_s$ .

$$W_s = 0.1kg \cdot 9.81m/s^2 \cdot (1.81m - 0.86m) \cdot \cos(45^\circ)$$
$$W_s = 0.66J$$

En segundo lugar, se calcula el trabajo del proyectil en su bajada ( $W_b$ ), calculando al final la suma de ambas partes.

$$W_b = 0.1kg \cdot \frac{9.81m}{s^2} \cdot 1.81m \cdot \cos(45^\circ)$$
$$W_b = 1.25J$$
$$W_T = W_b + W_s$$
$$W_T = 1.25J + 0.66J = 1.91J$$

## Potencia

Con los resultados obtenidos en el cálculo del trabajo tanto del proyectil como del contrapeso, se procede a calcular la potencia que desarrolla el mecanismo

$$P = \frac{W}{t} \text{ (w)}$$
$$P_{proyectil} = \frac{1.91J}{1.20s} = 1.6w$$

De igual manera se repiten los cálculos para obtener la potencia que desarrolla el contrapeso y por tanto el trabuquete en sí.

$$W_{\text{contrapeso}} = 2\text{kg} \cdot 9.81\text{m/s}^2 \cdot 0.65\text{m} = 12.65\text{J}$$

Midiendo el tiempo de descenso del contrapeso desde su punto superior hasta el inferior se obtiene una medición de 0.79s. Con este dato se puede calcular la potencia del mecanismo.

$$P_{\text{contrapeso}} = \frac{12.65\text{J}}{0.79\text{s}} = 16.14\text{w}$$

Como último cálculo podemos obtener el rendimiento del mecanismo.

$$\eta = \frac{P_{\text{proyectil}}}{P_{\text{contrapeso}}} = \frac{1.6\text{w}}{16.4\text{w}} = 0.1$$

El mecanismo tiene un rendimiento del 10%, lo cual quiere decir que una décima parte de la energía potencial que posee el contrapeso es aprovechada para impulsar el proyectil, el resto es disipada en su gran mayoría en fricción de la madera

A continuación, se presenta una tabla resumen de todas las propiedades físicas calculadas:

Propiedad física		Símbolo	Valor
Fuerza Peso	Proyectil	$F_1$	0,98N
	Contrapeso	$F_2$	19,6N
Momento de fuerza	Sobre el eje del brazo	$M_z$	-4,82N·m
Fuerza	Sobre el proyectil	$F_p$	4,46N
Segunda ley de Newton	Aceleración del proyectil	$a$	44,6m/s <sup>2</sup>
Velocidad media	Velocidad del proyectil en X	$V_x$	4,32m/s
Lanzamiento oblicuo	Velocidad tangencial	$V_0$	6,11m/s
	Velocidad del proyectil en Y	$V_{0y}$	4,32m/s
	Tiempo para $Y_{\text{max}}$	$t$	0,44s
	$Y_{\text{max}}$	$Y$	1,81m
Energía cinética	Proyectil	$E_c$	1,87J
Energía potencial	Contrapeso	$E_p$	12,75J
Trabajo	Proyectil	$W_t$	1,91J
	Contrapeso	$W_{\text{contrapeso}}$	12,65J
Potencia	Proyectil	$P_{\text{proyectil}}$	1,6w
	Contrapeso	$P_{\text{contrapeso}}$	16,4w

## 6. CONCLUSIONES

En cuanto al inventor del *trebuchet* conocido como tal, se considera que la información es muy difusa existiendo varias hipótesis referidas al proceso de evolución hasta su diseño tal y como es conocido. Sin embargo, la hipótesis que tiene más peso es la que identifica a *Mardi Ibn al-Tarsusi* como el creador del trabuquete de contrapeso.

Tanto esta disparidad en la información como su escasez han dificultado el hallazgo de datos para la definición concreta del término *trebuchet*, sin embargo, mucha más abundante y convergente es la información existente sobre los trabuquetes de torsión.

Como se puede observar en la Figura 8, el diseño original se realizó añadiendo un travesaño a cada lado de la estructura base, pero en el momento de la construcción del modelo se percibió que estos no eran necesarios ya que la estructura ya poseía la suficiente resistencia y rigidez para ejercer el lanzamiento.

Con todas las propiedades físicas calculadas se puede concluir que la construcción del modelo se ha realizado satisfactoriamente ya que durante la realización de los lanzamientos no se ha producido ningún problema estructural, ya que los materiales han resistido satisfactoriamente todos los lanzamientos a los que ha sido sometido el modelo.

Además, los cálculos realizados evidencian que tanto la distancia alcanzada por el proyectil como la precisión de éste se ajusta proporcionalmente a los datos de los trabuquetes originales mencionados en el apartado “3. Antecedentes”.

A pesar de que su rendimiento sea de tan solo el 10%, en esta réplica a pequeña escala se puede percibir el poder destructivo que podían llegar a alcanzar estas armas de asedio, por lo que el modelo construido también puede servir como evidencia de la potencial magnitud de este tipo de ataques.

En cuanto a los conocimientos adquiridos durante la realización de este trabajo, destacan los referentes al uso de programas de diseño, ya que los cálculos de propiedades físicas del trabuquete no suponen mucha dificultad en sí mismos.

Una de las partes que más dificultad a supuesto a la hora de la realización del trabajo ha sido la de poder unificar la información histórica leída ya que, tal y como se ha mencionado anteriormente, esta es muy escasa y muy dispar. El método de redacción de antecedentes ha supuesto leer gran cantidad de información, crear un hilo cronográfico con aquellos hitos que se manifestaban en varios de estos

documentos y, a partir de este hilo más general la concreción de información adicional con documentos más específicos. Además de obviar aquella información cuya contradicción se manifestaba en varios documentos.

Gracias a la realización de este trabajo se han adquirido gran cantidad de conocimientos históricos, tanto en el desarrollo de la historia en sí como en la evolución de la maquinaria y la ingeniería presente en la Edad Media.

Además, debido a ciertas dudas surgidas a partir del diseño asistido por ordenador del modelo, se han adquirido ciertos conocimientos más específicos, como por ejemplo la simulación de elementos finitos.

También se han adquirido conocimientos referentes a realizar el paso de un modelado digital a la construcción real del mismo debido a ciertos problemas que han surgido como el corte de ciertos ángulos en las maderas con las herramientas disponibles.



## 7. ANEXOS

A continuación, se presenta el análisis de elementos finitos realizado en Catia:

### Analisis elementos finitos

#### MESH:

Entity	Size
Nodes	56487
Elements	220984

#### ELEMENT TYPE:

Connectivity	Statistics
SPIDER	710 ( 0,32% )
TE4	220274 ( 99,68% )

#### ELEMENT QUALITY:

Criterion	Good	Poor	Bad	Worst	Average
Stretch	220051 ( 99,90% )	223 ( 0,10% )	0 ( 0,00% )	0,146	0,642
Aspect Ratio	208629 ( 94,71% )	11310 ( 5,13% )	335 ( 0,15% )	7,676	1,869

#### Materials.1

<b>Material</b>	Pine
<b>Young's modulus</b>	1,7e+010N_m2
<b>Poisson's ratio</b>	0,45
<b>Density</b>	500kg_m3
<b>Coefficient of thermal expansion</b>	3,75e-006_Kdeg
<b>Yield strength</b>	0N_m2

<b>Material</b>	User Material.1 : Pine
<b>Young's modulus</b>	1,7e+010N_m2
<b>Poisson's ratio</b>	0,45

<b>Density</b>	500kg_m3
<b>Coefficient of thermal expansion</b>	3,75e-006_Kdeg
<b>Yield strength</b>	0N_m2

<b>Material</b>	User Material.2 : Pine
<b>Young's modulus</b>	1,7e+010N_m2
<b>Poisson's ratio</b>	0,45
<b>Density</b>	500kg_m3
<b>Coefficient of thermal expansion</b>	3,75e-006_Kdeg
<b>Yield strength</b>	0N_m2

<b>Material</b>	User Material.3 : Pine
<b>Young's modulus</b>	1,7e+010N_m2
<b>Poisson's ratio</b>	0,45
<b>Density</b>	500kg_m3
<b>Coefficient of thermal expansion</b>	3,75e-006_Kdeg
<b>Yield strength</b>	0N_m2

<b>Material</b>	User Material.4 : Pine
<b>Young's modulus</b>	1,7e+010N_m2
<b>Poisson's ratio</b>	0,45
<b>Density</b>	500kg_m3
<b>Coefficient of thermal expansion</b>	3,75e-006_Kdeg
<b>Yield strength</b>	0N_m2

<b>Material</b>	User Material.5 : Pine
<b>Young's modulus</b>	1,7e+010N_m2
<b>Poisson's ratio</b>	0,45
<b>Density</b>	500kg_m3
<b>Coefficient of thermal expansion</b>	3,75e-006_Kdeg
<b>Yield strength</b>	0N_m2

<b>Material</b>	User Material.6 : Pine
<b>Young's modulus</b>	1,7e+010N_m2

<b>Poisson's ratio</b>	0,45
<b>Density</b>	500kg_m3
<b>Coefficient of thermal expansion</b>	3,75e-006_Kdeg
<b>Yield strength</b>	0N_m2

## Static Case

### Boundary Conditions



Figure 1

### STRUCTURE Computation

Number of nodes : 56487  
 Number of elements : 220984  
 Number of D.O.F. : 169461  
 Number of Contact relations : 495  
 Number of coefficients : 4102  
 Number of Kinematic relations : 981  
 Number of coefficients : 9428

Linear tetrahedron : 220274  
 Contact join : 327  
 Solid to solid fastened join : 215  
 Solid to solid fitting join : 168

### RESTRAINT Computation

Name: Restraints.1

Number of S.P.C : 4197

### LOAD Computation

Name: Loads.1

Applied load resultant :

$F_x = 4 \cdot 308e-016 \text{ N}$

$F_y = -2 \cdot 132e-016 \text{ N}$

Number of local singularities	:	0
Number of singularities in translation	:	0
Number of singularities in rotation	:	0
Generated constraint type	:	MPC

### CONSTRAINT Computation

Restraint: Restraints.1

Number of constraints	:	5178
Number of coefficients	:	0
Number of factorized constraints	:	5178
Number of coefficients	:	8294
Number of deferred constraints	:	0

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Aranegui Gascó, C. (2003). Projectiles de honda con epígrafes griegos atribuidos a Sagunto. *Romula*, 2: 43-52.
- Bruhn de Hoffmeyer, A. (1988). Las armas en la historia de la reconquista. *Gladius*, 31-101. ISSN: 0435-029X.
- Carmona Fernández, F. (2001). *La mentalidad literaria medieval: (siglos XII y XIII)*. Murcia, Universidad de Murcia, Servicio de Publicaciones.
- Coetzee, D. y W. Eysturlid, L. (2013). Philosophers of War: The Evolution of History's Greatest Military Thinkers. *Santa Barbara*, 1: 1-191.
- D. Cotts, J. (2013). *Europe's Long Twelfth Century: Order, Anxiety and Adaptation, 1095-1229 (European History in Perspective)*. England, Palgrave Macmillan.
- De Ayala Martínez, C. (2007). *Las órdenes militares hispánicas en la Edad Media (siglos XII-XV)*. Madrid, Marcial Pons, Edición Historia.
- De Souza, C. A. (2020). *Estudo do lançamento oblíquo utilizando réplicas de armas medievais*, Sociedad Brasileña de Física, Universidad Federal de Rio Grande de Sul.
- Dreger de Araujo, V. C. (2004). *A arte da guerra no século XII: As campanhas italianas de Federico I Barbarossa (1154-1162)*. São Paulo, Universidad de São Paulo, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Departamento de História.
- Durán Becerra, T. (2013). La creación en tiempos de guerra y la explosión de la creatividad, *RUTA: Revista Universitària de Treballs Acadèmics*, N°5.

- E. Chevedden, P; Eigenbrod, L.; Foley, V. y Soedel, W. (1995). The *Trebuchet*, *Scientific American*, 66-71.
- E. Chevedden, P. (2011). The View of the Cruades from Rome and Damascus: The Geo-Straegic and Historical Perspectives of Pope Urban II And Ali Ibn Tahir al-Sulami. *Oriendo*, 39: 257-329.
- García Turza, J. (1996). De los monjes a los frailes: La coyuntura del año 1.200 en la sociedad y en la iglesia. *Nájera*, 13-28. ISBN: 84-89362-11-4.
- González Mínguez, C. (1993). La Urbanización del litoral del norte de España (siglos XII-XIV). *Nájera*, 43-62.
- Karlsson, D. (2018). *The Trebuchet. Longer shots with wheels?*
- Ministerio de Defensa, Dirección General de Relaciones Institucionales. (2006). *Aproximación a la historia militar de España*. Volumen 1 y 3. ISBN: 84-9781-244-1.
- Rovira i Port, J. y Casanovas y Romeu, A. (2006). Armas y equipos en la marca superior de Al-Andalus. El reducto rural islámico de Solibernat (Lleida) y su panoplia militar en la primera mitad del siglo XII. *Gladius*, 149-174. ISSN: 0435-029X.
- Ruiz Moreno, M. J. y Rebollo García, F. (2008). El trabuco de Cortés. *XXXVI Coloquios Históricos de Extremadura*. Vol. 2: 719-734.
- Sierra C., C. E. (2014). Tecnología Bélica Medieval. Giro en la historia de la tecnología. *Revista Universidad de Antioquia*, 315: 52-60.
- Soto Rodríguez, José Antonio (2011). El arte medieval: Una mirada desde el siglo XI. *Revista Tiempo y Espacio*, 26: 67-93.
- Suñé Arce, J. (2013). Técnicas de ataque y defensa en los asedios del siglo XIII: Ámbito catalano-aragonés y occitano. *Gladius*, 113-130.
- Vieira Júnior, N., Sander Bernardes C. Alves, A., Henrique B. Gomes Pereira, B., Olímpio P. da Silva, G., de Souza, M. L., Vieira de Castro, P. I. y Lúcio da Silva, W. (2016). *Trebuchet construido com palitos de picolé*. Instituto Federal de Minas Gerais, Bacharelado em Engenharia Mecânica.