



El Trebuquete. Análisis y construcción de prototipo a escala

José Luis Ródenas-Vigil¹, Rafael López-García², Gustavo Medina-Sánchez³

¹ Graduado en Ingeniería Mecánica, Universidad de Jaén, España. Email: jlr0003@red.ujaen.es

² Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera, Universidad de Jaén, España. Email: rlgarcia@ujaen.es

³ Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera, Universidad de Jaén, España. Email: gmedina@ujaen.es

De la necesidad de ataque y defensa que se produce en épocas de guerra, han surgido grandes avances tecnológicos que tras su perfeccionamiento pasan a formar parte de la vida cotidiana. Las catapultas como instrumentos de guerra se han utilizado desde su primera aparición hace muchos siglos que muchos estudiosos sitúan en China y cuyo mecanismo desde el principio funcionaba mediante fuerza humana.

Más tarde llegó el trebuchet o trebuquete, un artefacto atribuido a Mardi Ibn Ali al-Tarsusi, que consiste en 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, lo que supuso un importante avance respecto a las máquinas existentes por su mayor precisión y capacidad de alcance. La influencia del mecanismo de contrapeso que utilizaba el trebuchet ha sido tan importante, que podemos encontrarlo en multitud de sistemas modernos.

En este trabajo se realiza inicialmente un estudio de los antecedentes históricos de este tipo de máquinas de guerra, para posteriormente centrar el trabajo en el análisis del mecanismo. A continuación, se lleva a cabo el modelado geométrico digital, con el que podemos analizar no solo su funcionamiento, sino también desde el punto de vista cinemático, estático y dinámico.

Como resultado de este trabajo se ha obtenido además del modelado digital, y a partir de él, se obtienen los planos de los diferentes elementos que lo componen y así poder llevar a cabo la fabricación de un modelo real a escala de esta arma medieval, utilizando diferentes tecnologías y la aplicación de los conocimientos de diferentes áreas de la ingeniería mecánica y de la fabricación, por lo que tienen también un importante componente académico.

La capacidad de los softwares actuales de ingeniería asistida nos permite analizar detalladamente los mecanismos e ingenios mecánicos de la antigüedad, y conocer las técnicas empleadas en las diferentes épocas de la historia, de forma que podamos acercarnos a las tecnologías y a los “ingenieros” de ese momento.

Esta metodología utilizada en este trabajo, nos puede servir para la recuperación virtual, así como para la ejecución de modelos reales a escala de otros ingenios, artefactos y mecanismos antiguos, que nos ayudan a conocer la ingeniería de tiempos pasados.

Las catapultas como instrumentos de guerra se han utilizado desde hace muchos siglos y aunque no se sabe con certeza quién fue el autor de la primera catapulta, muchos estudiosos coinciden en que su primera aparición pudo tener lugar en China. Al principio funcionaban con fuerza humana, con una docena de hombres que tiraban de una cuerda para hacer funcionar el mecanismo.

Mas tarde surge el trebuchet de contrapeso, probablemente a raíz de las guerras de asedio durante las Cruzadas del siglo XII [2], y que supuso un importante avance respecto a las máquinas existentes por su mayor precisión y capacidad de alcance.

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 algunos historiadores su desarrollo fue 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. Lo que sí parece claro es atribuir este artefacto a Mardi Ibn Ali al-Tarsusi.

Este trabajo se centra precisamente en el estudio histórico y tecnológico del mecanismo del trebuchet de contrapeso.

La influencia del mecanismo de contrapeso que utilizaba el trebuchet ha sido tan importante, que podemos encontrarlo en multitud de sistemas modernos.

2. Antecedentes

En el siglo XII Europa es una sociedad completamente feudal con diferentes pueblos e imperios y en la que abundan las invasiones y reconquistas (Figura 1).

Las ciudades, experimentan el inicio de una notable etapa de crecimiento en numerosos aspectos, tanto social, como demográfico y comercial. Gran parte de ellas se encontraban amuralladas con el fin de protegerse de los ataques e invasiones, además de mantener un gran escalón social entre el mundo burgués interior y el campesino exterior.

A pesar de ello, la reorganización de las ciudades y la división de los trabajos en distintos gremios permite que los ciudadanos empiezan a vivir de sus propios oficios u otros servicios y la agricultura deja de ser la única actividad comercial rentable, aunque los excedentes de la agricultura son vendidos en las ciudades, lo que hace que el mundo rural y urbano sigan estando vinculados y de comienzo esa actividad comercial [3].



Figura 1: Organización política territorial de Europa Occidental a mediados del siglo XII [4].

La capacidad militar de los guerreros en la Edad Media, venía determinada, casi exclusivamente, por el alcance de sus armas. El lanzamiento de proyectiles con las armas utilizadas 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 y murallas en las ciudades (Figura 2). Estas últimas técnicas de ataque requerían un despliegue más técnico que táctico [5].



Figura 2: Ingeniería bélica medieval [6].

Los trebuchets coexistieron en Europa Occidental, con las primeras armas que usaron pólvora [7], incluso hay constancia de que fueron utilizados hasta bien entrado el siglo XV, en algunas ocasiones siendo complementados en sus ataques por la nueva artillería pirobalística [8].

Una actividad determinante en el desarrollo de la historia en general, y por supuesto en la guerra, fue la escritura, que desde tiempos muy tempranos permitió a los escritores transmitir la sabiduría de la época a través de sus obras, algunas de las cuales tuvieron gran influencia en los actos bélicos, por crear nuevas estrategias de ataque y por el diseño de maquinaria que pudiera ser utilizada en batallas, ataques e invasiones. Muchos de ellos son conocidos hoy en día, más que por sus obras literarias, por ser los “antiguos ingenieros bélicos” de mayor influencia [8], como lo fue Mardi Ibn Ali al-Tarsusi.

2.1. Orígenes del Trebuchet

Diferentes autores consideran el trebuchet, sinónimo, sucesor o variante de la catapulta o simplemente todos aquellos mecanismos con una apariencia similar y cuyo funcionamiento se rige por una acción parabólica.

Ya en la época de los romanos se utilizaban hondas para atacar a los enemigos. No eran más que una doble tira de cuero o fibras vegetales, que el guerrero hacía girar por encima de su cabeza y al dejar de hacerlo, soltaba uno de los extremos, haciendo que el proyectil salga lanzado 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” [9]. También se utilizaron ingenios que fueron heredados del mundo griego, como pequeñas máquinas para lanzamiento de dardos, basado en mecanismos de torsión de haces de tendones o máquinas ya de mayor tamaño para lanzar piedras pesadas.

Los visigodos en el siglo V, ya fueron adquiriendo conocimientos para la construcción y uso de estas máquinas de asedio. Las armas que se usaron en el asedio de Nîmes 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); la balista (Figura 3) (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); la catapulta móvil (máquina griega que se empleaba para lanzar piedras o dardos basada en el principio de elasticidad de torsión de las cuerdas; el escorpio (artilugio con forma de ballesta, que se utilizaba para lanzar flechas envenenadas) [10].

Algunos historiadores consideran que la evolución hacia los trebuchets de tensión, y por ende a los de contrapeso, tiene su origen en la honda con bastón mencionada, que fueron introducidos en la zona del Mediterráneo a finales del siglo VI [12].

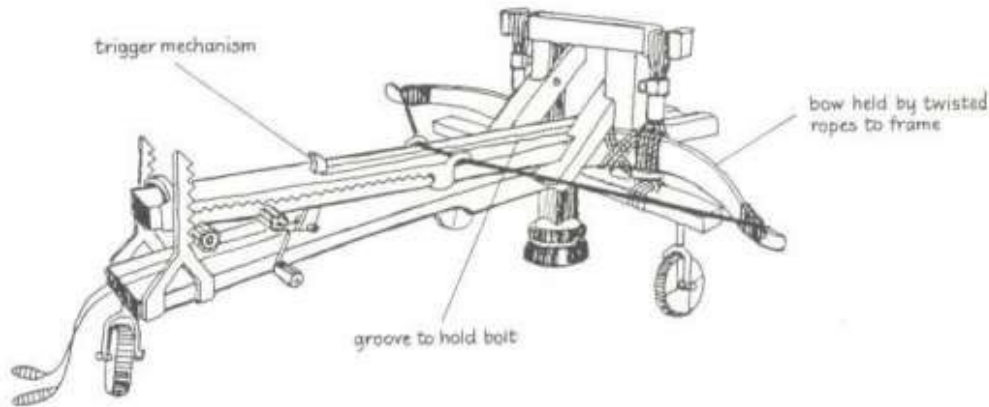


Figura 3: Dibujo de una balista [11].

Otros 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” [6]. 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 4) y el mangonel (Figura 2).

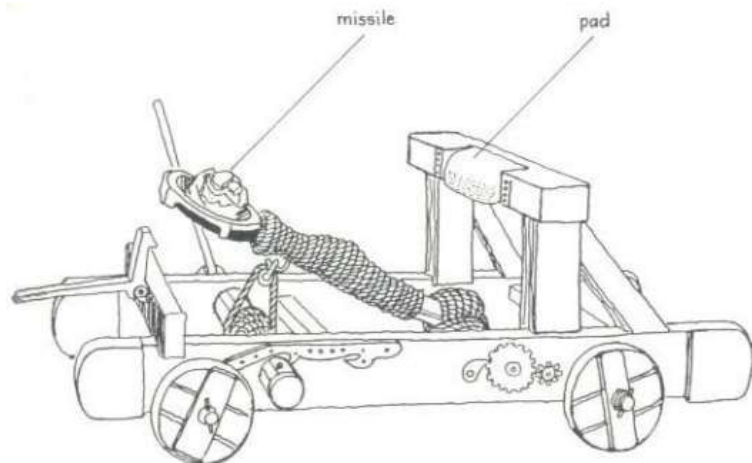


Figura 4: Dibujo de un onagro [11].

El mangonel era una versión mejorada del onagro, que fue introducido en Europa por los árabes en el siglo VI y que fue utilizado en la Segunda Cruzada y en la Península Ibérica en el año 1147, durante el asedio de Lisboa, en el sitio de Aledo (Murcia) por los almorávides, así como en Andalucía, Levante e Ibiza [6].

2.2. Objetivo del uso de los trebuchetes

A pesar de existir distintos tipos, todos ellos comparten una función principal, bombardear continua e intensamente los muros de las fortificaciones. No obstante, su función no era únicamente la guerra física sino también la guerra psicológica. Fueron utilizados para desmoralizar al enemigo mediante el lanzamiento de objetos que pudieran herirlos psicológicamente, como por ejemplo cráneos u otras partes del cuerpo. También fueron utilizados para llevar a cabo guerras biológicas, lanzando a las fortificaciones cadáveres en descomposición o con enfermedades contagiosas con la intención de propagarlas [13].

2.3. Principio de funcionamiento del trebuchete

Se trata de un armazón en el que se apoya una palanca, en cuyo brazo más corto se coloca el contrapeso y en el brazo más largo, se coloca una honda en la que se sitúa el proyectil que se va a lanzar. 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 5).

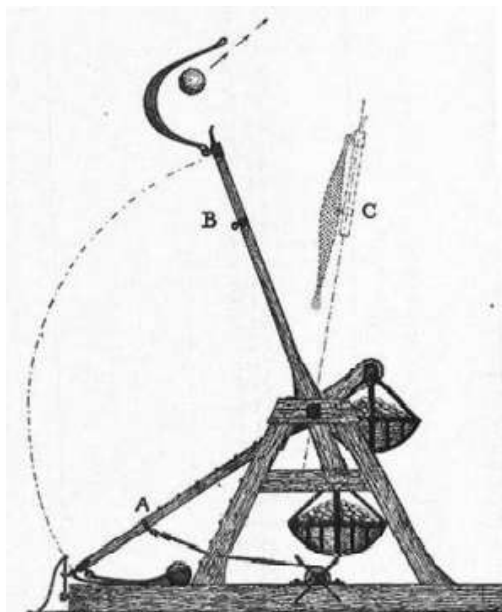


Figura 5: Movimiento de lanzamiento del trebuchete [14].

3. El Trebuchet de Mardi Ibn Ali al-Tarsusi

Mardi Ibn Ali al-Tarsusi, perteneciente a la dinastía Ayyubid del siglo XII, se puede considerar como perteneciente al movimiento entonces llamado “Filósofos de la Guerra”, considerados como grandes pensadores militares, por el valor e influencia de sus escritos en el desarrollo de armas y estrategias bélicas, de su época.

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 trebuchet de contrapeso, es por ello que la invención de este tipo de trebuchet se atribuye a Mardi Ibn Ali al-Tarsusi (Figura 6) [15].

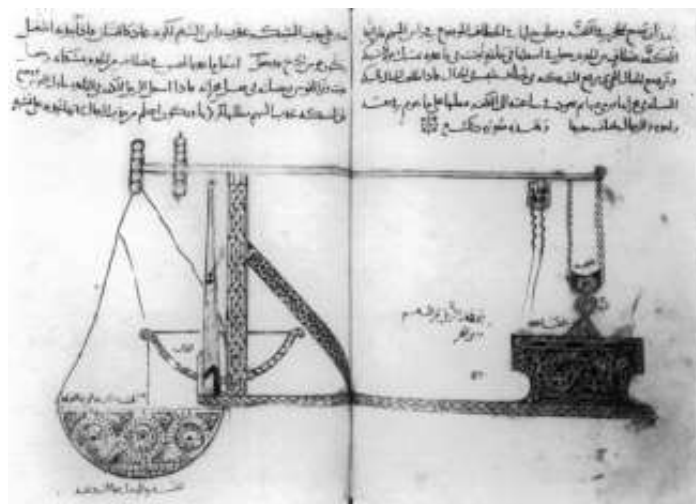


Figura 6: Trebuchet de Mardi Ibn Ali al-Tarsusi [12].

El trebuchet descrito por al-Tarsusi, hoy en día sería considerado un trebuchet híbrido por el contrapeso de tamaño reducido. En su manual, afirmaba que su diseño tenía la misma fuerza de lanzamiento que un trebuchet 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. También aseguraba, que el uso de esta única fuerza de la gravedad, haría que el trebuchet tuviera un mayor alcance y fuera más preciso. Lo que resultó ser cierto y dotó de gran ventaja a este tipo de arma.

Este diseño híbrido del trebuchet incluye una honda que da un efecto de látigo al proyectil (Figura 7), incrementando el alcance de este. Además, el trebuchet diseñado por al-Tarsusi tenía ruedas, lo que permitía su desplazamiento, que lo hizo todavía más formidable [15].

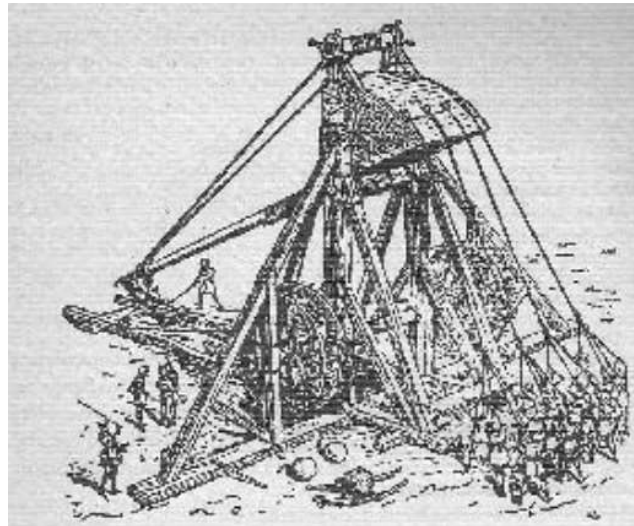


Figura 7: Representación de un trebuchet híbrido [16].

El trebuchet de Mardi Ibn Ali Al-Tarsusi fue probado en el asedio de la ciudad de Damietta, en Egipto, en el año 1218, lanzando rocas de unos 200 kilos a las murallas de la ciudad. El del trebuchet de contrapeso tal y como es conocido hoy en día se comenzó a utilizar en las Cruzadas, cuando los ingenieros europeos decidieron aumentar la masa del contrapeso con el objetivo de aumentar la potencia del trebuchet híbrido [15].

4. Metodología. Diseño y modelado geométrico

Como paso previo a la reconstrucción física del trebuchet, se ha realizado un modelado geométrico digital del mismo. Para ello se ha utilizado el software CATIA, que es un programa de ingeniería asistida para el diseño y fabricación asistido por ordenador y que actualmente es usado en muchos sectores de ingeniería.

Estos programas nos permitirán modelar piezas simples independientes que posteriormente y mediante el ensamblaje de ellas obtener los conjuntos. De estos modelados podremos obtener los planos técnicos, así como otros resultados.

Comenzando por la estructura base que soportará todo el conjunto, con los apéndices laterales y los postes centrales (Figura 8), el brazo lanzador, la puntera del brazo, el contrapeso, la biela, las ruedas de tracción (Figura 9) y la base.

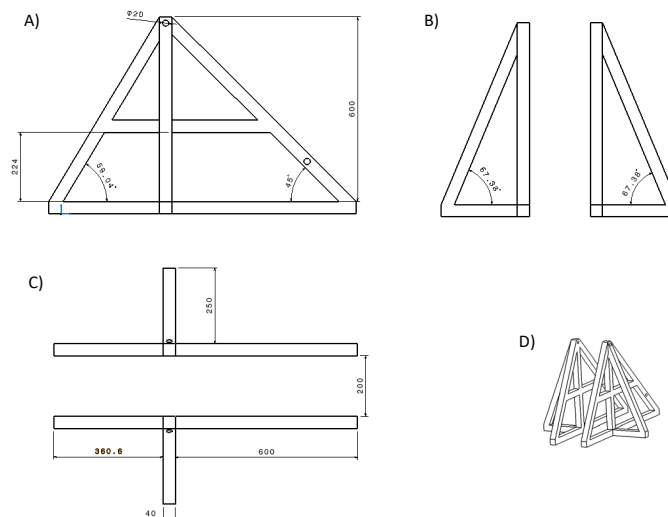


Figura 8: Estructura base. Vistas A) Frontal. B) Lateral. C) Planta. D) Isométrica. Elaboración propia.

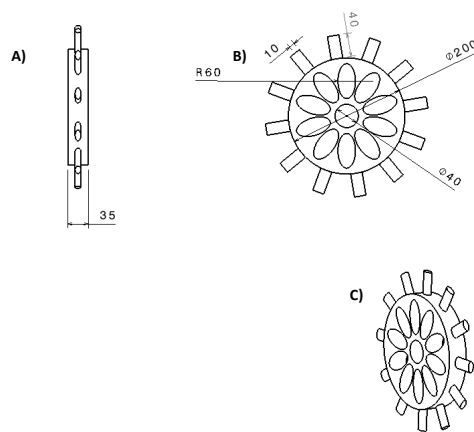


Figura 9: Rueda de tracción. Vistas A) Lateral. B) Frontal. C) Isométrica. Elaboración propia.

El ensamblaje de todas estas piezas simples en conjuntos más complejos que componen el mecanismo, se lleva a cabo empleando las relaciones de posición entre ellas, como: concéntrica en los ejes, rodillos, coincidente para hacer que las caras estén juntas, etc.

Una vez ensamblados, se puede realizar la simulación del movimiento que tendría el mecanismo, colocando virtualmente motores giratorios y de trayectoria, efecto de gravedad, fuerzas en las piezas etc. Y por último, con los complementos de simulación de Análisis por Elementos Finitos, pueden ser mallados, aplicarle fuerzas y analizarlos numéricamente, desde el punto de vista mecánico, térmico, etc., obteniendo los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos.

Una de las importantes funciones de que dispone este software es la de poder ensamblar un número indefinido de piezas, asignarle un material a cada una de ellas, y poder hacer así una simulación del conjunto más completa, que nos facilitará otras operaciones posteriores como la realización de la maqueta real del mecanismo, con ahorro de tiempo y trabajo.

El resultado del modelo digital del trebuchet es el representado en la siguiente Figura 10.

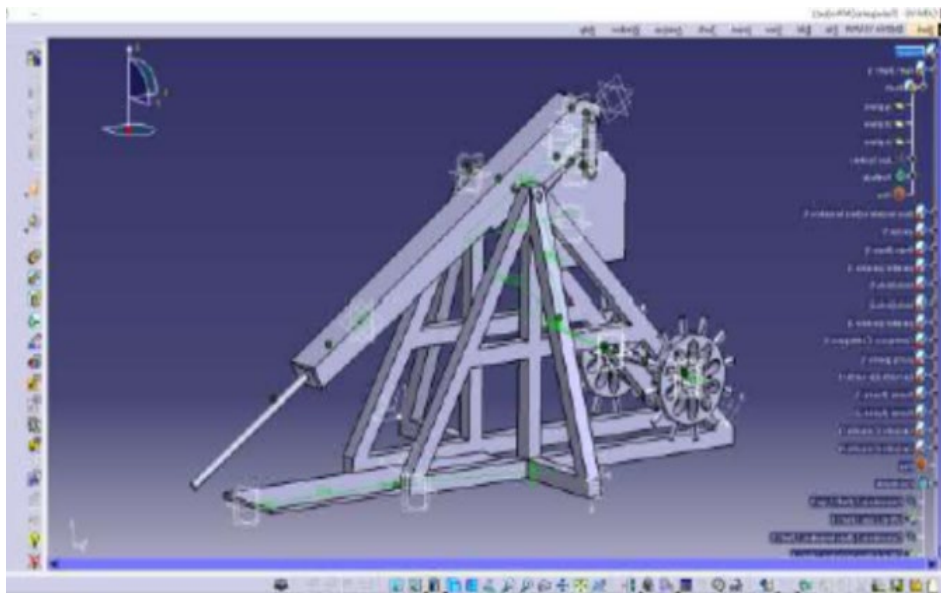


Figura 10: Modelado digital del Trebuchet. Elaboración propia

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

El mecanismo renderizado en el que se han obviado los cordajes de tensión, se puede ver en la Figura 11.



Figura 11: Renderizado del modelo digital. Elaboración propia.

5. Metodología. Análisis mecánico

A partir del modelado geométrico digital del mecanismo, se procede a su análisis mediante elementos finitos utilizando los módulos de “Analysis & Simulation” del mismo software CATIA utilizado, específicos de análisis mecánico y con los que a partir de fuerzas y cargas aplicadas, resortes, acción de la gravedad y motores de accionamiento estimados se lleva a cabo el estudio, obteniendo los resultados de esfuerzos, tensiones, deformaciones y desplazamientos resultantes (Figura 10).

Para este análisis se llevan a cabo los siguientes pasos:

- Modelado de cada una de las piezas por separado en 3D.
- Ensamblaje de todo el conjunto.
- Establecimiento de las condiciones de contorno (cargas, apoyos, materiales, etc.)
- Realización del mallado de las piezas.
- Análisis y obtención de resultados.
- Interpretación de resultados.

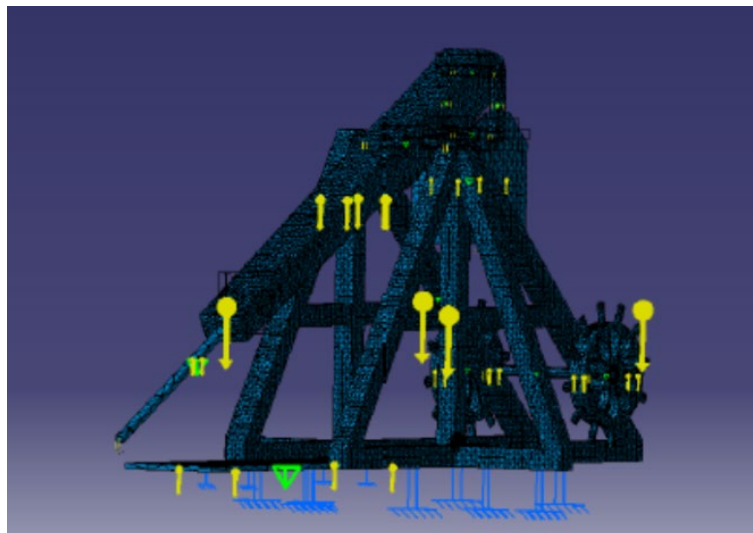


Figura 10: Ejemplo de mallado del modelo y resultados de deformaciones. Elaboración propia.

Se han realizado algunas simplificaciones como no considerar el rozamiento entre las piezas, que los materiales son isótropos y se han aplicado algunas condiciones de contorno, como para los pasadores que se mantengan rectos, que las caras mantengan su forma original y las restricciones de los apoyos.

Para realizar la simulación de las cargas estáticas se ha utilizado un mallado con distintos niveles, malla más fina en las zonas donde hay cargas aplicadas o discontinuidades del material y más basta conforme nos alejamos de esos puntos.

6. Resultados. Reconstrucción real a escala

Para el diseño de la maqueta se han tenido en cuenta ciertos aspectos iniciales. El más importante de ellos es la escala que se ha establecido en 1:10, para que la maqueta sea manejable, ilustrativa y que sea funcional de manera segura para su demostración de funcionamiento en el entorno al aire libre.

El resultado final se puede ver en las siguientes Figuras 11 a,b.

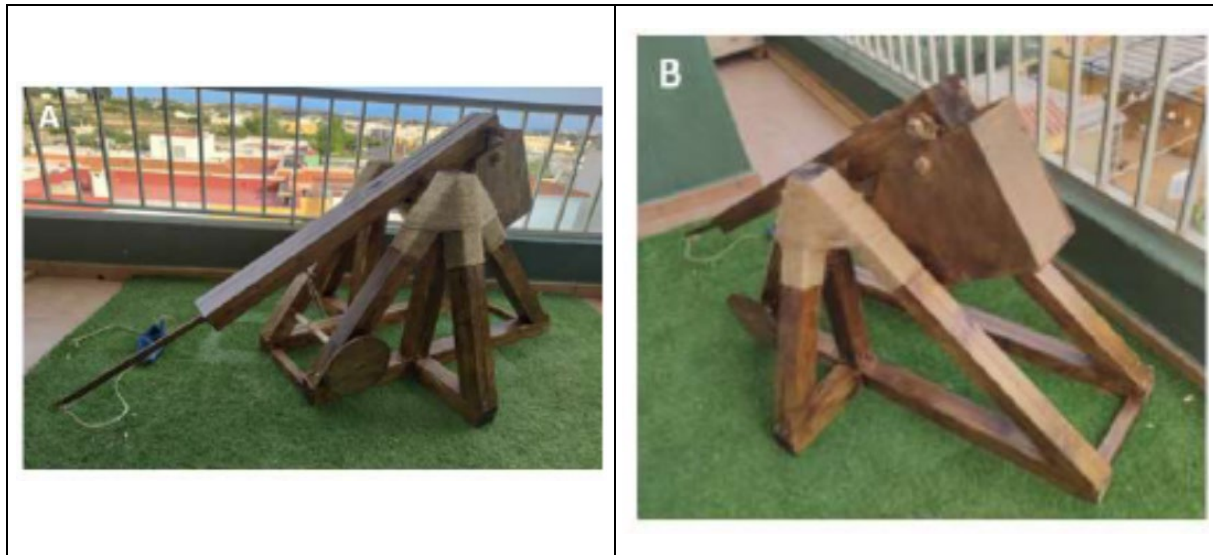


Figura 11a,b: Modelo real a escala, antes del disparo. Elaboración propia

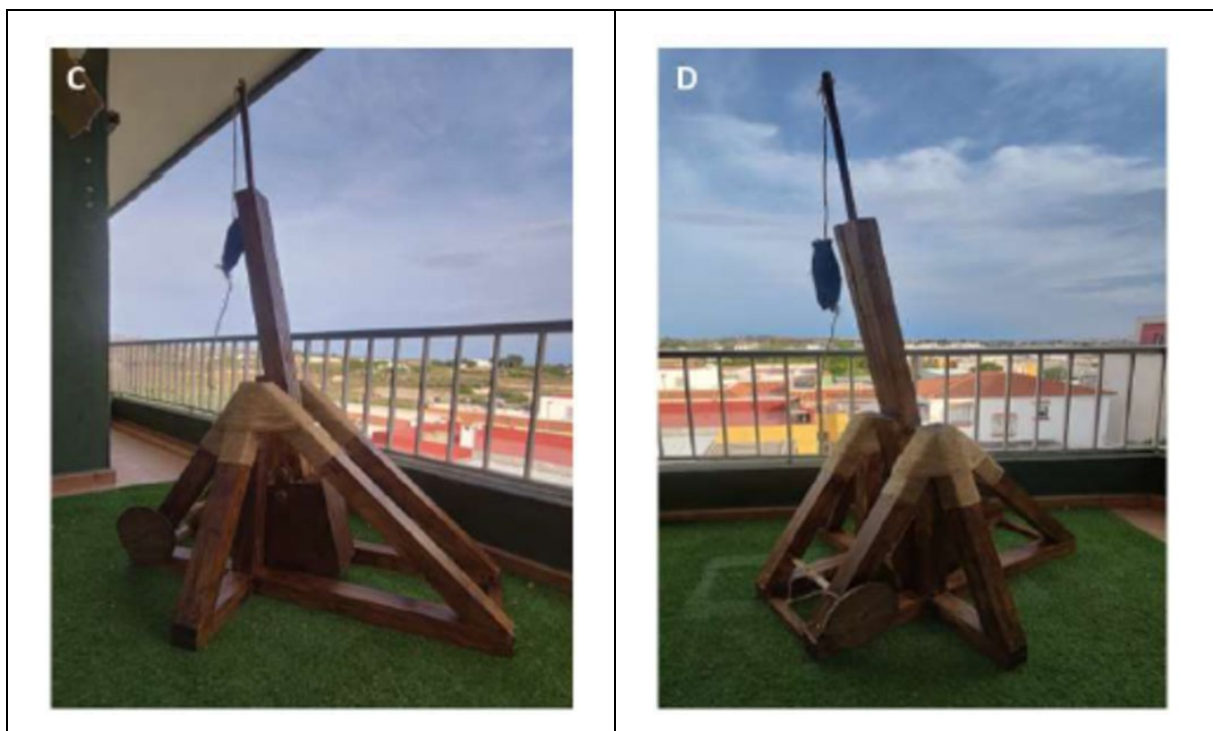


Figura 11c,d: Modelo real a escala, después del disparo. Elaboración propia

Para la reconstrucción tridimensional de la maqueta real a escala no se ha optado por ningún método de fabricación moderno, como pueden ser moldes, mecanizado (torno, fresadora, etc) o impresión 3D, sino que al tratarse de máquinas realizadas en la Edad Media, se ha decidido acercarse lo más posible a los métodos de fabricación empleados en la época para construir la maqueta del ingenio mecánico, utilizando para ello materiales comunes

como madera, cuerda y pasadores y tornillos metálicos y empleando para su ejecución tecnologías de fabricación manuales como corte, taladrado, uniones pegadas y/o atadas, etc.

7. Conclusiones

El estudio de máquinas históricas permite profundizar en el conocimiento de los mecanismos más elementales y entender mejor la evolución que se ha seguido hasta los diseños de mecanismos más complejos actuales, lo que da valor e impacto a este tipo de trabajos.

Como resultado de este trabajo se ha obtenido el modelado geométrico digital, el análisis mecánico y la reconstrucción física a escala de un arma de guerra medieval de gran importancia como fue el trebuchet.

La capacidad de los softwares actuales de ingeniería asistida nos permite analizar desde todos los puntos de vista, cinemático, estático, dinámico, los mecanismos e ingenios mecánicos de la antigüedad, para poder conocer el nivel de las técnicas empleadas en las diferentes épocas de la historia, de forma que podamos acercarnos a las tecnologías y a los “ingenieros” del momento.

Su modelado geométrico y la reconstrucción física a escala permite estudiar su movimiento y funcionamiento de una forma más visual y didáctica.

Esta metodología se puede utilizar como se ha hecho en este trabajo, para la recuperación virtual, así como para la ejecución de modelos a escala de ingenios y mecanismos antiguos, que nos ayudan a conocer la ingeniería de tiempos pasado, como es el caso de la maquinaria de guerra en la época medieval y en particular en este trabajo el trebuchete.

Asimismo, para la ejecución de las distintas fases de este tipo de trabajos, se hace necesaria la aplicación de los conocimientos de diferentes áreas de la ingeniería mecánica y de la fabricación, lo que los hace muy interesantes desde el punto académico.

Con este tipo de trabajos, enmarcados en el ámbito de la Historia de las máquinas y mecanismos, se analiza y profundiza en los conocimientos ingenieriles de otras épocas y permite su comparación con los actuales, lo que da valor a esta metodología, ya se constata que muchos de los avances mecánicos actuales están basados en ingenios y artefactos existentes en la antigüedad.

8. Referencias

- [1] Durán Becerra, T. La creación en tiempos de guerra y la explosión de la creatividad, RUTA: Revista Universit ria de Treballs Acad mics, n 5, Barcelona, (2013).
- [2] Bruhn de Hoffmeyer. Las armas en la historia de la reconquista. Gladius, 31-101. ISSN: 0435-029X, Buenos Aires, (1988).
- [3] González M n ez, C. La Urbanización del litoral del norte de España (siglos XII-XIV). Nájera, pp. 43-62. (1993).
- [4] D. Cotts, J. Europe’s Long Twelfth Century: Order, Anxiety and Adaptation, 1095-1229 (European History in Perspective). England, Palgrave Macmillan, (2013).
- [5] Soto Rodríguez, J.A. El arte medieval: Una mirada desde el siglo XI. Revista Tiempo y Espacio, n  26: pp. 67-93, (2011).
- [6] Ruiz Moreno, M. J. y Rebollo García, F. El trabuco de Cortés. XXXVI Coloquios Históricos de Extremadura. Vol. 2: 719-734. (2008).
- [7] Sierra C., C. E.. Tecnología B lica Medieval. Giro en la historia de la tecnología. Revista Universidad de Antioquia, n  315: pp. 52-60, (2014).
- [8] Ruiz Moreno, M.J., Rebollo García, F. El trabuco de Cortés. XXXVI Coloquios Históricos de Extremadura. Vol. 2: pp. 719-734. (2008).
- [9] Aranegui Gascó, C. Proyectiles de honda con epígrafes griegos atribuidos a Sagunto. Romula, n  2: pp. 43-52. (2003).
- [10] Ministerio de Defensa, Dirección General de Relaciones Institucionales. Aproximación a la historia militar de España. Volumen 1 y 3. ISBN: 84-9781-244-1. (2006).
- [11] Dreger de Araujo, V. C. A arte da guerra no s culo 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 Historia. (2004).
- [12] Chevedden, P., Eigenbrod, L., Foley, V., Soedel, W. The Trebuchet, Scientific American, pp. 66-71. (1995).

-
- [13] Suñé Arce, J. Técnicas de ataque y defensa en los asedios del siglo XIII: Ámbito catalano-aragonés y occitano. *Gladius*, pp. 113-130, (2013).
- [14] 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., Lúcio da Silva, W. Trebuchet construido com palitos de picolé. Instituto Federal de Minas Gerais, Bacharelado em Engenharia Mecânica, (2016).
- [15] Coetzee, D. y W. Eysturlid, L. *Philosophers of War: The Evolution of History's Greatest Military Thinkers*. Santa Barbara, 1: 1-191. (2013).
- [16] Soto Rodríguez, J.A. El arte medieval: Una mirada desde el siglo XI. *Revista Tiempo y Espacio*, nº 26: pp. 67-93. (2011).