

3D Parametric design and static analysis of the first Spanish winch used to drain water from mines

José Ignacio Rojas-Sola ^a & Jesús Molino-Delgado ^b

^a Universidad de Jaén, Jaén, España. jirojas@ujaen.es

^b Universidad de Jaén, Jaén, España. jmd00011@red.ujaen.es

Received: November 7th, 2014. Received in revised form: January 29th, 2015. Accepted: February 10th, 2015

Abstract

In this paper, we analyze in detail the first Spanish winch used to drain water from mines. It is a privilege of invention designed by Bernave Dombon in 1850. In particular, three-dimensional modeling is performed using software parametric (Catia v5 R21) of each of the elements of the set. Also, after obtaining the 3D model, a static analysis using techniques of Computer-Aided Engineering has been performed, thanks to software of finite element analysis (Simulia Abaqus v6.14-1), based on the analysis of the von Mises stress and displacement. So, the highest stress concentrations occur in the drum shaft and the supporting structure, and that the highest concentration of displacements on the drum shaft too, but the rupture of the elements does not occur in any case, making it a set properly sized.

Keywords: mining industrial historical heritage; winch; computer-aided design; computer-aided engineering; static analysis.

Diseño paramétrico tridimensional y análisis estático del primer malacate español utilizado para drenar agua de las minas

Resumen

En el presente artículo se analiza en detalle la primera máquina malacate desarrollada en España utilizada para la extracción del mineral. Se trata de un privilegio de invención diseñado por Bernave Dombon en 1850. En particular, se ha realizado el diseño paramétrico 3D con ayuda de software específico (Catia v5 R21) de cada uno de los elementos que componen el conjunto. Asimismo, una vez obtenido el modelo 3D, se ha realizado un análisis funcional estático mediante técnicas de Ingeniería Asistida por Ordenador realizado gracias al concurso del software de análisis por elementos finitos Simulia Abaqus v6.14-1, basadas en el análisis de las deformaciones, desplazamientos y tensión de von Mises, comprobando que las mayores concentraciones de tensiones se producen en el eje y en la estructura que soporta el tambor, y que la mayor concentración de desplazamientos se encuentra también en el eje del tambor, aunque no se produce en ningún caso la rotura de los elementos, por lo que resulta un conjunto bien dimensionado.

Palabras clave: patrimonio histórico industrial minero; malacate; ingeniería gráfica; ingeniería asistida por ordenador; análisis estático.

1. Introducción

El presente artículo sigue una línea de investigación en el campo de la minería iniciado por publicaciones anteriores del autor [1-6], relativo al estudio y caracterización del patrimonio histórico industrial minero español desde el punto de vista de la ingeniería gráfica e ingeniería asistida por ordenador.

La presente investigación tiene como objetivo principal el diseño paramétrico tridimensional de la primera invención histórica española de una máquina malacate y su análisis estático mediante elementos finitos.

De dicha invención histórica presente en el Archivo

Histórico de la Oficina Española de Patentes y Marcas [7], se conserva tan sólo un plano que incluye una memoria de descriptiva de los diferentes elementos que componen el conjunto.

Se trata del expediente 499 titulado “*Máquina malacate para desaguar pozos y aplicable a otros usos nuevos como lavado y triturado de minerales, etc*”, desarrollado por Bernave Dombon y presentado en dicha Oficina el 10 de junio de 1850, con una duración de 5 años, y clasificado como F04 en la clasificación internacional de patentes.

El malacate o baritel era accionado por fuerza animal y consistía en una estructura de madera con un árbol vertical o eje que en su parte superior lleva un tambor cilíndrico donde

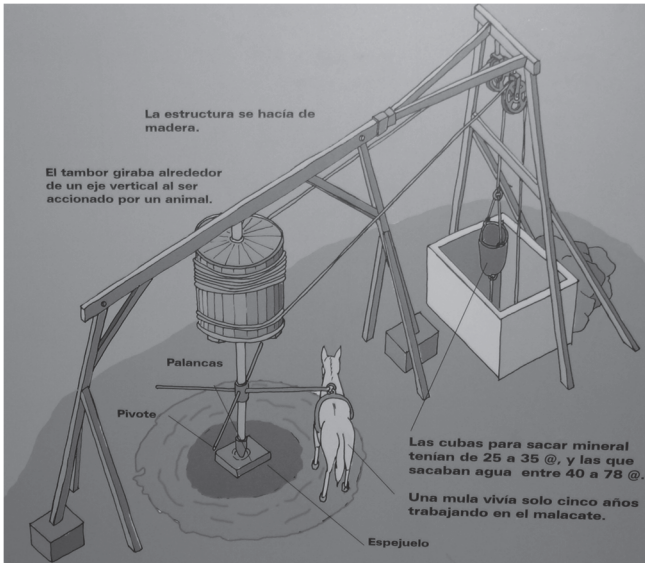


Figura 1. Esquema de malacate.

Fuente: Fotografía tomada del centro de interpretación del paisaje minero en Linares (Jaén, España).

se enrollan las maromas o cables que pasando por unas poleas hacían ascender o descender los recipientes de extracción [8]. La Fig. 1 muestra un esquema de malacate que se ajusta a la definición expresada anteriormente.

1.1. Descripción de la máquina malacate

La planimetría original presente en el expediente (Fig. 2), se compone de dos vistas diédricas correspondientes al alzado y a la planta superior con deficiencias en la representación gráfica y con medidas expresadas en varas castellanas (1 vara castellana equivale a 0,835905 m), incluyendo la señalización de los elementos que lo componen así como una descripción de cada uno de ellos. Así pues, los elementos que se muestran con su numeración son:

1. Armadura o bancada de madera, armada con tornillos, para la colocación de las diferentes piezas que componen la máquina.
2. Bancada de hierro sobre la que juega el manejo de la caballería.
3. Manejo y rueda motriz.
- 4 y 5. Ruedas colocadas a los extremos de un árbol horizontal para transmitir el movimiento a los siguientes.
6. Rueda puesta al extremo de un árbol horizontal colocado transversalmente respecto del anterior, por el que corren fijas en una manga las dos ruedas siguientes.
- 7 y 8. Ruedas para transmitir alternativamente el movimiento de derecha a izquierda y viceversa.
9. Palanca para engranar y desengranar alternativamente las ruedas 7 y 8.
10. Rueda colocada en el árbol de un cilindro en el que se enrolla un cintero o maroma.
11. Cilindro.
12. Rueda de trinquete.

13. Cojinetes sobre los que juegan los árboles.
14. Montante de madera para la colocación de las garruchas.
15. Garruchas o poleas, sobre las que pasa la maroma o cintero que eleva los cubos.
16. Cubos que giran por el centro y se llenan por el fondo por medio de una válvula.
17. Topes para hacer dar el vuelco a los cubos.
18. Artesa o vaciadero de madera.
19. Caño de desagüe de la misma.
20. Boca del pozo que ha de desaguar.
21. Indicaciones de la prolongación de los embarrados para aplicar esta máquina a los usos que se mencionan en la solicitud del privilegio.

2. Ingeniería gráfica

Esta fase de la investigación es fundamental pues de la precisión de los resultados obtenidos dependerá la obtención de resultados fiables en la fase de ingeniería asistida por ordenador, lo que permitirá realizar el análisis funcional de manera correcta. Por tanto, se destaca la importancia del modelado basado en CAD para una recuperación fidedigna de los restos del patrimonio cultural [9].

El diseño tridimensional se ha realizado gracias al software paramétrico Catia v5 R21 [10], a partir de la planimetría original, siendo esta fase clave para obtener

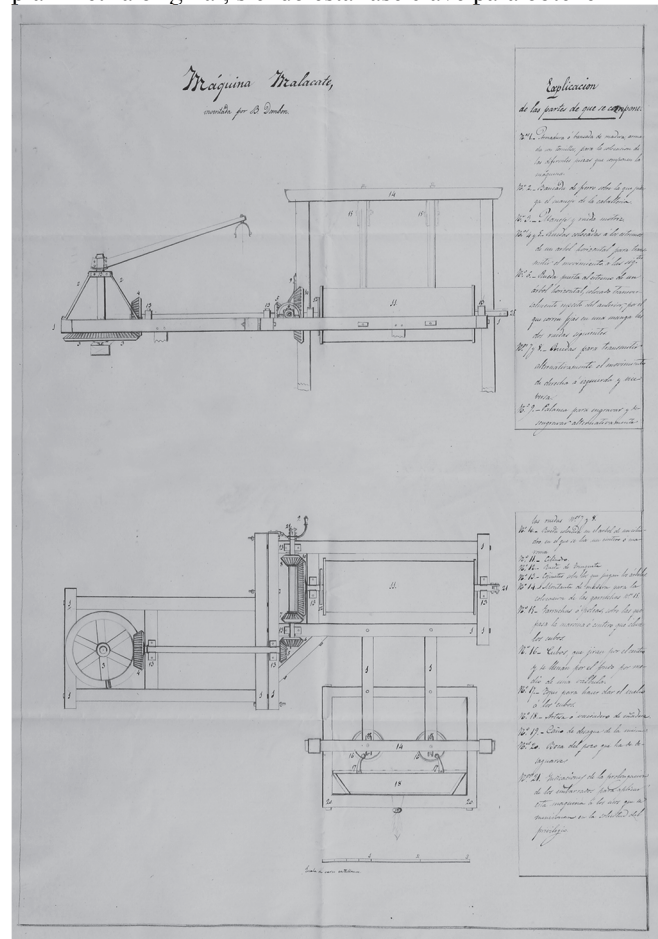


Figura 2. Ministerio de Industria, Energía y Turismo. Oficina Española de Patentes y Marcas. Archivo Histórico. Expediente nº 499.

resultados fidedignos en la fase de ingeniería asistida por ordenador.

Seguidamente se ha realizado el modelado de cada uno de los elementos que componen el conjunto: bancada de madera, bancada de hierro, rueda motriz y ruedas auxiliares (engranajes de 18, 32, 60 y 72 dientes), ejes A, B, C y D, tambor, poleas, artesa, así como otros elementos accesorios.

Una vez modelados todos los componentes de la máquina malacate, se procede al ensamblaje de todos ellos, mediante la aplicación de ciertas restricciones que fijan el movimiento de unos elementos respecto a otros, y por tanto, con diferentes grados de libertad.

Las Figs. 3 y 4 muestran el diseño paramétrico final del conjunto ensamblado y su apariencia realista mediante renderizado con el software Keyshot 3.3.15 [11].

3. Ingeniería asistida por ordenador

El análisis estático de la máquina malacate se ha realizado con técnicas de ingeniería asistida por ordenador, gracias al concurso del software de análisis por elementos finitos Simulia Abaqus [12], realizándose las siguientes operaciones: preprocesado, asignación de materiales, establecimiento de las condiciones de contorno, establecimiento de las fuerzas aplicadas, discretización o mallado, y obtención de resultados en lo relativo a las deformaciones, desplazamientos (mm) y tensión de von Mises (MPa).

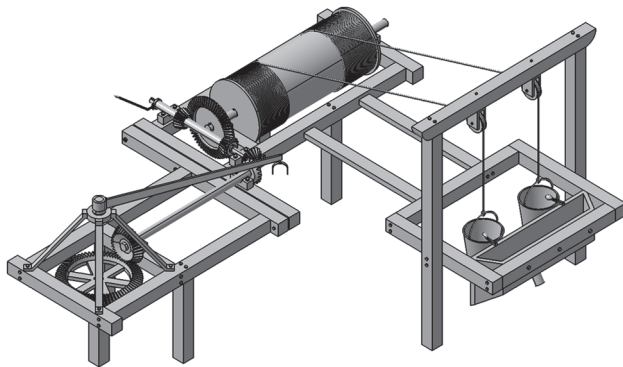


Figura 3. Diseño paramétrico final de la máquina malacate. Fuente: Elaboración propia.

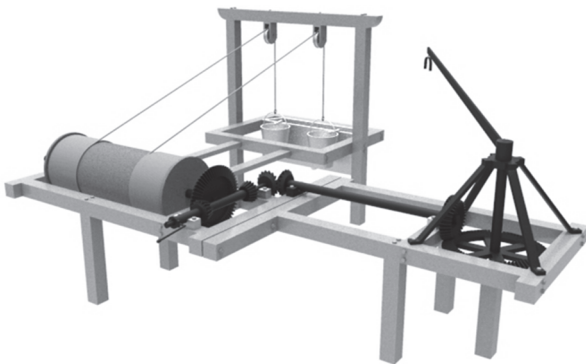


Figura 4. Renderizado final de la máquina malacate. Fuente: Elaboración propia.

3.1. Preprocesado

El preprocesado se realiza tras importar el ensamblaje en Simulia Abaqus, definiéndose las restricciones necesarias para la aplicación de las condiciones de contorno del modelo.

Para no aumentar la complejidad del modelo y por tanto, los requerimientos computacionales necesarios en la simulación, se han suprimido todos los elementos de sujeción y fijación, es decir, tornillos, arandelas, pasantes y demás piezas de función, permaneciendo el resto en el modelo final.

Sin embargo, aunque existen piezas como los engranajes que requieren una discretización o mallado muy fino, dicho proceso se ha sustituido por un análisis dinámico para comprobar las tensiones que se producen con el movimiento de los engranajes. Así pues, se ha realizado un análisis de precisión de las tensiones que surgen del contacto de dos engranajes rectos cualesquiera. Por esta razón, los engranajes únicamente cuentan como elementos que añaden peso al conjunto.

Así pues, se ha realizado un análisis estático de la máquina malacate en su conjunto de estructura y componentes, incluyéndose ejes, engranajes, bancadas, tambor, cubo, poleas y artesa, tratándose como un sólido rígido (Fig. 5).

3.2. Asignación de materiales

Al presentar el modelo como un sólido rígido, se asignará un único material a todo el conjunto, aunque realmente la máquina está formada por piezas de distintos materiales, escogiéndose aquél que tenga una mayor densidad y sea más desfavorable para el análisis, como es el hierro, y siendo sus propiedades físicas las siguientes: densidad (7.870 Kg/m^3), módulo de Young (175.000 MPa), coeficiente de Poisson (0,25), límite elástico (150 MPa) y tensión de rotura (350 MPa).

3.3. Condiciones de contorno

En este apartado se definen las restricciones de movimiento que tiene la máquina. En el caso de la máquina malacate se aplican en la base de los pilares de apoyo de la estructura (Fig. 6).

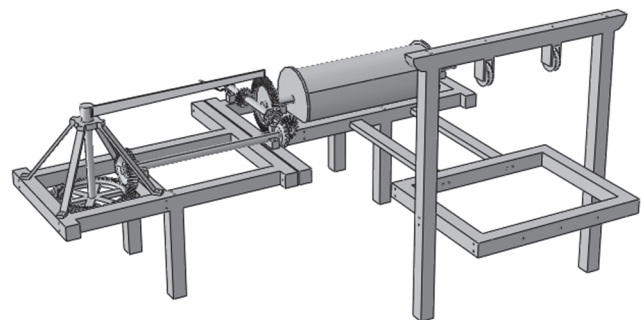


Figura 5. Modelo para el análisis general con Simulia Abaqus. Fuente: Elaboración propia.

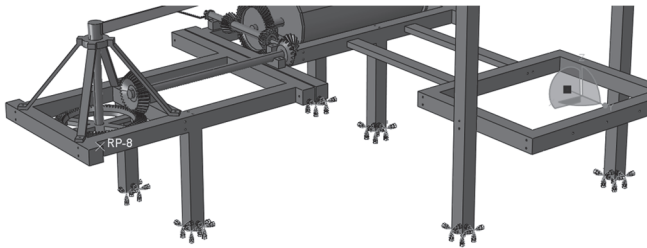


Figura 6. Restricciones de apoyos fijos en el conjunto.
Fuente: Elaboración propia.

3.4. Fuerzas aplicadas

Para aplicar las fuerzas en el modelo se han utilizado *couplings*, consiguiendo referenciar un punto a una superficie, de manera que al aplicar una fuerza en un punto determinado, realmente se está aplicando a la superficie. Esto se hace principalmente para las fuerzas del tambor y las poleas, al haber eliminado los cables. Las fuerzas que se han aplicado en este análisis son:

- Fuerza de empuje en la manivela: Sería la fuerza que imprimiría el animal en la manivela giratoria. Se ha supuesto que dicho animal ejerza una fuerza de 500 N equivalentes a 50 Kg, que sería suficiente para levantar la carga de los cubos mediante el sistema de engranajes y tambor. La dirección de esta fuerza es perpendicular al plano de la manivela y aplicada en su extremo. De esta forma, y tal como está orientada la manivela en el modelo a 45 grados, se ha dividido la fuerza en sus componentes según los ejes X e Y, obteniendo 353,5 N en cada coordenada.
- Carga en el tambor: Se ha incorporado una carga en el tambor que emula la carga que obtendría por el arrollamiento del cable. Puesto que el cable tiene un ángulo de 17,63 grados, se ha dividido la fuerza en sus componentes, obteniendo 1367,69 N en la coordenada Y, y 427,56 N en la coordenada Z.
- Carga en las poleas: Se han planteado las mismas cargas que en el tambor pero en sentido contrario para suplir el haber eliminado los cables, imponiéndose además la carga vertical que levantaría el animal y que estaría aplicada en los cables. Esta carga tendría un valor igual al peso de los cubos más el peso del agua que transportan, de manera que se obtiene una carga negativa en el eje Z con un valor de 1.432,97 N.
- Gravedad: Se aplica la fuerza de la gravedad al conjunto.

La Fig. 7 muestra las cargas aplicadas en el modelo.

3.5. Discretización o mallado

Simulia Abaqus cuenta con un módulo específico para realizar el mallado del modelo, que se realiza de forma automática, aunque se puede obtener un refinamiento de la malla.

En un principio el programa no permite mallar el ensamblaje, ya que por defecto el tipo de malla es hexaédrica, lo que es imposible de aplicar a un modelo tan complejo como éste; por tanto, se tiene que aplicar una malla de tipo tetragonal. Dicha malla tiene menor precisión

que la malla hexaédrica, pero los resultados arrojados serán suficientemente válidos para este análisis.

En la Fig. 8 se aprecia el mallado tetragonal establecido inicialmente de forma automática por Abaqus.

En dicha figura, se puede apreciar que es un mallado muy grosero, por lo que se opta por cambiar el tamaño medio del elemento de la malla y aumentar el número de nodos en ciertas zonas que pueden ser más problemáticas, apreciándose el resultado final en la Fig. 9.

Así pues, se puede comprobar que el resultado del refinamiento de la malla es considerablemente mejor, estando formada dicha malla por elementos cuadráticos tetraédricos (C3D10).

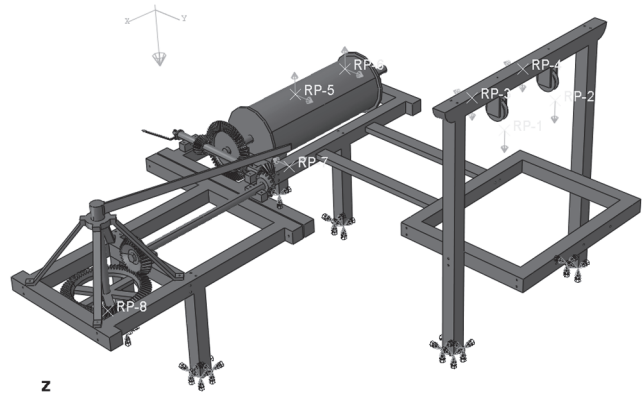


Figura 7. Cargas aplicadas al conjunto.
Fuente: Elaboración propia.

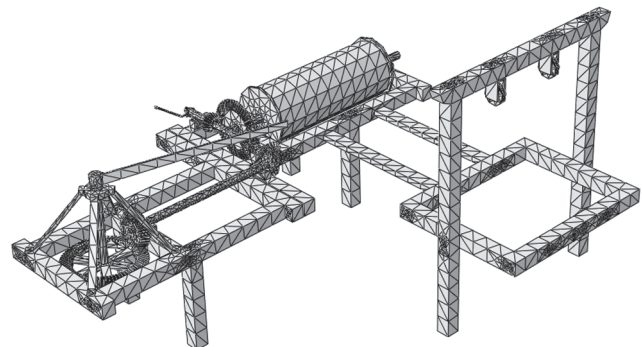


Figura 8. Discretización inicial realizada automáticamente por Abaqus.
Fuente: Elaboración propia.

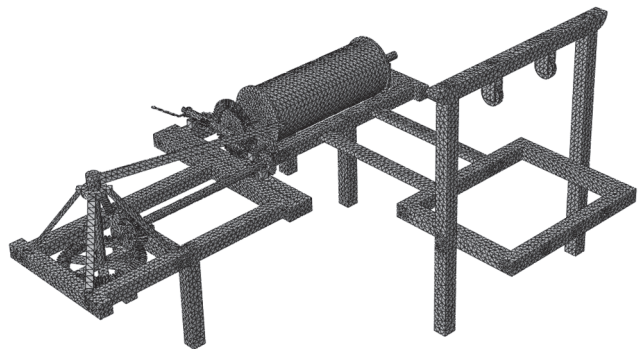


Figura 9. Discretización refinada realizada por Abaqus.
Fuente: Elaboración propia.

3.6. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos han sido los siguientes:

3.6.1. Deformaciones

La deformación representada en las Figs. 10 y 11 presenta un escalado realizado por el programa de 18,59:1.

En la Fig. 10 se muestra la planta de la máquina malacate, donde se puede apreciar cómo la manivela ha sufrido una deformación por el esfuerzo aplicado perpendicular a ella.

En la Fig. 11 se puede observar el alzado del conjunto, apreciándose que la estructura que soporta el tambor ha sufrido una deformación por la carga soportada así como el peso del tambor.

3.6.2. Desplazamientos

En la Fig. 12 se aprecia el desplazamiento que tienen los elementos de la máquina. Cabe destacar que el desplazamiento (en mm) que indica el análisis en la manivela no sería real puesto que en realidad la manivela giratoria no está empotrada a la estructura, sino que puede girar.

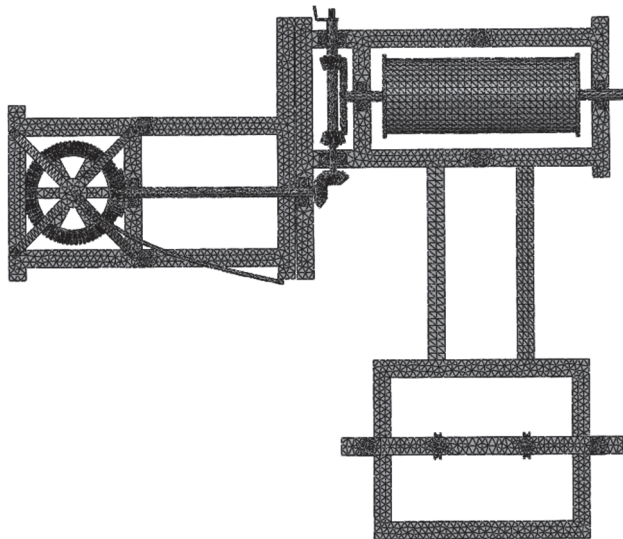


Figura 10. Vista en planta de la deformada del modelo.
Fuente: Elaboración propia.

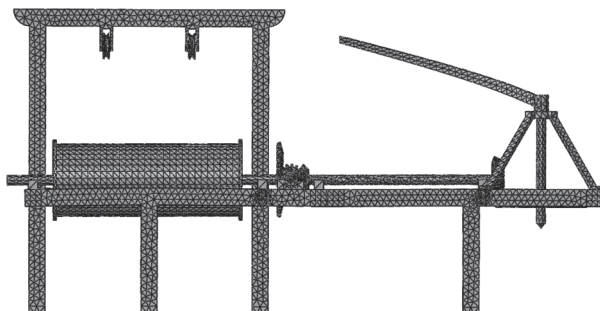


Figura 11. Vista de alzado de la deformada del modelo.
Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, el desplazamiento producido en el resto de componentes presenta resultados mucho más lógicos. El tambor con su peso por efecto de la gravedad flexiona el eje sobre el cual se apoya e incluso la estructura cede con el peso, siendo lógico pensar que dependiendo del material del tambor la deformación sería diferente.

En la Fig. 13 se ha limitado el máximo de deformación a 3 mm, con lo que se puede apreciar cómo se reparte ésta a lo largo de la estructura. Así pues, se ha podido comprobar que existen desplazamientos de aproximadamente 2 mm en un extremo del tambor, así como en la estructura que lo sujeta.

3.6.3. Tensiones de von Mises

Las tensiones de von Mises se representan en la Fig. 14.

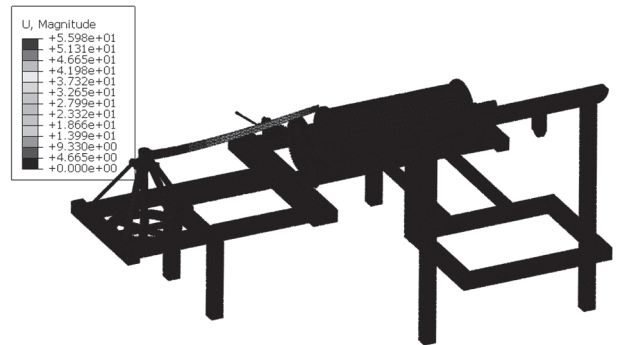


Figura 12. Desplazamientos del modelo.
Fuente: Elaboración propia.

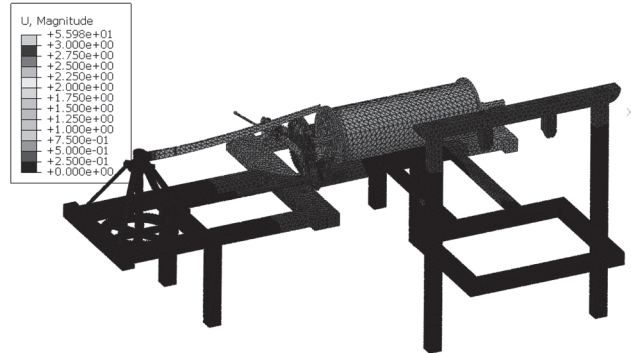


Figura 13. Desplazamientos con valor máximo de 3 mm del modelo.
Fuente: Elaboración propia.

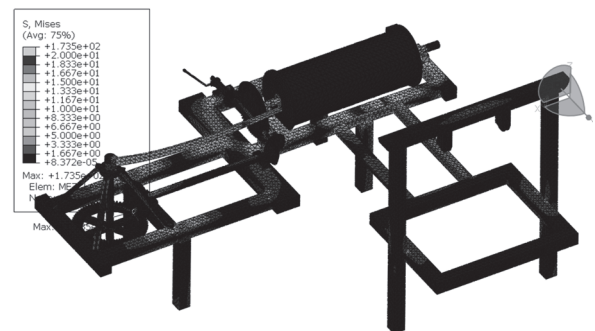


Figura 14. Tensiones de von Mises limitadas hasta 20 MPa del modelo.
Fuente: Elaboración propia.

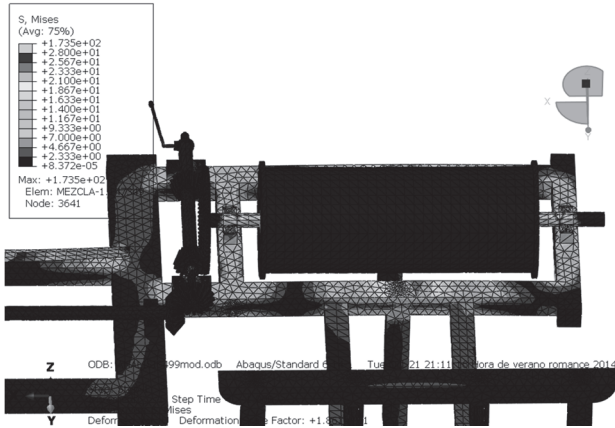


Figura 15. Detalle de las tensiones en la zona del tambor.
Fuente: Elaboración propia.

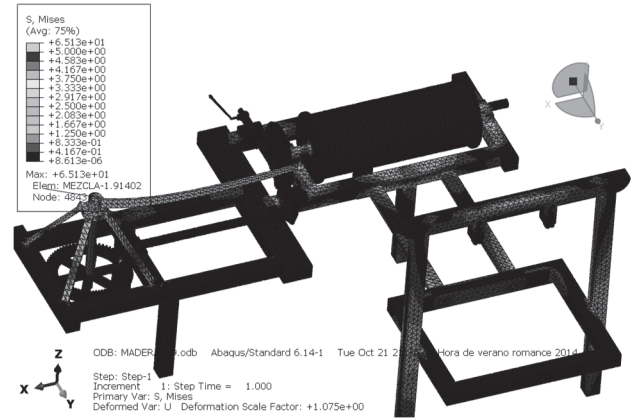


Figura 16. Tensiones del modelo en madera limitadas a 5 MPa.
Fuente: Elaboración propia.

La escala ha sido limitada a 20 MPa para poder observar la distribución de tensiones. Así pues, se aprecia que el máximo estaría fuera de ese rango en torno a los 173 MPa; sin embargo, se ha podido localizar la zona de ese máximo correspondiendo a un punto aislado donde la tensión no tiene continuidad, debiéndose probablemente a un error en un elemento de la malla.

Como es lógico, se aprecia que las mayores tensiones se muestran alrededor del tambor, pues es el elemento más pesado en este análisis, aún más que la carga que sujetan los cables que apenas crea una tensión de 5 MPa en la viga que sostiene las poleas.

También hay que destacar que el tamaño de esta máquina es considerable, ya que mide varios metros de longitud y las vigas tienen una sección de 20x20 cm².

En la Fig. 15 se puede observar con mayor detalle la viga que más sufre a causa del tambor.

En dicha figura, se puede observar que el eje del tambor soportaría una tensión cercana a los 30 MPa. Por lo tanto, a la vista de los resultados expuestos se puede afirmar que suponiendo la máquina fabricada íntegramente de hierro resistiría perfectamente, puesto que las mayores tensiones se concentran alrededor del tambor y no superan los 30 MPa, siendo el valor del límite elástico del hierro de 150 MPa.

Comparativa con madera

A modo de comparativa se muestran las Figs. 16 y 17, suponiendo que tanto la estructura como los componentes estuviesen realizados en madera.

Para la madera se han supuesto las siguientes propiedades físicas: densidad (670 kg/m³), módulo de Young (10.000 MPa), coeficiente de Poisson (0,4), límite elástico (10-15 MPa, dependiendo de la dirección de las fibras) y tensión de rotura (50 MPa, dependiendo de la dirección de las fibras).

En el caso de la madera se puede observar claramente que el mayor desplazamiento estará en la viga donde se fijan las poleas que aguantan el peso de la carga de los cubos, alcanzando dichos desplazamientos un valor aproximado de 7 mm. Al ser el tambor mucho menos pesado que en el caso anterior, la deformación mayor se tendrá donde se localiza

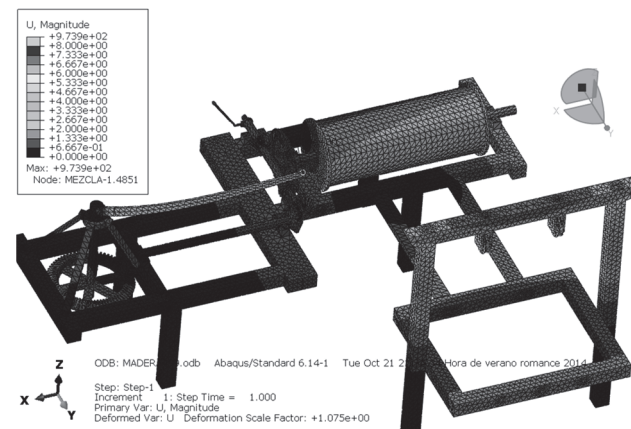


Figura 17. Desplazamientos del modelo en madera limitados a 8 mm.
Fuente: Elaboración propia.

la carga y no en la zona circundante del tambor. En cuanto a las tensiones, se observa que las máximas se localizan en el eje del tambor.

A la vista de estos resultados obtenidos, se puede decir que la madera no llegaría a la tensión de rotura en ningún lado, pero no se podría afirmar con total seguridad puesto que dependería de la dirección de las fibras de la madera.

El caso real dependería de muchas variables puesto que realmente habría que realizar un análisis dinámico. Sin embargo, se intuye que la solución estaría en un término medio entre los dos casos expuestos, ya que la mayor parte de los componentes de la máquina son de hierro mientras que la estructura y el tambor podrían estar fabricados en madera.

3.6.4. Análisis dinámico de contacto entre engranajes

El modelo que se va a analizar consiste en un par de engranajes cualesquiera de dientes rectos que giran solidariamente y con las mismas medidas, mostrando la Tabla 1 las características de los mismos.

Una vez realizado el croquis se extrusiona para darle volumen. Se crean dos instancias iguales para tener los dos engranajes y se ensamblan a la distancia de su diámetro primitivo, quedando fijados como se aprecia en la Fig. 19.

Tabla 1.

Características del engranaje.

Número de dientes	20
Diámetro primitivo	4 cm
Diámetro exterior	4.4 cm
Adendum	0.2 cm
Dedendum	0.2314 cm
Espesor del diente	0.31413 cm
Largo del diente	0.4 cm
Profundidad del agujero	0.4314 cm
Espesor angular	9°
Diámetro interior	3.872592776 cm
Ángulo de presión	14.5°

Fuente: Elaboración propia.

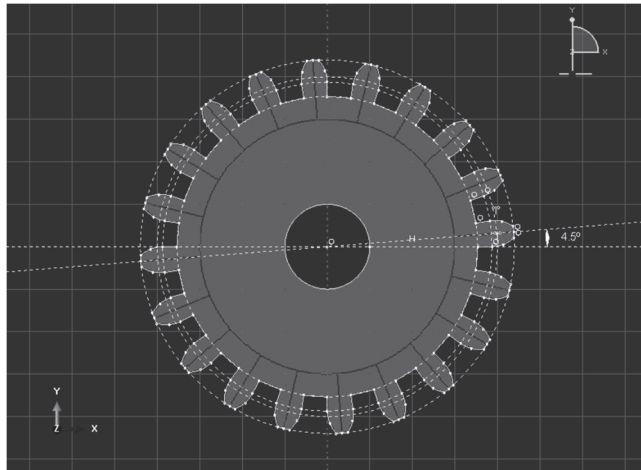


Figura 18. Croquis del engranaje.

Fuente: Elaboración propia.

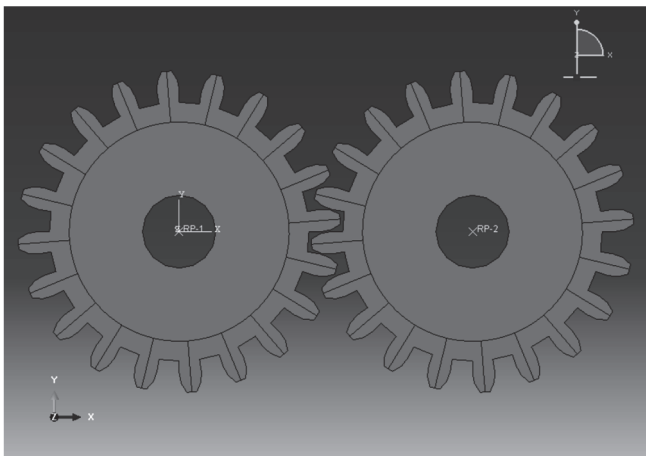


Figura 19. Ensamblaje de engranajes.

Fuente: Elaboración propia.

Con estas características se ha dibujado el croquis del engranaje que se muestra en la Fig. 18.

Como material se ha elegido hierro, fijándose las condiciones de contorno que permiten que los engranajes puedan girar así como una pequeña rotación para que entren

en contacto aplicando un momento. Se aplica además una fricción con coeficiente 0,3, y como contacto se elige ‘superficie con superficie’.

Finalmente, se crea la malla de tipo QUAD para ambos engranajes, quedando finalmente como se aprecia en la Fig. 20.

El análisis ha sido realizado considerando únicamente un comportamiento elástico (lineal) del material. Sin embargo, un análisis completo se realizaría considerando un comportamiento elástico-plástico (cuadrático) del material.

No obstante, el análisis con un comportamiento lineal, ha arrojado unos resultados aceptables que muestran la distribución de tensiones de von Mises en los dientes y zonas circundantes de ambos engranajes, apreciándose una concentración de tensiones en la zona de contacto entre dientes (indicado en rojo en la Fig. 21).

Se aprecia que en la zona de contacto entre los dientes se localiza la mayor tensión así como en los ángulos rectos de los dientes que están entrando en contacto en ese momento.

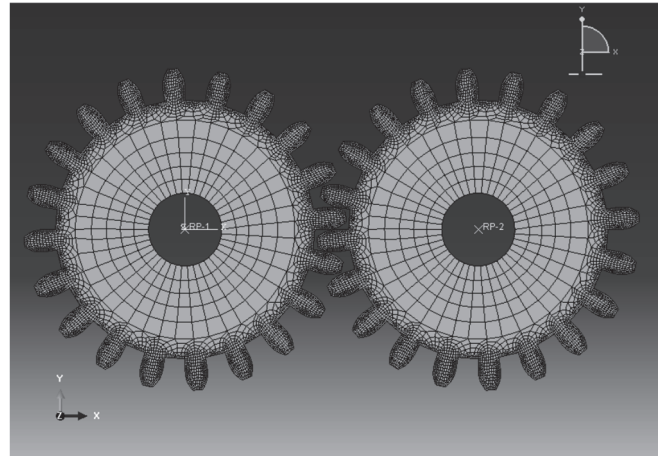


Figura 20. Mallado de los engranajes.

Fuente: Elaboración propia.

Las tensiones obtenidas tras el primer *frame* se muestran en la Fig. 21.

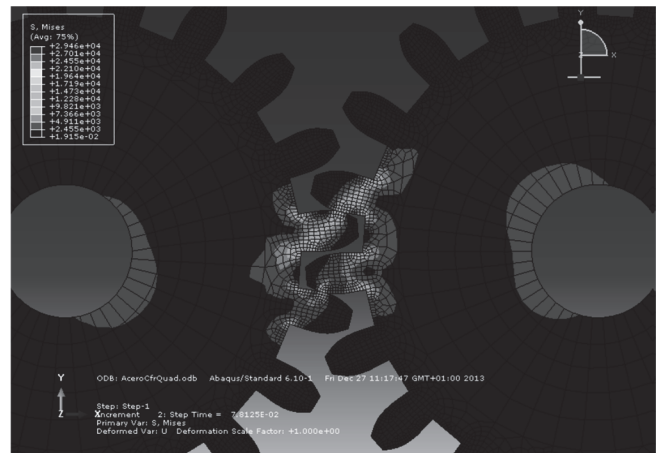


Figura 21. Tensiones de von Mises tras el análisis de contacto.

Fuente: Elaboración propia.

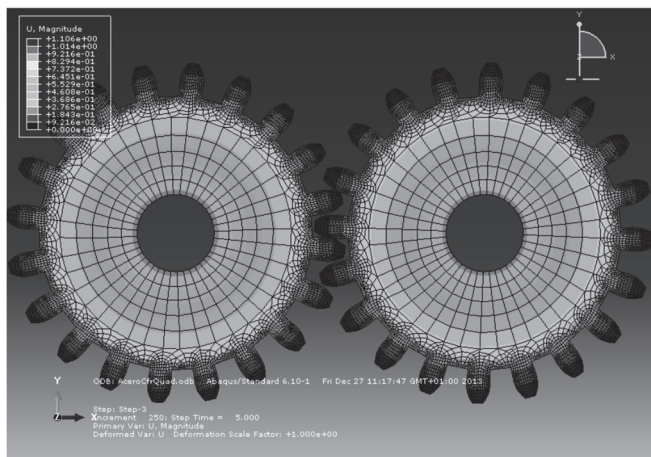


Figura 22. Desplazamientos sufridos por los engranajes.
Fuente: Elaboración propia.

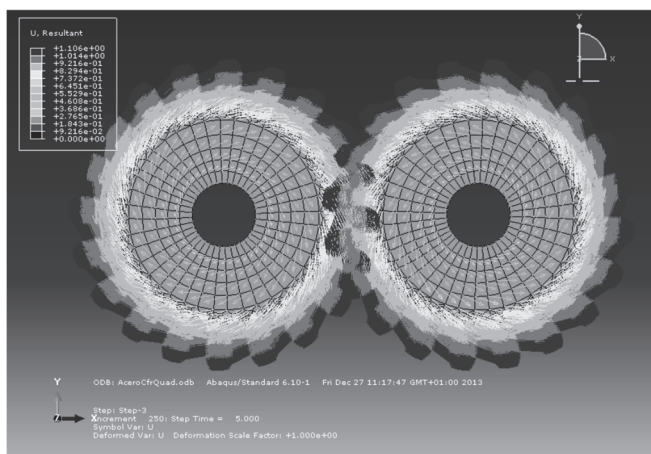


Figura 23. Vectores directores de los desplazamientos.
Fuente: Elaboración propia.

También se puede observar una tensión algo mayor en el centro de los engranajes donde estaría situado el eje al cual está fijado el engranaje.

Por otro lado, en la Fig. 22 se puede observar cómo se reparten los desplazamientos.

Conforme va girando el primer engranaje se arrastra el segundo, de manera que los dientes de ambos engranajes sufren los mismos desplazamientos, como es lógico.

Finalmente, se representan a continuación los vectores directores de los desplazamientos (Fig. 23).

De dicha figura, se puede apreciar cómo los vectores de mayor módulo se encuentran en los dientes, y dirigidos además en la dirección de rotación de cada engranaje, intuyéndose además que estos vectores directores llevarán la misma dirección en todos los casos, sin importar el material, variando únicamente el módulo de dichos vectores en cada caso concreto.

4. Conclusiones

Se ha documentado geoméricamente la primera máquina malacate diseñada en España en 1850 para la

extracción del mineral mediante el software paramétrico Catia v5 R21, y se ha realizado el análisis estático de la misma, gracias al concurso del software de análisis por elementos finitos Simulia Abaqus 6.14-1.

Se conoce que en la fecha de presentación de dicha invención histórica no existía normalización que facilitara la correcta interpretación del plano, por lo que se han tenido que realizar algunas suposiciones siempre de forma que el diseño fuera realizable y funcionara correctamente.

Asimismo, se han realizado diversas simplificaciones en el análisis estático debido a la complejidad de éste, y a los altos requerimientos computacionales que se hubieran necesitado.

Así pues, una vez obtenido el diseño paramétrico 3D, se ha realizado un análisis funcional estático mediante técnicas de Ingeniería Asistida por Ordenador, basadas en el análisis de las deformaciones, los desplazamientos y la tensión de von Mises, comprobando que tanto las tensiones como los desplazamientos se encuentran localizados en el eje que soporta el tambor cilíndrico y en la estructura que lo soporta, no superando en ningún caso los 3mm, ni la tensión de rotura del hierro, concretamente no superando los 30 MPa, en el caso de la simulación como sólido rígido realizado íntegramente en hierro, como material más desfavorable.

A la vista de los resultados obtenidos se puede afirmar que la máquina malacate está correctamente diseñada. Sin embargo, podría ser ciertamente mejorable, puesto que podría elevar uno de los cubos y hacer descender el otro, siendo una tarea imposible debido al diseño actual ya que existe una interferencia entre el cable que llega al tambor y la estructura soporte o bancada de madera.

Si se realiza el análisis estático de la máquina malacate, se puede comprobar que fabricándola bien en hierro o en madera no habría problemas de esfuerzos, puesto que no se llegan a las tensiones de rotura de dichos materiales. Sin embargo, habría que analizar detalladamente el caso en el que existiesen componentes de ambos materiales.

Agradecimientos

La investigación expuesta en el presente artículo se ha realizado en el seno del Proyecto de Investigación titulado ‘*El patrimonio histórico industrial minero: un estudio integral para su puesta en valor y difusión desde la ingeniería gráfica*’ (HAR2012-30723), financiado en el seno del Plan Nacional de Investigación, Desarrollo e Innovación (2008-2011) por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España.

Referencias

- [1] Rojas-Sola, J.I., Montalvo-Gil, J.M. and Castro-García, M., Modelado tridimensional y análisis funcional de una cabria para la extracción del mineral. DYNA, 80 (181), pp. 118-125, 2013.
- [2] Rojas-Sola, J.I. and Martínez-Escobar, J.P., Modelado tridimensional y análisis funcional de una invención histórica española del siglo XIX para la extracción del mineral: La máquina Emilina. DYNA, 82 (189), pp. 13-21, 2015.
- [3] Rojas-Sola, J.I. and Palomares-Muñoz, I., Modelado tridimensional y análisis funcional de un castillete metálico: Comparación con un castillete de mampostería. DYNA, (en evaluación), 2015.

- [4] Rojas-Sola, J.I., Montalvo-Gil, J.M. and Castro-García, M., Geometric documentation of mining industrial historical heritage: application to a Cornish pumping engine house from the ancient mining district in Linares-La Carolina (Jaen), Proceedings of XXIII International Conference on Engineering Graphics, 2013.
- [5] Rojas-Sola, J.I., Lupiáñez-Cruz, P. and Carranza-Cañadas, M.P., Caracterización tecnológica de las invenciones del Archivo Histórico de la Oficina Española de patentes y marcas relacionadas con la fase extractiva del mineral: privilegios de invención (1826-1878). De Re Metallica, 22, pp. 93-104, 2014.
- [6] Rojas-Sola, J.I., Lupiáñez-Cruz, P. and Carranza-Cañadas, M.P. Caracterización tecnológica de las invenciones del Archivo Histórico de la Oficina Española de patentes y marcas relacionadas con la fase extractiva del mineral: patentes de invención (1878-1966). De Re Metallica, 23, (*en prensa*), 2014.
- [7] Archivo Histórico de la Oficina Española de Patentes y Marcas. [on line]. Available at: <http://historico.oepm.es/archivohistoricow3c/index.asp>
- [8] Menéndez-Suárez, C., Los castilletes mineros: Una aproximación a su tipología. Energía & Minas: Revista profesional, técnica y cultural de los Ingenieros Técnicos de Minas, 8, pp. 46-53, 2010.
- [9] Bouza-Rodríguez, B., Comesana-Campos, A. and Gonzalez-Pineiro, L. CAD-based methods applied to the reconstruction of archaeological remains. DYNA, 80 (179), pp. 70-78, 2013.
- [10] Tikoo, S., Catia v5 R21 for designers. Hammond (Indiana): CADCIM, 2012.
- [11] Jo, J.L., KeyShot 3D rendering: showcase your 3D models and create hyperrealistic images with KeyShot in the fastest and most efficient way possible. Birmingham (United Kingdom): Packt Publications, 2012.
- [12] Ventakesh, C., Getting started with Abaqus - Workbook 1: Linear Static Analyses and Basic Mesh Generation. Hyderabad (India): KFour Metrics, 2012.

J.I. Rojas-Sola, es Doctor e Ingeniero Industrial y catedrático de universidad en el área de expresión gráfica en la ingeniería en la Universidad de Jaén, España. Es jefe del Grupo de Investigación 'Ingeniería Gráfica y Arqueología Industrial' desde 1996 y ha sido director para Europa del Oeste de la International Society for Geometry and Graphics desde 1999 hasta 2008. Además, es revisor de artículos científicos en más de 20 revistas internacionales indexadas en el JCR, y autor en más de 200 artículos y comunicaciones a Congresos Internacionales. Además, es experto evaluador de proyectos de investigación, desarrollo e innovación para los Gobiernos de España e Italia. Asimismo, es investigador principal en numerosos proyectos de investigación, y director de tesis doctorales. Sus líneas de investigación incluyen arqueología industrial, ingeniería gráfica aplicada al patrimonio industrial o cultural, ingeniería asistida por ordenador, animación por ordenador, realidad virtual, realidad aumentada, e historia de la tecnología, entre otras.

ORCID: 0000-0001-9001-1050

J. Molino-Delgado, es Ingeniero Técnico Industrial en 2012 y finaliza sus estudios en Ingeniería Industrial en 2014 ambos por la Universidad de Jaén, España Sus intereses se centran en el diseño y el análisis por elementos finitos.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Mecánica

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Mecánica

Mayor información:

E-mail: acmecanica_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 4259262