

Modelado tridimensional y análisis estático de un castillete metálico articulado español para la extracción del mineral

José Ignacio Rojas-Sola, Isis Palomares-Muñoz
de Universidad de Jaén

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7695>

1. INTRODUCCIÓN

La importancia de la actividad minera para la humanidad a lo largo de los siglos está fuera de toda duda, de forma que las manifestaciones del patrimonio cultural ligado a dicha actividad son estudiadas, conservadas y puestas en valor para las futuras generaciones.

Un reciente estudio muestra la evolución histórica y caracterización tipológica-funcional de los distintos ejemplos de patrimonio industrial minero ligado a los distintos procesos de laboreo de minas [1], permitiendo al lector a situarse en el contexto histórico-tecnológico.

La investigación presentada en este artículo trata de arrojar luz sobre uno de los ejemplos más notables de dicho patrimonio histórico como es el castillete minero, del que se pueden encontrar hasta 10 tipologías en España [2]. En concreto el castillete objeto de estudio, está situado en el antiguo distrito minero de Linares-La Carolina, que fue el tercer distrito minero más importante de España en relación al número de pozos mineros con castilletes, tras los de Asturias y Córdoba, y que constituye uno de los 100 ejemplos más destacados de patrimonio industrial en España según TICCIH (*The International Committee for the Conservation of the Industrial Heritage*). Dicho distrito minero ha sido estudiado en detalle y muestra al lector las características detalladas de los pozos que presenta [3].

El presente artículo sigue una línea de investigación en el campo de la minería iniciado por publicaciones anteriores relacionadas con el estudio del

patrimonio histórico minero y su caracterización desde la perspectiva de la ingeniería gráfica y el diseño e ingeniería asistidos por ordenador [4-8].

La presente investigación tiene como objetivo principal el análisis estático de un castillete metálico situado en el antiguo distrito minero de Linares-La Carolina (Jaén, Spain), concretamente en el pozo de la Esmeralda en Bailén, donde predominaba la minería del plomo, mediante la explotación de la galena (densidad de 7.600 kg/m³). Dicho pozo cuenta con una profundidad de 450 m y perteneció a la empresa nacional ADARO. Fabricada por *Ensidesa* y montada por la desaparecida empresa *La Constancia*, estuvo en funcionamiento hasta 1986, siendo el último castillete que se instaló en el distrito [3].

Los materiales utilizados para la construcción de castilletes han ido variando a lo largo de la historia. Según fuentes bibliográficas, los castilletes de madera fueron empleados hasta finales del siglo XIX, sin embargo, los de fábrica de mampostería y ladrillo macizo, se utilizaron hasta la segunda mitad de dicho siglo mientras que los metálicos

se instalaron a partir del último cuarto del siglo XIX hasta la actualidad (de ahí que sean los mejor conservados).

El castillete se conoce como aquella construcción que presenta dos tornapuntas que soportan la mayor parte de los esfuerzos y que se une con la estructura central y vertical, destinada a soportar los esfuerzos residuales y a alojar una serie de dispositivos formando cuatro pilares o montantes, que alberga un sistema de poleas permitiendo el deslizamiento de los cables (Fig. 1).

En el caso de estudio del presente artículo, se trata de una tipología de castillete fácilmente reconocible por las articulaciones de unión entre la estructura de los montantes y los tornapuntas, de la que resulta una estructura isostática.

Finalmente, una interesante observación, radica en que ambas tipologías de castilletes (mampostería y metálico) han coexistido hasta finales de siglo XX, por dos razones principales: de un lado, ya que la construcción de los castilletes de mampostería a base de sillares de piedra era mucho más barata que la construcción de castilletes metálicos, y de esa forma, ganaban en altura de la construcción de manera mucho más económica, pero por otro lado, la rapidez en la construcción del metálico a base de perfiles ya prefabricados, facilitaba su rápida implantación a lo largo del distrito minero, así como que también tenían un comportamiento estructural muy robusto.

Rojas-Sola et al. [9] han realizado el modelado 3D y análisis estático de un castillete de mampostería, y el presente

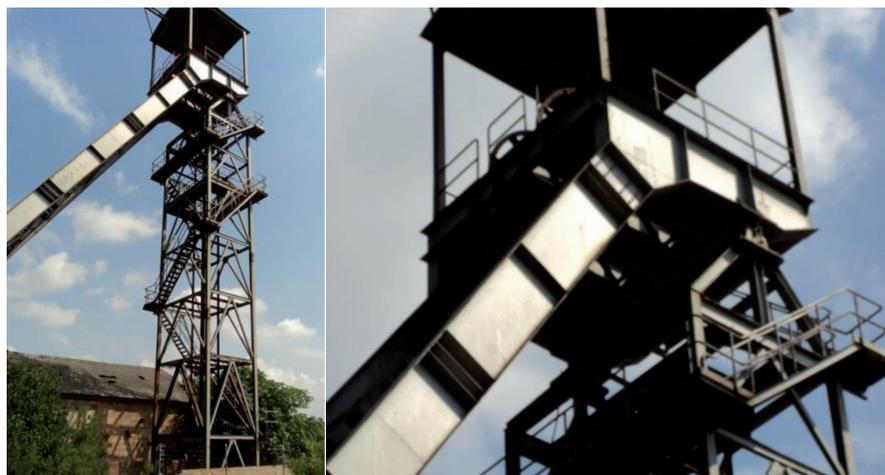


Fig. 1: Castillete metálico articulado y detalle de la articulación (Pozo de la Esmeralda, Bailén, Jaén, España)

artículo sigue la misma estructura para un castillete articulado de acero.

Finalmente, indicar que los objetivos perseguidos por esta investigación han sido tres: la difusión y puesta en valor del patrimonio industrial minero del antiguo distrito minero de Linares-La Carolina (Jaén), la documentación geométrica tridimensional de un castillete metálico articulado y su análisis estático mediante técnicas de ingeniería asistida por ordenador.

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA METÁLICA

El castillete metálico articulado presenta una altura de 24 m hasta la estructura soporte de las poleas o coronación, y está formado por diferentes elementos.

Entre ellos, destacan los pilares principales o montantes que constituyen la estructura central, formados por cuatro perfiles HEB 220 con una longitud total de 20,47 m que se encuentran atados en 7 vanos de diferentes longitudes con el fin de evitar el posible pandeo. Dichos pilares se asientan sobre cuatro placas de anclaje de 0,075 m de espesor salvando así la altura de 20,55 m.

El atado de los pilares principales se realiza en su mayor parte con perfiles HEB 160, cuyas longitudes son, según la dirección de atado, de 2,99 m y 4,08 m, aunque también presentan perfiles IPE 450 e IPE 300, teniendo éste último como función, albergar una plataforma accesible a los operarios para realizar tareas de mantenimiento.

Los arriostramientos del castillete están conformados por dos perfiles UPN 140 soldados en cajón en cuyos extremos se encuentran unas cartelas que, unidas a la estructura principal del castillete, aseguran la estabilidad de éste. El castillete se encuentra arriostrado en todos los vanos en que se divide excepto en la unión al suelo.

La longitud de los perfiles y su inclinación en el vano son variables, y dependerá según si arriostran la anchura o la longitud del castillete, y de la altura del vano en cuestión, ya que el castillete se divide en vanos desiguales. Las cartelas son placas de acero de 0,025 m de espesor y unas dimensiones de 0,45 x 0,22 m.

Los tornapuntas del modelo son dos perfiles convergentes que se encuentran separados en la base una distancia de 10 m y convergen hasta quedar separados una distancia de 4,30 m, siendo su lon-

gitud aproximada de 25,70 m. Por tanto, se trata de perfiles crecientes desde la base a la coronación del castillete, partiendo de la base con una anchura de 0,48 m y creciendo hasta alcanzar la anchura de 1,05 m. Están arriostrados a lo largo de su longitud en cuatro puntos diferentes, de modo que su longitud total queda dividida en cuatro vanos de diferentes alturas. Las uniones transversales se encuentran soldadas a tope a los propios tornapuntas, mientras que las diagonales se unen entre sí soldadas a unas cartelas de 0,03 m de espesor.

Por último, el castillete metálico presenta 2 jaulas para la subida de material y para el ascenso o descenso de los operarios con una sección cuadrada de 1 m de lado y 2 m de altura.

1.2. JUSTIFICACIÓN DE LA ARTICULACIÓN

La articulación presentada en el castillete persigue obtener una estructura isostática, de modo que sólo se tengan cuatro puntos de apoyo y no seis, como ocurriría normalmente en un castillete de tipología común que corresponde a una estructura hiperestática.

La articulación se une a la parte superior del castillete por medio de unas secciones, cuya inclinación es tal que permite el basculamiento de parte de la estructura en los tornapuntas, recibiendo la articulación el resto del esfuerzo, y tras ella, el castillete.

De este modo, se consigue una estructura más simple que goza de gran estabilidad, repartiendo los esfuerzos entre los tornapuntas y las articulacio-

nes, y transmitiéndolas posteriormente al resto del castillete.

2. DISEÑO ASISTIDO POR ORDENADOR

Esta fase de la investigación es clave para obtener unos resultados fidedignos en la fase de ingeniería asistida por ordenador, permitiendo realizar correctamente el análisis estático.

El modelado tridimensional se ha realizado con el software paramétrico *Autodesk Inventor Professional 2014* [10], a partir de planimetría original y de distintas comprobaciones realizadas sobre la estructura original.

Seguidamente se ha realizado el modelado de cada uno de los elementos que la componen: pilares principales o montantes, vigas de atado de los montantes, tornapuntas, vigas de atado de los tornapuntas, articulación, estructura soporte de las poleas, poleas, eje, cubierta, arriostramientos de los montantes y de los tornapuntas, así como otros elementos accesorios.

Una vez modelados todos los componentes de la estructura metálica del castillete, 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.

A continuación, se muestra el alzado y la vista lateral izquierda del conjunto ensamblado y acotado, respectivamente (Fig. 2).

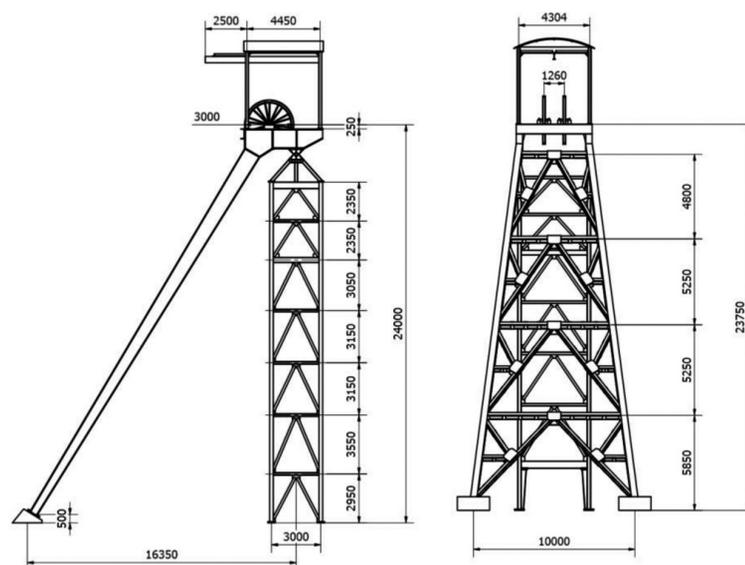


Fig. 2: Alzado y Vista lateral izquierda del castillete metálico articulado (unidades en mm)

3. INGENIERÍA ASISTIDA POR ORDENADOR

El análisis estático del castillete metálico se ha realizado con técnicas de ingeniería asistida por ordenador, 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 la tensión de von Mises (N/m^2), desplazamientos (mm) y coeficiente de seguridad.

3.1. PREPROCESADO

Una vez finalizado el ensamblaje de la estructura, el primer paso antes de comenzar con la simulación, es convertir el modelo en un conjunto soldado. Sin embargo, una vez que el ensamblaje se convierte en un conjunto soldado no puede volver a la forma de ensamblaje, por lo que conviene que éste sea el último paso, y asegurarse previamente de que todo está correcto antes de comenzar con la simulación.

Tras convertirlo en un conjunto soldado se definen las soldaduras del modelo, y para ello se accede al módulo *Soldadura*, y se definen los conjuntos a soldar.

Debido a los altos requerimientos computacionales, se han eliminado elementos no estructurales, arriostramientos y correas no principales que no tienen una influencia significativa en el análisis estático del conjunto (Fig. 3). De hecho, se han obtenido resultados de tensiones y desplazamientos de toda la estructura y no existen diferencias significativas entre ambos modelos.

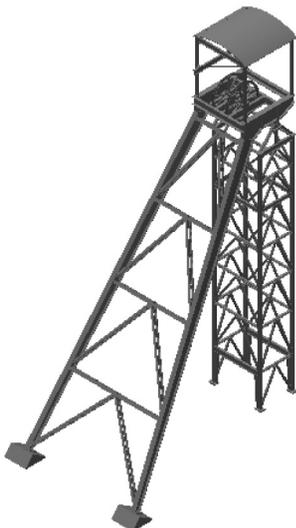


Fig. 3: Modelo reducido para el análisis general

Finalmente, se ha realizado un análisis estático general del conjunto de la estructura metálica, suponiendo que las 2 jaulas de subida de mineral están cargadas, que es el caso donde se producen mayores solicitaciones.

3.2. ASIGNACIÓN DE MATERIALES

Al conjunto de dicha estructura metálica se le ha asignado un material como el acero estándar de la biblioteca de materiales del software (S275 J0) con un comportamiento isótropo, y con sus correspondientes propiedades físicas: (módulo de Young (210.000 MPa), coeficiente de Poisson (0,30), densidad (7.850 kg/m^3) y tensión de rotura (210 MPa)).

3.3. CONDICIONES DE CONTORNO

Una vez dentro del módulo de análisis de tensión, se aplican dos tipos de condiciones de contorno: en los apoyos fijos y en los apoyos rotatorios.

Como apoyos fijos, se han seleccionado las bases de las cuatro placas de anclaje sobre las que se asienta el castillete y las bases de los apoyos de los tornapuntas. En los apoyos rotatorios, la restricción se aplica en la cara interior del rodamiento que está unida al eje (Fig. 4).

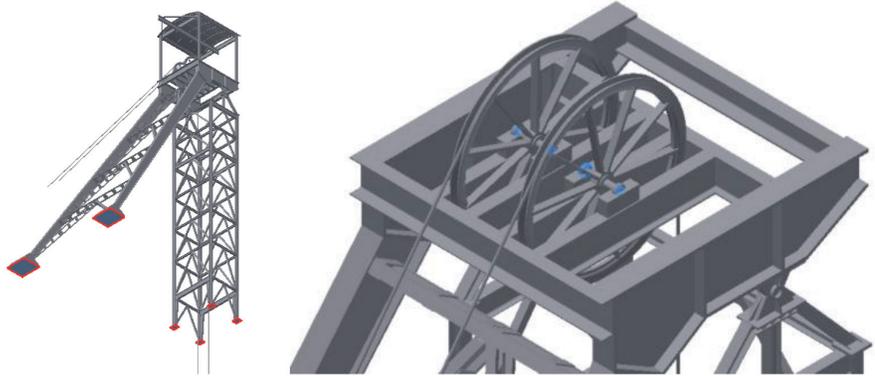


Fig. 4: Restricciones de apoyos fijos y apoyos rotatorios en la estructura metálica

3.4. FUERZAS APLICADAS

Las fuerzas aplicadas han sido las siguientes (Fig. 5):

- Peso de la estructura: Se aplica en el centro de masas del castillete metálico, representada como una flecha en el sentido de la aceleración de la gravedad (vertical).
- Carga elevada (poleas): Se simula el peso de la carga elevada. La fuerza se aplica sobre la cara interior de la polea (sobre la que estaría el cable), y tangencial a ésta. Para aplicar la fuerza, es necesario dibujar el cable sobre el que está aplicada ésta, y esto es necesario porque Autodesk Inventor Professional 2014 sólo proporciona la posibilidad de aplicar la fuerza sobre una arista o una cara, y para ser realista, no conviene aplicarla sobre la cara de la polea ya que la fuerza tendría componentes no deseadas.

Como se ha comentado anteriormente, en el pozo de la Esmeralda hay dos jaulas, por lo que se considera que cuando una sube la otra baja. Para simular este hecho, lo que se hace es simular dos fuerzas en vez de cuatro, como si la

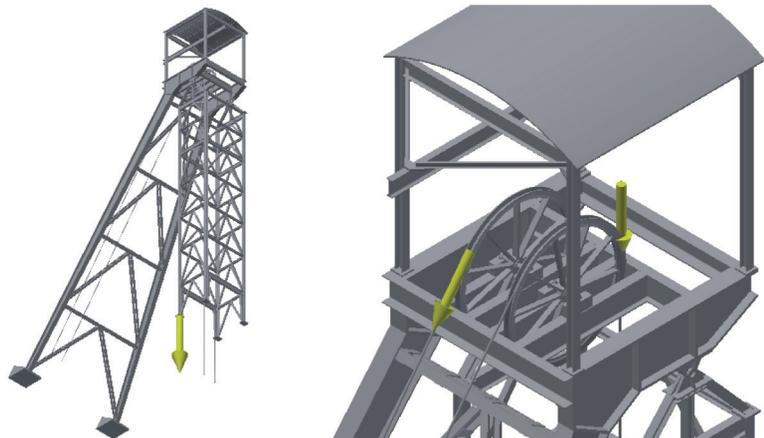


Fig. 5: Cargas aplicadas: Peso de la estructura y carga elevada en las poleas

tracción del cable sólo se efectuara en un sentido.

La carga simulada corresponde a la masa de la propia jaula (235 kg) más la masa del mineral (15.435 kg), es decir, 15.670 kg, lo que corresponde a un peso aproximado de 153.566 N que soporta cada cable.

3.5. DISCRETIZACIÓN O MALLADO

Autodesk Inventor Professional 2014 discretiza automáticamente el conjunto modelado en función de los elementos, pero ofrece la posibilidad de refinar este mallado en las zonas que se consideren críticas o de mayor interés.

La interface de Autodesk Inventor Professional 2014 para la simulación no ofrece alternativas a la hora de la elección del elemento de mallado o tipo de análisis, presentando un mallado tetragonal. Por lo tanto, y dados los errores que puedan derivarse debido a la falta de elección de un elemento o un método adecuado, se ha optado por refinar la malla para que el resultado sea lo más fidedigno posible, sobre todo en las poleas y en el eje de las mismas (Fig. 6), definiendo el tamaño mínimo (1 mm) y medio del elemento (2 mm), el factor de modificación (1.5) y el ángulo de giro (60°).

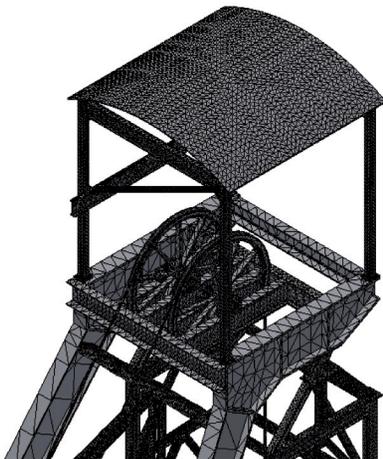


Fig. 6: Discretización refinada en las partes móviles y coronación del castillete

Como se observa, el tamaño de la malla es mucho menor en las partes móviles y coronación, que en el resto de la estructura metálica pues los esfuerzos soportados son mucho mayores en dichas zonas, como se comprobará posteriormente. Asimismo, se observa que aunque el programa discretiza finamente la cubierta del castillete, ésta no necesita tal nivel de detalle, pues no soporta ninguna carga ni está en continuo movimiento.

3.6. RESULTADOS

3.6.1. Tensión de von Mises

Se observa de forma global cómo están repartidos los esfuerzos sobre la estructura, que aparece con esfuerzos mínimos en su totalidad, alcanzando sólo valores próximos a la rotura en las partes móviles correspondientes a las poleas y al eje (Fig. 7).

Los valores de tensión alcanzados en las poleas oscilan entre los 126 MPa en la parte central de los radios y los 50 MPa aproximadamente en la periferia de los mismos. Por su parte en el eje, se alcanzan tensiones mayores que rondan los 210 MPa sin llegar a alcanzar dicho valor, lo cual indica que en ningún punto de la estructura se alcanza la tensión de rotura del acero.

Para tener una idea de cómo se reparten los esfuerzos por el resto de la estructura lo que se hace es disminuir el rango de visualización, haciendo corresponder con el color rojo el valor de 5 MPa, teniendo así un rango de colores más discretizado (Fig. 8).

Asimismo, se aprecia cómo las tensiones se propagan por el resto de la estructura, siendo las partes más cargadas, las correspondientes a las poleas y a los perfiles sobre los que éstas descansan (Fig. 9).

Además, se observa que cuando la fuerza es hacia abajo (movimiento de descenso (Fig. 9, izquierda), la articulación sufre mucho más que cuando el movimiento es de ascenso (Fig. 9, derecha), sin llegar a ser un esfuerzo importante ni cercano a la rotura.

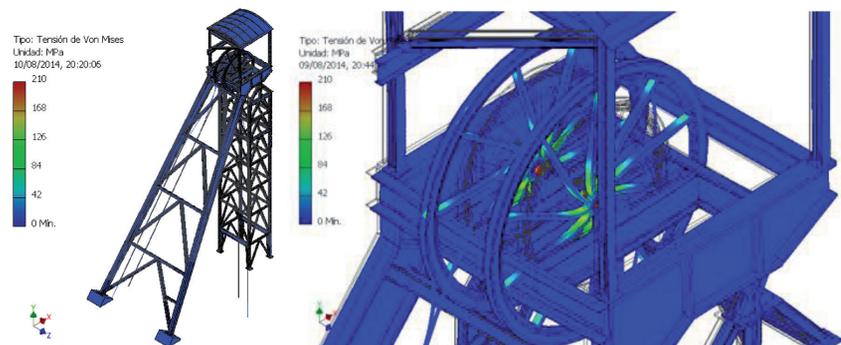


Fig. 7: Tensión de Von Mises sobre el conjunto y sobre las partes móviles



Fig. 8: Tensión de Von Mises sobre el conjunto y sobre las partes móviles

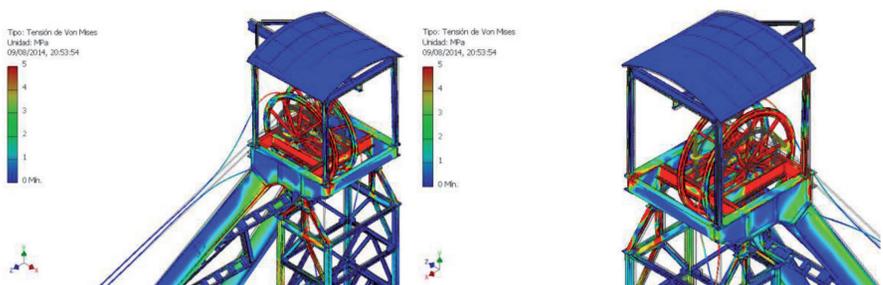


Fig. 9: Tensión de Von Mises en las partes móviles

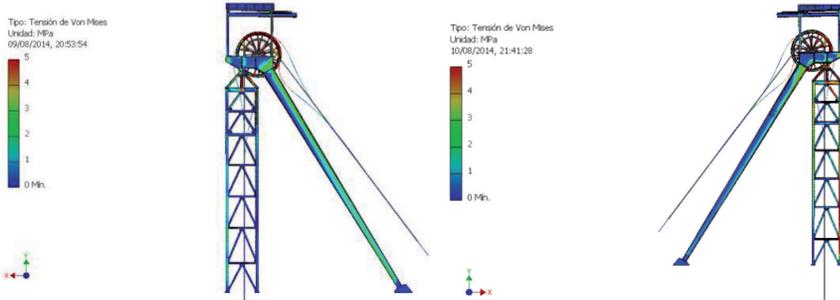


Fig. 10: Tensión de Von Mises en los tornapuntas derecho e izquierdo

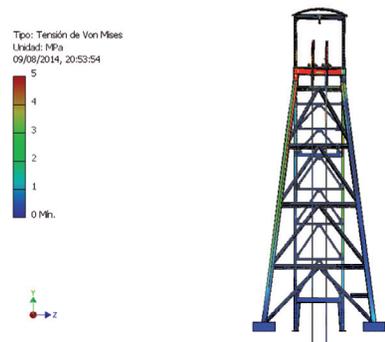


Fig. 11: Tensión de Von Mises según la vista lateral izquierda

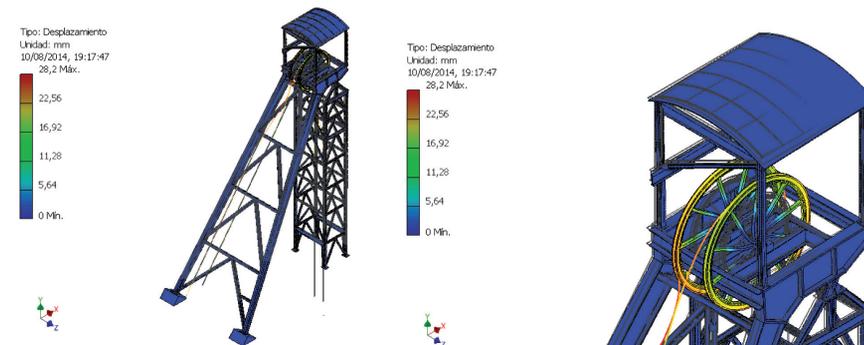


Fig. 12: Desplazamientos globales en el castillete metálico y en las poleas

Asimismo, los tornapuntas también reciben los esfuerzos diferentes (Fig. 10), dependiendo de si el movimiento es de ascenso (Fig. 10, izquierda) o de descenso (Fig. 10, derecha), siendo mucho más importantes los del tornapuntas derecho, cuando el movimiento es de subida de la carga.

Por último, se observa la vista lateral izquierda donde se aprecia cómo se encuentran repartidos los esfuerzos (Fig. 11).

3.6.2. Desplazamientos

A continuación se muestra una vista global de cómo se encuentran distribuidos los desplazamientos en todo el modelo (Fig. 12). Se puede observar que en ningún momento se superan desplazamientos mayores a 5 mm, excepto en las poleas y en el cable.

Asimismo, se han descompuesto en los ejes X (Fig. 13) e Y (Fig. 14), los desplazamientos que sufren las poleas.

Según los resultados obtenidos, las poleas sufrirían un estiramiento como consecuencia de la aplicación de esfuerzos. Esto ocurre porque en la simulación no se puede considerar la situación en la cual la polea gira con el cable, por lo que al estar el esfuerzo aplicado en el cable y éste solidario a la polea, se produce la deformación de la misma. Sin embargo, el hecho de que las poleas se deformen,

se debe a que no se puede modelar en Autodesk Inventor Profesional 2014 un cable que deslice y mueva la polea, sino que se considera una pieza sólida unida a la polea, provocando que al aplicar en el cable una fuerza, la polea la reciba en la misma magnitud y por tanto, produciendo una deformación en la pieza móvil que no ocurre en realidad.

Sin embargo, y aunque los desplazamientos son altos, el acero soporta estos valores, y el software muestra que la polea se saldría (al estirarse) del entramado de perfiles en el que se encuentra. Sin embargo, esto no ocurre en realidad sino que es el propio software el que realiza una exageración visual para que se aprecien mejor los resultados.

Por último, discretizando el desplazamiento en el eje Z (Fig. 15), se puede

observar que al no recibir las fuerzas de forma simétrica, sino que mientras una jaula sube la otra baja, se produce un pandeo lateral del modelo, que no resulta ser demasiado importante, ya que alcanza su valor máximo en un desplazamiento de 1,686 mm.

3.6.3. Coeficiente de seguridad

Asimismo, se puede observar el coeficiente de seguridad que presenta la estructura. En una vista global del conjunto, se puede ver que toda la estructura presenta un alto coeficiente de seguridad, lo que implica que está claramente sobredimensionada (Fig. 16).

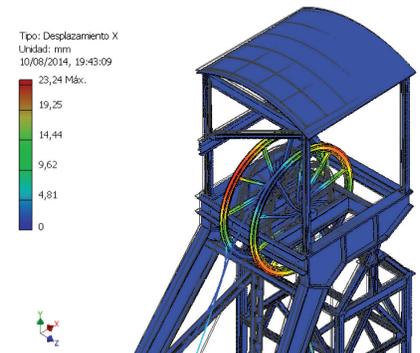


Fig. 13: Desplazamientos en las poleas según el eje X

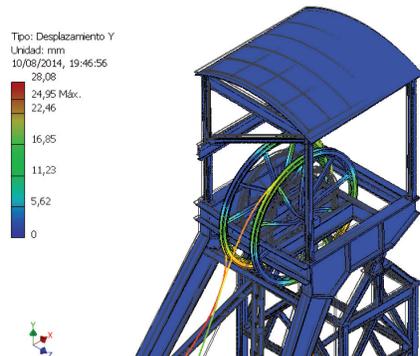


Fig. 14: Desplazamientos en las poleas según el eje Y

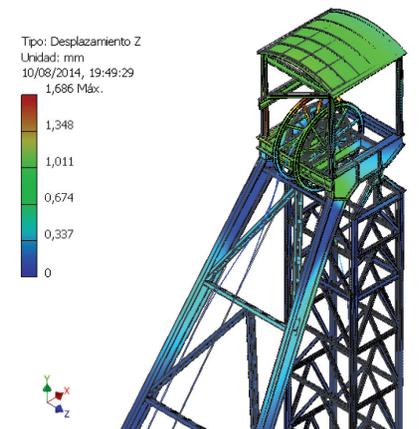


Fig. 15: Desplazamientos en las poleas según el eje Z

En las poleas el coeficiente de seguridad disminuye sin llegar a alcanzar un valor menor de la unidad, por lo que el acero no rompe (Fig. 17). Este valor se alcanza solamente en el cable debido a que el software no lo trata como un cuerpo deslizante.

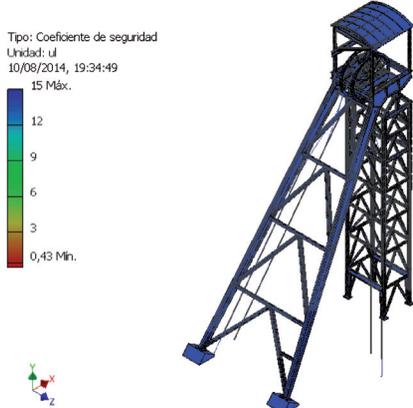


Fig. 16: Coeficiente de seguridad global

4. CONCLUSIONES

Se ha diseñado y documentado geoméricamente un castillete metálico articulado y se ha realizado el análisis estático del mismo.

Asimismo, una vez obtenido el modelo 3D, se ha realizado un análisis estático mediante técnicas de Ingeniería Asistida por Ordenador, basadas en el análisis de la tensión de von Mises y de desplazamientos, comprobando que las tensiones están muy localizadas en el eje y las poleas, y distribuyéndose por el resto de la estructura, de tal modo que ninguna parte de la misma se encuentra sometida a una tensión que provoque su rotura, y por otra parte, que los desplazamientos se encuentran localizados en las poleas y en el cable, pero que en ningún caso superan los 5 mm. Por tanto, se concluye que se trata de una estructura altamente robusta.

En el análisis estático se ha supuesto el cable como un elemento fijo que hace contacto con la polea pero no desliza

sobre ella haciéndola rodar, dado que el software Autodesk Inventor Professional 2014 no implementa esta opción. El problema que de esta condición se deriva es que el cable sufre deformaciones muy grandes, y por consiguiente, las poleas que se suponen asidas a él, hecho que no ocurre en la realidad.

Dadas las dimensiones y complejidad del modelo, ha sido necesario realizar una serie de simplificaciones antes de ejecutar la simulación, suprimiendo los elementos no estructurales y los arriostramientos y correas no principales, puesto que los requerimientos computacionales eran muy elevados, no siendo posible su simulación con equipos convencionales.

La simulación se ha realizado suponiendo que la polea derecha realiza un movimiento de ascenso mientras que la izquierda lo realiza de descenso. Bajo estas condiciones, se ha podido comprobar que el tornapuntas sufre más cuando el movimiento es de subida, siendo la articulación de la izquierda la más cargada.

Aunque el software comercial empleado presenta algunas limitaciones, se ha considerado útil su empleo a un nivel inicial y para disponer de una visión global del comportamiento de la estructura metálica, si bien la utilización de un paquete de elementos finitos mejoraría notablemente dicho estudio, y podría completarse con la realización de un análisis dinámico y a fatiga.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su gratitud a la Secretaría de Estado de Investigación, Desarrollo e Innovación del Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España por la financiación 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 dentro del Plan Nacional de Investigación, Desarrollo e Innovación (2008-2011), en cuyo seno se ha desarrollado la presente investigación.

PARA SABER MÁS

- [1] Rojas-Sola JI. "Evolución histórica y caracterización tipológica-funcional del patrimonio histórico industrial minero español ligado a diferentes procesos del laboreo de minas". De Re Metallica. Jun 2015. Vol. 24. p. 1-17.
- [2] Menéndez-Suarez C. "Los castilletes mineros: una aproximación a su tipología". Energía & Minas: Revista profesional, técnica y cultural de los Ingenieros Técnicos de Minas. 2010. Vol. 8. p. 46-53.
- [3] Contreras Cortés F., Dueñas Molina J. (dir.) La minería y la metalurgia en el Alto Guadalquivir: Desde sus orígenes hasta nuestros días. Jaén: Instituto de Estudios Giennenses, 2010. 423p. ISBN: 978-84-928-7602-0.
- [4] Tejero-Manzanares J, Garrido-Saenz, I, Perez-Calle MD et al. "Virtual reconstruction in recovery metallurgical heritage of Almaden mines". Dyna. May 2013. Vol. 89-3. p. 299-307. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5209>.
- [5] Cheluszka P. "Computer-aided design of robotised technology for manufacturing working units of mining machines". International Journal of Mining Reclamation and Environment. Jan 2015. Vol. 29-1. p. 62-81. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/17480930.2014.955959>.
- [6] Van der Merwe JW, Andersen DC. "Applications and benefits of 3D laser scanning for the mining industry". Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Mar 2013. Vol. 113-3. p. 213-219.
- [7] Liu G, Zhao H, Fu E. "Three-dimensional modeling of open-pit based on AutoCAD and its application". Applied Mechanics and Materials. Mar 2013. Vol. 275-277. p. 2624-2628. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.275-277.2624>.
- [8] Pilyugin VI, Martovitskiy AV, Kochin Aye et al. "Mining-graphical application to AutoCAD". Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. Jul 2012. Vol. 4. p. 69-73.
- [9] Rojas-Sola JI, Montalvo-Gil JM, Castro-García M. "Modelado tridimensional y análisis funcional de una cabria para la extracción del mineral". Dyna-Colombia. Sep 2013. Vol. 80-181. p. 118-125.
- [10] Younis W. Up and running with Autodesk Inventor Professional 2014: Part 1, stress and frame analysis. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013. 302p. ISBN: 978-1-4903-2941-3.

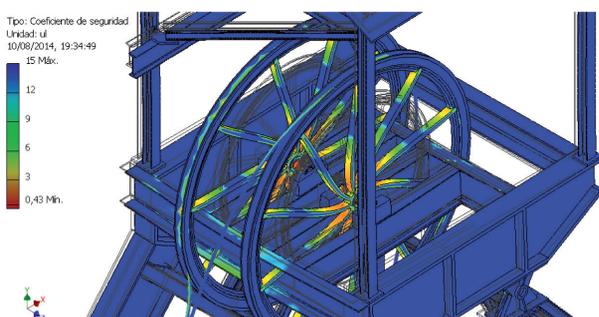


Fig. 17: Coeficiente de seguridad en las poleas