

MODELADO TRIDIMENSIONAL Y ANÁLISIS FUNCIONAL DE UNA CABRIA PARA LA EXTRACCIÓN DEL MINERAL

3D MODELING AND FUNCTIONAL ANALYSIS OF A HEADFRAME FOR MINERAL EXTRACTION

JOSÉ IGNACIO ROJAS-SOLA

Ph.D., Universidad de Jaén, jirojas@ujaen.es

JUAN MANUEL MONTALVO-GIL

Ph.D.(c), Universidad de Jaén, jmgil@ujaen.es

MIGUEL CASTRO-GARCÍA

Ph.D., Universidad de Jaén, miguelcg@ujaen.es

Recibido para revisar Abril 1 de 2013, aceptado Julio 23 de 2013, versión final Julio 29 de 2013

RESUMEN: En el presente artículo se analiza en detalle un ejemplo del patrimonio industrial minero del antiguo distrito minero de Linares-La Carolina (Jaén, España), como es una cabria de mampostería con su castillete metálico, utilizada en la extracción del mineral de plomo, concretamente de galena o sulfuro de plomo. En particular, se ha realizado el modelado tridimensional con ayuda de software paramétrico gracias a técnicas empíricas de cada uno de los elementos que componen el conjunto. Asimismo, una vez obtenido el modelo 3D, se ha realizado un análisis funcional mediante técnicas de Ingeniería Asistida por Ordenador, basadas en el análisis tensional y el análisis de desplazamientos, comprobando que las mayores concentraciones de tensiones se producen en la parte media e inferior de los muros, que los mayores valores de tensión se producen en los alrededores de los huecos de los muros, y que la mayor concentración de desplazamientos de la cabria de mampostería se encuentran en los muros en la parte media y superior, y del castillete en las correas de la cubierta.

PALABRAS CLAVE: patrimonio industrial minero, cabria, diseño asistido por ordenador, ingeniería asistida por ordenador.

ABSTRACT: This paper discusses in detail an example of the mining industrial heritage at the old mining district of Linares-La Carolina (Jaén, Spain), as is a masonry headframe crowned by a metal castle, used in the extraction of lead ore, specifically galena or lead sulfide. In particular, the modeling was performed using parametric software by means empirical techniques of each one of the elements of the set. Also, after obtaining the 3D model a functional analysis has been performed using techniques as Computer-Aided Engineering, based on stress analysis and analysis of displacements, ensuring that the highest stress concentrations occur in the middle and lower of the walls, that higher values are produced around the wall voids, and that the highest concentration of displacements in the masonry headframe are in the middle and at the top of the walls, and of the metal castle are in the cover straps.

KEYWORDS: industrial mining heritage, headframe, computer-aided design, computer-aided engineering.

1. INTRODUCCIÓN

La presente investigación sobre un notable ejemplo de Patrimonio Histórico Industrial Minero (PHIM), concretamente sobre una cabria con castillete utilizada en la fase de extracción del mineral de plomo, forma parte de una tesis doctoral sobre la temática ligada íntimamente a la arqueología industrial. Dicha disciplina adquiere cada día mayor relevancia, ya que la historia de la técnica y particularmente, el de la ingeniería, no puede obviar el estudio de su propia evolución.

El sector de la minería concentra una gran cantidad

de artículos en revistas internacionales sobre una gran cantidad temática como por ejemplo, los accidentes ocupacionales [1], los sistemas de gestión de la calidad [2] o sobre modelos que optimizan y gestionan el riesgo de inversiones en minería [3], que muestran la vigencia de este sector productivo convertido en motor de desarrollo socioeconómico en muchos países.

1.1. El patrimonio histórico industrial minero

La importancia del patrimonio cultural asociado a la actividad minera queda manifiesta a lo largo de 4.000 años. Los edificios industriales (cabrias, chimeneas o las

casas de máquinas de vapor para el desagüe de las minas, entre otros) únicos, y algunos de ellos en buen estado de conservación, son testigos fundamentales para explicar la configuración del territorio y del paisaje originado tras años de actividad minera (actividad extractiva y tratamiento del mineral), con gran auge a partir de 1850. Dicha actividad convirtió al distrito minero de Linares-La Carolina en uno de los núcleos urbanos más importantes de Andalucía referente a la minería del plomo, y es el tercer distrito más importante de España en número de pozos con castilletes, tras Asturias y Córdoba, siendo el año 1991 en el que desaparece la última empresa dedicada al laboreo minero (Minas de la Cruz), tras 161 años de funcionamiento. Además, existe un expediente de declaración de patrimonio mundial por la UNESCO en proceso de valoración, lo que viene a reflejar la importancia de dicho distrito, y la conveniencia de actuar en él.

Por otro lado, no hace muchos años se ha observado una creciente sensibilización del patrimonio vinculado a las actividades mineras e industriales, y fruto de ello fue la redacción de la Carta de El Bierzo para la conservación del patrimonio industrial minero en España (aprobada por el Consejo de Patrimonio Histórico en junio de 2008) [4], como marco de referencia donde se concretan las bases conceptuales y metodológicas de cualquier actuación relacionada con la recuperación del patrimonio minero. No en vano, se han desarrollado numerosos Parques, Museos y Centros de Interpretación en diversas zonas donde se ha producido el declive de la minería, fruto de iniciativas de turismo cultural (de interior), que se ha denominado turismo minero, turismo industrial e incluso tecnoturismo.

La manifestación del PHIM es muy amplia, pues depende de la actividad específica, pero se podría clasificar en [5]:

- 1) Vinculado a la extracción. Se encuentran ejemplos como desmontes, cortas, canteras y escombreras (explotación a cielo abierto), pozos y galerías (explotación subterránea) y castilletes, cabrias metálicas, cabrias de mampostería, casas de extracción, tolvas, ascensores, casa de máquinas de bombeo, casas de calderas, chimeneas, compresores, almacenes o subestación eléctrica (instalaciones de apoyo a la extracción).
- 2) Vinculado al tratamiento del mineral. Se encuentran ejemplos como las zonas de lavado, clasificación y transformación (lavado y compactación) o centrales térmicas y fundiciones (transformación).

3) Vinculado al transporte marítimo y fluvial o terrestre. Ejemplos son las líneas férreas, estaciones de tren y cargaderos.

4) Vinculado a usos sociales y administrativos. Se encuentran ejemplos como barrios, cuarteles, viviendas obreras, casa de dirección y casa de técnicos (alojamientos) o escuelas, capillas, economatos, hospitales, oficinas, casinos e instalaciones deportivas (equipamientos).

En concreto, el paisaje minero de Linares-La Carolina es uno de los 100 ejemplos más destacados de patrimonio industrial en España según la TICCIH (The International Committee for the Conservation of the Industrial Heritage) [6].

Asimismo, el PHI está siendo tratado cada día con mayor frecuencia, pues la ingeniería tiene que asumir el estudio de su propia evolución como disciplina, y haciéndolo desde el punto de vista técnico que complementa al histórico. Por ello, cada día son más numerosas las iniciativas para la recuperación del patrimonio en sentido amplio, y el industrial en particular, pero debido a la falta de una metodología definida, estas investigaciones no dan el resultado esperado.

Actualmente, existen muchos ejemplos del PHI que se encuentran al borde de la desaparición, y en muchos casos en un estado ruinoso. Pero en multitud de ocasiones, los esfuerzos de conservadores, arqueólogos y restauradores, no son siempre suficientes. En lo referente al PHI que ha formado parte de procesos productivos, éste se pierde en muchas ocasiones por la concurrencia de intereses creados de tipo urbanístico o la inexistencia de un proyecto de rehabilitación, que diera vida a ese lugar así como nuevas oportunidades a las personas de su entorno, y además porque las máquinas antiguas sufren una degradación más profunda en su funcionamiento, cuando dejan de ser utilizadas, incluido el expolio al que suelen verse avocadas.

De esta forma, cada vez que se pierde un bien patrimonial, se elimina la oportunidad de estudiar, analizar y valorar de una forma integral su impacto en la sociedad.

En general, el PHI se caracteriza por presentar edificaciones que buscan alojar la actividad productiva de una forma eficiente, dejando en un segundo plano las posibles incorporaciones estéticas que ofrecen una mayor belleza visual. Sin embargo, se trata de una tipología de patrimonio cuya importancia radica en los procedimientos y técnicas

industriales que albergaban. Desde el punto de vista de la ingeniería, la recuperación de las máquinas, procedimientos y técnicas productivas, facilitan el desarrollo de las mismas además de constituir el legado que han aportado las distintas civilizaciones al desarrollo de la técnica.

Por todo ello, la ingeniería gráfica se convierte en herramienta fundamental de un estudio de historia de la tecnología, dado el carácter universal del lenguaje gráfico. Buena muestra de ello, lo prueban los numerosos artículos publicados sobre reconstrucciones gráficas de diversos artefactos o ingenios que facilitan el estudio tecnológico [7-10].

Dentro de la reconstrucción de construcciones y/o elementos de interés sociocultural, la ingeniería gráfica cobra gran fuerza. Uno de sus principales aliados es el aspecto económico, ya que la reconstrucción virtual (patrimonio virtual) representa una pequeña parte del coste de una reconstrucción convencional, siendo una de las primeras consecuencias de este hecho, la posibilidad de la reconstrucción de construcciones y/o elementos que no sean viables de forma convencional, por su gran coste económico o debido a que no poseen el interés de otros monumentos, por parte de los diversos promotores.

1.2. El conjunto cabria-castillete en minería

La cabria minera forma parte del ingenio por el cual se sube o se baja la jaula dentro del pozo, transportando las vagonetas con el mineral (Figura 1).



Figura 1. Cabria de mampostería construida con sillares de piedra y coronada por castillete metálico en el distrito minero de Linares-La Carolina (Jaén, España).

Se trata de un apoyo articulado que presenta la dirección de la resultante entre la fuerza del peso del material y la fuerza que se ejerce para elevarlo, y que suele ser coronado por una estructura metálica llamada castillete con dos poleas donde se enrollan los cables de extracción, facilitando el ascenso o descenso de las jaulas (Figura 2).



Figura 2. Detalle de las poleas.

Estos cables eran accionados por las máquinas de extracción de doble efecto con dos cilindros horizontales, movidas en un principio, por máquinas de vapor de cilindro vertical tipo Watt y posteriormente, por electricidad.

En función del material del que estén construidas se clasifican en las tipologías de madera, metálica, mampostería, hormigón o mixtas, aunque existe una clasificación más completa aunque aproximada, que los clasifica en doce tipologías [11].

2. INGENIERÍA GRÁFICA

La fase de ingeniería gráfica es el puntal en el que se apoya el resto de la investigación pues definir de manera fidedigna el modelo 3D del conjunto cabria-castillete, permitirá obtener resultados fiables en cuanto a las solicitudes obtenidas en la fase de ingeniería asistida por ordenador.

El proceso de documentación geométrica 3D se apoyó en técnicas empíricas, realizadas en base a dos pilares: un extenso reportaje fotográfico y las mediciones realizadas, utilizando una cinta métrica flexible de 10 m, así como un distanciómetro láser.

Con los croquis convenientemente acotados, se realizó en el laboratorio el modelado 3D gracias al concurso del software AutoCAD 2012 [12] no paramétrico y por otro, Inventor Professional 2012 [13] de tipo paramétrico, ambos de la empresa Autodesk.

A continuación se muestran algunas imágenes del proceso de modelado 3D de algunos elementos que conforman el conjunto cabria-castillete.

La Figura 3 muestra los muros principales paralelos de geometría trapezoidal con una altura de 15.25 m, una separación de 4.76 m y un grosor de 0.90 m.

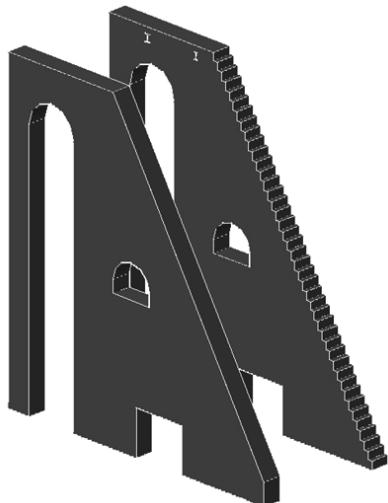


Figura 3. Muros principales.

La Figura 4 muestra los dos muros transversales paralelos de geometría rectangular de igual altura que los anteriores con una separación de 2.45 m y un grosor mayor, de 1.15 m.

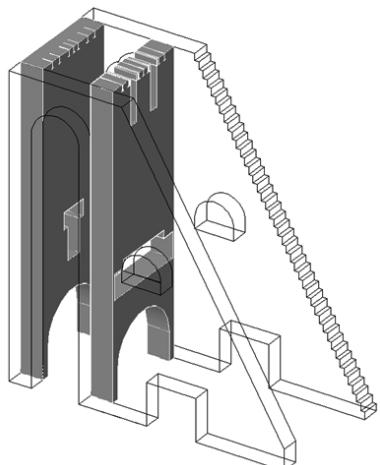


Figura 4. Muros transversales.

La Figura 5 muestra los contrafuertes de geometría trapezoidal que dan rigidez a la estructura con una separación de 2.45 m, una altura de 12.50 m y un grosor de 1.15 m.

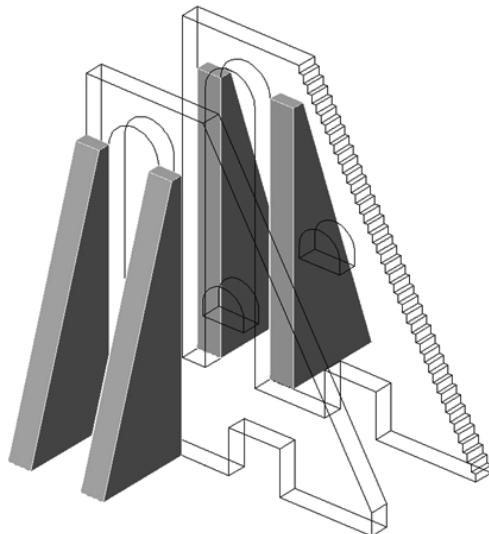


Figura 5. Contrafuertes.

La Figura 6 muestra las dos ruedas de las poleas que sirven de guía y sujeción de los cables y que permiten el movimiento de la jaula. Presentan un diámetro de 2.14 m y sus ejes están apoyados en los correspondientes cojinetes.

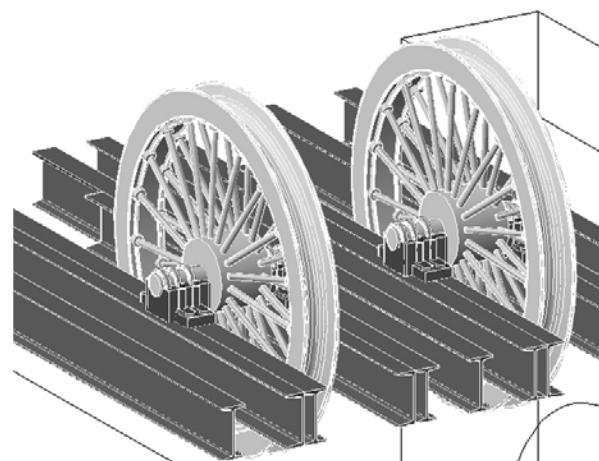


Figura 6. Ruedas de las poleas.

Por último, en la Figura 7 se aprecia el castillete metálico y su cubierta donde se albergaban las dos ruedas de poleas.

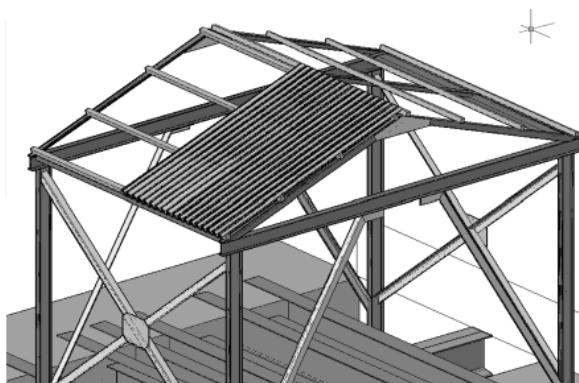


Figura 7. Castillete metálico con cubierta.

3. INGENIERÍA ASISTIDA POR ORDENADOR

Dado que se ha obtenido el modelo tridimensional del conjunto cabria-castillete en un programa paramétrico como Autodesk Inventor Professional 2012, existe la posibilidad de someter al modelo a un estudio de ingeniería asistida por ordenador, concretamente a un análisis de fuerzas (tensional) ante la hipótesis de carga más desfavorable y obtener cuales son los puntos críticos y sus deformaciones en todo el conjunto.

3.1. Análisis tensional

Se van a estudiar dos casos: en uno de ellos, se va a suponer la jaula a plena carga y en el otro sin carga alguna, aplicándose las cargas en los cables y de forma tangencial a las ruedas de las poleas.

Previamente es necesario realizar unas estimaciones de los valores de los vectores peso en función de los materiales, de su geometría y de la estructura metálica.

Así pues, para la jaula a plena carga se estiman los siguientes valores: la masa de la jaula con un valor de 200 kg, la masa de la carga con uno de 600 kg, la masa del cable unos 150 kg, y la masa de la rueda con un valor estimado de 250 kg. En total, suma 1.200 kg lo equivalen a unos 12.000 N.

Por otro lado, para el caso de la jaula vacía, sólo se consideran los valores del peso de la jaula y del peso de la rueda.

Así pues, una vez cargado el archivo del modelo 3D en Autodesk Inventor Professional 2012, se realizan los siguientes ajustes:

a. Se regulan las condiciones de contorno, concretamente la asignación de material a cada componente del modelo, y el tipo de restricción física en el apoyo de los componentes. En este caso, se han elegido hormigón y acero como los materiales asignados por el programa, y como restricción fija, se han designado las bases de la cabria para que actúen como apoyos empotrados.

b. Se asignan las solicitudes, que son las hipótesis de carga a las que está sometido el modelo. Inicialmente se asignan los valores del vector fuerza de gravedad del conjunto, y también en las dos ruedas de poleas de forma tangencial como se ha indicado anteriormente (Figura 8).

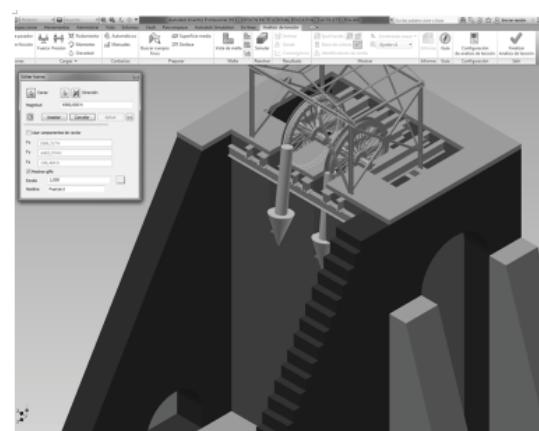


Figura 8. Vectores de gravedad aplicadas en las ruedas de las poleas.

c. Se regulan los parámetros del mallado, es decir, la discretización del modelo (Figura 9).

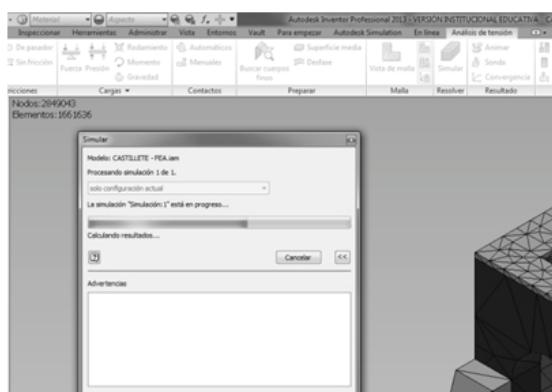


Figura 9. Proceso de mallado del conjunto.

d. Se realiza el procesado de la simulación y se obtienen resultados. Estos deben ofrecer un mapa de colores mostrando la intensidad de las tensiones de Von Mises expresadas en MPa, junto a un rango de valores de cada color, así como los desplazamientos que han tenido los vértices de los diferentes elementos del modelo.

En muchos casos, se obtiene un mapa de un mismo color debido a que la amplitud del intervalo del rango de valores de la escala general es muy amplia. Por ello, se debe acotar el mismo para visualizar claramente la distribución de tensiones, siendo en este caso el intervalo de entre 0 y 0.5 MPa.

Así pues, la distribución de tensiones de Von Mises en el castillete se muestra en la Figura 10 y en la Figura 11, el valor máximo de la misma y su localización.

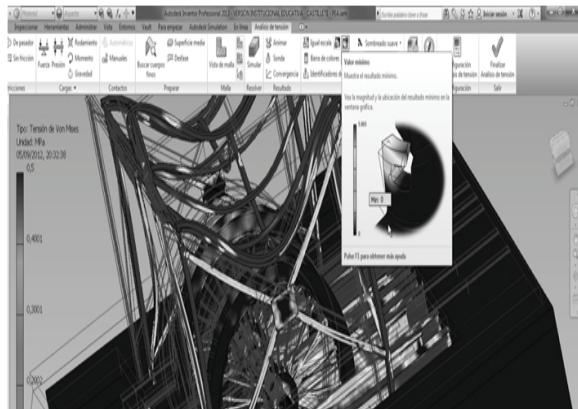


Figura 10. Distribución de tensiones en el castillete.

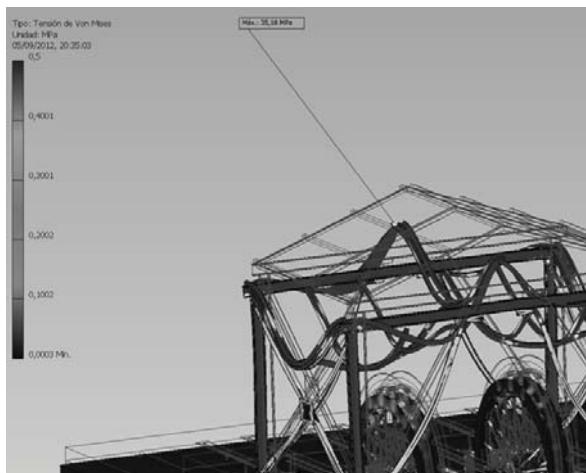


Figura 11. Tensión máxima y localización.

En la Figura 12 se observa la distribución de tensiones en los muros de mampostería de la cabria.

Así pues, se puede apreciar que las mayores concentraciones de tensiones se producen en la parte media e inferior de los muros, debido al apoyo de estos con el suelo al considerarse empotrados, y los mayores valores de tensión se producen en los alrededores de los huecos de los muros.

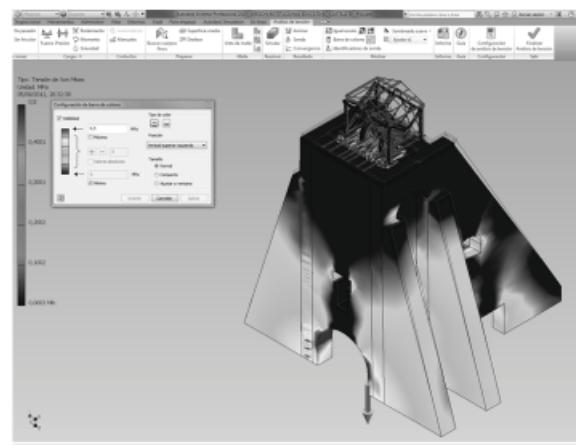


Figura 12. Distribución de tensiones en la cabria.

En el forjado de operación junto a las tolvas, se observa la concentración de tensiones en la parte media junto con el desplazamiento que sufre éste (Figura 13).

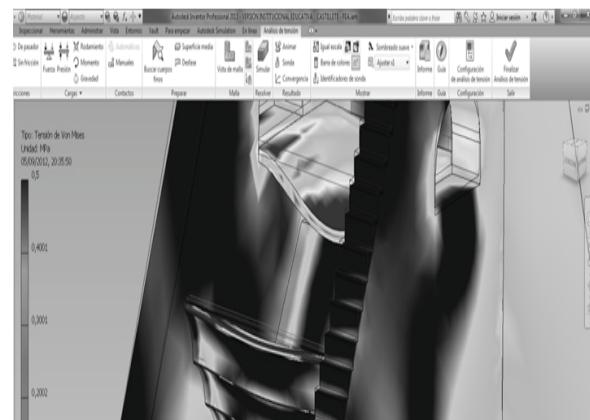


Figura 13. Distribución de tensiones en el forjado de operación junto a las tolvas.

3.2. Análisis de desplazamientos

Para visualizar los desplazamientos que tienen lugar en los nudos de los diferentes elementos del conjunto, se

ha reducido el intervalo de la escala al rango de entre 0 y 0.3 mm.

Así pues, en la Figura 14 se aprecia el desplazamiento producido en la cabria de mampostería en su conjunto, y en la Figura 15 se muestran los desplazamientos que sufren los elementos superiores del castillete: pilares, dinteles, vigas de atado horizontales y correas.

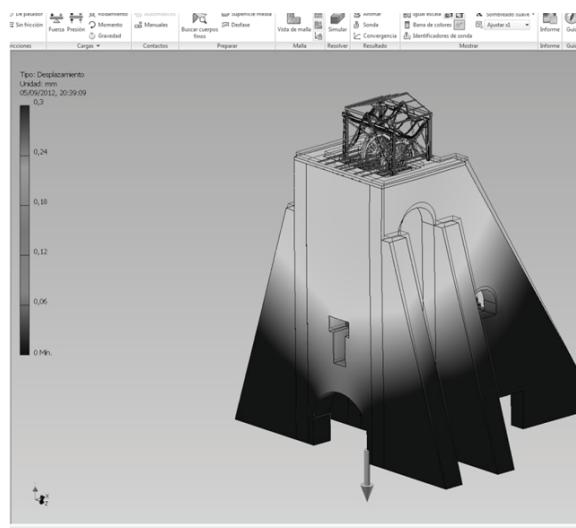


Figura 14. Distribución de desplazamientos en el conjunto.

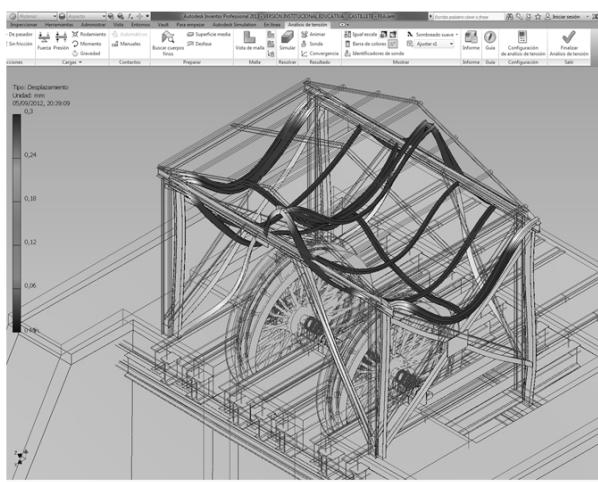


Figura 15. Distribución de desplazamientos en el castillete.

Como hecho destacable, resaltar el importante desplazamiento que sufre el forjado de acceso a la tolva (Figura 16).

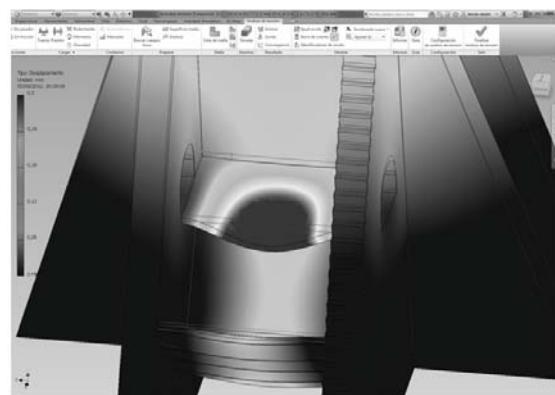


Figura 16. Distribución de desplazamientos en el forjado de acceso a la tolva.

Una vez terminado el análisis de Ingeniería Asistida por Ordenador (CAE, del inglés *Computer-Aided Engineering*) relativo al análisis tensional y de desplazamientos, el programa permite emitir un informe final de resultados donde se resume toda la información generada siendo en su mayor parte de tipo gráfico.

Asimismo, una vez finalizado el análisis, dicho software dispone de una herramienta que permite generar un video en el que se muestra el aumento gradual de las tensiones y deformaciones, que sufren las diferentes partes del modelo a las que están sometidas, mediante diferentes tonos de color.

4. CONCLUSIONES

En este artículo de investigación se ha realizado el modelado 3D de la cabria de mampostería y del castillete metálico del pozo San Vicente localizado en el antiguo distrito minero de Linares-La Carolina (Jaén, España) mediante técnicas de ingeniería gráfica, así como su análisis funcional apoyado en la utilización de las técnicas de ingeniería asistida por ordenador, gracias al concurso del software Autodesk Inventor Professional 2012.

El proceso de documentación geométrica se ha basado en la utilización de técnicas empíricas ‘in situ’ y ha resultado imprescindible, pues a partir de la información recogida mediante los croquis acotados y el exhaustivo reportaje fotográfico, se ha podido obtener información relevante que ha permitido obtener un modelo 3D fidedigno del conjunto y con

suficiente grado de detalle, que ha servido de base para un posterior proceso de análisis con software CAE.

Asimismo, con un software CAE relativamente simple se demuestra la utilidad de estos tipos de análisis para comprobar la efectividad del diseño original de un modelo y proponer mejoras en su geometría y su funcionamiento.

En este sentido, se ha probado que efectivamente en el diseño de las cabrias de mampostería, las mayores concentraciones de tensiones se producen en la parte media e inferior de los muros debido al apoyo de estos con el suelo al considerarse empotrados, y los mayores valores de tensión se producen en los alrededores de los huecos de los muros. Asimismo, en el forjado de operación junto a las tolvas, se observa la concentración de tensiones en la parte media.

Respccto a los desplazamientos, se puede afirmar que la mayor concentración de ellos en la cabria de mampostería se encuentra en los muros en la parte media y superior, y en el castillete metálico se encuentra en las correas de la cubierta.

En resumen, se ha realizado el análisis tecnológico de un ejemplo tipo del patrimonio histórico industrial característico del paisaje minero del distrito minero de Linares-La Carolina. Con ello, se pretende su difusión y puesta en valor, destacando la importancia que supone para el desarrollo socioeconómico de las zonas donde se enclavan estos ingenios, así también como mostrar la evolución de la ingeniería.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento más sincero al Ministerio de Economía y Competitividad, como organismo financiador del Proyecto de Investigación del Plan Nacional de I+D+i titulado '*El patrimonio histórico industrial minero: un estudio integral para su puesta en valor y difusión desde la ingeniería gráfica*' (HAR2012-30723), así como al Programa Nacional de Formación del Profesorado Universitario (FPU) del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, ambos del Gobierno de España.

REFERENCIAS

[1] Sammiquel Pera, L., Vintro, C. and Freijo, M., Characteristics of the 3 most common types of occupational accident in Spanish

sub-surface and surface mining, from 2003-2008, Dyna-Colombia, 172, pp. 118-125, 2012.

[2] Escanciano, C. and Iglesias-Rodriguez, F.J., Quality management and integrated total quality in Spanish mining: results of an empirical study, Dyna-Colombia, 171, pp. 167-174, 2012.

[3] Botin, J.A., Guzman, R.R. and Smith, M.L., A methodological model to assist in the optimization and risk management of mining investment decisions, Dyna-Colombia, 170, pp. 221-226, 2011.

[4] Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Carta de El Bierzo para la conservación del patrimonio industrial minero en España. Disponible: http://www.mcu.es/patrimonio/docs/MC/IPHE/PatrimonioCulturalE/N0/07-Carta_El_Bierzo.pdf [citado 1 de Abril de 2013].

[5] Contreras, F. and Dueñas, J., (coord.) La minería y la metalurgia en el Alto Guadalquivir: Desde sus orígenes hasta nuestros días, Instituto de Estudios Giennenses, Jaén, 2010.

[6] TICCIH (The International Committee for Conservation of Industrial Heritage). 100 elementos del Patrimonio Industrial en España. Disponible: <http://www.ticcih.es/patrimonio-industrial-2/100-elementos-del-patrimonio-industrial-en-espana> [citado 1 de Abril de 2013].

[7] Rojas, J.I., Ancient technology and Computer-Aided Design: olive oil production in Southern Spain, Interdisciplinary Science Reviews, 30, pp. 59-67, 2005.

[8] Rojas, J.I. and López, R., Engineering graphics and watermills: ancient technology in Spain, Renewable Energy, 32, 2019-2033, 2007.

[9] Rojas, J.I. and Ureña, J.R., Las máquinas de vapor en la obtención del azúcar de caña en España: análisis comparativo, Dyna-Colombia, 171, pp. 183-190, 2012.

[10] Castro, M., Rojas, J.I. and Carranza, M.P., Caracterización tecnológica de los molinos de viento mediterráneos españoles, Dyna-Colombia, 177, pp. 22-30, 2013.

[11] Menéndez, 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.

[12] Omura, G. Mastering AutoCAD 2012 and AutoCAD LT 2012 : Autodesk official training guide, Wiley Publications, Indianapolis, 2011.

[13] Waguespack, C., Mastering Autodesk Inventor 2012 and Autodesk Inventor LT 2012 Wiley Publications, Indianapolis, 2011.