

## **MODELADO Y ANÁLISIS DE LA TORRE DEL EQUIPO DE INTERVENCIÓN DE POZOS DE PETRÓLEO Y GAS**

### **MODELLING AND ANALYSIS OF TOWER INTERVENTION EQUIPMENT OF OIL & GAS WELLS**

*César A. Chagoyén-Méndez<sup>1\*</sup>, Jorge Luis Díaz-López<sup>1</sup>, Ernesto L. Chagoyén-Méndez<sup>2</sup>, Jorge L. Moya-Rodríguez<sup>1</sup> y Constantina Álvarez-Peña<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas; Carretera a Camajuaní Km 5 ½. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

<sup>2</sup> Facultad de Construcciones. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas; Carretera a Camajuaní Km 5 ½. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

<sup>3</sup> Universidad de Oviedo, Campus de Viesques. Dpto. Ing. Eléctrica, Gijón – Asturias, España.

Recibido: Octubre 14, 2014; Revisado: Febrero 9, 2015; Aceptado: Marzo 17, 2015

#### **RESUMEN**

En el presente trabajo se presenta el modelado y el análisis de una torre mástil Workover Rig perteneciente a una instalación de mantenimiento de pozos de petróleo y gas. Al realizar labores de mantenimiento de esta torre se detecta que uno de los elementos de la estructura presenta cierta deformación. Se decide no ponerla en operación y someterla a investigación.

Se aborda lo concerniente al modelado por invariantes, así como las formas de modelar la interacción suelo estructura. Fue necesario determinar las propiedades del material realizando ensayos de muestras tomadas en dos componentes de la torre.

Se estudia entonces el comportamiento estructural de la torre ante las cargas de operación, del cual se pudo comprobar que el efecto del elemento deformado en la estructura no resulta significativo para las solicitaciones a que está sometida.

**Palabras clave:** comportamiento estructural, torre Workover Rig, pozos de petróleo.

---

Copyright © 2015. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

---

\* Autor para la correspondencia: César Chagoyén-Méndez, Email: [cachagoyen@uclv.edu.cu](mailto:cachagoyen@uclv.edu.cu)

## **ABSTRACT**

In this paper, the modeling and analysis of one tower Workover Rig belonging to a maintenance facility for oil and gas wells is presented. When performing the maintenance of this tower, it is detected that one of the elements of the structure has some deformation. It was decided not to put it into operation and submit it to research.

The modeling of invariants as well as ways of modeling soil structure interaction is discussed. It was necessary to determine the material properties with the performing of test of some samples taken on two components of the tower.

The structural behavior of the tower to operating loads are then studied, proving that the effect of the deformed element in the structure is not significant for the stresses to which are subject.

**Key words:** structural behavior, Workover Rig tower, oil wells.

## **1. INTRODUCCIÓN**

La principal labor que realizan las torres de intervención de pozos de petróleo se enmarca en devolver una funcionabilidad óptima al pozo, además de la sustitución de tuberías en mal estado y válvulas defectuosas. Cuando estas torres dejan de funcionar ocurren grandes demoras en los trabajos y gastos considerables. En Cuba la utilización de estas torres comienza en el año 2005 por lo que es relativamente reciente ya que su costo es elevado y es preciso importarlas.

El equipo analizado es el XJ 350 Workover Rig de la compañía China SJ Petroleum Machinery Co. (EMPERCAP, 2004), (Manual, 2010), con el cual se brinda mantenimiento a pozos poco profundos. Este equipo está constituido por una torre mástil telescópica de perfiles de acero montado en un vehículo sobre neumáticos, el cual transporta la maquinaria que hace funcionar esta instalación.

El mástil está compuesto por dos secciones que se deslizan una dentro de otra (2,53 m) mediante un gato hidráulico, el mismo en operación alcanza 31,7 m y sirve de almacenamiento para los aparejos que realizan el mantenimiento del pozo. Esta torre o mástil debido a la altura que alcanza y las cargas a las que está sometida, se fija a tierra mediante cables que aportan estabilidad a la torre ante la acción de los vientos y presenta un ángulo de inclinación con respecto a la vertical de 3,5°.

Posee una conformación estructural tipo celosía. En cuanto a simetría se puede decir que es asimétrica, conformada por perfiles de sección I, canal, angular y tubular los cuales se unen principalmente por soldadura a filete. Presenta dos cunas: una para el soporte de 100 mazos de cabillas y la otra como respaldo a 4000 m de tubos que se apoyan en el suelo.

La comprobación del comportamiento estructural de la torre surge a solicitud de la empresa EMPERCAP, la cual al realizar labores de mantenimiento de esta torre detecta que uno de los elementos de la estructura presenta cierta deformación. Se decide no ponerla en operación y someterla a investigación.

Por tanto, este trabajo tiene como objetivo determinar el comportamiento de la torre mástil XJ-350 Workover Rig de los equipos de intervención ante las cargas de

operación pero principalmente evaluar el comportamiento del elemento deformado que ha sido detectado y que se encuentra en la sección inferior de la torre.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

Inicialmente se realizó un levantamiento detallado de la torre completa. En la figura 1 se muestran algunas imágenes del levantamiento gráfico realizado a la torre en estudio.



**Figura 1.** Vistas de la sección superior e inferior de la torre (arriba) así como lateral e inferior del elemento deformado (debajo)

Luego de realizar el levantamiento de la estructura de la torre, donde se tomaron todas las dimensiones de los elementos y las dimensiones de las secciones de estos, se procedió a la identificación de cada uno de estos en las tablas para perfiles que posee el Manual de Diseño en Acero por Factor de Carga y Resistencia o Manual LRFD de Construcción en Acero, Thornton (1994).

### **2.1. Modelado de la torre: Invariante Geometría**

El modelado se realiza teniendo en cuenta los ejes centroidales de las secciones de los elementos, por ello se hizo necesario determinar la posición de los ejes centroidales de los perfiles que actúan como columnas, debido a que la distancia entre estos determinan los resultados. Para esta labor se utilizó el software MDSolids 4.1 (MDSolids, 2014). Luego de determinar la posición de los ejes centroidales para estos elementos de soporte se pudo comenzar a confeccionar el mallado de hilos para el modelo. Para la confección del modelo 3D de la torre de intervención se utilizó el software SolidWorks 2012.

### **2.2. Invariante: Condiciones de apoyo suelo-estructura**

La estructura de la torre descansa sobre un conjunto de elementos denominado “tijera” y este a su vez sobre una base que está conformada por vigas y que descansa sobre el suelo. Tanto la tijera como la base poseen elementos de unión entre sí y al camión. Cualquiera de los seis grados de libertad en cualquiera de los nodos en la estructura de la base modelada pueden tener condiciones de soporte amortiguado traslacional o rotacional. Estas amortiguaciones elásticas conectan la estructura con el suelo. Los

soportes amortiguados a lo largo de los grados de libertad restringidos no contribuyen a la rigidez de la estructura.

Para realizar el modelado de las condiciones de apoyo de la torre con el suelo se necesitó formular una hipótesis que permitiese considerar condiciones desfavorables del suelo (bajo coeficiente de balasto), con un valor de  $2'500 \text{ kN/m}^3$ . Este bajo valor se asumió en función de los suelos donde operan mayormente estos equipos que son en zonas costeras donde los suelos encontrados en estas áreas son arenosos, sedimentarios calizos y rocas calizas cavernosas, Das (2001).

Para el modelado de la interacción suelo estructura en base a la teoría de Fuss-Winkler se declaró en cada nodo de la base o plataforma de apoyo un tipo de apoyo que funciona como un resorte, donde la rigidez del mismo fue calculada a partir de la expresión (1) (Chagoyén et al., 2009), Chagoyén (1996):

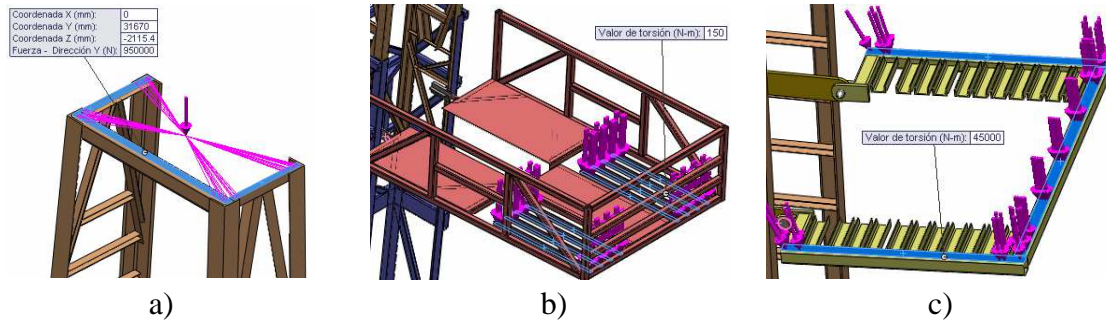
$$k_s = \frac{P}{y(z)} \quad (1)$$

Los cables presentes en la estructura fueron modelados sin imponerle tensión ni deformación alguna Chagoyén (1996).

### **2.3. Invariante: Cargas**

Las cargas que actúan y su distribución en la estructura es la siguiente:

- 950 kN perteneciente a la capacidad máxima del block y el peso de este, ubicado en el punto determinado de la corona por donde baja el block. Esta carga se encuentra desplazada 10 cm en Y y 3 cm en X del centro superior de la torre (figura 2, a).
- 0,1746 kN/m correspondiente al peso escaleras, mangueras, tuberías hidráulicas, gato hidráulico para el telescopio, cuello de ganso y otros. Distribuidos uniformemente en cada pata de la torre.
- 0,15 kN/m componente vertical actuante sobre la primera cuna de la torre. Debido a que los tubos se apoyan en el suelo con cierto ángulo de inclinación no se tomó el 100% del peso de estos (figura 2, b).
- 45 kN/m del peso de las cabillas de la segunda cuna. A esta segunda cuna se le consideró el 100% de las cargas actuantes, debido a que estas cuelgan de esta cuna (figura 2, c).
- La presión de viento no extremo obtenida es de  $0,697 \text{ kN/m}^2$ . Para colocarla distribuida a lo largo de los elementos estructurares se multiplicó por una media de los anchos de los elementos de 0,0762 m, obteniendo como resultado  $0,053 \text{ kN/m}$ , en todos los elementos de la torre. Para los cálculos de las cargas de viento se utilizó la NC-258 (Castellón y Pino, 2011) (NC-285, 2003).
- $0,84 \text{ kN/m}$  del peso distribuido del torrero en la segunda cuna, tomado como  $0,8 \text{ kN/m}^2$ .



**Figura 2.** Aplicación de la carga de 950 kN (a), de la carga tecnológica en la primera (b) y en la segunda cuna (c), respectivamente

#### 2.4. Invariante: Material

Los aceros utilizados en la fabricación de la estructura de las torres de los equipos de intervención de los pozos de petróleo, generalmente son aceros al carbono de calidad, es decir, con contenido de azufre y fósforo menor de 0,025%. El exceso de estos elementos químicos da lugar a la formación de inclusiones no metálicas, las cuales son perjudiciales en los aceros, Gil (2013).

Para identificar el tipo de acero usado en la estructura de la torre se tomaron dos muestras a dos elementos estructurales, una a los angulares que actúan como columnas y otra a uno de los elementos diagonales. Estas muestras tomadas se sometieron a varios métodos de investigación como la determinación de la composición química, análisis metalográfico y determinación de la dureza.

La determinación de la composición química se realizó mediante el método de análisis espectral de emisión atómica y el elemento carbono se corroboró mediante la utilización del software Image J. En la Tabla 1 aparece la composición de las muestras (M1 y M2).

**Tabla 1.** Composición química de las muestras analizadas

<i>Muestra de Acero</i>	<i>Composición química, % en peso</i>					
	<i>% C</i>	<i>% Cr</i>	<i>% Mn</i>	<i>% Si</i>	<i>% P</i>	<i>% S</i>
M1	0,28	0,3	0,7	0,2	≤ 0,04	≤ 0,05
M2	0,30	0,25	0,7	0,1	≤ 0,04	≤ 0,05

El objetivo del análisis metalográfico es la obtención de información del material por medio de la microestructura. Para la realización del análisis metalográfico del acero analizado, las probetas fueron preparadas según el procedimiento establecido y atacadas con Natal al 3 %.

La dureza se determinó con un durómetro Vickers de marca Heckert del año 1989 de fabricación alemana. En la Tabla 2 aparecen los valores de dureza obtenidos.

**Tabla 2.** Valores de dureza

<i>Mediciones</i>	<i>Dureza (HV)</i>	
	<i>Probeta M1</i>	<i>Probeta M2</i>
1	175	177
2	170	176
3	177	175
<b>Promedio</b>	<b>174</b>	<b>176</b>

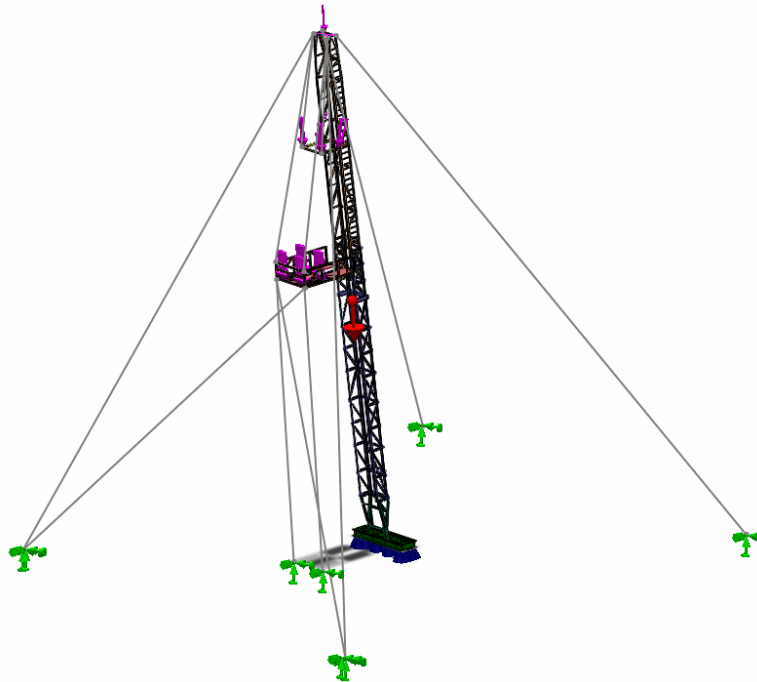
Los análisis realizados a las muestras arrojaron las siguientes conclusiones:

- Las probetas del acero analizado no poseen tratamiento térmico, su microestructura es ferrito-perlítica, con un valor de dureza promedio de 175 HB.
- El acero analizado posee inclusiones no metálicas alargadas, pero las mismas no son peligrosas, si están en el sentido longitudinal del laminado.
- El acero analizado puede ser homologado con un AISI 1030 en estado de “as rolled” con resistencia a la rotura del orden de 550 MPa y límite de fluencia de 350 MPa.

Con esta última conclusión se puede definir el material del modelo a simular.

### **2.5. Modelo de Elementos Finitos**

El modelo 3D completo de la torre se muestra en la figura 3.



**Figura 3.** Modelo 3D de la torre de intervención Workover Rig

### **2.6. Simplificación del modelo**

Debido a la capacidad del hardware con que se cuenta no fue posible realizar la simulación del modelo 3D completo elaborado en SolidWords 2012. Se hace necesario entonces simplificar del modelo, para lo cual se retiró la parte superior de la torre, así como las cunas de las cabillas y de los tubos. Esto implica que no se contará con un análisis detallado de la parte superior. El elemento deformado (el de mayor interés para el análisis) se localiza en la parte inferior de la torre. Por lo que la simplificación no limitará el análisis de este elemento. Las simplificaciones del modelo se realizaron en Autodesk Professional Inventor 2014 para el modelado y en ANSYS Workbench 14.0 para la simulación.

### 2.6.1. Simplificación de las cargas

Teniendo en cuenta las cargas que afectan directamente a las secciones retiradas del modelo y que ellas también afectan las partes restantes, es preciso descomponer cada carga en una fuerza aplicada en el punto deseado y en un par de fuerzas. Esto es posible debido al principio de transmisibilidad de la Mecánica el cual plantea: cualquier fuerza  $F$  que actúe sobre un cuerpo rígido puede desplazarse a un punto arbitrario  $O$ , si se agrega un par, de momento igual al momento de  $F$  con respecto a  $O$  (Beer y Johnston, 2010), Gil (2013). Como resultado de esta transformación, se aplica ahora una fuerza  $F$ , resultante de la sumatoria de todas las fuerza; y las otras dos fuerzas forman un par de momento  $M$ , resultante de la sumatoria de todos los momentos a trasladar. En la figura 4 se puede apreciar esta transformación.

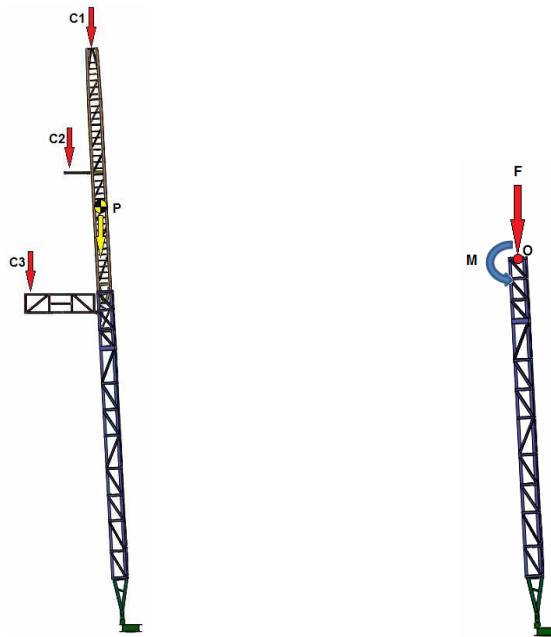


Figura 4. Modelo a simplificar (izquierda) y modelo simplificado (derecha)

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La distribución de las tensiones en el modelo simplificado mostrado revela que las tensiones que surgen no representan peligro para la estructura ya que el valor máximo es 208,44 MPa y el límite de fluencia del material es de 350 MPa, por lo tanto no ocurren fallas de resistencia.

Los resultados obtenidos en las deformaciones elásticas equivalente confirman que el comportamiento de la torre es adecuado para este tipo de estructura y cargas de trabajo, ya que los valores son pequeños.

Los desplazamientos se comportan de forma aceptable (26,7 mm) si se tiene en cuenta que se trata de una estructura del tipo celosía de más de 15 metros de altura, 1,63 m de ancho y 1.03 m de altura, que soporta cargas de más de 100 toneladas métricas.

Todos estos resultados se pueden apreciar con claridad en la figura 5. Un resultado obtenido también es el factor de seguridad que alcanza un valor de 1,19 lo cual es adecuado en estos tipos de estructuras.

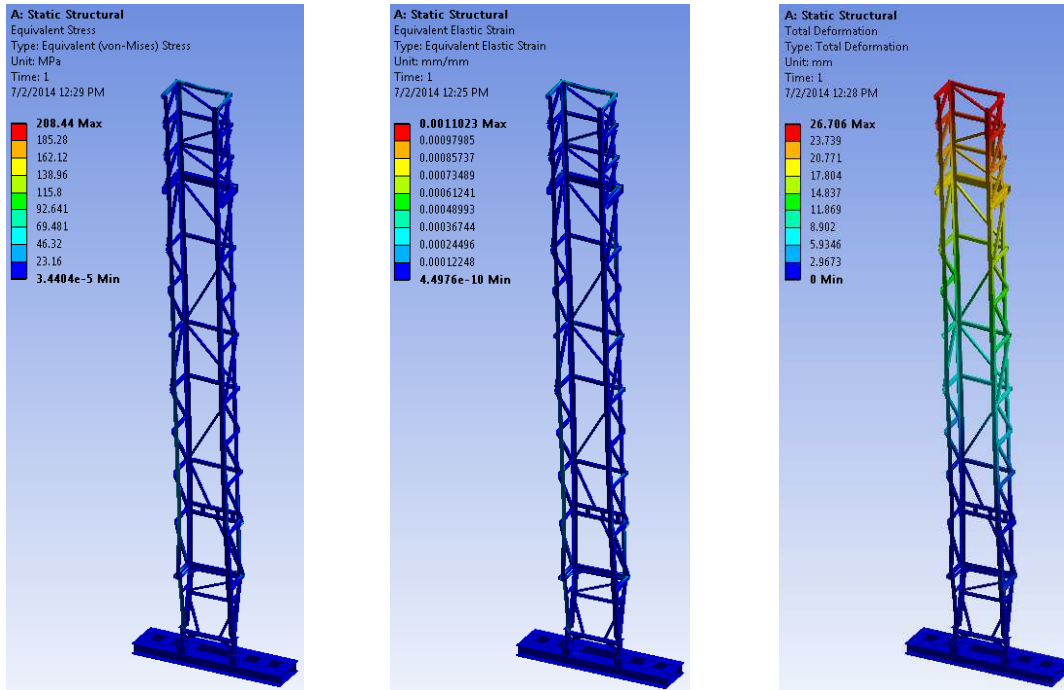


Figura 5. Tensiones von Mises, deformaciones elásticas equivalente y desplazamientos

### 3.1. Análisis del comportamiento del elemento deformado

Las tensiones Von-Mises en el elemento deformado son bajas (18,911 MPa), por lo que no representa peligro alguno, desde el punto de vista de la resistencia para el elemento deformado. Como consecuencia la estructura puede trabajar con las cargas máximas de operación. Debido a que por encima y relativamente cerca de la zona donde está ubicado el elemento deformado se encuentra la fijación al camión, los valores de desplazamiento son muy bajos (0,9261 mm), lo cual se traduce en que no habrán problemas de rigidez posterior. El factor de seguridad en esta sección de la torre es muy elevado lo que garantiza un alto grado de confiabilidad. Todos estos resultados se pueden apreciar en la figura 6. Las deformaciones tienen el mismo comportamiento que el resto de la estructura, es decir, que no aumentan en dicho lugar debido a la pequeña variación de la geometría de este elemento.

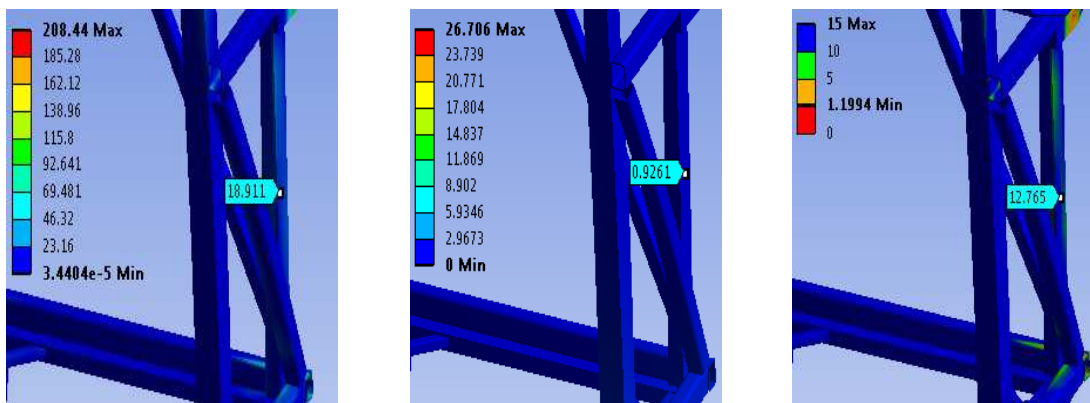


Figura 6. Tensiones von Mises, desplazamientos y factor de seguridad en el elemento deformado



#### **4. CONCLUSIONES**

1. Los aspectos más relevantes del modelado realizado son:
  - El suelo se consideró como una base elástica tipo Winckler pudiéndose tratar como si estuviera compuesta por muelles.
  - El modelado de los cables se realiza atendiendo a los tipos de cargas que sobre estos actúan. En el análisis de cables flexibles se supone despreciable toda resistencia opuesta a la flexión. Esta hipótesis significa que la fuerza en el cable tiene siempre la dirección de este lo que nos permite modelarlo como un elemento de sección circular con el diámetro y la longitud del cable, otorgándole las propiedades mecánicas correspondientes.
2. Se realizó una simplificación del modelo, para lo cual se retiró la parte superior de la torre, así como las cunas de las cabillas y de los tubos. El elemento deformado (de interés para el análisis) se localiza en la parte inferior de la torre, por lo que dicha simplificación no limitó el análisis de este elemento. A este modelo simplificado se le realizó la validación de la malla de elementos finitos que ofreció como resultado que no hubo variación de las tensiones Von-Mises para las tres mallas elaboradas de distintos tamaños.
3. Del análisis estático lineal del modelo simplificado de la torre se obtuvo que las tensiones Von-Mises obtenidas son bajas y como consecuencia un adecuado factor de seguridad. Los desplazamientos y las deformaciones que se alcanzan también son pequeños. Todos estos resultados coinciden plenamente con la realidad del comportamiento estructural de la torre.
4. Los cálculos realizados al elemento deformado dieron como resultado que el elemento no obtuvo dicha deformación debido a las cargas de operación, sino a una mala manipulación por parte de los operarios, lo cual coincide con las opiniones de los ingenieros de EMPERCAP.

#### **REFERENCIAS**

- Beer, F. P, Johnston E. R. Jr., *Mecánica vectorial para ingenieros. Estática*. 9na Ed. McGraw-Hill Interamericana, S. A. de C.V, Capítulo 3, pp. 75, México D.F., 2010. ISBN-13:978-607-15-0277-3.
- Castellón, O. F. R., Pino, M. L., *Modelación mecánica de estructuras isostáticas*, Folleto, en: Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, 2011.
- Chagoyén M., C.A., Illana Martos, A., Vilchez Vichez, M., Machado Rodríguez, A., Carmona Torres, J. A., *Estado actual y perspectivas de investigación de los cables metálicos de tiro e izaje para cargas medias y altas.*, 9º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica (CIBIM9), Las Palmas de Gran Canaria, Islas Canarias, España, 17-20 Nov. 2009, ISBN 978-84-6921-2, 80581-62-0909.
- Chagoyén M., E. L., *Modelo de la viga sobre apoyos elásticos. Método de los parámetros de origen.*, Monografía Maestría de Estructuras, Editorial Feijoo, 1996, pp. 26-38.
- Chagoyén M., E. L., *Monografía Maestría de Estructuras*. Editorial Feijoo, 1996.

- Das, Braja M. Principios de Ingeniería de Cimentaciones, 4ta Edición, International Thomson Editores, Capítulo 1, 2001, pp. 17. México, ISBN 0-534-95403-0.
- EMPERCAP., Documento de empresa. CUPET: Asimilación de los servicios de reparación de pozos, Ciudad de La Habana, 2004, pp. 7-8.
- Gil, F.R., Modelación y Análisis de una instalación de intervención de pozos de Petróleo (EMPERCAP), Documento de empresa en: Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara. 2013.
- MDSolids 4.1.0. Educational software for Mechanics of Materials., University of Missouri Rolla, Timothy A, Philpot, USA. [Consultado el: 14 de enero de 2014]. Disponible en: <http://www.mdsolids.com/>
- NC-285 Carga de viento., Método de cálculo, Normalización, 1 Ed., pp.3-9, 2003.
- Thornton C., W. A., Manual of Steel Construction Load & Resistance Factor Design, 1994.
- Workover Rigs Manual. China SJ Petroleum Machinery Co., Chapter 5, 2010, pp. 39-52.