

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UN ELEVADOR DE CANGILONES SOMETIDO A FUERZAS DE VIENTOS HURACANADOS CON ÁNGULO DE INCIDENCIA VARIABLE

BUCKETS ELEVATOR SUBJECTED TO HURRICANE WINDS FORCES WITH VARIABLE INCIDENCE ANGLE STRUCTURAL ANALYSIS

Santiago Amaury Santana Reyes^{1}, José Félix Morales Leslie²,
Juan Pablo Pérez Noriega³ y Yoan Manuel Ramos Botello¹*

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Granma, Cuba. Carretera a Manzanillo,
km 17 ½, Peralejo, Bayamo, Granma, Cuba.

² Empresa Hidrogreen, Del Retoño #73, San Diego, Texcoco de Mora, Estado de México. México.

³ Empresa de Ingeniería y Proyectos Azucareros, Calle 4^a #49, Reparto Jesús Menéndez,
Bayamo, Granma, Cuba.

Recibido: Octubre 9, 2018; Revisado: Diciembre 20, 2018; Aceptado: Marzo 28, 2019

RESUMEN

El presente trabajo analiza, a partir del método de los elementos finitos, la estructura de un elevador de cangilones cuando es sometida a presiones de viento provocadas por un huracán categoría 5, según la escala Saffir-Simpson. Se determina el estado tensional, de acuerdo al criterio de von Mises, provocado por la acción del peso propio del conjunto estructural y a la presión básica característica del viento, determinada a partir de la NC 285:2003. Se comprueba la influencia de la variación del ángulo de incidencia del viento (AIV) sobre la estructura, siendo el ángulo de 60° la componente más crítica pues el límite de fluencia del material es superado. Así mismo, se evidencia que el desplazamiento de la estructura resulta moderado ante las sollicitaciones que lo provocan. Finalmente, se relacionan en un modelo matemático la influencia de la variación del ángulo de incidencia del viento sobre las tensiones en la estructura del elevador de cangilones.

Palabras clave: elevador de cangilones; estructura; tensiones; vientos huracanados.

ABSTRACT

The present work analyzes, using the finite elements method, the buckets elevator structure when it is subjected to wind's pressures caused by a category 5 hurricane, according to Saffir-Simpson's scale. Tensional state is determined according to von Mises criterion caused by the action of the structural group own weight and the basic pressure characteristic of wind, certain from the NC 285:2003. The variation influence of wind incidence angle (WIA) on the structure is checked, being 60° angle the most critical component, since the material yield limit is exceeded. Likewise, it is evidenced that the structure displacement is moderate due to solicitations that provoke it. Finally, it is related in a mathematical model the wind's incidence angle influence variation in buckets elevator structure stress's.

Keywords: bucket elevator; structures; stress hurricane; winds.

1. INTRODUCCIÓN

En toda industria es necesario el trasiego de la materia prima o mercancía de manera segura, rápida y con aceptables indicadores ergonómicos. Autores como Alvarez y García (2001) refieren que las máquinas de transporte continuo juegan un papel importante en el cumplimiento de la demanda de los almacenes portuarios. De igual manera (Hernández et al., 2017) plantean la importancia de los transportadores en la industria procesadora de cemento.

En la producción de azúcar de caña ocupan un papel importante los sistemas de transportación continua, pues desde la etapa inicial de la molienda hasta el final del ciclo productivo es necesario transportar constantemente dicho producto.

Los elevadores de cangilones son los transportadores normalmente usados para elevar materiales a granel. Consisten en una serie continua o discontinua de recipientes, denominados "cangilones" fijados sobre una cinta o sobre uno o dos ramales de cadena que actúan como elemento de tracción (Garofoli y Garofoli, 2014).

Los elevadores de cangilones, debido a su altura constructiva, son estructuras esbeltas por lo que la sollicitación mecánica a la que están sometidos es de carga axial por compresión, producto a la acción de su peso propio.

Sin embargo, debido a que los elevadores de cangilones se pueden ubicar en áreas exteriores, surge una condición resistiva adicional provocada por la acción del viento sobre la estructura. La presión que provoca el viento al entrar en contacto con dicha estructura ocasiona el surgimiento de esfuerzos de flexión, los que pueden ser significativos cuando la velocidad del viento alcance 250 km/h producto a la acción de un huracán tropical.

Cuba ha sido azotada durante los últimos 205 años por unos 109 ciclones o huracanes tropicales, entre ellos 10 grandes huracanes (Gómez y Hernández, 2015). De acuerdo a Blanco y Llanes (2011) los fenómenos hidrometeorológicos extremos tuvieron hasta la mitad de la década de los 90, un período de baja probabilidad de ocurrencia, pero específicamente a partir del año 1996, entraron en una fase de alta probabilidad de ocurrencia.

Por esta razón, se hace necesario el estudio del comportamiento de las estructuras, que se construyen en el país, ante situaciones de vientos huracanados. Existen autores que a partir del análisis estático por el método de elementos finitos (MEF) han estudiado el comportamiento resistivo de disímiles objetos de obra, generados a partir del diseño asistido por computadora (CAD), los cuales son sometidos a la acción de vientos huracanados. Autores como Peiso y col., (2017) determinan la resistencia mecánica de varias configuraciones geométricas de tablillas de persianas sometidas a la acción de vientos huracanados.

En ese mismo orden, Estrada y col., (2017) a través de la simulación por el MEF determinan las causas del colapso de cubiertas ligeras de fibrocemento empleadas en viviendas. De igual manera, Gonzáles y col., (2005) utilizan el MEF para predecir el comportamiento tensional de las estructuras de torres de comunicaciones sometidas al azote de un huracán tropical.

Otros autores, como Morales y Santana (2016) analizan, a partir del MEF, la estructura de un invernadero tipo capilla, la cual es sometida a vientos tropicales de 120 km/h, todo lo cual sirve para determinar el estado tensional que presenta ante la acción de cargas de vientos en dos direcciones (lateral y frontal).

El objetivo de la presente investigación es comprobar la resistencia mecánica de la estructura del elevador de cangilones, mediante la evaluación por el MEF, atendiendo al peso propio del conjunto y a la acción de la fuerza del viento con un ángulo de incidencia variable, conociendo las condiciones constructivas de la misma.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Particularidades del diseño y funcionamiento del elevador de cangilones

El elevador de cangilones es uno de los componentes principales del sistema de recepción y circulación del azúcar crudo. En la Tabla 1 se muestran las principales características típicas de funcionamiento y construcción de dicho elevador.

Tabla 1. Características funcionales y constructivas del elevador de cangilones

<i>Característica</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad de medida</i>
Altura total	12,9	m
Capacidad máxima	18,74	t/h
Velocidad del elevador	1	m/s
Capacidad de cada cangilón	0,0035	m ³

2.2. Formación del modelo CAD para el análisis por el MEF

Se suprimen los componentes que no son de interés estructural como: los cangilones, el motor eléctrico, el reductor de velocidad y la baranda; no obstante, se toma en cuenta la acción del peso de estos componentes sobre la estructura (Figura 1a). La simplificación del modelo CAD permite reducir el tiempo de cálculo computacional, quedando el modelo como se muestra en la Figura 1b).

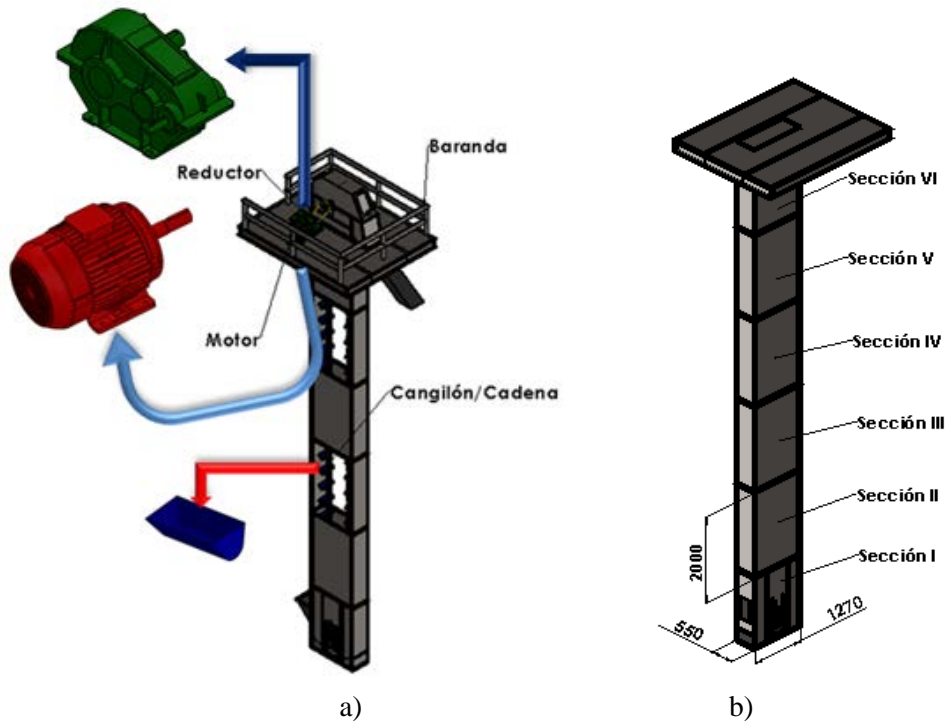


Figura 1. Modelo CAD del elevador de cangilones, a) Elevador con todos los componentes y b) Elevador solo con componentes estructurales (Unidades de medida en mm)

La estructura del elevador está compuesta por columnas de perfiles angulares de alas iguales del tipo ISO 50x50x4 mm. Se colocan paneles metálicos de 4 mm en los laterales con el fin de evitar la pérdida del azúcar. La estructura está compuesta por 6 secciones las que se ensamblan a partir de uniones atornilladas. El material de los componentes estructurales es de acero ASTM A36, las propiedades mecánicas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero ASTM A36 (Mott 2006, MatWeb 2018)

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>
Módulo elástico	$2 \cdot 10^5$	MPa
Coefficiente de Poisson	0,26	---
Densidad	7850	kg/m ³
Límite elástico	$2,5 \cdot 10^2$	MPa
Límite a tracción	$4 \cdot 10^2$	MPa

2.3. Fuerzas y restricciones presentes en el modelo CAD del elevador de cangilones

En la Figura 2a) se muestra las restricciones en la base, las que no permiten ningún grado de libertad del modelo CAD. En la Figura 2b) se puede observar la acción total de la magnitud del peso propio sobre la estructura.

El peso propio incide axialmente en la parte superior de la estructura y para considerar el modo más crítico de funcionamiento se ha colocado en el extremo superior del conjunto y no en el centro de masa. La determinación del peso del elevador de cangilones se realiza mediante el programa de diseño SolidWorks 2016 y tiene un valor de 63237,07 N.

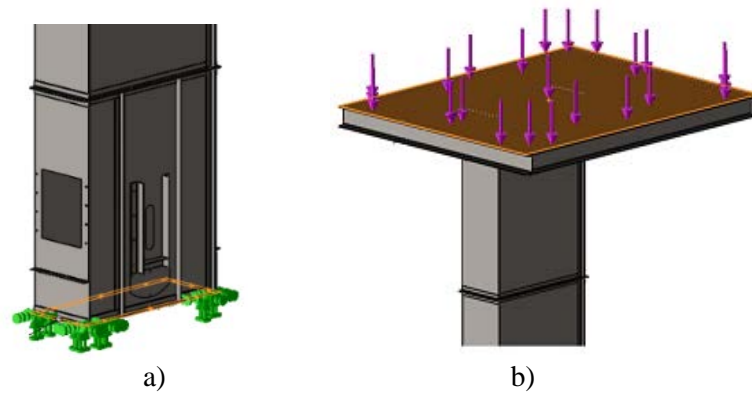


Figura 2. Cargas y restricciones actuantes en el modelo; a) Restricciones del modelo del tipo fijo y b) Acción del peso del elevador aplicado sobre la plataforma superior

Teniendo en cuenta la configuración geométrica esbelta de la estructura, ante la acción de la fuerza de compresión axial, se realizó una comprobación de pandeo, la cual no reveló fallas mecánicas a causa de dicha sollicitación.

2.4. Determinación de la presión básica característica del viento en la estructura del elevador de cangilones. Mallado del modelo CAD

Otra carga que actúa en conjunto al peso propio del elevador de cangilones es la presión del viento, la cual se determina a partir de la metodología establecida en la norma NC 285 (2003). Dicha norma establece la ecuación 1, la que permite determinar la presión básica característica del viento. Siendo: v , la velocidad del viento. Para el caso de huracanes tropicales categoría 5, la velocidad de los vientos sostenidos es de 250 km/h (69,44 m/s).

$$q_{10} = \frac{v^2}{1,6 \cdot 10^3} = 3,014 \text{ kN/m}^2 \quad (1)$$

La carga unitaria característica total producida por el viento se determina a partir de la ecuación 2.

$$q = q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_{ra} \cdot C_f \quad (2)$$

Donde:

C_t : coeficiente de recurrencia, el tiempo de recurrencia es de 50 años, por tanto el valor es de 1.

C_s : coeficiente de topografía, la norma propone el coeficiente correspondiente a sitio normal, por tanto el valor es de 1.

C_h : coeficiente de altura, debido a que el elevador se emplaza en un terreno tipo A de acuerdo a la norma, el valor es de 1,25; al ser la altura del elevador de 12,9 m.

C_r : coeficiente de ráfaga, según la categoría del tipo de terreno A, el valor del coeficiente es de 1,14.

C_{ra} : coeficiente de reducción, este coeficiente no se tiene en consideración pues la dimensión máxima del elevador de cangilones es menor a 15 m.

C_f : coeficiente de forma, debido a que el elevador tiene superficies verticales de considerable altura, el valor del coeficiente es de 0,8.

Entonces, al evaluar los coeficientes en la ecuación 2, se tiene:

$$q = 3,014 \text{ kN/m}^2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,25 \cdot 1,14 \cdot 0,8 = 3,44 \text{ kN/m}^2$$

En esta investigación se realiza un análisis de la estructura del elevador de cangilones atendiendo a las principales componentes angulares en las que puede actuar el viento (0°; 30°; 45°; 60° y 90°). La Figura 3a) muestra la acción de la presión del viento sobre la estructura del elevador de cangilones en un ángulo de incidencia del viento (AIV) de 60°.

Para realizar el mallado de la estructura se emplea una malla sólida basada en curvatura, esta crea automáticamente más elementos en las zonas de contacto, esta característica permite aumentar la precisión de los cálculos (Figura 3b). La configuración de la malla que se utiliza en la investigación es la del estudio 1 (Tabla 3), la misma cuenta con 24842 nodos y 76521 elementos.

La malla sólida es empleada pues, a pesar de consumir más recursos computacionales, garantiza una mejor correspondencia con la geometría de los perfiles estructurales (en especial los angulares). Esta relación costo-beneficio es asumida igualmente, con resultados favorables por Concepción (2014).

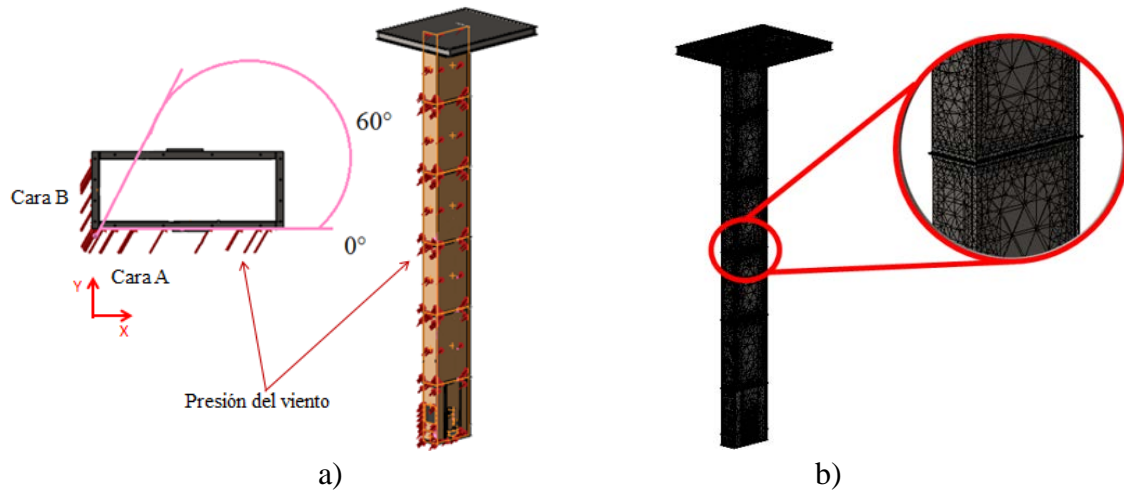


Figura 3. Estructura del elevador de cangilones; a) Acción de la presión del viento y b) Mallado del modelo. Detalle de transición del tamaño de los elementos de la malla

Como parte del análisis de la convergencia del mallado se redujo el tamaño de los elementos a la mitad en otro estudio numérico, el error relativo entre ambos estudios numéricos es de 2,08 %, lo cual indica que la variación del tamaño de los elementos de la malla no influye significativamente en la magnitud de los resultados encontrados.

Tabla 3. Convergencia del mallado a partir de los resultados de las tensiones

<i>Estudio numérico</i>	<i>Tamaño máximo del elemento (mm)</i>	<i>Tamaño mínimo del elemento (mm)</i>	<i>Tensiones (MPa)</i>	<i>Error relativo (%)</i>
1	500	100	251,578	---
2	250	50	246,326	2,08

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Tensiones y desplazamientos de la estructura del elevador de cangilones

La Figura 4a) muestra la distribución de las tensiones, de acuerdo al criterio de von Mises, en la estructura del elevador de cangilones, cuando es azotada por vientos huracanados de 250 km/h sostenidos y con una componente, de acuerdo al sistema de referencia mostrado en la Figura 3, de 60°. Las máximas tensiones se encuentran localizadas en la parte superior de la primera sección de la estructura cerca de la unión atornillada, en un evidente esfuerzo de flexión y tienen un valor de 251,578 MPa; este valor supera ligeramente el límite elástico del material por lo que las deformaciones que surgen debido al esfuerzo son permanentes.

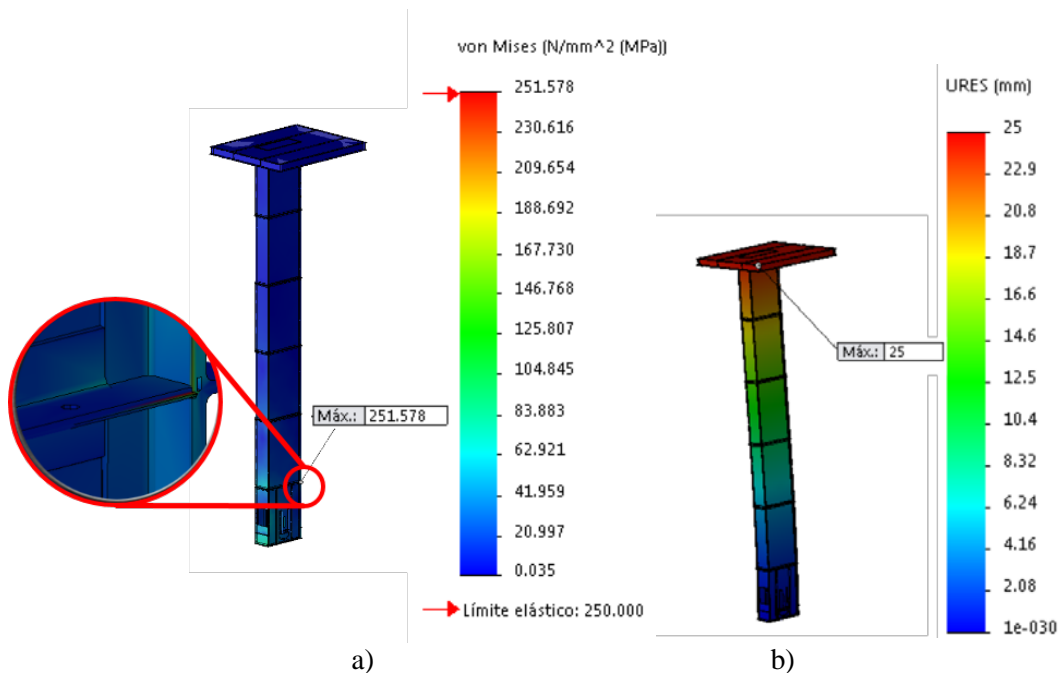


Figura 4. Resultados del análisis por el MEF de la estructura del elevador de cangilones ante un AIV de 60°

a) Tensiones máximas y b) Desplazamientos resultantes (Escala de deformación 1:50)

En aras de disminuir el valor de las tensiones es factible colocar en la zona comprometida una serie de refuerzos de tal manera, que exista una mejor distribución de las tensiones a lo largo de la zona antes mencionada.

Los máximos desplazamientos (Figura 4b) tienen un comportamiento moderado pues en la plataforma superior se registran desplazamientos con un valor de 25 mm; los cuales no resultan peligrosos.

La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos de los casos de estudio atendiendo a la variación del AIV sobre la estructura. Se evidencia la marcada influencia de la variación del AIV sobre el estado tensional del conjunto. Mientras aumenta el AIV existe un incremento del valor de las tensiones, siendo la sollicitación más crítica cuando el AIV es de 60° pues el viento actúa muy cercano a la perpendicularidad en las caras A y B. Sin embargo, este comportamiento no es lineal porque cuando el AIV tiene una componente de 90° se aprecia una disminución del valor tensional, debido a que solo la

cara B está expuesta. Ese mismo comportamiento no lineal se aprecia en el valor de los desplazamientos, los cuales por otra parte no resultan significativos.

Tabla 4. Comportamiento del estado tensional y de los desplazamientos en la estructura del elevador de cangilones atendiendo a la variación del AIV

Variación del AIV (°)	Caras expuestas	Tensiones (MPa)	Desplazamientos (mm)
0	A	189,632	19,4
30	AB	166,343	16,7
45	AB	216,272	21,4
60	AB	251,578	25,0
90	B	36,642	3,62

3.2. Análisis de regresión polinomial

Se establece el ajuste de un modelo polinomial no lineal de tercer orden para describir la relación entre las tensiones presentes en la estructura del elevador de cangilones (variable dependiente) y la variación del AIV (variable independiente) (Figura 5).

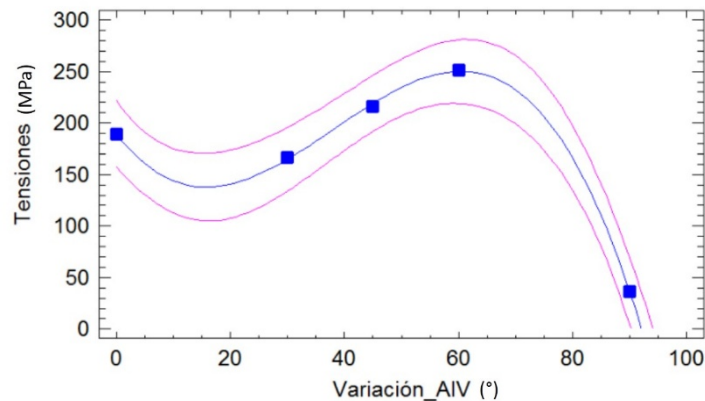


Figura 5. Gráfico del modelo ajustado para la relación tensiones en el elevador de cangilones y variación del AIV

La ecuación 3 relaciona la influencia de la variación del AIV en el comportamiento tensional de la estructura del elevador de cangilones, siendo esto una cuestión muy importante pues es primordial conocer dicho comportamiento en estructuras que son azotadas por vientos de huracanes tropicales, teniendo en cuenta que estos últimos poseen una gran variabilidad debido su naturaleza y recorrido, en ocasiones errático.

$$\sigma = 189,805 - 7,215 \cdot AIV + 0,288 \cdot AIV^2 - 0,00252 \cdot AIV^3 \quad (3)$$

Donde, σ es la tensión estimada en la estructura (MPa).

El estadístico R^2 es de 99,91 % lo que indica que el modelo propuesto en la ecuación 4 explica en ese orden la variabilidad de las tensiones.

4. CONCLUSIONES

1. El análisis numérico realizado permitió evidenciar que la estructura del elevador de cangilones ante un estado tensional provocado por vientos huracanados, con una velocidad de 250 km/h sostenidos y con un AIV de 60°, falla elásticamente.

2. Los desplazamientos determinados, a partir del análisis numérico, en la estructura del elevador de cangilones son moderados.
3. El modelo matemático polinomial obtenido permite una evaluación del estado tensional de la estructura del elevador de cangilones, atendiendo a la variación del AIV, y facilita la toma de decisiones preventivas a partir de la trayectoria de los huracanes tropicales.

REFERENCIAS

- Alvarez, P., y García, M.E., Análisis estructural de un transportador de banda, Ingeniería Mecánica, Vol. 4, No. 3, May.-Jun., 2001, pp. 63-70.
- Blanco, R. y Llanes, C., Es la Norma Cubana NC 285:2003, pertinente para las Cargas de Viento que se desarrollan en la actualidad, Revista de Arquitectura e Ingeniería, Vol. 5, No. 1, 2011, pp. 89-95.
- Concepción, N., Estudio de la capacidad portante de la torre (Cabria) de un taladro de perforación petrolera., Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Diseño y Fabricación Asistido por Computadoras (CAD/CAM), Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya", Cuba, 2014.
- Estrada, R., Rodríguez, J., Lengarán, Y. y Campos, S., Mitigación del colapso de las cubiertas ligeras de fibrocemento ante vientos huracanados., Informes de la construcción, Vol. 69, No. 547, 2017, pp. 1-9.
- Garofoli, A. y Garofoli, J., Elevadores a cangilones de descarga centrífuga. Pérdidas ocasionadas por problemas de diseño., Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, Vol. 18, No. 2, 2014, pp. 55-67.
- Gómez, A. y Hernández, P.A., Determinación de la carga por viento extremo en naves con cubiertas a dos aguas, Revista de Arquitectura e Ingeniería, Vol. 9, No. 1, 2015, pp. 1-47.
- González, V., Rodríguez, M., Veliz, L., Delvía, C. y Delgado, Y., Aplicación del MEF al análisis de vulnerabilidad estructural de torres de telecomunicaciones., Memorias del 7^{mo} Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, México D.F., Octubre 2005, pp. 1-8.
- Hernández, H., Castellanos, L.M., Cabello, J., Silva, J. y Manga, C., Failure evaluations in bucket conveyor. Studies case., Revista Espacios, Vol. 38, No. 34, 2017, pp. 1-8.
- MatWeb. 2018, ASTM A36 Steel, Consultado en: Enero 2, 2018, Disponible en: www.matweb.com.
- Morales, J. y Santana, S., Determinación del estado tensional de un invernadero tipo capilla en áreas de clima tropical., Innovare, Vol. 5, No. 1, 2016, pp. 1-19.
- Mott, R., Diseño de elementos de máquinas., Vol. 1, Pearson Educación, México, 2006, Anexo 13.
- NC 285:2003., Oficina Nacional de Normalización., Carga de viento. Método de cálculo. La Habana, Cuba, pp. 1-67.
- Peiso, K., González, R. A., Nápoles, E. y Morales, H., Simulación de persianas para naves industriales bajo condiciones de vientos huracanados., Ingeniería Mecánica, Vol. 20, No. 1, 2017, pp. 14-21.