

## **Revisión estructural de torre atirantada frente a carga de viento extremo**

### **Structural review of a guyed tower against extreme wind load**

**Kelvin Barban Lara<sup>1</sup>, Alejandro Miguel Guerra<sup>1,\*</sup>, Leandra Orlandi González<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (Cujae). Calle 114 No 11901 e/ 119 y 127. Marianao. La Habana, Cuba.

\*Correspondencia: [alejandguegon@civil.cujae.edu.cu](mailto:alejandguegon@civil.cujae.edu.cu)

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](#)



#### **Resumen**

Las torres atirantadas constituyen un ejemplo de estructuras donde la no linealidad geométrica tiene una marcada influencia en el comportamiento estructural de cada uno de los elementos que la conforman. El diseño de torres atirantadas, exige de la realización de un análisis con no linealidad geométrica, pero en ocasiones en función de la estructura y de la magnitud de las cargas pudiera no ser necesario, y en ese caso, se simplificarían los modelos computacionales. El objetivo del presente estudio es la revisión estructural de una torre atirantada que será instalada sobre la cubierta de la termoeléctrica Máximo Gómez, en la provincia de Artemisa. Se realizó un estudio comparativo del comportamiento de la torre al aplicar un análisis lineal contra un análisis no lineal. Los parámetros tomados en cuenta para la comparación fueron los desplazamientos en el fuste, la fuerza axial en las columnas y las diagonales, las reacciones en los anclajes y las solicitudes máximas en los cables. Los resultados obtenidos de la modelación de la torre reafirmaron el comportamiento no lineal geométrico que se manifiesta en este tipo de estructuras y por ende de la necesidad de su consideración en el diseño y revisión.

**Palabras clave:** Torres atirantadas, análisis no lineal, no linealidad geométrica

#### **Abstract**

Guyed towers are an example of a structure wherein geometric non-linearity has a marked influence on the structural behavior of each comprising element. The design of guyed towers requires an analysis with geometric nonlinearity, but sometimes depending on the structure and the magnitude of the loads, it may not be necessary. In that case, the computational models would be simplified. The objective of this study is the structural revision of a guyed tower that will be installed on the roof of the Máximo Gómez thermoelectric plant, in the province of Artemisa. A comparative study was performed to analyze the behavior of the tower by applying a linear analysis against a non-linear analysis. The parameters taken into account for the analysis are the displacements in the shaft, the axial forces in the columns and diagonals, the reactions in the anchors, and the maximum stresses on the cables. The results obtained from the modeling of the tower reaffirmed the non-linear geometric behavior that is manifested in this type of structure and therefore the need for its consideration in the review and design.

**Keywords:** guyed towers, non-lineal analysis, geometric nonlinearity

## 1. Introducción

Las torres atirantadas de celosía son estructuras de gran complejidad debido a la presencia de cables para garantizar su estabilidad, los cuales le confieren al conjunto un comportamiento caracterizado por la no linealidad geométrica producto de la variación de la rigidez de los mismos a los desplazamientos horizontales de la estructura frente a cargas de viento. La mayor parte de la no linealidad de estas estructuras proviene de la relación no lineal que existe entre la fuerza y el desplazamiento de los cables inclinados al actuar la carga de viento [1]. Algunos artículos han sido publicados basándose en el estudio de la no linealidad de los cables. Madugula [2] propone dos enfoques para analizar el comportamiento de los cables: bajo un comportamiento estático y para un comportamiento dinámico de los mismos, mientras que autores como Shi, H. y H. Salim [3] plantean que cuando la torre atirantada experimenta grandes deformaciones la rigidez global cambia significativamente y la respuesta se vuelve muy diferente a la de una torre sin grandes deformaciones, los cables se comportan de una forma altamente no lineal y la respuesta es muy difícil de predecir usando la teoría lineal del cable.

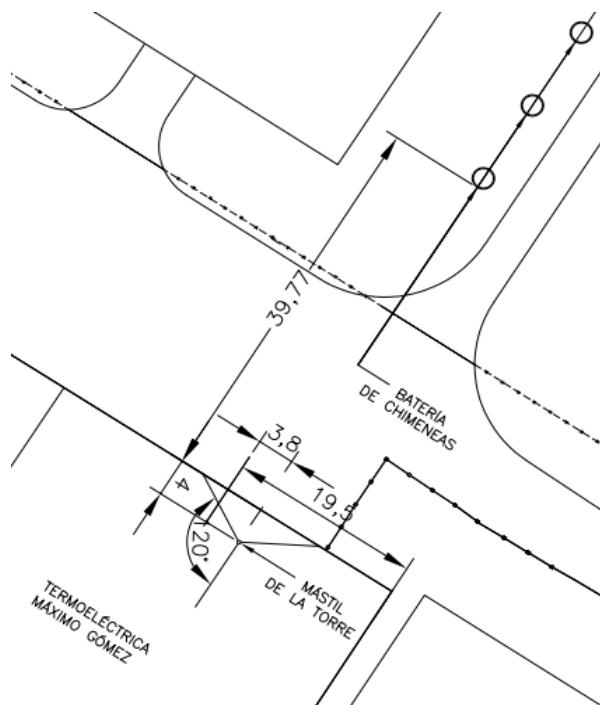
Estudios realizados por Elena y Fernández [1] en la comparación del análisis estructural de torres atirantadas en condiciones de comportamiento lineal y no lineal de los cables bajo la acción de cargas extremas evidencia que se subestiman los esfuerzos a los que está sometida la estructura si no se realiza un análisis no lineal geométrico. Sin embargo, en determinadas torres en función de su altura y la magnitud de las cargas pudiera no ser necesario un análisis no lineal simplificando los modelos computacionales.

En esta investigación se propone realizar una comparación del comportamiento de una torre sometida a carga de viento extrema al aplicar un análisis lineal contra un análisis no lineal, los parámetros tomados en cuenta para la comparación fueron los desplazamientos en el fuste, la fuerza axial en las columnas y las diagonales, las reacciones en los anclajes y las solicitudes máximas en los cables, a partir de la modelación computacional de la estructura con el programa de análisis estructural SAP 2000 en su versión 16. El objetivo es determinar si la torre analizada con su altura y las magnitudes de la carga puede ser calculada sin tener en cuenta la no linealidad geométrica.

## 2. Materiales y Métodos

El objeto de estudio es una torre atirantada ubicada sobre la cubierta de la Termoeléctrica Máximo Gómez en el Mariel. Por cuestiones técnicas la torre debe de estar ubicada a 4 m del borde de la nave y alineada con la batería de chimeneas que colinda con la nave (Figura 1), lo que complejiza su anclaje a la estructura. La nave posee una altura de 27 m, una longitud de 259 m con intercolumnios cada 6 m, la cubierta está formada por losas casetonadas apoyadas sobre armaduras metálicas que salvan una luz de 39 m.

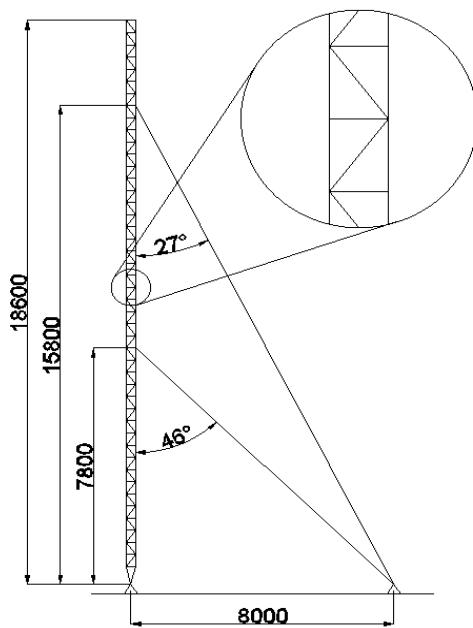
La estructura del fuste fue modelada como una armadura espacial tridimensional, teniendo en cuenta cada uno de sus elementos: columna, diagonales, tranques y dos niveles de vientos que tributan a los anclajes ubicados en la cubierta de la nave. El mástil tiene una altura de 18,6 m y su sección transversal es triangular equilátero de ancho 0,30 m. Las columnas que conforman las aristas son de sección transversal tubular maciza con un diámetro de 30 mm, mientras que las diagonales y los tranques son de 16 mm. Los elementos del mástil son de acero A-36, con tensión de fluencia 250 MPa y con una tensión de rotura de 400 MPa. Los cables de acero son de 12 mm de diámetro con una tensión de fluencia de 1600 MPa y una tensión de rotura de 2000 MPa. En la tabla 1 y en la figura 2 se definen las características y disposición de los cables.



**Fig.1** Replanteo de la torre. Dimensiones en metros

**Tabla 1.** Datos de los cables para la construcción del modelo

Nivel	Ángulo con la torre (grados)	Diámetro (mm)	Carga de rotura (kN)
1	46	12	226,2
2	27	12	226,2



**Fig.2** Modelo de torre. Dimensiones en milímetros

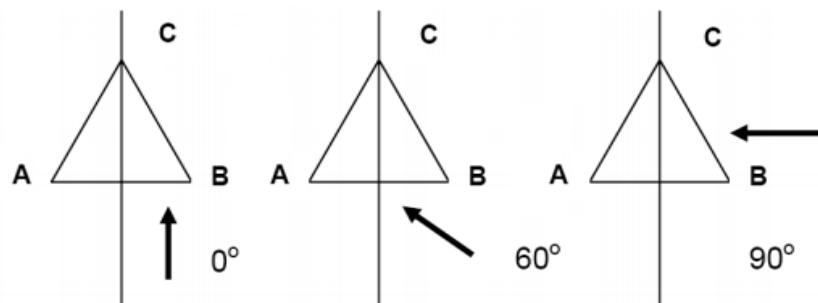
Los elementos que componen la armadura espacial (columnas, diagonales y tranques) fueron modelados como elementos barras. Las columnas se consideraron continuas desde la base del fuste hasta el tope garantizando la transmisión de las solicitudes; el resto de los vínculos se consideraron articulados.

Las condiciones de apoyo de la estructura están dadas por la unión del fuste a la estructura de transición y la unión de los cables mediante los anclajes. Ambos tipos de uniones fueron consideradas como articulaciones espaciales.

Sobre la torre fueron consideradas las acciones de tesado en los cables, el viento, el peso propio, así como el peso y el efecto del viento sobre un radar ubicado en el tope de la torre. Para la determinación de las combinaciones a emplear se utilizó la NC 450 [4] trabajando finalmente con  $0,9C_p + 1,4C_v$  y  $1,2C_p + 1,4C_v$  ( $C_p$ : Carga Permanente y  $C_v$ : Carga de Viento). El viento sobre el mástil y los cables fue calculado empleando estudios [5-9] consultados para actualizar la norma cubana de viento y las direcciones de viento estudiadas fueron  $0^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $90^\circ$ . La acción dinámica del viento sobre la estructura fue tomada en cuenta empleando el método estático equivalente de los patrones de carga “Patch Load”, donde las cargas asignadas sobre la estructura se dividen en dos componentes: una carga media de viento que se aplica sobre el fuste y los cables de la torre y un grupo de patrones de carga de valor variable que se asignan sobre los cables y secciones del fuste [10, 11].

### 3. Resultados y Discusión

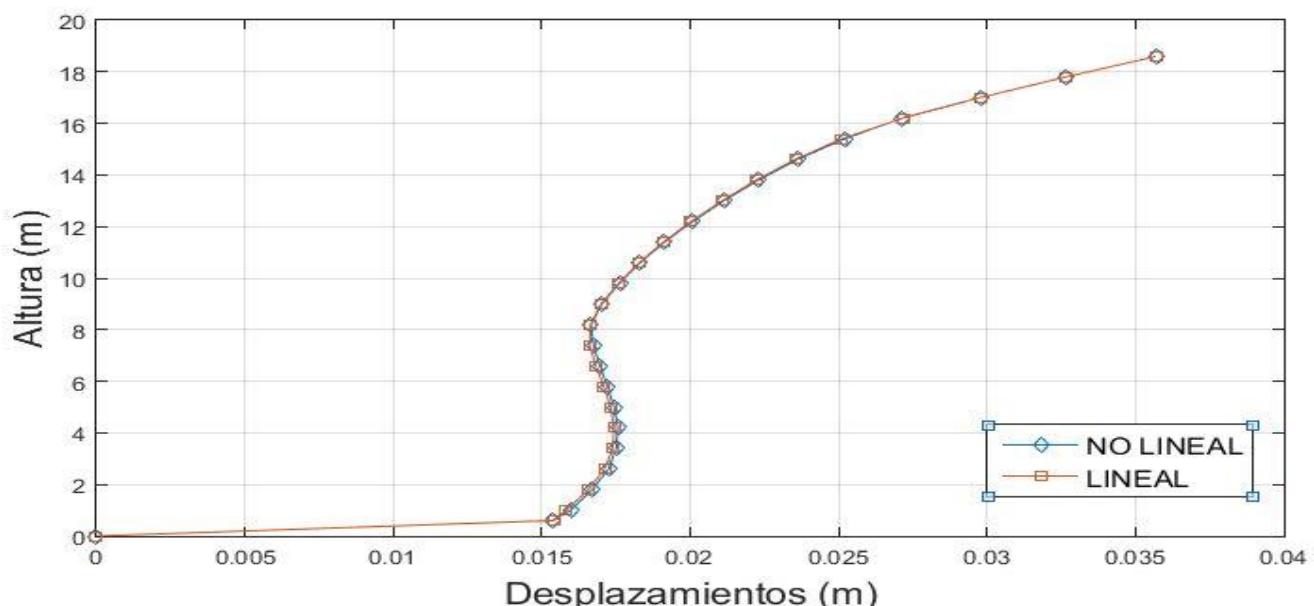
Se realizó el análisis lineal y no lineal de la torre atirantada. Los parámetros de comparación entre los dos métodos de análisis fueron: fuerza en los cables, reacciones en anclajes, fuerzas en los elementos del fuste (columnas, diagonales y tranques) y los desplazamientos en el fuste, analizados para tres direcciones de viento  $0^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $90^\circ$ . Las letras (A, B, C) representan los vértices de la torre (Figura 3).



**Fig.3** Esquema de direcciones de viento y nomenclatura de vértices

#### *Desplazamientos*

La dirección de viento para la cual se obtuvieron los mayores desplazamientos fue 90 grados (Figura 4), siendo el tope de la torre el punto donde se alcanzaron estos desplazamientos máximos. Los mayores desplazamientos fueron obtenidos con el análisis no lineal, con una diferencia de un 0,02% respecto a los obtenidos en el análisis lineal, como se observa, el incremento es poco significativo, esto es consecuencia directa de la poca altura de la torre y la incidencia de cargas de viento relativamente bajas.

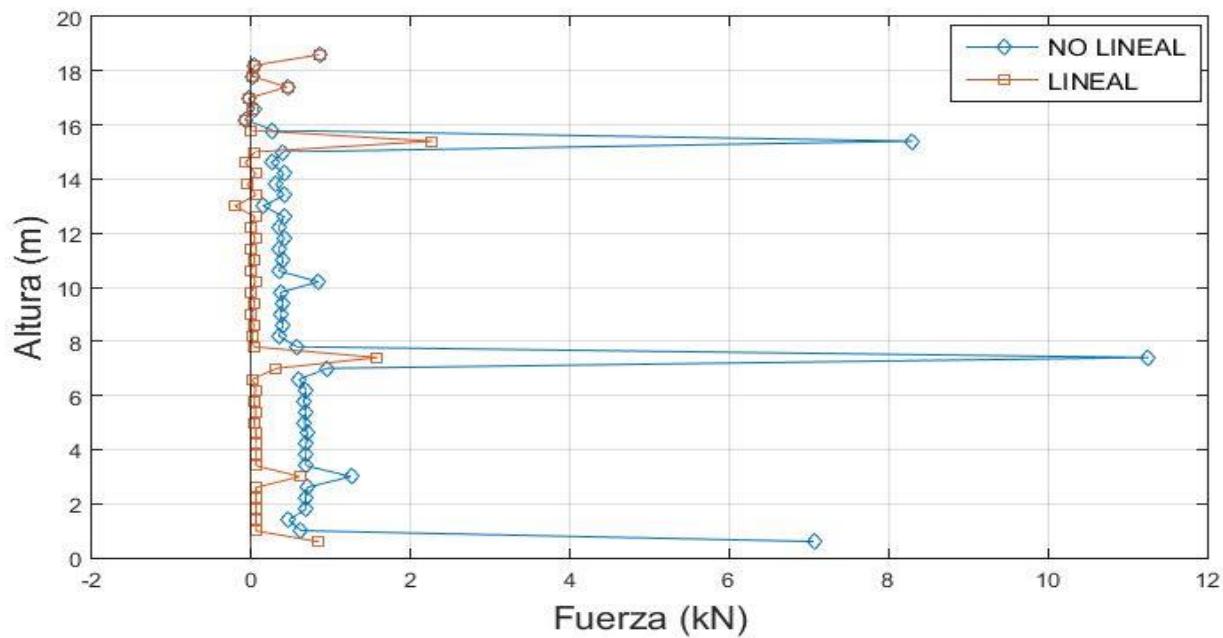


**Fig.4** Desplazamientos en la dirección del viento 90 grados en el tope de la torre para estado final de trabajo

#### *Tranques*

Los mayores valores de fuerza axial en los tranques se observaron en la cara AB. De las condiciones de viento analizadas, la correspondiente a 60 grados es la que arrojó los resultados más desfavorables. Los tranques bajo el análisis lineal se encuentran trabajando a valores bajos de compresión y tracción, y pasan a trabajar en tracción cuando se realiza el análisis no lineal. En los niveles donde llegan los cables al fuste se produce un salto en los valores de fuerza axial debido a la fuerza transmitida por estos (Figura 5), en el primer nivel de vientos la fuerza axial en el análisis no

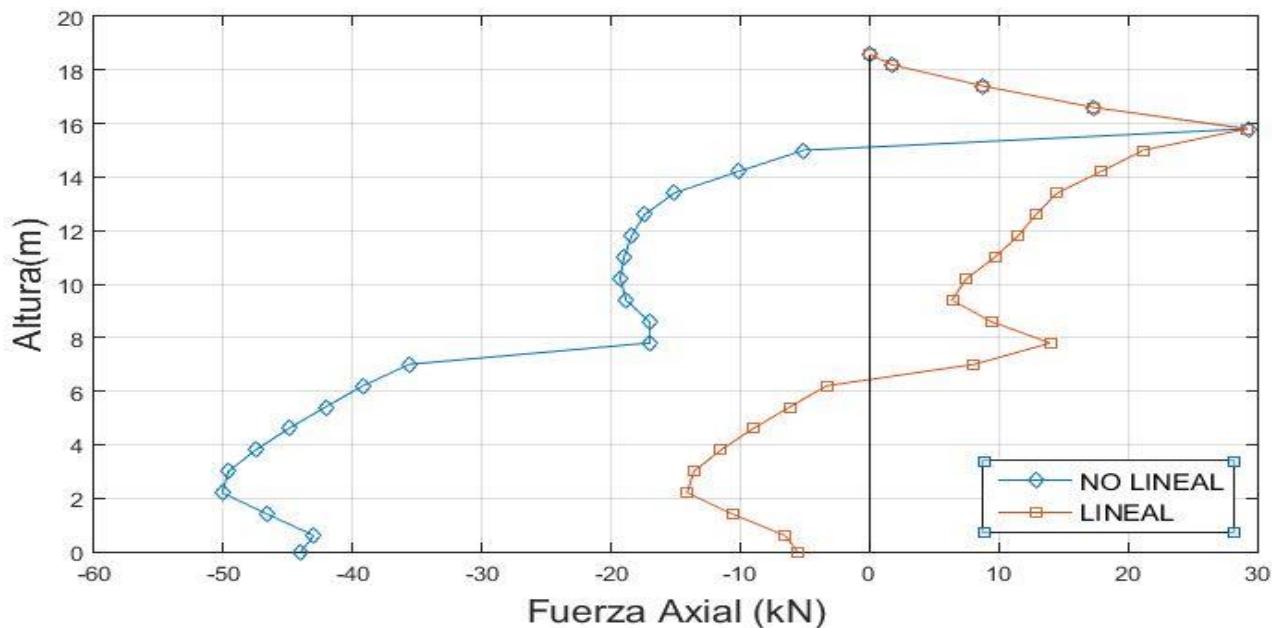
lineal es 7 veces mayor que en el análisis lineal y en el segundo nivel de viento la diferencia es de 4 veces, y al igual que en el primer nivel los mayores valores de carga axial se encuentran para el análisis no lineal.



**Fig.5** Fuerza axial en trajes de cara AB del fuste para dirección de viento 60 grados

### Columnas

De las condiciones de viento analizadas la correspondiente a sesenta grados es la que arroja los resultados más desfavorables para los elementos del fuste. La columna más comprimida resultó ser la del vértice C. Según el análisis lineal de la estructura, la columna se encuentra trabajando a tracción en los tramos intermedios entre niveles de cables. El análisis no lineal en cambio, arroja la mayor parte de los tramos de esta columna trabajando en compresión y con valores tres veces mayores que en el caso de análisis lineal. Se observa un acercamiento de los dos resultados en el último tramo de la torre, en donde los valores de fuerza axial obtenidos coinciden en signo y se acercan mucho en magnitud. En este tramo al estar sometido a compresión, aunque en una magnitud relativamente pequeña y existir una alta tensión en los cables del último y penúltimo nivel, el comportamiento predominante ante la carga lateral es de flexión (Figura 6). La Tabla 3 muestra el elemento más solicitado a tracción y a compresión para ambos análisis y los incrementos relativos.



**Fig.6** Fuerza axial en columna C a sotavento para dirección de viento 60 grados. (Combinación 1,2CP+1,4CV)

### Diagonales

Los mayores valores de fuerza axial en las diagonales se observan en la cara AB. De las condiciones de viento analizadas la correspondiente a 90 grados es la que arroja los resultados más desfavorables. La Tabla 2 resume los resultados obtenidos para ambos análisis. Se aprecia que no existen grandes incrementos entre un análisis y otro.

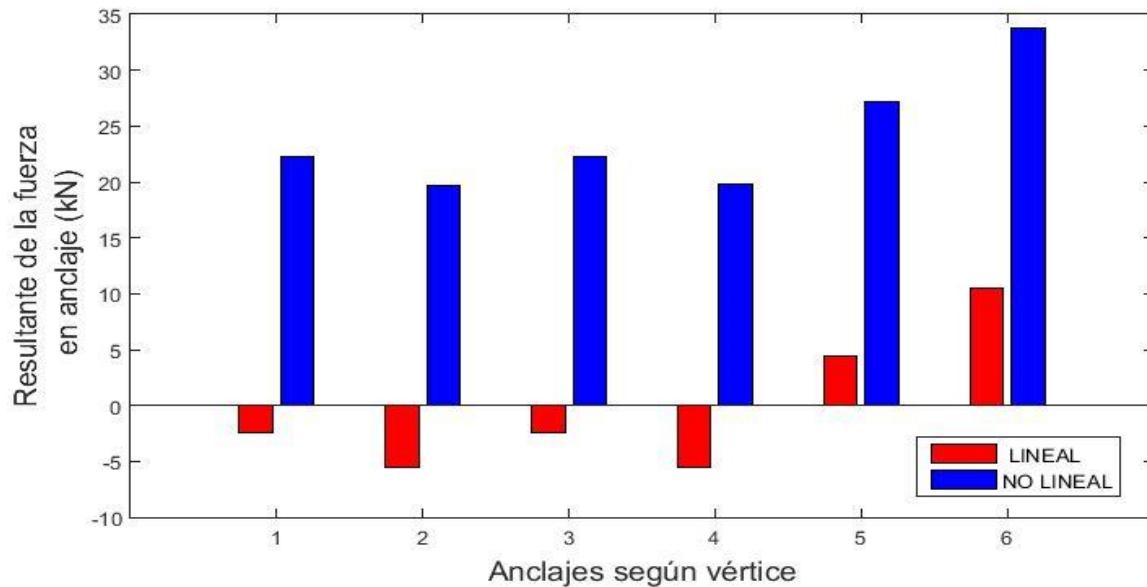
**Tabla 2.** Fuerza axial e incrementos relativos de fuerzas en diagonales

Diagonales AB	Análisis lineal	Análisis no lineal	Incrementos ANL/AL (%)
Máxima carga a tracción (kN)	4,29	4,31	0,47
Máximo carga a compresión (kN)	-4,28	-4,36	1,87

### Anclajes

Analizando las reacciones para las tres direcciones de viento principales, se observó que la condición más desfavorable se produjo, en los anclajes del vértice C para la dirección de viento de 60 grados. También señalar que en los anclajes de los vértices A y B en el análisis lineal se manifiestan valores de fuerza axial en compresión siendo un resultado ilógico pues los tensores sujetos a ellos

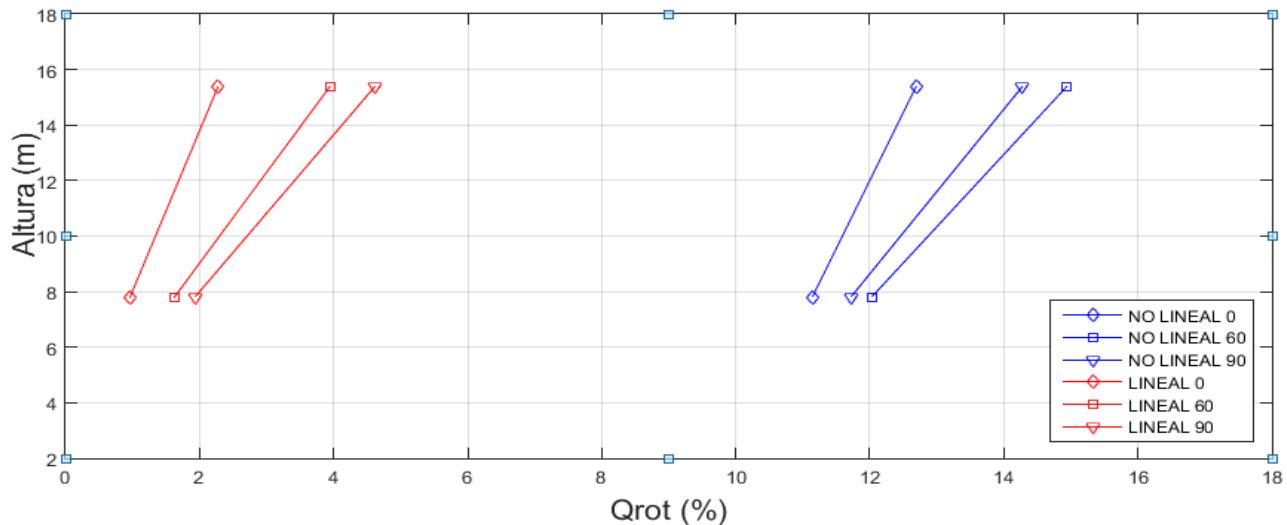
precisamente trabajan a tracción; lo descrito constituye un ejemplo de que el análisis lineal presenta limitaciones para realizar el correcto estudio de una torre atirantada (Figura 7).



**Fig.7** Reacción en los anclajes para el estado final de trabajo. (Combinación 0,9CP+1,4CV)

#### Cables

Para las tres direcciones de viento analizadas se tomaron las fuerzas interiores de los cables más solicitados y con ellos se realizó la comparación. El mayor valor de fuerza axial en los cables se observa en el vértice C. De las condiciones de viento analizadas la correspondiente a sesenta grados es la que arroja los resultados más desfavorables. La Figura 8 representa la fuerza axial en los cables de los distintos niveles de viento del vértice C para los dos análisis realizados, expresados en porcentaje de la carga de rotura, representando la carga máxima que es capaz de resistir el cable. Este valor se obtiene del producto entre el área de la sección transversal y la tensión de rotura del material del cable. Como se aprecia en la gráfica siguiente los porcentajes obtenidos con un análisis lineal resultan inferiores a los obtenidos en el análisis no lineal, por lo que con un análisis lineal se subestiman las cargas que actúan sobre la estructura resultando en un diseño erróneo.



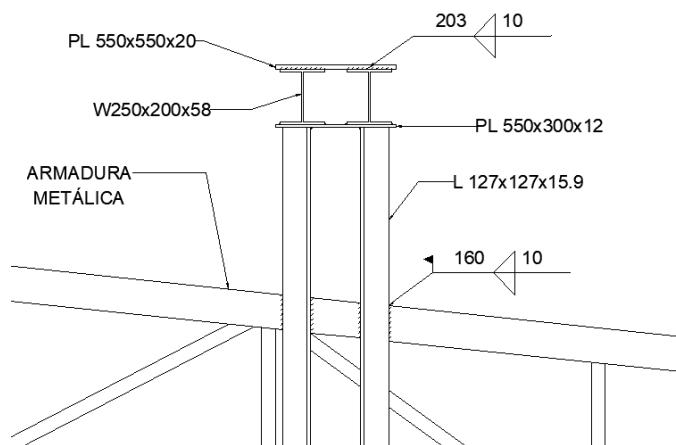
**Fig.8** Fuerza axial actuante en los cables

Los valores máximos para las reacciones tanto en la base de la torre como en los anclajes (Tabla 3) se obtuvieron con el análisis no lineal, por lo que el diseño de la solución de la base y los anclajes fue diseñado según las especificaciones del AISC [12] con estos resultados.

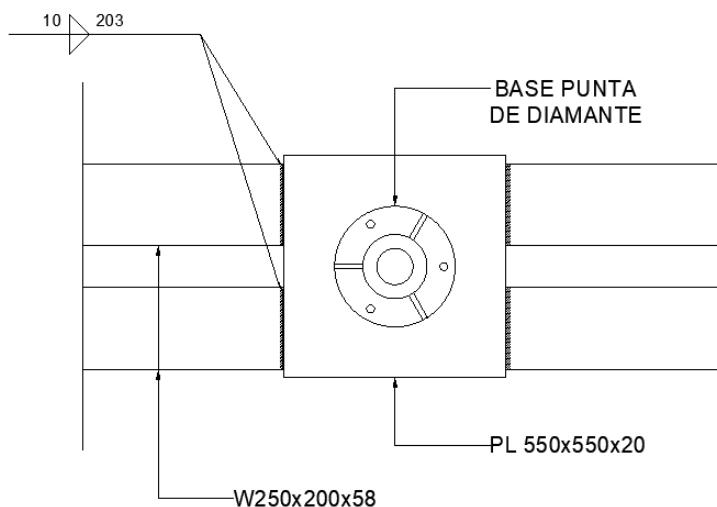
**Tabla 3. Reacciones obtenidas en la base del fuste y en los anclajes**

Posición de la reacción	Combinación de carga	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)
<b>Fuste</b>	1.2Cp+1.4Cv	0,326	0,594	119,604(compresión)
<b>Anclajes</b>	0,9Cp+1,4CV	0.25	33.13	46.81 (tracción)

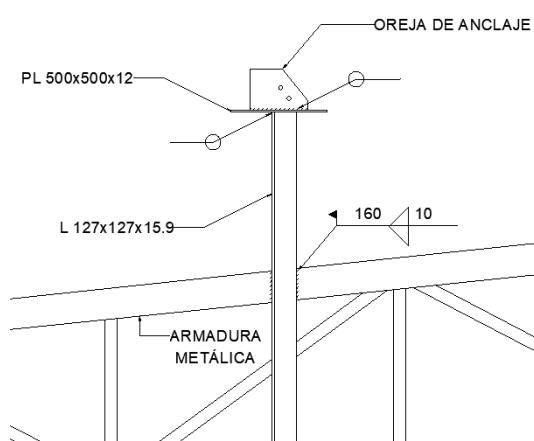
Se propone como solución para anclar la torre a la estructura principal de la nave una estructura de transición la cual estará compuesta de perfiles angulares que se soldarán a las armaduras penetrando el casetón de la cubierta. Estos a la vez tendrán una plancha soldada en el tope (Figura 9). El mástil se apoyará sobre una plancha metálica que será soldada sobre dos vigas, las cuales se apoyarán sobre la plancha que está encima de los perfiles angulares (Figura 10). Para los anclajes de los cables se empleará una solución similar se soldarán perfiles angulares a las armaduras y estos tendrán una plancha soldada en el tope y sobre esta la oreja (Figura 11).



**Fig.9** Estructura de transición del mástil



**Fig.10** Apoyo del mástil



**Fig.11** Anclaje de los cables

#### 4. Conclusiones

La comparación del análisis estructural de la torre, en condiciones de comportamiento lineal y no lineal de los cables bajo la acción de cargas extremas, evidencia que se subestima la respuesta que ofrece la estructura de no realizar un análisis no lineal geométrico, por lo que los estudios realizados para actualizar la norma cubana de viento agilizan y generaliza el correcto proceder para tomar el efecto del viento sobre las torres atirantadas. Las mayores diferencias en el modelo de comportamiento no lineal con relación al modelo de comportamiento lineal para la torre se encuentran en las columnas, los tranques y en los cables, mientras que los desplazamientos obtenidos en ambos análisis presentan poca diferencia reflejando que la mayor fuente de no linealidad es producto de los desplazamientos generales de la torre y no de las deformaciones de los miembros de la estructura. La propuesta de la estructura de transición para el apoyo del mástil y los anclajes, formada de acero A36 fue diseñada según las especificaciones del AISC para soportar todas las cargas a las que va a estar sometida la torre durante su vida útil y transmitirlas de manera efectiva a la estructura principal de la nave.

#### Referencias

1. Parnás, V.E., Fernández I., *No linealidad geométrica en torres atirantadas*. Revista Cubana de Ingeniería, 2011. **2**(3): p. 37-44.
2. Madugula, M.K., *Dynamic response of lattice towers and guyed masts*, 2001: ASCE Publications.
3. Shi, H., Salim H., *Geometric nonlinear static and dynamic analysis of guyed towers using fully nonlinear element formulations*. Engineering Structures, 2015. **99**: p. 492-501.
4. Normalización, O.N., *Edificaciones. Factores de Carga o ponderación-Combinaciones*. NC 450:2006, 2006. La Habana, Cuba.
5. Elena, V.B., Martín P., Luis K., *Análisis topológico de los cables en un modelo de torre atirantada*. Obras y proyectos, 2019: p. 65-73.
6. Fernández, I., *Comparación de métodos de análisis dinámico en una torre atirantada sometida a cargas de viento extremas en Cuba*. Revista de la Asociación Internacional de Conchas y Estructuras Espaciales, 2019. 60.
7. Luis, K., Parnás V.E., *Análisis estadístico de velocidades de viento para el cálculo de estructura*, 2017. Tesis de Maestría. Universidad Tecnológica de La Habana.
8. Ismail, A.M., Hassnien S.H., *Non-Linear Dynamic Analysis of Guyed Towers to Wind Loading*. IOSR J. Mech. Civ. Eng., 2018. **15**(1): p. 21-29.
9. Meshmesh, J.B., Hussam M., Kennedy K.S., *Static and dynamic analysis of guyed steel lattice towers*. Structural Engineering and Mechanics, 2019. **69**(5): p. 567-577.
10. Elena, B.C., *Comparación de métodos de análisis dinámico de torres atirantadas bajo cargas de viento extremo*, 2017. Universidad Tecnológica de la Habana.
11. Gerstoft, P. Davenport, A., *A simplified method for dynamic analysis of a guyed mast*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1986. **23**: p. 487-499.
12. AISC 360-10, *Steel Construction Manual*, 2011.