

EVALUACIÓN DE CAPACIDAD RESISTENTE DE TORRES RETICULADAS CON REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL BAJO CARGA DE VIENTO

Hasan Al-Qatami¹, Patricia Martín Rodríguez², Vivian Elena Parnás³.

¹Ingeniero civil, Embajada de Ecuador en Palestina, Palestina, hqutami@gmail.com

²Ingeniera civil, Doctora en ciencias técnicas Universidad Tecnológica de la Habana "José A. Echeverría", Facultad de Ingeniería Civil, Calle 114 #11901, e/ Rotonda y Ciclovía, Marianao La Habana Cuba, patriciamr@civil.cujae.edu.cu

³Ingeniera civil, Doctora en ciencias técnicas, Universidad Tecnológica de la Habana "José A. Echeverría", Facultad de Ingeniería Civil, Calle 114 #11901, e/ Rotonda y Ciclovía, Marianao La Habana Cuba, vivian@civil.cujae.edu.cu

RESUMEN

Las torres reticuladas de telecomunicaciones son estructuras altamente vulnerables a la acción del viento. Cada año se reportan numerosas pérdidas económicas debido al colapso de estas estructuras en territorios sometidos al paso de vientos huracanados. Por tal motivo se encaminan estudios dirigidos a mejorar los nuevos diseños y a mejorar la capacidad resistente de las estructuras existentes, mediante el reforzamiento de sus secciones. En este trabajo se expone el método aplicado para el estudio de reforzamiento de una torre de telecomunicaciones existente a partir del aumento de la sección de las columnas de la torre y del arriostramiento de elementos diagonales. En el estudio se empleó la modelación computacional mediante elementos finitos. Se determinó el incremento de la capacidad resistente en la torre a partir del refuerzo propuesto, lo cual permitió un aumento de la resistencia de la torre a velocidades superiores en un 50 por ciento de las que actualmente resiste.

Palabras claves: Cargas de viento, torres reticuladas, reforzamiento estructural.

EVALUATION OF THE RESISTANT CAPACITY OF LATTICE TOWERS WITH STRUCTURAL REINFORCEMENT UNDER WIND LOAD

ABSTRACT

Telecommunication latticed towers are structures highly sensitive to wind loads. Every hurricane season, great economic loss is reported from tower collapses under wind action. Several studies deal with the improvement of wind resistance design of this kind of constructions. One of the methods is to improve their capacity through the reinforcement of existent structures. The main objective of this work is to assess the increment resistance capacity of a latticed tower with the reinforcement of the leg members. A finite element model was performed to estimate the structural behavior of the reinforced tower and the mechanisms of load transmission. The increase in the resistance capacity in the tower was determined from the proposed reinforcement. Increase on resistance capacity is evaluated to be 50% of the original capacity.

Keywords: Wind load, lattice tower, structural reinforcement.

Nota Editorial: Recibido: enero 2021; Aceptado: marzo 2021

1. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de los servicios de las telecomunicaciones implica la instalación de nuevas antenas sobre las torres de telecomunicaciones. De acuerdo con estudios de fallas de torres bajo carga de viento extrema en Cuba se ha comprobado que los elementos columna están sometidos a grandes esfuerzos que no son resistidos por los diseños existentes. Además, se ha identificado que los elementos diagonales fallan fundamentalmente por pandeo debido al insuficiente arriostramiento. Esto ha motivado la necesidad del estudio de las técnicas de reforzamiento en las torres con el fin de aumentar su capacidad resistente frente a estas cargas.

El empleo de técnicas de reforzamiento en torres de celosía metálicas ha sido estudiado en la bibliografía internacional por diversos autores [1-6]. En la actualidad existen dos métodos de refuerzo empleados en la práctica a pesar de la carencia de estudios que respaldan su eficiencia. El primero se denomina refuerzo mediante un sistema de arriostramiento y el segundo refuerzo mediante aumento de la sección transversal del elemento.

El primer método consiste en introducir elementos nuevos elementos horizontales en forma de arriostres a la mitad de la longitud de pandeo para aumentar la capacidad del elemento, este método ha obtenido los mejores resultados aplicándose a elementos que originalmente tenían esbelteces mayores que 100 [6], lo cual ocurre principalmente con las diagonales y los tranques.

Un estudio experimental realizado por F. Albermani, M. Mahendran y S. Kitipornchai [1], en el cual fue investigado el incremento de la capacidad resistente de las diagonales de una torre de telecomunicación de 105 m de altura, mediante la introducción de una serie de arriostres en forma de diafragma a mitad de la longitud de pandeo concluyeron que un sistema de arriostres se puede usar de manera muy eficiente para aumentar la capacidad de las diagonales de una torre de celosía, los incrementos obtenidos en cuanto a la carga última de pandeo oscilaban entre 156 y 289% en dependencia del arreglo del diafragma.

Un estudio realizado por Zhuge Y, Mills J y Ma X. [6], investigó la capacidad resistente de columnas conformadas por perfiles angulares reforzadas mediante aumento de la sección transversal para tres arreglos de conexiones denominados: alineado, alternado y cruciforme. Un ensayo de capacidad de carga fue realizado con los tres arreglos para determinar el más eficiente. En el experimento la esbeltez del elemento original se mantuvo constante con valor igual a 80, mientras las variantes eran: el arreglo de los conectores y la pretensión de los pernos. Los resultados de las pruebas experimentales indicaron que, entre las tres conexiones tipos examinados para las juntas intermedias, el tipo cruciforme proporcionó el mayor aumento de la resistencia.

Con el objetivo de estudiar la eficiencia de este método de refuerzo en la práctica, otra investigación fue llevada a cabo por los mismos ingenieros [2], en la cual se enfocó en determinar si el refuerzo es inmediatamente efectivo o será necesario extenderlo más allá del punto crítico. Estos investigadores además estudiaron qué efecto tiene el desplazamiento en las conexiones sobre los resultados y cómo afecta la precarga de los elementos originales, ya que el refuerzo se realiza sobre la torre en sus condiciones de trabajo cuando sus elementos ya están cargados por el peso propio de la torre y las antenas. Para lograr el objetivo de esa investigación, realizaron una serie de ensayos sobre una torre de 7,3m de altura de sección triangular. Los resultados muestran que las cargas axiales se pueden transferir de manera efectiva entre los miembros originales de la torre y los miembros de refuerzo a través del sistema de empalme atornillado. La precarga reduce la carga compartida en los miembros de refuerzo en la etapa inicial de carga, pero no tiene una influencia significativa en la resistencia final de toda la estructura.

En este trabajo se expone el estudio de reforzamiento de una torre de telecomunicaciones existente. Para el estudio se empleó la modelación computacional mediante elementos finitos utilizando los programas SAP-2000 y Abaqus. El reforzamiento propuesto se realizó a partir del aumento de la sección transversal de las columnas usando el tipo cruciforme y mediante el arriostramiento de las diagonales.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

La torre seleccionada para la investigación es la torre autosoportada soporte de antenas modelo Najasa, de diseño y fabricación nacional. La torre es de sección transversal cuadrada de dimensiones variables con la altura (tronco piramidal) desde su base de 6x6m y hasta los 45m de altura, donde la sección es de 1.17 x 1.17m y se mantiene constante hasta los 60m de altura (torreta), a partir de donde se coloca un mástil soporte. Ver figuras 1 y 2.



Figura 1: Vista general del modelo Najasa.

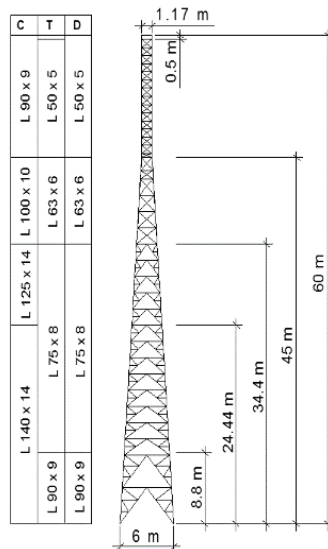


Figura 2: Dimensiones geométricas (modelo Najasa).

La estructura en su totalidad se consideró como una armadura espacial, empotrada en la base y trabajando como una viga en voladizo. Los elementos fueron considerados como barras (elementos lineales con nudos en sus extremos). La torre en su conjunto se consideró para la modelación con seis grados de libertad. Las columnas se consideraron continuas en toda su longitud desde la base y hasta el final de la torreta ($h=60\text{m}$), con uniones a tope con doble plancha de 12 y 16 pernos. Las columnas se encuentran arriostradas por los tranques los cuales disminuyen la longitud de pandeo del elemento y rigidizan la estructura. Las diagonales principales y secundarias, tranques principales e interiores y los tranques en diagonales se consideraron articuladas en sus extremos. Los elementos de la torre están conformados por perfiles laminados en caliente de acero de calidad A-36, (tensión de fluencia $F_y= 250\text{ MPa}$, tensión de rotura $F_u= 400\text{ MPa}$), sus propiedades se consideraron linealmente elásticas y constantes en el tiempo.

La distribución de antenas considerada para el análisis y la revisión estructural de la torre se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Distribución de las antenas sobre la torre.

Tipo de antena	Ubicación sobre la torre	Cantidad	Altura en la torre (m)
UHF	Mástil	12 paneles en 3 pisos	61, 62 y 63
VHF	Torreta	8 paneles en 2 pisos	54,5 y 57,5
Parábolas	Tramo troncopiramidal	6	4,5 - 12,5 - 18,5 - 24,5 - 30,5 y 34,5

La revisión estructural de la torre modelo Najasa fue realizada utilizando como herramienta el programa SAP2000 V14 con el objetivo de determinar los elementos en fallo mediante la relación demanda/capacidad y determinar la velocidad de viento con la cual ocurre la falla.

La modelación fue realizada para condiciones ideales, es decir, no se consideró en las secciones de la estructura el efecto del deterioro de los elementos por corrosión, como tampoco se tomó en cuenta el deterioro de las uniones que puede estar presente en las torres modelo Najasa existentes.

Para el cálculo de las torres de celosía se consideraron como cargas permanentes el peso propio de los elementos estructurales y el peso propio de las antenas. El peso de las antenas UHF y VHF se obtuvo del catálogo de la empresa RYMSA [7] y el peso de las parábolas del catálogo de la empresa RFS [8]. La carga de viento sobre la estructura fue calculada según las especificaciones de la norma cubana de viento NC:285-2003 [9] para reticulados espaciales aplicando el valor de viento extremo. La carga de viento se calculó por tramos, y se aplicó en los nodos de la unión entre tranque y columnas como carga concentrada. Las direcciones de viento analizadas fueron 0° y 45° . Ver Figura 3.

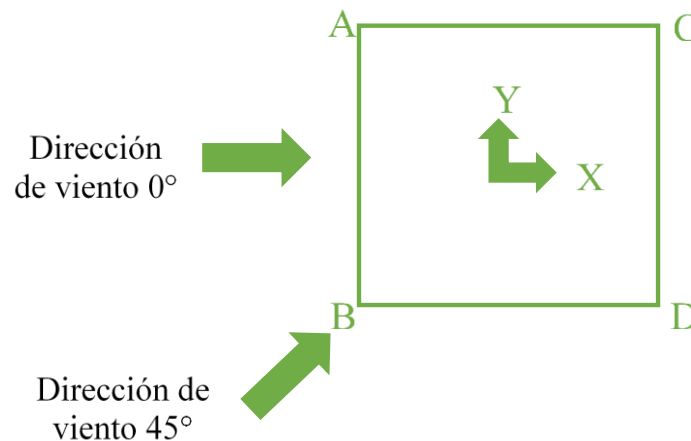


Figura 3: Vértices y direcciones de viento tomadas en cuenta en el análisis.

Las consideraciones para el cálculo de la carga de viento por la NC 285:2003 fueron la torre ubicada en la zona oriental del país (Zona III) $q_{10} = 0,9 \text{ kN/m}^2$, sitio expuesto, terreno tipo A, período de recurrencia de 50 años. Para el coeficiente de forma (C_f) fueron utilizados los valores obtenidos en los ensayos experimentales en túnel de viento [10].

En la revisión estructural de la torre se detectaron varios elementos en fallo, tanto en compresión como en tracción para las dos direcciones de viento analizadas. Se encontraron 21 elementos en fallo para la dirección 0° y 54 elementos en fallo para la dirección 45° , con predominio de fallo de elementos columna en compresión en ambas direcciones. La dirección de viento de 45° fue la más crítica para las columnas, tanto en compresión como en tracción. Las columnas fallan con relaciones de demanda/capacidad de hasta 4,66 en compresión y 1,9 en tracción.

Estudio de falla mediante la modelación

Con el objetivo de analizar el mecanismo de falla y determinar la velocidad de viento para la cual ocurre el fallo, se aplicó la carga de viento de manera gradual con incrementos del 10% hasta aplicar el 100% de la carga. Las Tablas 2 y 3 muestran la secuencia de fallas en las columnas al incrementar la carga del viento en las dos direcciones de viento analizadas.

Tabla 2: Secuencia de fallas en las columnas para la dirección de viento 0° .

% Carga de viento	Columnas en falla	
	Dirección de viento 0°	
	Compresión	
	Sección	Altura (m)
60	100x10	34,40 – 40,38
70	140x14	0,00 – 4,49
	100x10	40,38 – 42,38
80	140x14	4,49 – 8,48
	100x10	43,38 – 45,00
90	140x14	8,48 – 12,46
	100x10	43,38 – 45,00
	90x9	45,00 – 46,50

Tabla 3: Secuencia de fallas en las columnas para la dirección de viento 45°.

% Carga de viento	Columnas en falla Dirección de viento 45°			
	Compresión		Tracción	
	Sección	Altura (m)	Sección	Altura (m)
30	-	-	-	-
40	100x10	34.40 – 38.39	-	-
50	140x14	0.00 – 8.48	-	-
	100x10	38.39 – 42.38		
60	140x14	8.48 – 14.46	140x14	0.00 – 8.48
	100x10	43.38 – 45.00		
	90x9	45.50 – 45.50		
70	140x14	14.46 – 22.44	140x14	8.48 – 12.46
	125x14	22.44 – 32.41		
	100x10	42.38 – 43.38	90x9	45.00 – 45.50
	90x9	45.50 – 47.50		
80	125x14	32.41 – 34.40	140x14	12.46 – 22.44
			125x14	22.46 – 32.41
	90x9	47.50 – 48.50	100x10	34.40 – 43.38
			90x9	45.50 – 46.50
90	90x9	48.50 – 49.50	125x14	32.41 – 34.40

Se pudo observar que, para las dos direcciones de viento, los primeros elementos en fallar son las columnas de 100x10, lo cual ocurrió al aplicar el 40% y 60 % de la carga de viento en las direcciones de 45° y 0° respectivamente. La velocidad de viento correspondiente al 40 % de la carga de acuerdo a la norma cubana es de 86,4 km/h promedio en 10 minutos lo que representa el 63,2% de la velocidad normativa.

Refuerzo mediante el aumento de la sección transversal

Para las dos direcciones de viento analizadas los primeros elementos en fallar están sometidos a compresión, por lo que el análisis se enfoca en el incremento de la capacidad resistente a compresión de los elementos columna mediante refuerzo. El método empleado fue introducir un perfil de igual sección transversal paralelo al elemento que se requiere reforzar y unirlos mediante conectores de igual sección transversal [6]. Ver Figura 4a y 4b.

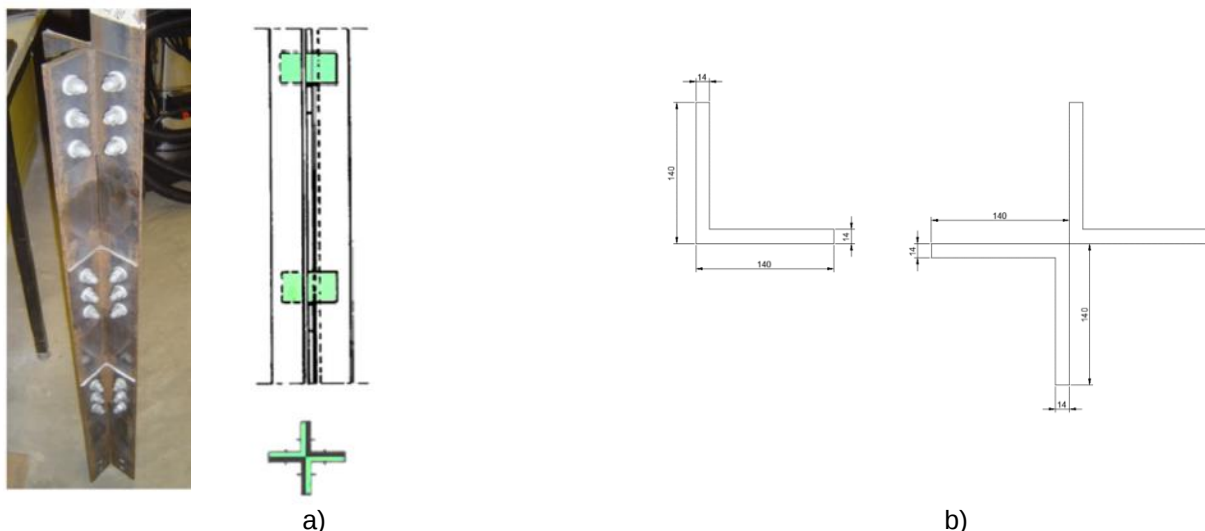


Figura 4: a) Colocación del refuerzo, b) Sección simple y Sección reforzada

Con el fin de investigar el incremento debido al refuerzo se desarrolló un modelo de elementos finitos sólido tridimensional utilizando elementos continuos en el programa Abaqus, en el cual se puede considerar tanto el efecto de los conectores como el efecto de la excentricidad de la aplicación de carga. Se dividió el modelo de la torre en cinco tramos tridimensionales teniendo en cuenta los cambios de la configuración de la torre y de

la sección de las columnas. Ver Figura 5 (a-e).

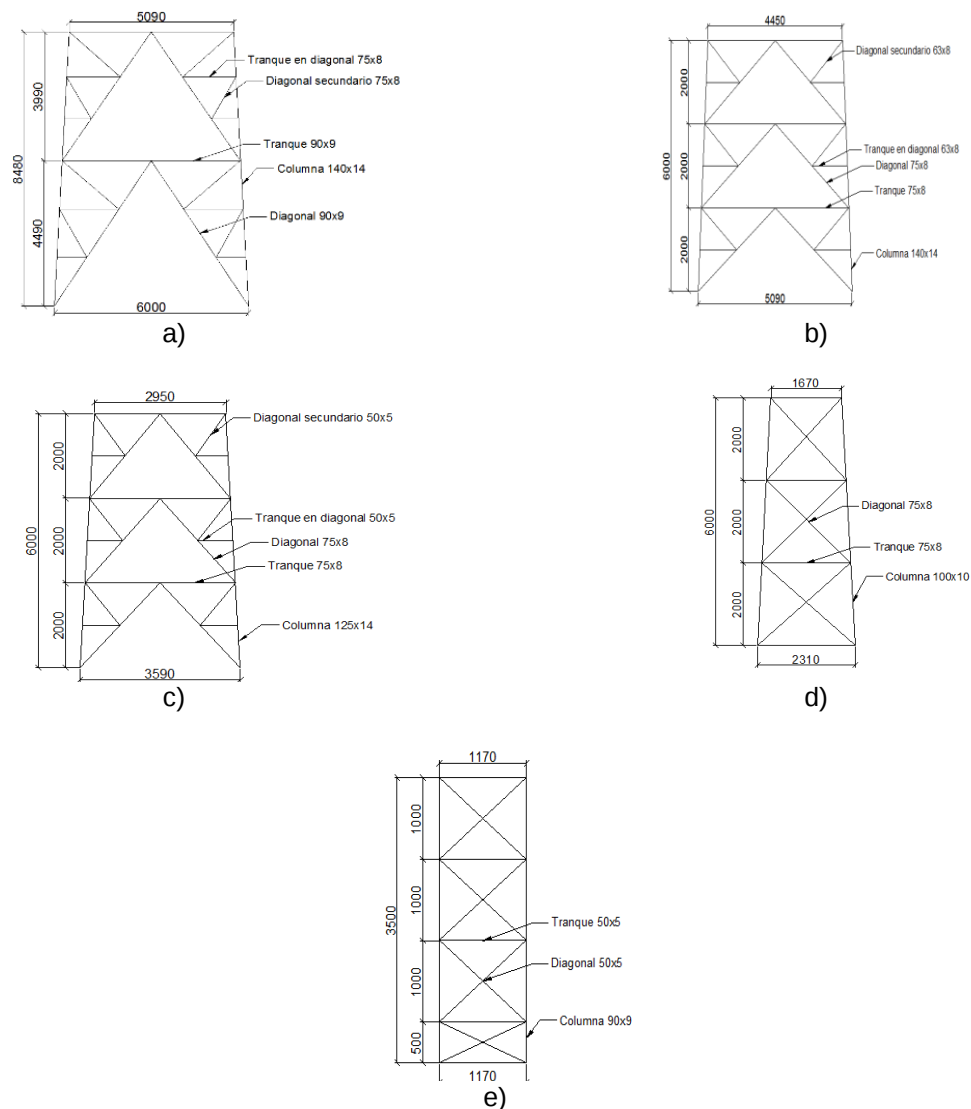


Figura 5: a) Tramo 1, b) Tramo 2, c) Tramo 3, d) Tramo 4, e) Tramo 5 de la torre.

En todos los tramos, el refuerzo se simuló mediante la adición de un perfil de la misma sección transversal que la columna reforzada, adosado a esta mediante planchas de conexión. La conexión se realizó mediante conectores de tipo cruciforme suponiendo la condición ideal de que la carga se distribuye de manera equivalente entre la columna y el refuerzo.

El material se consideró con propiedades elásticas y plásticas no lineal para poder determinar la carga bajo la cual el material fluye (entra el régimen no lineal), pues esta será la P_n de la columna. Las columnas fueron cargadas axialmente a compresión por una carga concentrada en el centroide de la sección transversal.

Para la modelación de los tramos de la torre en el programa Abaqus/CAE fue necesario definir diferentes parámetros relacionados con la modelación de la geometría, las interacciones entre los elementos, el mallado del modelo y la modelación de las cargas. Cada tramo modelado fue sometido al análisis sin refuerzo y luego con refuerzo para determinar el incremento en la capacidad resistente a compresión que provoca la colocación del refuerzo, dicho incremento fue determinado a partir de los gráficos de carga-desplazamiento obtenidos de cada corrida de análisis.

Refuerzo por arriostramiento

Además del sistema de refuerzo con doble columna se colocó un sistema de arriostramiento adicional para diagonales de sección angular 90x9 mm y para las columnas de sección angular 100x10 mm ya que la esbeltez de dichos elementos provoca el fallo por pandeo y no permite desarrollar la capacidad resistente

necesaria.

Este refuerzo fue aplicado en las diagonales de sección 90x9 mm que se encuentran en los primeros dos tramos mediante la introducción de un tranque espacial entre dos diagonales en caras diferentes de la torre, para arriostrarlas en el otro plano de pandeo y así reducir la relación de esbeltez. El refuerzo fue aplicado utilizando perfiles angulares de alas iguales de 50x5 mm. Ver Figura 6. Para el caso de las columnas, estas fueron arriostradas a la mitad de la longitud libre de pandeo en dos planos. Ver Figura 7.

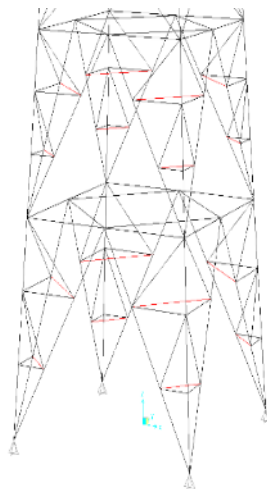


Figura 6: Refuerzo de diagonales mediante sistema de arriostramiento (líneas en rojo).

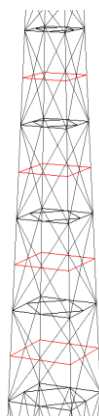


Figura 7: Refuerzo de columnas mediante sistema de arriostramiento (líneas en rojo).

Para las columnas de 100x10 mm que fallaban por pandeo en el tramo 4, el refuerzo mediante un sistema de arriostramiento no provocó incremento en la capacidad resistente para resistir las solicitaciones a las cuales están sometidas. Por lo cual se consideró necesario aplicar los dos métodos de refuerzo en esta parte de la torre.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

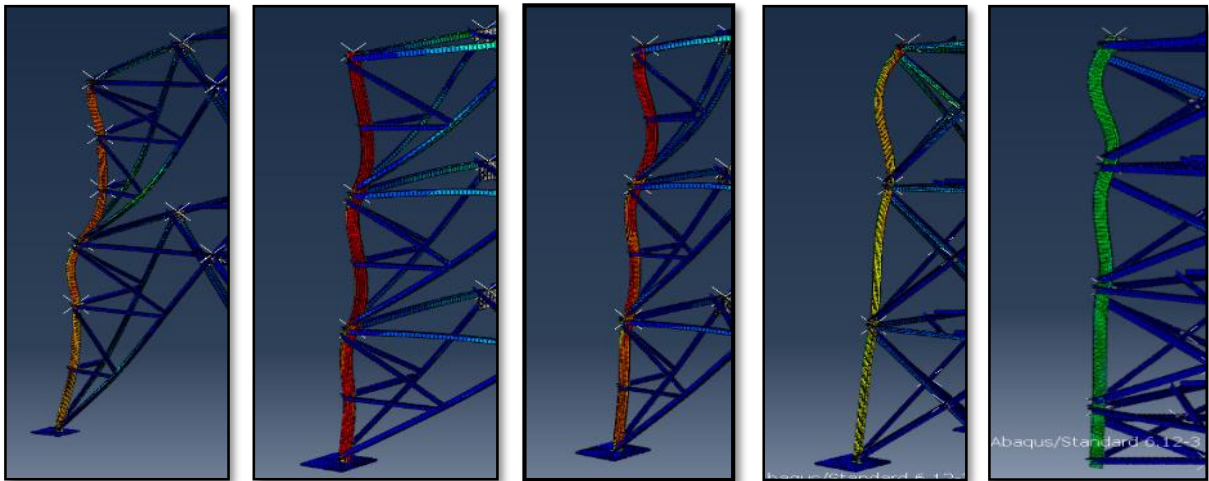
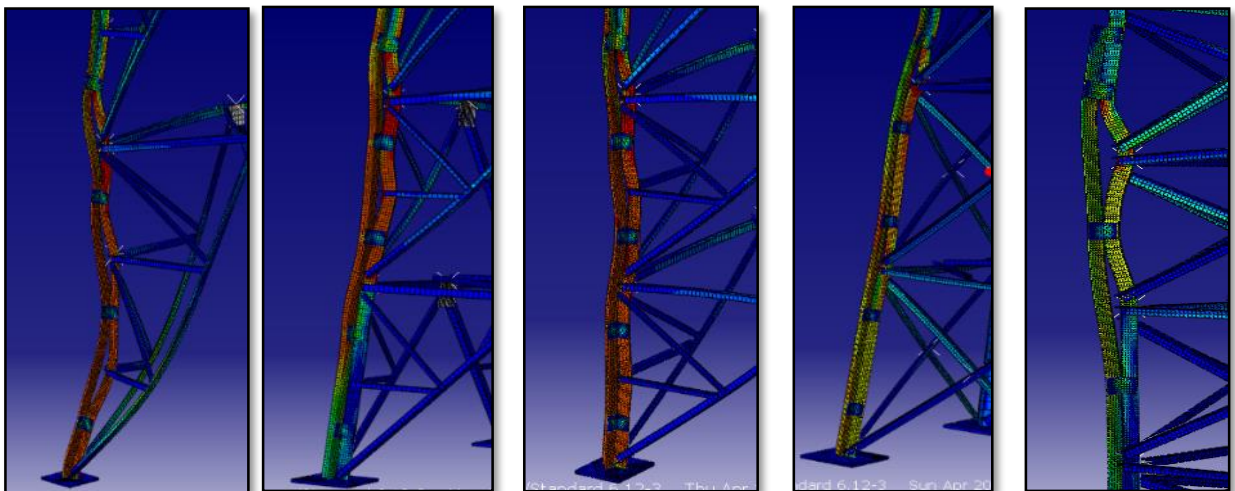
Cada modelo fue sometido al análisis sin refuerzo y luego con refuerzo por aumento de sección para determinar el incremento en la capacidad resistente a compresión que provoca la colocación del refuerzo.

En la tabla 4 se resumen los valores de capacidad de carga de las columnas en los tramos, obtenidos con y sin refuerzo. Se observa que las cargas últimas obtenidas para los tramos con refuerzo se incrementaron en un rango de 78 % a 94,6 % con relación a los tramos sin refuerzo. Además, se puede observar que mientras mayor es la esbeltez de las columnas, menor es el incremento logrado en la capacidad a compresión debido al refuerzo.

Tabla 4: Resumen de los resultados de la modelación.

Modelo	Esbeltez sin refuerzo	ϕP_n (kN)	% Incremento Modelación
Modelo 1 Sin Refuerzo	53,57	784	83,39%
Modelo 1 Con Refuerzo		1470	
Modelo 2 Sin Refuerzo	35,71	783	94,57%
Modelo 2 Con Refuerzo		1520	
Modelo 3 Sin Refuerzo	40	685	91,18%
Modelo 3 Con Refuerzo		1310	
Modelo 4 Sin Refuerzo	100	290	77,98%
Modelo 4 Con Refuerzo		519	
Modelo 5 Sin Refuerzo	55,55	313	83,65%
Modelo 5 Con Refuerzo		575	

Las Figuras 8 y 9 muestran los modos de falla de los modelos generados sin refuerzo y con refuerzo en columnas respectivamente.

**Figura 8:** Modos de falla de los tramos sin refuerzo de 1 al 5, de izquierda a derecha.**Figura 9:** Modos de falla de los tramos con refuerzo del 1 al 5, de izquierda a derecha.

Para determinar el incremento en la capacidad resistente de las columnas donde fueron aplicados los dos métodos de refuerzo, el modelo numérico fue modificado para incluir el refuerzo mediante un sistema de arriostramiento, además del refuerzo mediante aumento del área de la sección transversal de la columna. Ver Figura 10.

Se obtuvo como resultado, un incremento del 109,24% en la capacidad a compresión de la columna del tramo 4 modificado cuando se aplican los dos métodos de refuerzo.

Después de aplicado el método de refuerzo mediante arriostramiento se procedió a la aplicación de refuerzo mediante el aumento del área de la sección transversal para los elementos que fallaban por sobre carga a compresión y a tracción.

En la revisión de la torre mediante la modelación en el programa SAP 2000 se impuso el valor de la resistencia nominal de los elementos columna, para todos los tramos reforzados. Este valor fue tomado como la suma de la P_n del elemento calculada sin refuerzo, y el incremento debido al refuerzo obtenido de la modelación de los tramos en Abaqus/CAE como se muestra en la siguiente expresión:

$$P_n (\text{reforzada}) = P_n (\text{calculada sin refuerzo}) * (1 + \% \text{Incremento}) \quad (1)$$

La revisión estructural de la torre con las columnas reforzadas y los arriostres colocados fue realizada de manera análoga a la revisión sin refuerzo, aplicando la carga de viento de manera gradual para determinar el momento en el que ocurre la falla, y así determinar el incremento de la velocidad de viento que resiste la torre para las dos direcciones principales de viento debido a ambos tipos de refuerzo.

Para la dirección de viento de 0° las columnas de la torre resisten el 100% de la carga de viento logrando satisfacer las condiciones de la norma cubana de viento. Sin embargo para la dirección de viento de 45° la falla de la torre reforzada ocurre al aplicar el 90% de la carga de viento. Si se tiene en cuenta el resultado obtenido sin refuerzo de la torre cuando la falla ocurre para el 40 % de la carga normativa se puede afirmar que la torre en estudio mejorará considerablemente su capacidad frente a la carga de viento aun cuando no cumpla los requerimientos normativos. Para el 90% de la carga de viento la velocidad del viento es de 126 Km/h promedio en 10 minutos.

Las columnas de la torre que siguen en falla después de la colocación del refuerzo para el total de la carga de viento según la norma cubana en la dirección de 45° se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Columnas en falla para el 100% de la carga de viento en la dirección de 45° .

Sección	Cantidad de tramos en fallo	Altura	Causa	Relación D/C
140x14	2 tramos	0 – 4,49m	Compresión	1,33
		4,49 – 8,48m	Compresión	1,20
100x10	2 tramos	34,40 – 36,40	Compresión	1,07
		36,40 – 38,39m	Compresión	1,03

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se estudió el aumento de la capacidad resistente de una torre reticulada mediante reforzamiento. Dos tipos de reforzamiento fueron utilizados, mediante arriostres que reducen la esbeltez y mediante el aumento de sección transversal. La modelación numérica de la propuesta del refuerzo arrojó que el refuerzo mediante el aumento del área de la sección transversal incrementa la resistencia a compresión de las columnas en un 78 – 95 % para esbelteces de la columna entre 35 y 100. El refuerzo mediante arriostre aumentó la capacidad resistente de las columnas en uno solo de los tramos y su valor alcanzó el 109 % de la capacidad sin arriostre.

La aplicación de ambos refuerzos en la torre logró un incremento de la capacidad resistente de la torre para la dirección de viento de 0° que satisfacen los valores de velocidad de viento de la norma cubana. Para la dirección de viento de 45° no se alcanzaron los mismos resultados y la falla de la torre reforzada ocurre al aplicar el 90% de la carga de viento normativa.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Albermani, F., M. Mahendran, and S. Kitipornchai, Upgrading of transmission towers using a diaphragm bracing system. *Engineering Structures*, 2004. 26(6): p. 735-744.
- [2] Mills, J.E., X. Ma, and Y. Zhuge, Experimental study on multi-panel retrofitted steel transmission towers. *Journal of Constructional Steel Research*, 2012. 78: p. 58-67.
- [3] Szafran, J., K. Juszczak, and M. Kamiński. Reinforcements of tower structures: effective and economic design engineering. in *LIGHTWEIGHT STRUCTURES in CIVIL ENGINEERING 2018*. Łódź: International Association for Shell and Spatial Structures.
- [4] Winkelmann, K. and S. Duch. Basic sensitivity analysis of a telecommunication tower complementing standard reinforcement design process. in *AIP Conference Proceedings* 2019.
- [5] Xie, Q. and J. Zhang, Experimental study on failure modes and retrofitting method of latticed transmission tower. *Engineering Structures*, 2021. 226(111365).
- [6] Zhuge, Y., J.E. Mills, and X. Ma, Modelling of steel lattice tower angle legs reinforced for increased load capacity. *Engineering Structures*, 2012. 43: p. 160-168.
- [7] RYMSA. Catálogos de Antenas RYMSA, edición 8. [cited 2016; www.rymsa.com].
- [8] RFS. Catálogo RFS (AWS Microwave, Antenna System). [cited 2016; www.rfsworld.com].
- [9] NC-285, Carga de viento. Método de cálculo. 2003, Oficina Nacional de Normalización (NC): Cuba.
- [10] Martín, P., Elena Parnás, V. B., Loredó Souza, A. M. & Camaño Schettini, E. B. 2016. Experimental study of the effects of dish antennas on the wind loading of telecommunication towers. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* , 149, 40-47.