

Proposal for Structural Improvement of 9m+3m Braced Telecommunications Tower

Huancapaza-Huacaychuco Josthin Enrique , Silva-Acosta Angel Jhonatan ², Coro-Salinas David Dionicio ³
^{1,2,3}Universidad Privada del Norte, Perú, N00221647@upn.pe, N00193384@upn.pe, david.coro@upn.edu.pe

Abstract— The present research proposes an improvement to the usual design of a braced tower according to the standards used in Latin America. When carrying out structural reinforcement work on a tower, a structural failure was detected with successive antenna falls and loss in the transmission signal, revealing a notable deficiency in the mast coupling area. However, to carry out structural evaluations, the IDEA StatiCa and Sap2000 software were used, three additional areas with possible failures were also identified, attributed to the inadequate application in 3 types of connections: Union of the base, union between the sections at 3 meters and in the bracing of the tower. In the mentioned areas, they were evaluated with the failure criterion of the Von Mises stress analysis with steel creep of 2277.00 kg/cm², this being the maximum parameter that can be reached with the ASTM A-36 and A-53 material. The existing tower has the shape of an equilateral triangle where it shows hidden defects, thus proposing a circular design, using the ANSI TIA 222-H standard. The results in the union of the triangular base, union between sections at 3 meters and in the bracing of the tower, do not meet the Von Mises failure criterion, thus surprising in surpassing this. In conclusion, the proposed elements present a correct design in the connections in the braced towers, presenting reliability in their future manufacturing.

Keywords— Structural Strengthening, Von Mises, Steel Creep, braced tower.

Propuesta de Mejoramiento Estructural de una Torre Arriostrada de Telecomunicaciones de 9m+3m

Huancapaza-Huacaychuco Josthin Enrique¹, Silva-Acosta Angel Jhonatan², Coro-Salinas David Dionicio³

^{1,2,3}Universidad Privada del Norte, Perú, N00221647@upn.pe, N00193384@upn.pe, david.coro@upn.pe

Resumen— La presente investigación propone un mejoramiento al diseño usual de una torre arriostrada según los estándares usados en Latinoamérica. Al realizar un trabajo de reforzamiento estructural en una torre, se detectó una falla estructural con sucesiva de caídas de antenas y pérdida en la señal de transmisión, revelando una deficiencia notable en la zona de acoplamiento del mástil. No obstante, para la realización de evaluaciones estructurales se utilizaron los softwares IDEA StatiCa y Sap2000, se identificaron además tres áreas adicionales con posibles fallas, atribuidos a la aplicación inadecuada en 3 tipos de conexiones: Unión de la base, unión entre los tramos a 3 metros y en el arriostre de la torre. En las zonas mencionadas, fueron evaluadas con el criterio de rotura del análisis de los esfuerzos de Von Mises con fluencia del acero de 2277.00 kg/cm², siendo ésta el parámetro máximo que se puede llegar con el material ASTM A-36 y A-53. La torre existente tiene forma de triángulo equilátero donde manifiesta vicios ocultos, proponiendo sucesivamente una conexión bridada entre tramos, utilizando la normativa ANSI TIA 222-H. Los resultados en la unión de la base triangular, unión entre tramos a 3 metros y en el arriostre de la torre, no cumple con el criterio de rotura de Von Mises, sorprendiendo así en la superación de esta. En conclusión, las mejoras propuestas presentan un correcto diseño de las conexiones de las torres arriostradas, presentando mayor resistencia en las zonas de transición como las conexiones.

Palabras clave—Reforzamiento Estructural, Von Mises, Fluencia del acero, torre arriostrada.

I. INTRODUCCIÓN

En Latinoamérica las torres arriostradas tienen principalmente secciones de forma triangular en su gran mayoría. Sin embargo, se han presenciado caídas de las torres generadas por fenómenos naturales, dejando así incomunicadas a las poblaciones. La falta de comunicación en un desastre suele originar la muerte de cientos de personas que se encuentran con vida después del suceso [1].

En la actualidad, las torres están diseñadas para contener accesorios de telecomunicaciones para las necesidades iniciales de la población; no obstante, con el transcurso del tiempo, estas necesidades incrementan y se ven obligadas a ampliar su cobertura con dispositivos nuevos, sin tener control sobre la capacidad de la estructura existente [2].

En el Perú experimenta con mayor recurrencia los efectos del cambio climático, y vientos de gran magnitud con mayor frecuencia, generando daños en las estructuras de telecomunicaciones e incluso en la torre misma. Además, riesgos sísmicos y en su mayoría de diseños de torres no es considerada este tipo de fuerzas por ser estructuras livianas [3].

En nuestro país lamentablemente no existe una especialización de torres de telecomunicaciones por ende algunos diseños fueron desarrollados sobre un estudio empírico y de barreras burocráticas ilegales reduciendo la capacidad de las empresas y limitando las competencias [4], con propuestas que carecen de una verificación completa de la torre sobre todo en sus conexiones.

Por estas razones, es necesario cambiar el diseño tradicional de las uniones de las torres de telecomunicaciones de sección triangular por medio de ala-ala de perfiles angulares con uniones bridadas, con la finalidad de reducir los esfuerzos que se generan en las conexiones.

Este estudio propone mejorar estructuralmente torres arriostradas ante diferentes catástrofes meteorológicas; ya que considerablemente va aumentando el área de comunicaciones y servicios de información [5], estos se realizarán mediante softwares computarizados que facilitan los cálculos e identifican las zonas de mayor concentración de esfuerzos, con el fin de obtener mayor confiabilidad a ser construidas.

Como antecedentes recolectamos 6 investigaciones las cuales nos dan una base para este estudio, como podemos ver:

En la tesis de S. Muñoz, titulado “Rediseño de la estructura de la torre autosoportada de h=71m para que soporte las antenas de radiofrecuencia y microondas existentes, y 06 antenas de microondas futuras ubicada en la estación 0101711_pi_el_alto, Piura” nos muestra que los elementos más esforzados en el análisis de dicha torre de telecomunicación, son las montantes, las diagonales, horizontal y redundante, como se apreciar en la tabla 1, los elementos que fallan son: las montantes, diagonales y horizontales con una capacidad mayor al 100% [6].

TABLA 1
PERFILES METALICOS MAS ESFORZADOS A 100KM/H. [6].

Panel	Elementos Críticos	Perfil	Ratio	Condición
30	Montante	L120x120x12mm	1.35>0.85	Falla
15	Diagonal	L45x45x4mm	1.44>0.85	Falla
22	Horizontal	L50x50x4mm	1.63>0.85	Falla
34	Redundante	L50x50x5mm	0.0.7>0.85	Cumple

En la tesis de J. P. Paredes Llontop, titulado “Evaluación estructural de una torre autosoportada cuadrada de telecomunicaciones mediante métodos convencionales en la Estación 131003_LA_Pimentel, Lambayeque 2019” nos muestra en las tablas 2 y 3, que las diagonales y montantes de dicha estructura tienen una capacidad superior al 100% por lo cual estos elementos fallan por resistencia al adicionar más equipos de telecomunicaciones [7].

TABLA 2
RATIOS DE LAS MONTANTES QUE FALLARON CON UNA VELOCIDAD DE SUPERVIVENCIA DE 100KM/H [7].

DIAGRAMA DE MIEMBROS FALLADOS CON LOS DOS PROCEDIMIENTO DE DISEÑO				
PANELES	MONTANTES	ASD	MONTANTES	LRFD
13	L6x6x3/8"	113.50%	L6x6x3/8"	105.50%
14	L6x6x3/8"	125.50%	L6x6x3/8"	116.70%
15	L6x6x3/8"	137.40%	L6x6x3/8"	127.80%
16	L6x6x3/8"	135.90%	L6x6x3/8"	124.80%
17	L6x6x3/8"	125.00%	L6x6x3/8"	114.70%
18	L6x6x3/8"	130.20%	L6x6x3/8"	119.50%
19	L6x6x3/8"	125.40%	L6x6x3/8"	115.20%
20	L6x6x1/2"	97.10%	L6x6x1/2"	89.50%
21	L6x6x1/2"	96.80%	L6x6x1/2"	89.40%
	X PROM:	120.76%	X PROM:	111.46%

TABLA 3
RATIOS QUE LAS DIAGONALES QUE FALLARON CON UNA VELOCIDAD DE SUPERVIVENCIA DE 100KM/H. [7].

DIAGRAMA DE MIEMBROS FALLADOS CON LOS DOS PROCEDIMIENTO DE DISEÑO				
PANELES	DIAGONALES	ASD	DIAGONALES	LRFD
7	L2X2X3/16"	102.10%	L3X3X1/4"	83.40%
8	L2X2X3/16"	140.70%	L3X3X1/4"	138.70%
13	Pernos 5/8"	111.50%	L3X3X1/4"	46.90%
14	Pernos 5/8"	114.50%	L3X3X1/4"	47.40%
15	Pernos 5/8"	121.10%	L3X3X1/4"	50.30%
16	Pernos 5/8"	114.50%	L3X3X1/4"	41.50%
	X prom:	117.40%	X prom:	68.03%

En la tesis de E. G. Huamán Granda, titulado “Reforzamiento estructural para mejorar la estabilidad en torres autosoportadas de telecomunicaciones en el distrito de Lambayeque – Lambayeque -2018” se concluye que la estructura analizada a una velocidad de 100kph y teniendo en consideración las cargas presentes como las proyectadas, los componentes de la torre son esforzados a un máximo del 255.9%. según lo mencionado previamente, estos elementos no cumplen la verificación por resistencia [8].

En la tesis de A. E. Bendezú Vargas, titulado “Análisis del reforzamiento estructural de una torre de telecomunicaciones de la estación de “Puntas Pico” se concluye que el comportamiento actual de la torre de telecomunicaciones, tanto con cargas existentes como proyectadas, se obtuvo montantes y diagonales con una relación de esfuerzo axial y permisible (ratio) más crítica del 143,5 % al 238,6 %, 168,4 % al 308,4 % respectivamente, superando el ratio del 100%. Por lo tanto, estos elementos no cumplen la verificación por resistencia [9].

II. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

Proponer y determinar un correcto diseño en los elementos de conexión de las torres arriostradas para la fabricación y sucesiva instalación.

Como primer paso en el estado inicial se analizaron las zonas de las uniones y perforaciones por medio del método de elementos finitos, determinando zonas de concentración de esfuerzos que superaban los límites admisibles, los softwares utilizados fueron IDEA StatiCa y Sap2000.

Como segundo paso se realizó la propuesta de mejoramiento de las conexiones de la base, entre tramos y de arriostre.

III. MARCO TEÓRICO

El software *IDEA StatiCa* se especializa en las conexiones precisas, optimizando costos en el centro de tus proyectos. Maneja topo tipo de conexiones atornilladas, soldadas, a cortante, axiales de vigas de acero, así como placas base pilares y uniones de acero, cuidando también la complejidad del hormigón, permitiendo exportar y sincronizar datos [10].

3.2 Sap2000:

El software Sap200 es un programa de elementos finitos, con interfaz gráfico 3D orientado a objetos. Es la herramienta de trabajo para los ingenieros. La versatilidad es modelar estructuras que permite su utilización en el dimensionamiento de puentes, edificios, estadios, presas, estructuras industriales, entre otras. Así mismo la comprobación automática de

estructuras de hormigón armado, perfiles metálicos, a través de normativas Europeas, Americanas, y otras [11].

3.3 Von Mises:

Este criterio, conocido como plastificación de Tresca, establece que la plastificación se produce cuando la máxima tensión supera el límite elástico en cortadura. El criterio de Von Mises, se relaciona con la tensión octaédrica, en tensiones principales es: [12].

3.3 Aisc-360 Metodo LRFD

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

Donde:

- σ_e es la tensión efectiva.
- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ son las tensiones normales principales.

3.4 ANSI TIA 222-H:

El objetivo de esta norma es ofrecer literatura reconocida para estructuras de soporte de antenas, antenas y estructuras de soporte de turbinas eólicas pequeñas, abarcando: (a) requisitos de carga mínima y (b) criterio de diseño [13].

IV. MÉTODO

En la inspección de un proyecto de reforzamiento estructural de una torre existente, se identificó una falla crítica que provocó la caída de antenas y la interrupción en la señal de transmisión, evidenciando una deficiencia considerable en la zona de acoplamiento del mástil. En la figura 01 se observa un antes y después de la caída del mástil.



Fig. 01 posicionamiento del mástil y su caída posteriormente.

Se realizaron las anotaciones de las medidas de los 3 tipos de conexiones: unión de la base, unión entre los tramos a 3 metros y el arrioste de la torre existente.

En la unión de la base es de forma triangular que soporta toda la estructura. En la unión entre tramos de observa un levantamiento en la parte derecha; esto es debido que el mástil al desprenderse levantó dicha zona. En el arrioste de la torre se muestra la perforación del tubo que rigidiza a la torre. Como se visualiza en la figura 02.



Fig. 02 unión de la base, unión entre los tramos a 3 metros y el arrioste, visualización de izquierda a derecha respectivamente.

A continuación, se presenta el modelamiento matemático 3D del software Sap2000 de las medidas obtenidas de la torre existente.

En la figura 03 los objetos se han dispuesto para idealizar toda la estructura, para obtener muy aproximados resultados al comportamiento real esperado de las acciones gravitacionales y del viento.

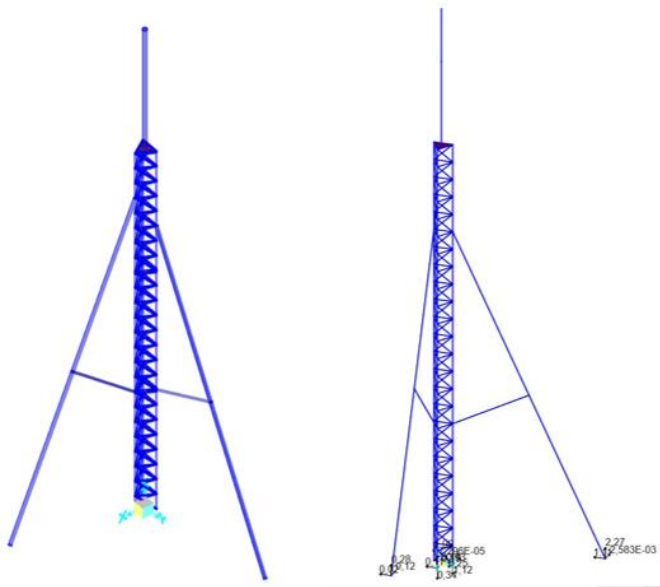


Fig. 03 torre arriostrada, desarrollado en el software Sap2000.

Posteriormente se realizó el modelamiento de la Unión de la base de forma triangular, con 3 perfiles angulares 2x2x3/16 de pulgadas respectivamente, fijado al pedestal en las alas con 6 anclajes de 5/8 de pulgadas SAE 1045. Como se indica en la figura 04.

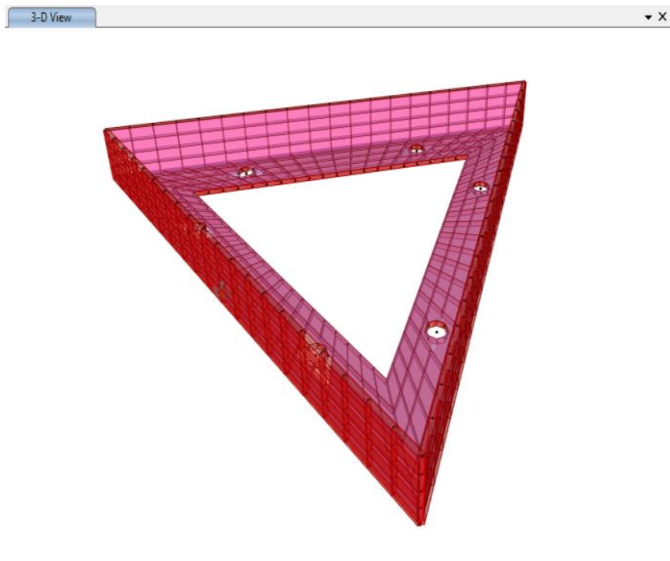


Fig. 04 unión de la base, desarrollado en el software Sap2000.

En la figura 05, se muestra la Unión entre tramos a 3m con perfiles angulares 2x2x3/16 de pulgadas, que forman una sección triangular unidos en las alas con 6 pernos de 5/8 pulgada (pulg.) ASTM A-325. Estos son dos triángulos que se encuentran para posteriormente formen una sólida estructura.

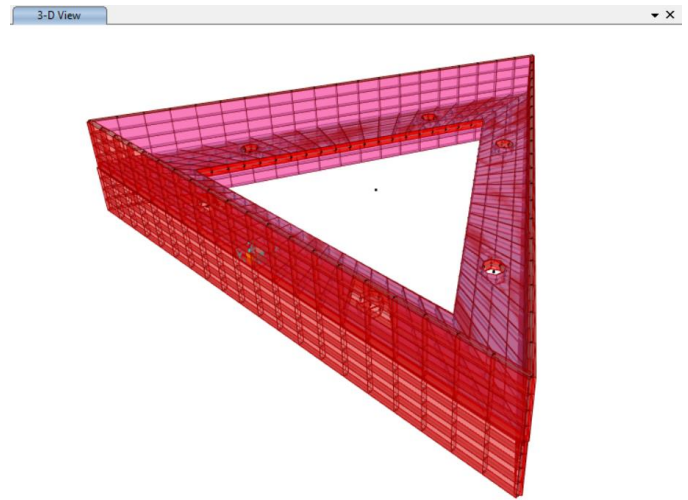


Fig. 05 unión entre los tramos a 3 metros, desarrollado en el software Sap2000.

En el arriostre de la torre, consta de una plancha base cuadrada de 190 milímetros (mm) x 190 mm x 1/4 pulg. de espesor, con un tubo de 3 pulg. STD con perforaciones para rigidizar la torre. Como se visualiza en la figura 06.

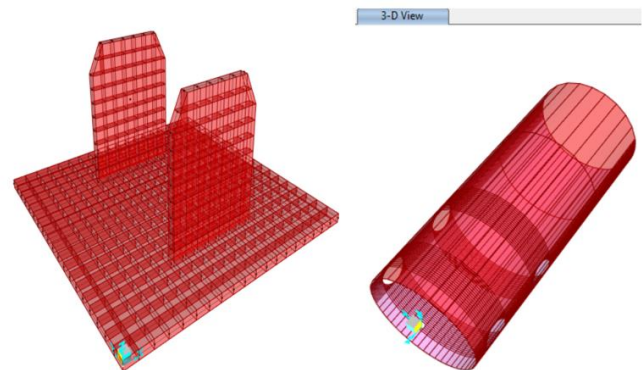


Fig. 06 arriostre de la torre, desarrollado en el software Sap2000.

Seguidamente se presentará los diseños propuestos mediante el software IDEA StatiCa, junto a ellos sus respectivas medidas y calidad del material que fueron utilizados.

Se muestra una brida de base con diámetro de 180 milímetros, con un espesor de 3/8 de pulgada de material ASTM A-36, se adicionaron 4 cartelas de forma de trapezoidal con material ASTM A-36 y con espesor de 1/4 pulgada, para rigidizar el tubo. En los anclajes 4 pernos de 1/2 pulgada con longitud de 300 milímetros SAE 1045. Por otro lado, un tubo SCH40 de 1 1/2 de pulgada con material de ASTM A-53. Como

se visualiza en la figura 07. Cabe mencionar que son tres bridas propuestas en la base.

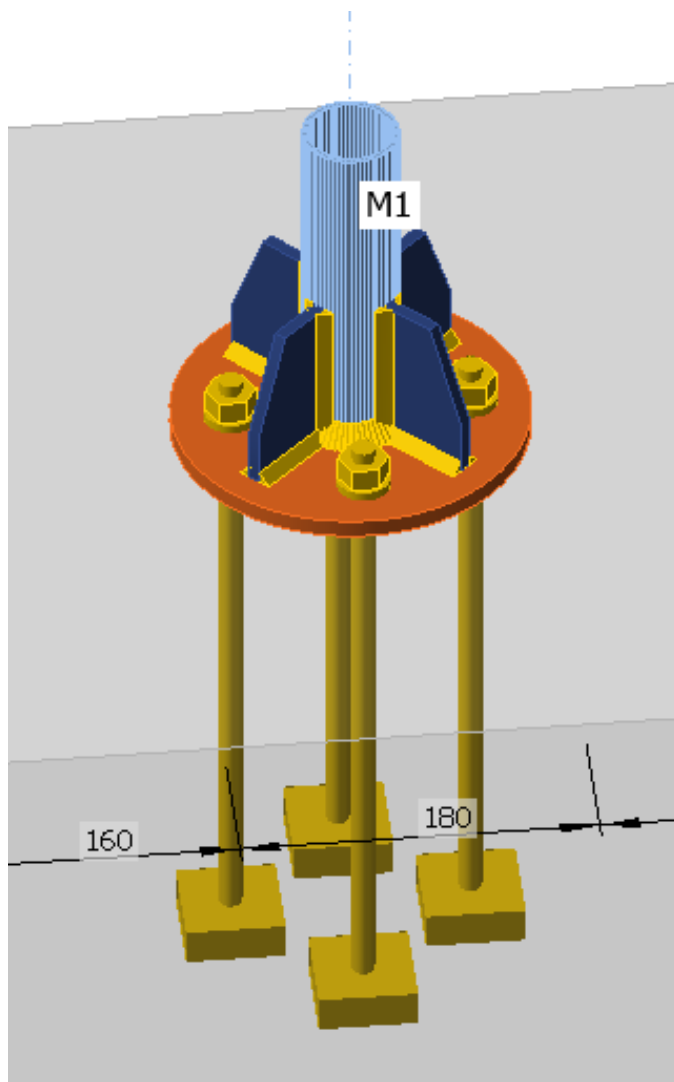


Fig. 07 brida de base circular, diseño propuesto desarrollado en IDEA StatiCa.

En la figura 08, presenta la unión entre tramos de 3 metros, indicando la continuidad del tubo de 1 ½ de pulgada con material de ASTM A-53 y la base de bridas de ambos lados con diámetro de 160 milímetros, con un espesor de 5/16 de pulg. con material de ASTM A-36, se adicionó 8 cartelas de forma de trapezoidal con espesor de 1/4 pulg. de material ASTM A-36. Adicionalmente 4 pernos de 1/2 pulg. ASTM A-325.

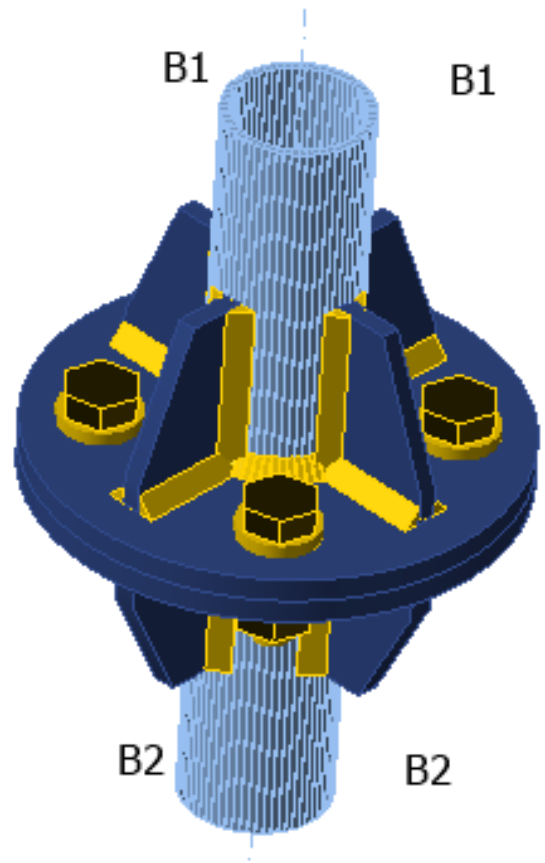


Fig. 08 unión entre tramos de 3 metros, diseño propuesto desarrollado en IDEA StatiCa.

Se consideró no perforar el tubo SCH40 de 3 pulgadas ASTM A-53, proponiendo una plancha como base de arriostre de forma cuadrada con longitud de 240 milímetros con espesor de 5/16 de pulgada ASTM A-36. En los anclajes 4 pernos de 5/8 pulgada con longitud de 400 milímetros SAE 1045. Como se muestra en la figura 09.

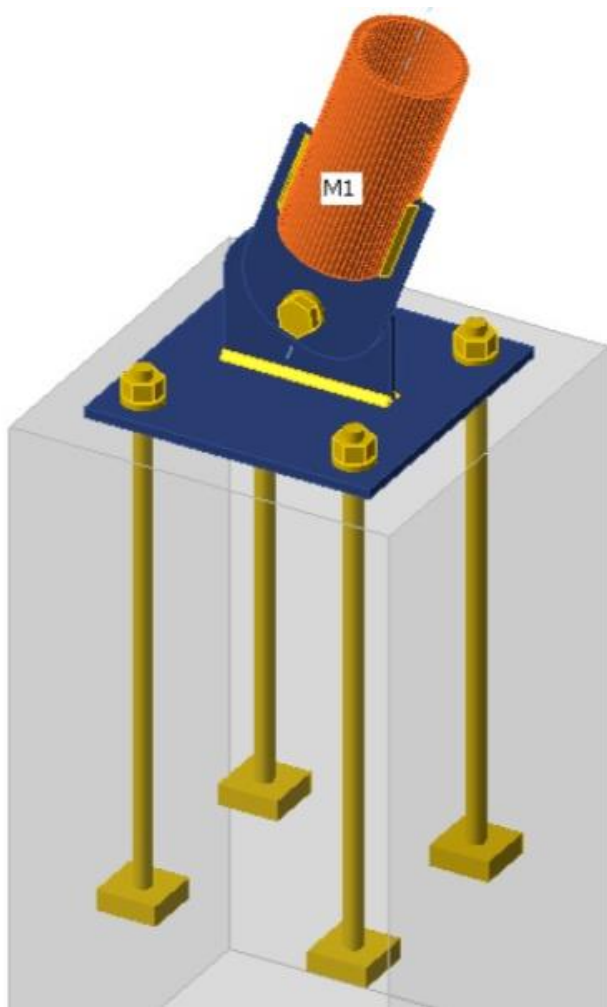


Fig. 09 arriostre de la torre, diseño propuesto desarrollado en IDEA StatiCa.

V. RESULTADOS

Seguidamente, se muestran los resultados de la torre existente arrojados del software Sap2000, especializado en modelamiento estructural con elementos finitos.

Se muestra en la figura 10, mayor concentración de esfuerzos en el triángulo de la base específicamente en dos agujeros de las esquinas, a simple vista se aprecia de color amarillo, pero si precisamos más es de color verde; arrojando así el valor de 6204.08 kgf/cm².

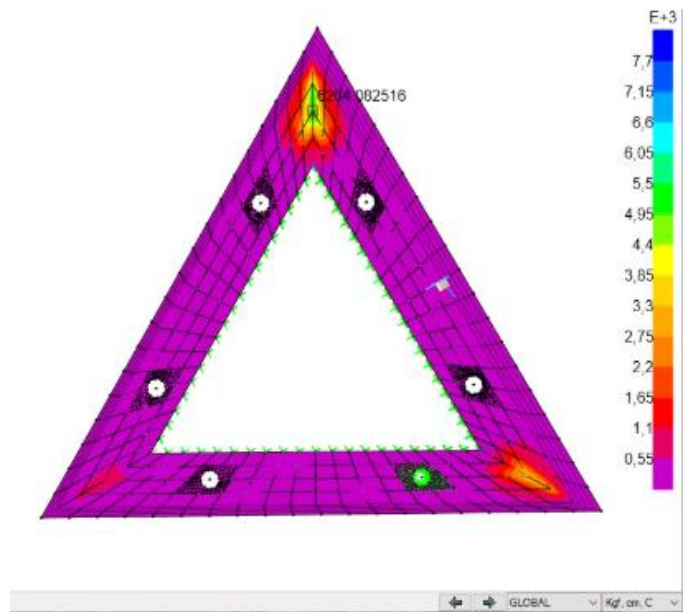


Fig. 10 unión de la base, desarrollado en el software Sap2000.

Se muestra en la figura 11, en la tabla de información ubicada en la parte derecha de la imagen, presenta E+3 quiere indicar que es una notación científica equivalente a 1000. Por lo tanto, los cálculos arrojados de los dos agujeros superiores del triángulo son de 4895.24 kgf/cm² de color verde.

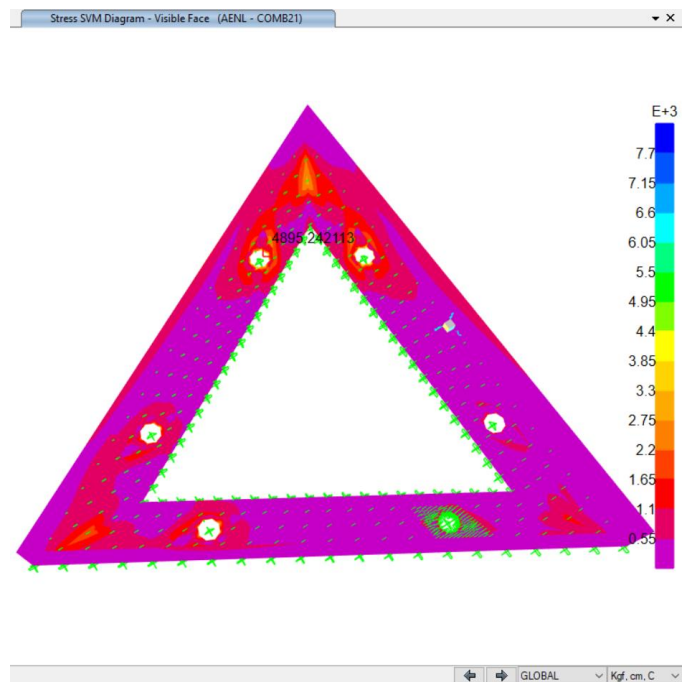


Fig. 11 unión entre los tramos a 3 metros, desarrollado en el software Sap2000.

Para la plancha de base horizontal y junto al vertical del arriostre, se detectaron mayores esfuerzos, arrojando datos de 5110.01 kgf/cm² indicando que está entre el color celeste y azul. Como se visualiza en la figura 12.

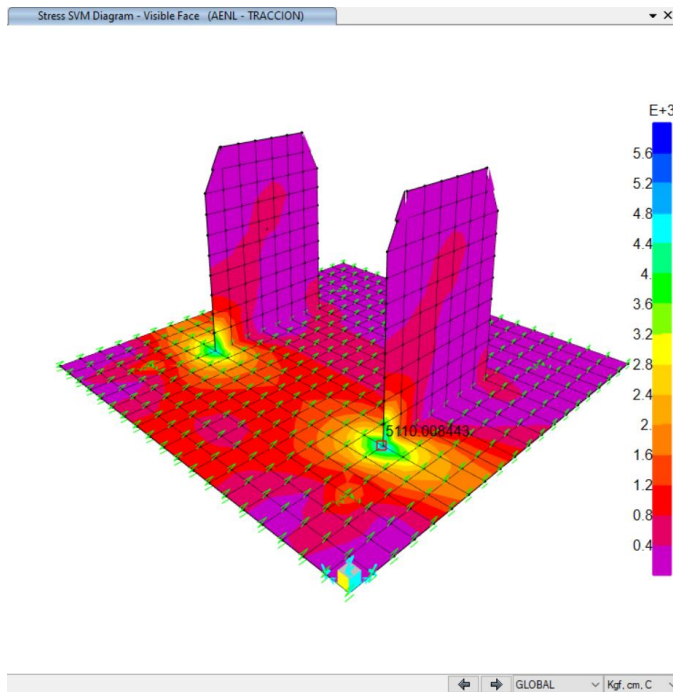


Fig. 12 plancha base de arriostre, desarrollado en el software Sap2000.

En la figura 13, se muestra un tubo de 3 pulgadas perforado, indicado que los esfuerzos que son realizado se concentran en esas zonas. Es importante señalar que las unidades se encuentran en la parte inferior derecha de la imagen.

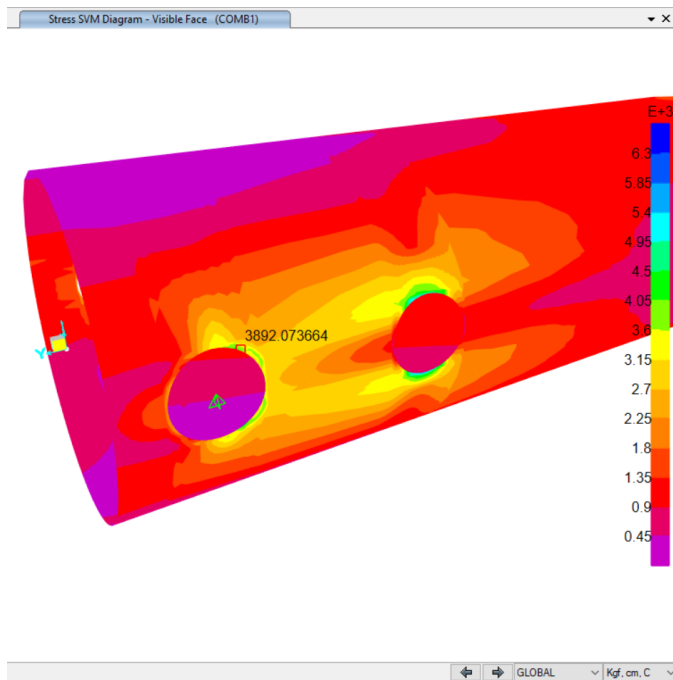


Fig. 13 tubo de 3 pulgadas del arriostre, desarrollado en el software Sap2000.

A continuación, se presentarán los resultados del diseño propuesto mediante el software IDEA StatiCa, especializados en conexiones precisas.

En el diseño propuesto de brida, cartelas y tubo estructural, se midió la resistencia a tracción con 7 kilo Newton (KN) en el software IDEA StatiCa, obteniendo un valor de 50 Mega Pascales (Mpa) de color azul, indicado en la tabla de datos. Como se muestra en la figura 14.

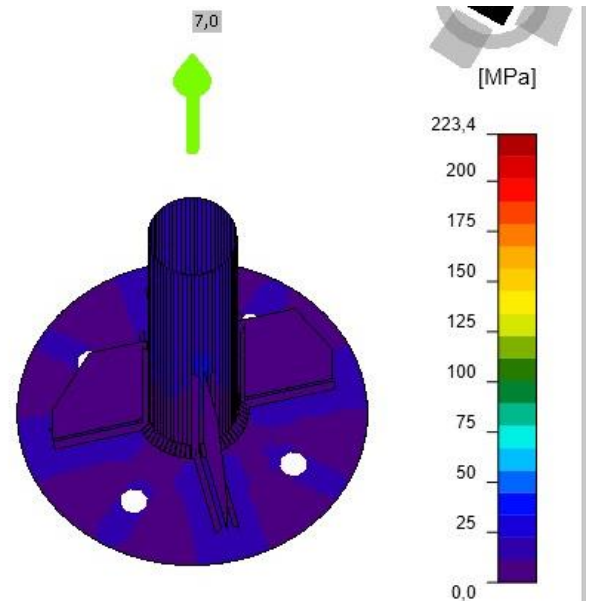


Fig. 14 brida con cartelas y tubo estructural, diseño propuesto en IDEA StatiCa.

En el diseño propuesto de brida, cartelas y tubo estructural, se evaluó la resistencia a compresión con -12.9 KN en el software IDEA StatiCa, obteniendo un valor de 50 Mpa que equivale a 509.86 kgf/cm². Este resultado se ilustra en la figura 15.

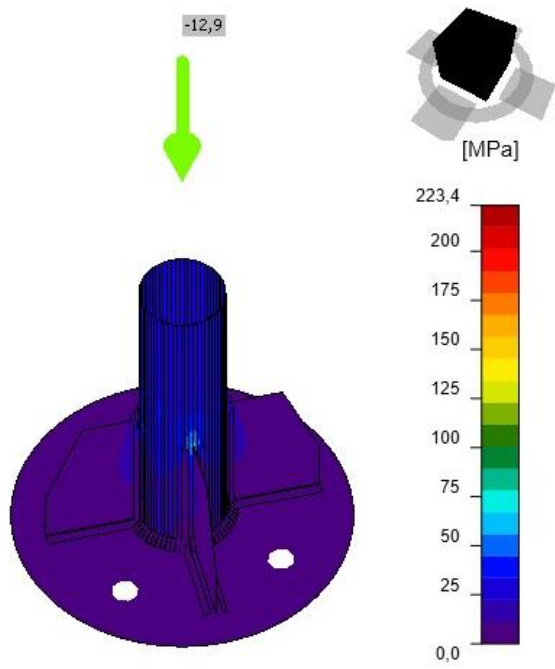


Fig. 15 brida con cartelas y tubo estructural, diseño propuesto en IDEA StatiCa.

Para el diseño de arriostre se midió la resistencia a tracción con 10.2 KN en el software IDEA StatiCa, obteniendo un valor máximo de 140 Mpa de color amarillo que es igual a 1427.6 kgf/cm², indicado en la tabla de datos. Como se muestra en la figura 16.

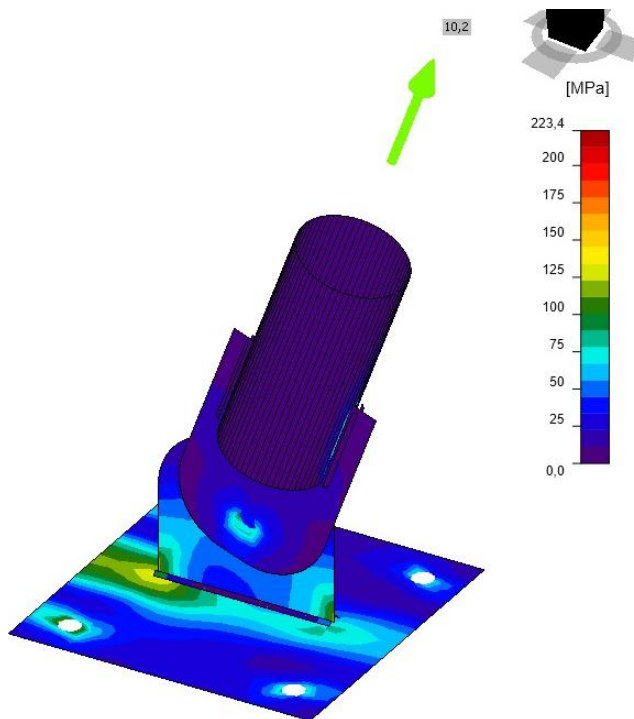


Fig. 16 arriostre con plancha de base y tubo estructural, diseño propuesto en IDEA StatiCa.

En el diseño de arriostre se midió la resistencia a compresión con -12.2 KN en el software IDEA StatiCa, obteniendo un máximo valor de 75 Mpa de color celeste que es igual a 764.79 kgf/cm², según la tabla de datos. Representado en la figura 17.

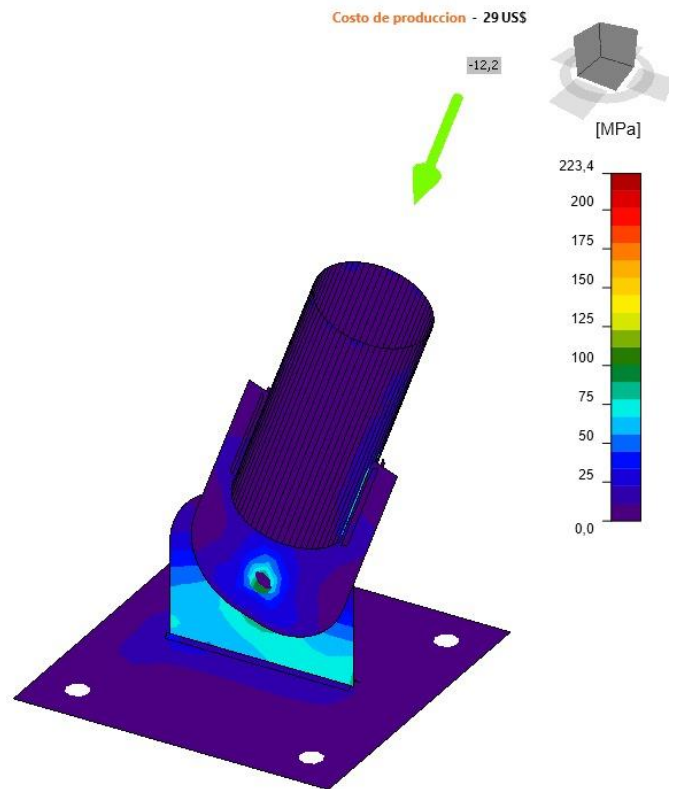


Fig. 17 arriostre con plancha de base y tubo estructural, diseño propuesto en IDEA StatiCa.

A continuación, se muestra en la tabla 1 un resumen de los resultados obtenidos, para indicar y comparar su cumplimiento con el criterio de Von mises.

TABLA 4
RESULTADOS DE LAS 3 ZONAS Y DISEÑO PROPUESTO

	Torre existente kgf/cm ²	Propuesta de mejoramiento kgf/cm ²	Von Mises kgf/cm ²
Unión de base	6204.08	509.86	2277
Unión de tamos a 3 metros	4895.24	509.86	2277
Arriostre	5110.01	1427.6	2277

El límite máximo que puede llevar el material ASTM A-36 y A-53 es con el criterio de Von Mises, afirmando que la torre

existente en las zonas: unión en la base, unión entre tramos a 3 metros y en el arriostre, no cumple con el criterio de rotura, superando con los números establecidos. En otra parte, el diseño propuesto cumple con dicho criterio, siendo esta menor al criterio establecido.

VI. CONCLUSIONES

En el Perú y América Latina, las torres arriostradas suelen presentar defectos ocultos que propician fallos estructurales debido a esfuerzos excesivos. Estas fallas se generan principalmente por las perforaciones realizadas en las uniones de las bases, entre tramos y en los elementos de arriostramiento.

A partir de los análisis realizados con los programas IDEA StatiCa y Sap2000, se concluye que la propuesta de mejoramiento estructural para una torre arriostrada de telecomunicaciones exhibe una capacidad adecuada para resistir fenómenos naturales. Esto representa un enfoque alentador para reducir los riesgos asociados a eventos como vientos fuertes y sismos en el contexto peruano. Sin embargo, es imprescindible llevar a cabo investigaciones adicionales y someter la propuesta a pruebas en condiciones reales para confirmar plenamente su eficacia.

Aunque el estudio actual se encuentra en una etapa inicial y se basa exclusivamente en simulaciones computacionales, se prevé, en fases futuras, construir un prototipo para evaluar su rendimiento en comparación con los resultados obtenidos en los modelos simulados.

VII. REFERENCIAS

- [1] B. Vallejo and M. Reañez, "Estrategias para el restablecimiento de los servicios de telecomunicaciones en caso de catástrofes naturales," *Revista Científica UISRAEL*, vol. 4, no. 2, pp. 39-50, Aug. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.35290/rcui.v4n2.2017.60>
- [2] R. Arévalo, "Validación estructural de la torre autosoportada Loreto de 108m de altura," Trabajo de grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2015. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/12571>
- [3] E. Guamán, "Reforzamiento estructural para mejorar la estabilidad en torres autosoportadas de telecomunicaciones en el distrito de Lambayeque – Lambayeque - 2018," 2018. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/34708>
- [4] C. Caceres and M. Huamán, "El marco jurídico para la expansión de infraestructura de telecomunicaciones y la autorización en el Tupa de la Municipalidad distrital de Pueblo Nuevo-Chincha-2021," 2022. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.13067/2373>
- [5] J. Alvarado, "Evaluación del riesgo geotécnico para la ubicación e instalación de torres de telecomunicaciones en el departamento de La Libertad 2021 - 2022," 2023. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.13084/6834>
- [6] S. Muñoz, "Rediseño de la estructura de la torre autosoportada de h=71m para que soporte las antenas de radiofrecuencia y microondas existentes, y 06 antenas de microondas futuras ubicada en la estación 0101711_pi_el_alto, Piura," Trabajo de grado, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, 2016. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.14414/3835>
- [7] J. P. Paredes Llontop, "Evaluación estructural de una torre autosoportada cuadrada de telecomunicaciones mediante métodos convencionales en la Estación 131003_LA_Pimentel, Lambayeque 2019," Trabajo de grado, Universidad César Vallejo, Lima, 2019. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/45935>
- [8] E. G. Huamán Granda, "Reforzamiento estructural para mejorar la estabilidad en torres autosoportadas de telecomunicaciones en el distrito de Lambayeque – Lambayeque - 2018," Trabajo de grado, Universidad César Vallejo, Lima, 2018. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/34708>
- [9] A. E. BendeZú Vargas, "Análisis del reforzamiento estructural de una torre de telecomunicaciones de la estación de 'Puntas Pico' para aumentar su capacidad portante," Trabajo de grado, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, 2021. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12894/7160>
- [10] IDEA StatiCa Software. [Online]. Available: <https://www.ideastatica.com/es>
- [11] SAP2000 Software. [Online]. Available: <https://www.csiespana.com/software/2/sap2000>
- [12] J. Arana and J. Gonzáles, "Mecánica de fractura," Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitateko Argitalpen Zerbitzua. [Online]. Available: <file:///C:/Users/HP/Downloads/Mecanica%20de%20fractura.pdf>
- [13] TIA-222-H, Editorial Committee, Oct. 2017. [Online]. Available: <file:///C:/Users/HP/Downloads/TIA-222-H.pdf>