

PERIODO FUNDAMENTAL DE MÁSTILES ARRIOSTRADOS DE BAJA ALTURA EVALUADOS EXPERIMENTALMENTE

FUNDAMENTAL PERIOD OF LOW RISE GUYED MASTS EXPERIMENTALLY EVALUATED

Alberto M. Guzmán, Francisco A. Calderón y Gustavo L. Palazzo

*CeReDeTeC, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, Rodríguez 273, Ciudad,
Mendoza (M5502AJE), Argentina, mguzman@frm.utn.edu.ar*

Palabras clave: mástiles arriostrados, AVM, periodo fundamental.

Resumen. Por diversas razones, tanto técnicas como económicas, uno de los sistemas estructurales más utilizados para dar sustento a los dispositivos de comunicaciones son los mástiles arriostrados. Estos sistemas se caracterizan por ser estructuras esbeltas, siendo sensibles frente a excitaciones dinámicas. Debido a que muchas de estas estructuras son emplazadas en regiones con elevada peligrosidad sísmica, resulta necesario en la etapa del diseño evaluar su respuesta estructural ante dicha acción. Es así que para el análisis sísmico, tanto estático como dinámico, un parámetro requerido por las reglamentaciones al momento de la evaluación resulta ser el periodo fundamental del sistema estructural. Frente a ello, el objetivo del presente trabajo es presentar los resultados obtenidos en una campaña de campo al haber instrumentado, mediante acelerómetros, a mástiles arriostrados de baja altura emplazados en una zona de muy elevada peligrosidad sísmica de la Provincia de Mendoza, Argentina. Esto ha permitido evaluar experimentalmente el periodo fundamental de estos sistemas estructurales mediante la técnica conocida como Ambient Vibration Measurements (AVM), registrando las vibraciones ocasionadas por acciones medioambientales. Al mismo tiempo y con los resultados obtenidos, se prevé poder llevar a cabo la calibración de futuros modelos numéricos utilizados para la representación de estos sistemas estructurales.

Keywords: guyed masts, AVM, fundamental period.

Abstract. For various reasons, both technical and economic, one of the most widely used structural systems to support communication devices are guyed masts. These systems are characterized by being slender structures, being sensitive to dynamic excitations. Due to the fact that many of these structures are located in regions with high seismic danger, it is necessary at the design stage to evaluate their structural response to this action. Thus, for seismic analysis, both static and dynamic, a parameter required by regulations at the time of evaluation turns out to be the fundamental period of the structural system. Faced with this, the objective of this paper is to present the results obtained in a field campaign having instrumented, using accelerometers, low-height guyed masts located in an area of very high seismic hazard in the Province of Mendoza, Argentina. This has allowed the experimental evaluation of the fundamental period of these structural systems using the technique known as Ambient Vibration Measurements (AVM), recording the vibrations caused by environmental actions. At the same time and with the results obtained, the calibration of numerical models used for the representation of the considered structural systems is carried out.

1. INTRODUCCIÓN

La importante extensión territorial de la Argentina hace necesaria la instalación de un gran número de antenas a fin de mantener conectadas a través de las comunicaciones a las distintas localidades que forman parte del territorio. Al respecto, muchas de estas estructuras requieren ser emplazadas en regiones con elevada sismicidad, como resulta ser la región del centro-oeste del país, caracterizada como la de mayor peligrosidad sísmica (INPRES, 1977). Por esta razón, los mástiles arriostrados a ser emplazados en estas regiones no sólo deben ser analizados y diseñados adecuadamente para soportar las acciones gravitatorias y las de viento, sino que también, frente a las eventuales acciones sísmicas que pudieren presentarse, debido a la importancia estratégica que significa mantener operativa las comunicaciones en situaciones de catástrofes.

La predicción de la respuesta sísmica de mástiles arriostrados, al igual que en otras estructuras, requiere muchas veces la necesidad de evaluar la respuesta dinámica en el tiempo, lo cual implica el tener que utilizar como excitación acelerogramas de terremotos ocurridos. Diversos autores (El-Rashidy y Zidan, 2000; Amiri, 2002; Hensley y Plaut, 2007; Blakeborough et al., 2008; Faridafshin y McClure, 2008; Ghafari Oskoei y McClure, 2012; Guzmán et al., 2018) han analizado la respuesta sísmica de estos sistemas estructurales para comprender su complejo comportamiento. Esta necesidad está dada en poder evaluar la serviciabilidad de los dispositivos de comunicaciones. Al respecto, un análisis dinámico en el tiempo implica la selección de una cierta cantidad de acelerogramas cuyas características deben cumplir condiciones en cuanto a su aceleración máxima y en cuanto a la media de las ordenadas de los espectros de respuestas (ASCE/SEI-7-16, 2016). El cumplimiento de dichas condiciones, hace necesario el escalamiento de los acelerogramas adoptados. Este procedimiento depende del periodo fundamental que presente el sistema estructural, lo cual hace a este parámetro en una variable determinante en dicho proceso. Pero también la determinación del periodo fundamental, y tal como lo refiere la Norma ANSI/TIA-222-G (2006), resulta necesaria cuando se desea comprobar el corte basal del sistema, el cual es determinado mediante un análisis menos riguroso que el dinámico, como resulta ser el análisis estático conocido como método 1 o de la fuerza lateral equivalente.

Es de destacar que la literatura presenta sólo unos pocos casos en los cuales se ha intentado encontrar a partir de simulaciones numéricas, tendencias de comportamiento referidas al periodo fundamental, y con ello, metodologías que permitan inferir dicho parámetro. En ese sentido se destaca a Amiri (2002) quien propone una ecuación para inferir el periodo fundamental en función de la altura del mástil, recomendando su uso a sistemas con alturas de entre 150 y 350 m, y con niveles de pretensión de flexural del orden del 10 % de su capacidad última. Por su parte, Blakeborough et al. (2008) a partir del estudio de cuatro mástiles arriostrados de alturas aproximadas entre 100 y 314 m, propone una ecuación lineal para inferir el periodo fundamental en función de la altura del mástil, resultando ser una corrección a la ecuación propuesta por Amiri. La Norma ANSI/TIA 222-G presenta dos expresiones que permiten inferir la frecuencia fundamental del sistema, una expresión que presenta cierta complejidad en su aplicación, y frente a ello, una expresión simplificada como alternativa a la anterior.

El desarrollo de estas expresiones para inferir el periodo, implica primero poder establecer cómo influyen los distintos parámetros mecánicos del sistema en la respuesta dinámica del mismo. Algunas investigaciones entre las que se citan a: Amiri (2002); Blakeborough et al. (2008); Guzmán et al. (2018, 2021); Madugula et al. (1998), han evaluado como influye en los periodos naturales la variación de la fuerza de pretensión de la flexural y la altura del mástil, siendo este último parámetro el más influyente en dicha propiedad dinámica. En ese sentido, la determinación experimental de periodos fundamentales de mástiles arriostrados existentes contribuye

a comprender el comportamiento de estos sistemas estructurales, permitiendo al mismo tiempo poder calibrar los modelos numéricos utilizados para representar dichas estructuras.

Respecto a lo anterior, las investigaciones en esta línea de evaluación experimental son escasas. Se puede citar el trabajo de [Harikrishna et al. \(2003\)](#), quienes evaluaron experimentalmente el comportamiento dinámico de un mástil arriostrado de 50 m de altura bajo la acción del viento. Se utilizaron dos acelerómetros triaxiales ubicados en los niveles +29.0 m y +50.0 m. Si bien el trabajo estuvo orientado a la evaluación de parámetros de respuesta ante la acción del viento, también se determinaron frecuencias fundamentales y la razón de amortiguamiento estructural.

Por otra parte la evaluación estructural de un mástil arriostrado de 90 m de altura mediante la medición de frecuencias naturales fue abordado por [Saudi \(2014\)](#). A partir de los resultados experimentales obtenidos se calibró un modelo de representación de elementos finitos. Se utilizaron acelerómetros uniaxiales dispuestos en los niveles +10.0 m y +19.0 m. Se observó que el comportamiento dinámico se caracteriza por modos acoplados en los ejes ortogonales principales. Esto se evidencia en los espectros medidos, donde los picos espectrales de las frecuencias resonantes son similares para ambas direcciones.

[Ghafari Osgoie et al. \(2012\)](#) hicieron mediciones de vibraciones ambientales en un mástil de 111.2 m de altura en Québec y luego realizaron una comparación con un modelo computacional a fin de calibrarlo y realizar análisis sísmicos temporales. En este trabajo se analizó además la incidencia de la tensión de los cables en la respuesta del modelo.

[Gentile y Ubertini \(2012\)](#) presentaron una identificación de propiedades dinámicas por medio de mediciones de vibraciones por radar, de un mástil de 104 m de altura, con sección triangular. En este trabajo se aplicaron dos métodos de identificación: Descomposición en el dominio de la frecuencia e Identificación en el sub-espacio estocástico, con los cuales se pudieron identificar doce modos. Cabe aclarar que, a diferencia de las mediciones realizadas con acelerómetros, donde se necesita al menos un sensor en cada punto de la estructura a medir, con un solo radar se pueden realizar múltiples mediciones de la estructura, en este caso 15 puntos solo en el mástil.

[Ismail \(2016\)](#) realizó mediciones de vibraciones ambientales en un mástil arriostrado de 150 m de altura con el objetivo de calibrar un modelo que utilizó para realizar un análisis de pushover, a fin de analizar el desempeño sísmico del mástil.

El objetivo de la presente investigación, es poder determinar experimentalmente el periodo fundamental de dos mástiles arriostrados existentes de baja altura, y a partir de ello, calibrar los modelos numéricos de elementos finitos utilizados para la representación de los mismos.

2. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN

Los sistemas de monitoreo estructural se han convertido en una herramienta importante en el análisis y la evaluación de estructuras. Esta importancia subyace en la capacidad del sistema de monitoreo de proveer características dinámicas de una estructura como son las frecuencias naturales, y utilizarlas como una referencia para calibrar un modelo de elementos finitos.

La calibración de un modelo de elementos finitos puede definirse como un proceso cuyo objetivo es afinar el modelo matemático de una estructura física para que refleje el comportamiento estructural observado experimentalmente ([Friswell y Mottershead, 1995](#)). Esta disciplina se remonta a la publicación de [Rodden \(1967\)](#), quien utilizó pruebas de vibración para mejorar la correlación entre lo teórico y lo experimental.

Por lo tanto, la metodología propuesta en la presente investigación, consistió en:

- . Seleccionar dos mástiles arriostrados existentes con la condición de baja altura.

- . Relevar la geometría, materiales y sus elementos constituyentes, a fin de establecer las principales características estructurales, abasteciendo de información a los modelos numéricos.
- . Medir vibraciones in-situ en los mástiles seleccionados a partir de la técnica conocida como *Ambient Vibration Measurements* (AVM), mediante el uso de acelerómetros de alta sensibilidad, uno uniaxial y otro triaxial, ubicados a distintas alturas del mástil, registrando las vibraciones ocasionadas por acciones ambientales y obteniendo así series temporales de aceleración.
- . Determinar, a partir de las mediciones obtenidas experimentalmente y mediante métodos de identificación de sistemas (*pick-picking*), las frecuencias naturales fundamentales de las estructuras evaluadas mediante la utilización del software libre Geopsy y de rutinas de Matlab.
- . Modelar numéricamente los sistemas estructurales considerados en la fase experimental, utilizando para ello un software comercial de elementos finitos, para obtener como respuesta de interés el periodo fundamental.
- . Calibrar los modelos numéricos en función de los resultados experimentales obtenidos.
- . Por último, evaluar el desempeño del modelo numérico calibrado, comparando para ello las respuestas modales obtenidas con aquellas que resultaron de la fase experimental.

3. MÁSTILES ARRIOSTRADOS SELECCIONADOS

En el predio que Radio Nacional posee en el departamento de Guaymallén, Provincia de Mendoza, se encuentra la planta transmisora, donde está emplazado el mástil arriestrado principal que sustenta los dispositivos de comunicaciones, pero también, se encuentran emplazados 6 mástiles arriestrados de baja altura los cuales actualmente están fuera de servicio.

Dos de estos mástiles de baja altura fueron seleccionados para el estudio, uno de ellos de 18 m de altura y dos niveles de riendas, en adelante MA-18, y el restante de 30 m de altura y tres niveles de riendas, en adelante MA-30 (Fig. 1). En ambos casos la separación entre los niveles de riendas es equidistante entre sí.



Figura 1: Estructuras seleccionadas. Izq.) MA-18. Der.) MA-30.

Ambas estructuras presentan un mástil reticulado de sección transversal triangular, con lados de 500 mm, y un mallado tipo "K" con un paso entre diagonales de 1000 mm. Los montantes

están formados por un perfil canal con alas a 60° y presentan un área de 400 mm^2 , en tanto que las diagonales están formadas por un perfil L con un área de 152 mm^2 , siendo en ambos casos de acero galvanizado. Las diagonales se toman a los montantes a través de un único bulón por extremo. En la Figura 2 se presenta el mallado y un detalle de la sección transversal.



Figura 2: Tramo típico de mástil. Izq.) Mallado tipo "K". Der.) Sección transversal.

En el caso del MA-18, los dos niveles de riendas son de diámetro 8 mm con una conformación de hilos de 1x7. En el caso del MA-30, el primer y tercer nivel de riendas son de diámetro 8 mm con una conformación de hilos de 1x7, en tanto que el segundo nivel es de diámetro 10 mm con una conformación de hilos de 1x9. En todos los casos se trata de cordones de acero galvanizado. En la Figura 3 se presenta un esquema de implantación y elevación de ambas estructuras.

4. MEDICIÓN DE VIBRACIONES IN-SITU

Para el monitoreo de las estructuras seleccionadas, se utilizó un acelerómetro uniaxial Kinematics modelo ES-U2, y una acelerómetro triaxial Kinematics modelo Basalt 4x. En ambas estructuras, el acelerómetro uniaxial se ubicó en la cima del mástil, en tanto que el triaxial se posicionó a la mitad de la altura de este (Fig. 4). Para el montaje de los mismos, se contó con la asistencia de un torrista habilitado para tal fin.

En ambos mástiles se realizaron mediciones de 30 minutos de duración. A partir de estas se realizaron los espectros de Fourier en ventanas de 50 segundos, suavizadas (Konno y Ohmachi, 1998) y apodizadas con 5% (cosine taper). Estas ventanas son luego promediadas y se obtienen los espectros resultantes, los cuales se presentan en la Figura 5. Sobre estos espectros se identificaron las frecuencias de manera visual (peak picking). De las mediciones realizadas en el MA-30 el sensor ubicado en la cima no registró vibraciones, aparentemente por una mala conexión del mismo, por lo que el gráfico solo presenta dos espectros (dirección norte y dirección este) correspondientes al sensor triaxial colocado a media altura. La Tabla 1, presenta los resultados de las frecuencias encontradas para los dos mástiles estudiados y su correspondiente conversión a periodos.

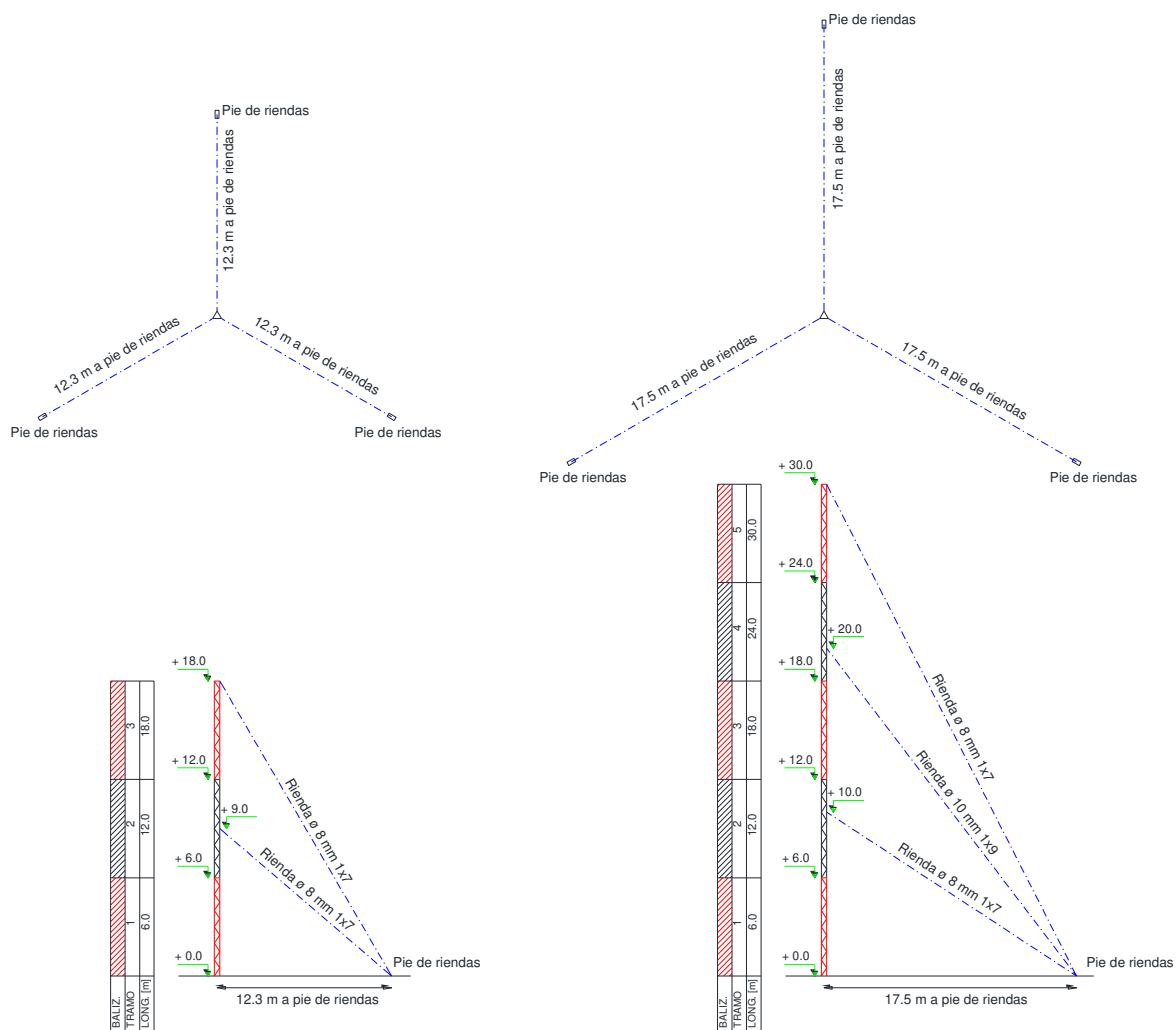


Figura 3: Implantación y elevación de estructuras. Izq.) MA-18. Der.) MA-30.



Figura 4: Izq.) Montaje de acelerómetros. Der.) Uniaxial en la cima y triaxial a mitad de altura.

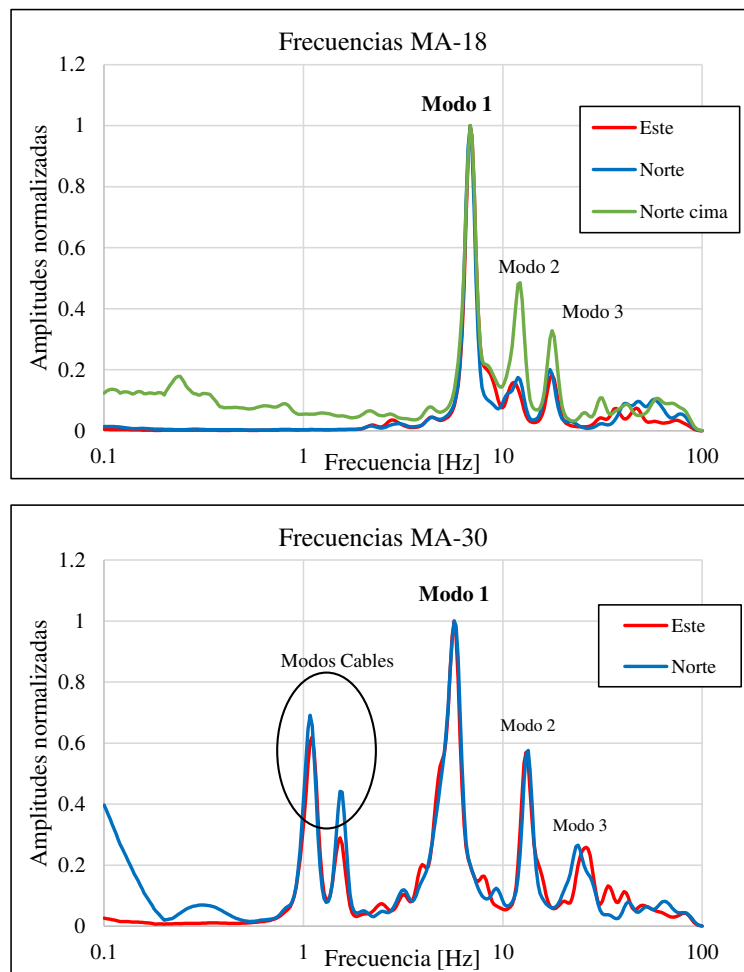


Figura 5: Espectros de frecuencias obtenidos experimentalmente. MA-18 y MA-30.

Tabla 1: Frecuencias fundamentales obtenidas experimentalmente y conversión a periodos.

Mástil arriostrado	f1 [Hz]	T1 [s]
MA-18	6.87	0.146
MA-30	5.75	0.174

5. SIMULACIONES NUMÉRICAS

Se representaron numéricamente las dos estructuras seleccionadas para las mediciones experimentales. Las modelaciones fueron llevada a cabo utilizando el software comercial de elementos finitos [SAP2000 \(2007\)](#). Las flexural fueron modeladas mediante el uso del elemento cable disponible en la biblioteca del software. El mástil reticulado fue modelado como viga-columna equivalente mediante el uso de elementos tipo frame, requiriendo para ello la determinación de las propiedades equivalentes a partir de la geometría original del mismo. Dichas propiedades fueron obtenidas de las expresiones desarrolladas por [Guzmán et al. \(2019\)](#). En [Tabla 2](#) se presenta los valores determinados para las propiedades utilizadas en la modelación del mástil reticulado como viga-columna equivalente.

Para la calibración del modelo se consideró como variable de ajuste la tensión de las riendas, bajo la hipótesis de asignar igual valor a cada una de ellas. Para el caso del modelo MA-18, la tensión resultó ser de 180 N, en tanto que para el caso MA-30 la tensión resultó ser de 500 N.

En la Figura 6 se muestran las primeras formas modales fundamentales de los mástiles considerados, en tanto que en la Tabla 3 se presentan las frecuencias y periodos resultantes.

Tabla 2: Propiedades equivalentes para la representación del mástil como viga-columna.

Propiedad	Notación	Valor	Unidad
Rigidez axial	EA	2.72E+08	N
Rigidez transversal	GA	1.59E+07	N
Rigidez flexional	EJ	1.14E+07	Nm ²
Inercia traslacional	ρA	1.44E+01	kg/m
Inercia flexional	ρJ	1.12E+01	kgm



Figura 6: Frecuencias fundamentales obtenidas numéricamente. MA-18 y MA-30.

Tabla 3: Frecuencias fundamentales obtenidas numéricamente y conversión a periodos.

Mástil arriostrado	f1 [Hz]	T1 [s]
MA-18	7.07	0.141
MA-30	5.71	0.175

Comparando los resultados de los periodos fundamentales (o frecuencias) obtenidos experimentalmente (Tabla 1) con aquellos determinados numéricamente (Tabla 3), se observa una correspondencia entre estos, lo que permite inferir una adecuada calibración de los modelos numéricos.

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación, se determinaron experimentalmente las frecuencias (periodos) fundamentales de dos mástiles arriostrados existentes de baja altura, a partir del monitoreo in-situ de los mismos. Al respecto y de lo evaluado, se permiten obtener las siguientes conclusiones:

- . La medición de vibraciones no implicó mayores dificultades, toda vez que se contó con el personal idóneo para el montaje del instrumental.
- . El tiempo requerido para el montaje de los acelerómetros, medición, y posterior desmontaje, resultó de aproximadamente 120 minutos en cada mástil arriostrado.
- . Lo anterior permite establecer que la técnica prevista para inferir el comportamiento dinámico del sistema estructural resulta expeditiva en su ejecución.
- . Los resultados experimentales no sólo permitieron determinar un parámetro dinámico de interés, sino que también, permitieron llevar a cabo la calibración de los modelos numéricos.
- . En la calibración de los modelos, la variable de ajuste resultó ser la tensión de las riendas, en donde se adoptó el mismo valor para cada una de ellas. Al respecto en futuras mediciones resultará de interés la evaluación in-situ del estado tensional imperante en las riendas.
- . De la comparación entre los periodos obtenidos experimental y numéricamente, se pudo establecer la adecuada calibración de los modelos computacionales.
- . Por último, se prevé continuar con mediciones experimentales en otros mástiles arriostrados existentes de baja altura y la posterior modelación de los mismos, generando así una base de datos que permita el ajuste de una ecuación desarrollada (Guzmán et al., 2021) para inferir el periodo fundamental de este tipo de estructuras consideradas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional por el financiamiento al proyecto PID UTN 8573, y al Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos CeReDeTeC, Facultad Regional Mendoza, Argentina.

REFERENCIAS

- Amiri G. Seismic sensitivity indicators for tall guyed telecommunication towers. *Computers and Structures*, 80(3-4):349–364, 2002.
- ANSI/TIA-222-G. *Structural Standard for Antenna Supporting Structures and Antennas*. Telecommunications Industry Association, 2006.
- ASCE/SEI-7-16. *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Reston, VA: ASCE, 2016.
- Blakeborough A., Grey M., y Williams M. Characterizing the seismic behavior of guyed masts. *Journal of Earthquake Engineering*, 12(1):36–53, 2008.
- El-Rashidy H. and El-Rakabawy M.F.N. y Zidan M. Response of guyed towers to simulated earthquake loading. *Advanced Technology in Structural Engineering*, páginas 1–11, 2000.
- Faridafshin F. y McClure G. Seismic response of tall guyed masts to asynchronous multiple-support and vertical ground motions. *Journal of Structural Engineering*, 134(8):1374–1382, 2008.
- Friswell M. y Mottershead J.E. *Finite element model updating in structural dynamics*, volumen 38. Springer Science and Business Media, 1995.
- Gentile C. y Ubertini F. Radar-based dynamic testing and system identification of a guyed mast. *In AIP conference proceedings*, 1457:318–325, 2012.
- Ghafari Osgoie M., McClure G., Zhang X., y Gagnon D. Assessing the variability of seismic response analysis of a tall guyed telecommunication tower with ambient vibration measurements. *In 15th World Conference on Earthquake Engineering 2012 (15WCEE)*, 6:4306–4314, 2012.

- Ghafari Oskoei S. y McClure G. New robust linearized seismic analysis method for tall guyed telecommunication masts. *Journal of Structural Engineering*, 138(4):502–513, 2012.
- Guzmán A., Calderón F., y Roldan V. Dynamic response of a guyed mast under seismic loadings. *International Journal of Science and Research*, 7(7):567–575, 2018.
- Guzmán A., Calderón F., Roldan V., Bazán M., y Rodríguez L. Inferencia del periodo fundamental de mástiles arriostrados de baja altura. *Mecánica Computacional*, 38(8):249–258, 2021.
- Guzmán A., Rosales M., y Filipich C. Continuous one-dimensional model of a spatial lattice deformation, vibration and buckling problems. *Engineering Structures*, 182:290–300, 2019.
- Harikrishna P., Annadurai A., Gomathinayagam S., y Lakshmanan N. Full scale measurements of the structural response of a 50 m guyed mast under wind loading. *Engineering Structures*, 25(7):859–867, 2003.
- Hensley G. y Plaut R. Three-dimensional analysis of the seismic response of guyed masts. *Engineering Structures*, 29(9):2254–2261, 2007.
- INPRES. *Publicación Técnica Nº 5: Zonificación sísmica de la República Argentina*. INPRES, 1977.
- Ismail A. Seismic assessment of guyed towers: A case study combining field measurements and pushover analysis. *HBRC journal*, 12(1):47–53, 2016.
- Konno K. y Ohmachi T. Ground motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremors. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(1):228–241, 1998.
- Madugula M., Wahba Y., y Monforton G. Dynamic response of guyed masts. *Engineering Structures*, 20(12):1097–1101, 1998.
- Rodden W. A method for deriving structural influence coefficients from ground vibration tests. *AIAA journal*, 5(5):991–1000, 1967.
- SAP2000. *Analysis Reference Manual v11*. Computers and Structures, Inc., CSI., Berkeley, California, USA, 2007.
- Saudi G. Structural assessment of a guyed mast through measurement of natural frequencies. *Engineering Structures*, 59:104–112, 2014.