

Comportamiento estructural de postes de hormigón pretensado para soporte de líneas eléctricas de media tensión en la provincia de Misiones

Maia A. Metrailler ^{a*}, Ricardo R. Miranda ^a, Alonso Vogel ^a, Javier Duarte ^b y Diego A. García ^b

^a Alumno del Departamento de Ingeniería Civil, Laboratorio de Ingeniería Civil (LIC), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

^b Docente del Departamento de Ingeniería Civil, Laboratorio de Ingeniería Civil (LIC), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

e-mails: maiaa2709@gmail.com, 3755557641.rr@gmail.com, garciadiego@fio.unam.edu.ar

Resumen

En la Provincia de Misiones, los postes de hormigón pretensado son elementos de uso preponderante en la construcción de líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica de media tensión. Se exhibe como finalidad del presente trabajo, el análisis del comportamiento estructural de postes de hormigón pretensado para líneas de media tensión. El análisis se lleva a cabo mediante la modelación de la estructura haciendo uso de un software comercial. Para dicho modelo se adoptan determinados modelos constitutivos de los materiales y se contempla el estado de tensión previa al que está sometido el poste, buscando efectuar una evaluación numérica de la respuesta a la acción de cargas de viento y a las cargas estáticas transmitidas por los cables conductores, en términos de desplazamientos máximos en la cima y esfuerzos o tensiones en el plano de contacto con el suelo que presentan estas estructuras soporte. Los valores de desplazamiento son comparados con las limitaciones que establece la Asociación Electrotécnica Argentina (AEA) y los de tensiones máximas son comparados con resultados de ensayos reportados por otros autores.

Palabras Clave –Comportamiento Estructural, Líneas eléctricas de Media Tensión, Postes de Hormigón Pretensado.

1. Introducción

Enmarcándose dentro del proyecto de investigación del Departamento de Ingeniería Civil de Facultad de Ingeniería de Oberá denominado: “Optimización comparativa, con restricciones de confiabilidad, de estructuras soporte para líneas de media tensión en madera y hormigón”, el presente trabajo abarca el estudio del comportamiento estructural de estructuras soporte de hormigón pretensado.

En 1995 Natarajan y Santhakumar [1], realizaron abordajes probabilísticos en el estudio de torres de transmisión con el objeto de obtener conocimiento de la confiabilidad del sistema estructural adoptado. Ese mismo año Rao [2] desarrolló una metodología para la optimización de torres de transmisión, y Desai et al [3], desarrollaron una formulación completa de un elemento finito de cable, en sus estudios de galope de conductores de líneas de transmisión, abordando desde entonces las no linealidades físicas y geométricas, así como el amortiguamiento no lineal. El colapso de torres de transmisión bajo acción del viento, fue analizado por Rodrigues [4] en 1999, avanzando hasta la modelación del conjunto torre-cadenas de aisladores-conductores. Más tarde, en 2004, la misma autora [5] amplió sus estudios sobre la mecánica de colapso aeroelástico, con importante aporte a la evaluación de la acción del viento bajo enfoques no determinísticos. A fin de representar numéricamente la acción dinámica del

viento horizontal, Ribeiro de Oliveira [6] utilizó en 2006 un modelo de comportamiento, presentado como proceso estocástico con correlación temporal y espacial, apta para su utilización en sistemas estructurales con desarrollo lineal en el espacio. Con el objeto de aportar respuestas a esas cuestiones, en una etapa anterior, en el Departamento de Ingeniería se ha abordado el estudio de los sistemas estructurales para líneas en el nivel de 132kV con soportes de hormigón armado y pretensado. La producción científica del grupo se manifiesta en la participación de congresos [7]-[10]. En dichos trabajos se aborda el estudio del comportamiento de estructuras de soporte de líneas de transmisión eléctrica de hormigón armado y pretensado, la simulación de la carga estocástica del viento, la representación numérica del comportamiento de cables conductores y la optimización de dichas estructuras.

Las estructuras que se emplean en la suspensión de líneas de energía eléctrica en la provincia de Misiones, están compuestas por postes a modo de soporte, que suspenden los conductores y otros elementos como ser hilos de guardia, cadenas de aisladores, crucetas y ménsulas de hormigón armado, solicitados a la acción dinámica estocástica del viento. Las secciones del poste pueden ser de madera u hormigón; en el caso de los postes de hormigón, estos contienen en su interior una capa radial de armaduras activas pretensadas antes del hormigonado y una capa de armadura pasiva compuesta por barras de acero ADN 420.

Los fenómenos climáticos que involucran al viento como una de sus variables originan fallas en las líneas con consecuentes caídas de servicio. Esta acción estocástica del viento requiere una respuesta conveniente por parte de los elementos constituyentes del sistema soporte. Una consecuencia posible es la deformación excesiva en la cima ocasionada por la acción de las cargas mencionadas, otra, el agotamiento de la capacidad resistente a flexión compuesta de la sección anular del poste de hormigón pretensado que también incluye armadura pasiva. Para contemplar estas situaciones adversas este trabajo tiene como objetivo el análisis del comportamiento estructural y de estabilidad del poste a través de un modelo numérico que considere las propiedades de los materiales existentes y su comportamiento hasta la falla, como así también las condiciones ambientales del área y las configuraciones habituales de elementos usualmente implementados por parte de los proveedores del servicio de energía eléctrica. Como parámetros de respuesta se tienen el máximo desplazamiento en la cima o el momento flector en la sección de base del poste, por ejemplo, cuyos valores pueden ser comparados con los admisibles o límites para la salida de funcionamiento o la falla de los materiales.

2. Materiales y Métodos

El sistema soporte a analizar está formado por un poste de hormigón pretensado cuya vinculación con la superficie corresponde a un empotramiento. El modelo que lo representa consta de las cargas originadas por el peso de los conductores y la acción del viento considerada siguiendo un patrón estocástico. Seguidamente se presentan los elementos de dicho sistema estructural.

2.1. Descripción del poste y de las cargas transmitidas por los cables conductores

Para un poste de hormigón pretensado troncocónico hueco de calidad H30, utilizado en las redes eléctricas de media tensión de la provincia de Misiones, las dimensiones adoptadas para el análisis son las que se estipulan a continuación: espesor de 0.05 m y diámetro exterior de 0.16 m en la cima, espesor de 0.09 m y diámetro exterior de 0.52 m en la base, pendiente de 1,5% y altura de 12 m desde la superficie de contacto con el suelo hasta su extremo superior. El poste posee en su interior armadura pasiva ADN 420 constituida por 20 barras de diámetro 0.12m, asimismo 15 cordones de armadura activa APL 1700. Las cargas consideradas parte del sistema soporte son las propias de las líneas eléctricas construidas por EMSA (Electricidad de Misiones Sociedad Anónima): peso de cruceta igual a 297.73 N; peso del hilo de guardia igual a 300.19 N; peso del conductor, de los herrajes, aisladores y morcetas igual a 754.88 N, el peso del poste igual a 3482.55 N y las cargas producidas por la acción del viento considerando los lineamientos del reglamento CIRSOC 102 [11] y la componente fluctuante de la fuerza del viento. Además, en el análisis de cargas se consideró el momento flector generado por la distancia de aplicación de estas cargas puntuales. En la Fig. 1 se presenta un esquema de la vinculación de los conductores eléctricos con la parte superior del poste.

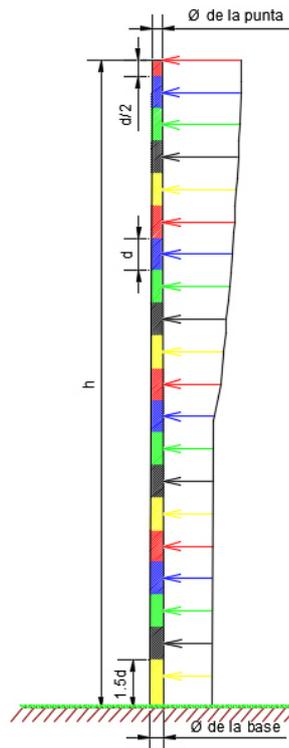


Fig. 1. Esquema del poste y la ubicación/distribución de cargas adoptado para contemplar la acción del viento sobre la estructura.

2.2. Descripción de las propiedades materiales consideradas para el poste de hormigón

El hormigón en este tipo de estructuras soporte de líneas de energía eléctrica de media tensión es de tipo H30, cuyos parámetros materiales se hallan estipulados en el Reglamento CIRSOC 201[12]. En el estudio se utilizan el valor del módulo de elasticidad igual a 25742 N/mm². En cuanto hace referencia al acero de la armadura pasiva, posee una tensión de fluencia igual a 420 N/mm² y una tensión de rotura considerada de 500 N/mm², por otra parte, para la armadura activa se estipula un valor de tensión de fluencia igual a 1633 N/mm² y una tensión de rotura de 1850 N/mm². En ambos casos el módulo de elasticidad longitudinal es de 200000N/mm². La fuerza de pretensado con la que se somete a los cordones interiores es de 1000KN.

2.3. Descripción de las condiciones de vinculación consideradas para el poste

El poste se considera empotrado en el suelo de fundación, por tanto, se considera que no influye el suelo circundante en las restricciones a la rotación y el desplazamiento.

2.4. Descripción de los modelos constitutivos adoptados para los materiales

Modelo Constitutivo para el hormigón confinado.

Para este trabajo se considera al hormigón como un material isotrópico. La curva tensión deformación del hormigón ($f_c - \epsilon_c$) envolvente en compresión se ha tomado del libro de Collins y Mitchell [13], que se muestra en la Fig. 2 y considera el incremento en la resistencia a compresión del hormigón al contemplar la presión de confinamiento que producen las armaduras transversales:

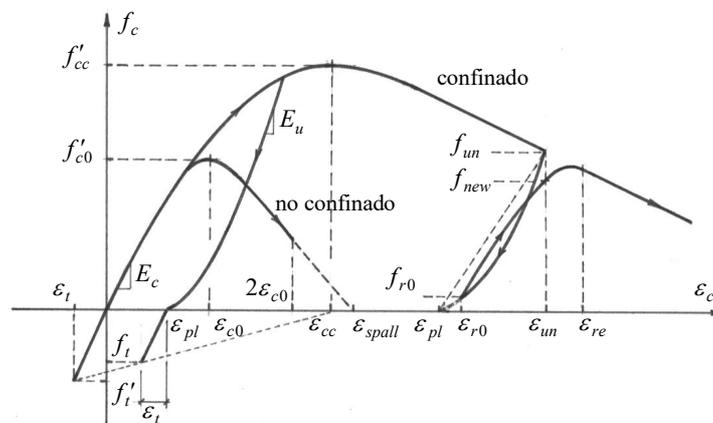


Fig. 2: Relación Constitutiva del hormigón.

$$f_c = \frac{f'_{cc} x r}{r-1+x^r} = f'_{c0} \frac{\left[2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_r}{f'_{c0}} - 2 \frac{f_r}{f'_{c0}} - 1.254} \right] x r}{r-1+x^r}$$

$x = \varepsilon_c / \varepsilon_{cc}$: Deformación normalizada respecto de ε_{CC} .

$r = E_c / (E_c - E_{sec})$: Factor de corrección por cambio en el módulo de elasticidad.

$E_{sec} = f'_{cc} / \varepsilon_{cc}$: Valor máximo del módulo de elasticidad del Hormigón.

$f'_{c0} = 0.85 f'_c$: Máxima Resistencia del Hormigón no confinado. f'_c es la resistencia especificada a compresión en el hormigón.

$f'_{cc} = K_{cc} f'_{c0}$: Máxima Resistencia del hormigón confinado.

$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c0} (1 + R(K_{cc} - 1))$: Máxima deformación del hormigón confinado.

$R = 5$ factor de ajuste, adoptado en forma arbitraria.

$K_{cc} = \frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_r}{f'_{c0}} - 2 \frac{f_r}{f'_{c0}} - 1.254}$ es el valor que corrige la resistencia

del hormigón por el cambio a situación de confinamiento.

El modelo constitutivo queda finalmente:

$$f_c = \frac{f'_{cc} x r}{r-1+x^r} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{CC} \cdot E_{SEC} + (E_C - E_{SEC}) \cdot \varepsilon_C \left(\frac{E_C}{E_C - E_{SEC}} \right)} E_C \cdot \varepsilon_C$$

Modelo Constitutivo para el acero pasivo ADN.

En cuanto al comportamiento del acero pasivo, existen modelos que van desde el caso elástico lineal, el cual es útil solo en estudios de comportamiento bajo cargas de servicio, modelos de comportamiento rígido-plástico y elasto-plástico, en los cuales respectivamente se desprecian las deformaciones elásticas frente a las plásticas y viceversa, hasta llegar al modelo tri-lineal el cual considera el cambio en la tensión producto del endurecimiento de la pieza por deformación, para este caso se ha tomado el modelo publicado en el libro de Collins y Mitchell [13], el cual discrimina tres zonas en el mismo: la primera de carácter lineal conocida como el módulo de elasticidad longitudinal del material; la segunda zona es una meseta conocida como zócalo de fluencia (en la cual la deformación aumenta a tensión constante), mientras que la tercera zona contempla la rama de endurecimiento por deformación (la ley de variación es obtenida en forma experimental), como se observa en la Fig. 3.

La tensión calculada en el acero por este modelo constitutivo, se ve afectada por parámetros que representan la relación entre valores últimos o de rotura, y valores del límite de fluencia.

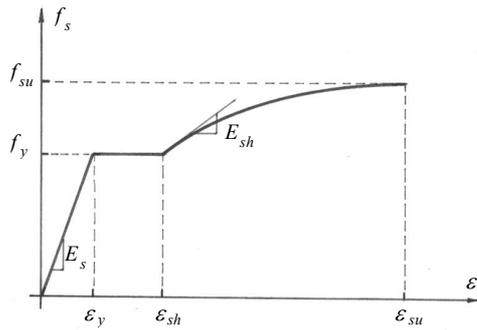


Fig. 3. Modelo constitutivo para acero de hormigón estructural.

$$f_s = E_s \varepsilon_s \quad 0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_y$$

$$f_s = f_y \quad \varepsilon_y \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sh}$$

$$f_s = f_{su} + (f_y - f_{su}) \left| \frac{\varepsilon_{su} - \varepsilon_s}{\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}} \right|^p \quad \varepsilon_{sh} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su}$$

donde $p = E_{sh} (\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}) / (f_{su} - f_y)$

Siendo:

E_s : Módulo de elasticidad del acero ADN.

E_{sh} : Módulo tangente al inicio del endurecimiento.

f_y : Tensión de fluencia.

f_{su} : Tensión última;

ε_{sh} : Deformación al final del plafón de fluencia.

ε_{su} : Deformación última a f_{su} .

Modelo Constitutivo para el acero activo.

Como característica principal esta tipología de acero no posee meseta de fluencia ni zona de endurecimiento, razón por la cual su fragilidad es mayor, a pesar de que su resistencia supera a la del acero ADN. Existen varias relaciones que corrigen al producto E_p por E_{ps} .

Para representar el comportamiento del acero de pretensado (activo), se propone la relación enunciada por Collins y Mitchell [13], la cual opera sobre la base de coeficientes A, B y C de corrección de la ecuación, en la cual la ductilidad del mismo depende del correcto ajuste de estos coeficientes ya que son determinados en forma experimental; la curva característica es de tipo exponencial (Fig. 4).

$$f_p = E_p \varepsilon_{ps} \left[A + \frac{1 - A}{\left[1 + (B \varepsilon_{ps})^C \right]^{1/C}} \right]$$

Donde:

f_p : Tensión en el acero

E_p : Modulo de elasticidad del acero

ε_p : Deformación última a f_p .

A, B, C : constantes de corrección experimental.

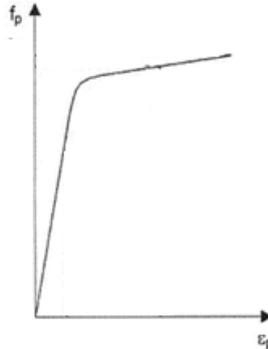


Fig. 4. Modelo constitutivo para acero de hormigón pretensado.

2.5 Descripción del procedimiento de modelación numérica

Una vez creado el elemento, asignados las secciones y materiales se somete a la estructura en primer lugar a una corrida “MODAL” para obtener sus frecuencias naturales de vibración, las cuales son requeridas para calibrar otros patrones de carga. Posteriormente, ya distribuidas las cargas puntuales a lo largo de la altura, separadas por un valor de 0,6 m, se aplica un pre esfuerzo a los elementos que componen la armadura activa. En lo que hace referencia a las cargas de viento, las fuerzas aplicadas corresponden a la velocidad básica del viento establecida por el Reglamento CIRSOC 102 para la zona, 45 m/s, mientras que el valor correspondiente a la fuerza de pretensado se adopta igual a 1000KN.

Para la validación del modelo se realiza una corrida contemplando los efectos del pretensado, el peso propio y el viento propiamente dicho, pudiéndose obtener desplazamientos en la cima y valores de momento y esfuerzo axial de compresión en la base.

3. Resultados Numéricos

En la siguiente sección se muestran los resultados numéricos obtenidos a través del software SAP 2000. Primeramente, el poste deformado luego de la acción de las cargas, en la Fig. 5.

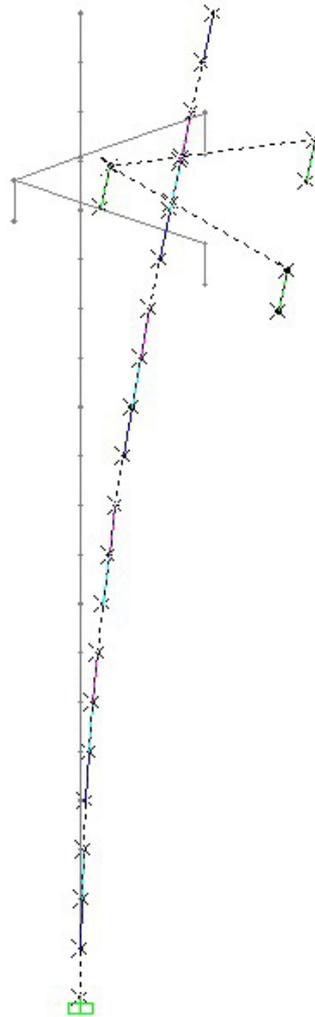


Fig. 5. Deformaciones obtenidas a lo largo del poste a través del software de elementos finitos SAP 2000.

En el caso de los desplazamientos obtenidos, al cabo de 300 segundos el valor medio obtenido es de 0,05 m alcanzando un máximo de 0,08 m. La Asociación de Electrotecnia Argentina (AEA) [14] dispone de límites o desplazamientos horizontales máximos admisibles. Para estructuras de retención el límite es 3.5% de la altura poste, mientras que para estructuras de suspensión la limitación aumenta al 6% de la altura del poste. Con estos valores se comparan los desplazamientos que sufre la estructura ante las cargas actuantes. En el caso del poste en estudio los límites para los desplazamientos horizontales son iguales a 0.42 m y 0.72 m para estructuras de retención y suspensión, respectivamente. En la Fig. 6 se muestran los resultados obtenidos para una velocidad del viento de 45 m/s. Se puede observar que los resultados se encuentran por debajo de los límites establecidos por la AEA para postes de retención y de suspensión. Indicando esto una muy baja probabilidad (casi nula) de superar dichos límites.

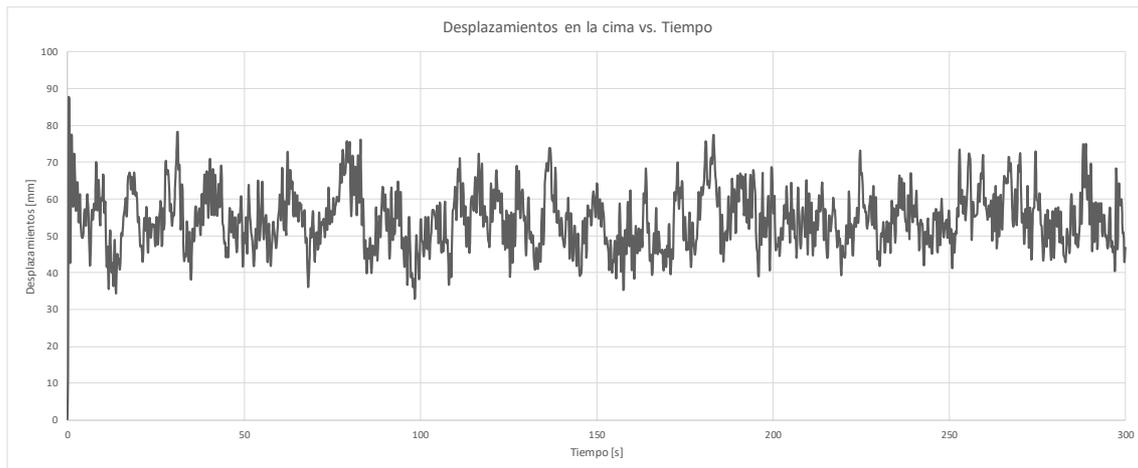


Fig. 6. Desplazamientos vs. Tiempo en la cima del poste (12m).

En la Fig. 7 se muestran los valores de Momento en la base el cual arroja un valor medio de 13,91 KNm y un valor máximo de 20,84 KNm. Por su parte, el esfuerzo normal de compresión presenta una muy pequeña variación y su valor se mantiene alrededor de los 969,5 KN, posible de ser observada en la Fig. 8. Con el objetivo de comparar las tensiones de trabajo alcanzadas en la base con las tensiones admisibles de los materiales, se requiere un análisis más exhaustivo, dado que la sección correspondiente a la base (en contacto con el suelo) está compuesta por el material hormigón y las armaduras activas y pasivas, debiéndose contemplar la distribución de esfuerzos entre estos materiales.

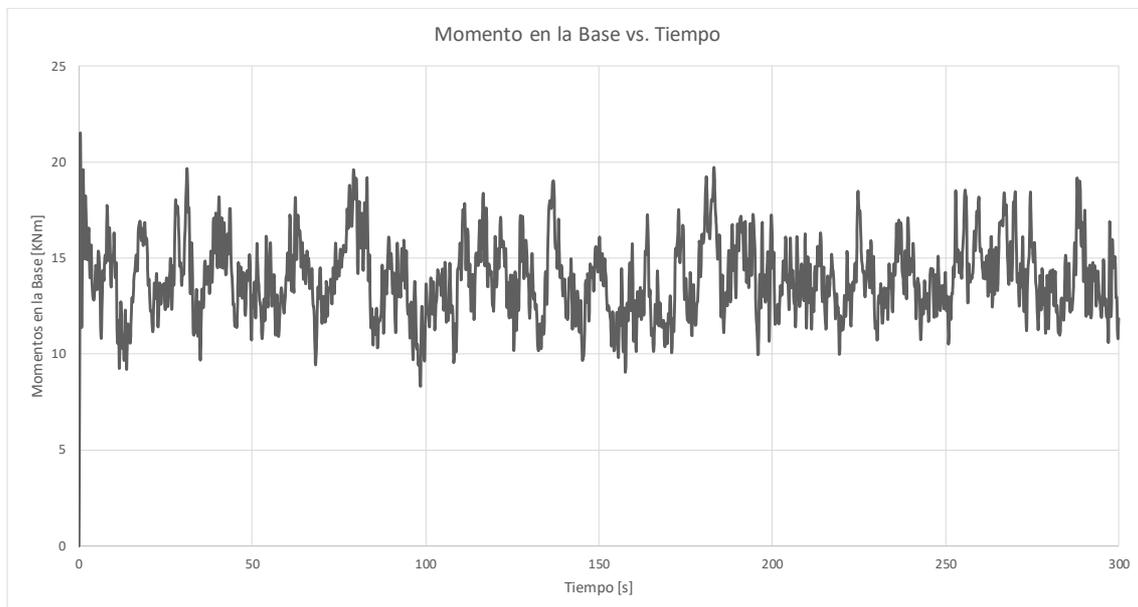


Fig. 7. Momento vs. Tiempo en la base del poste.

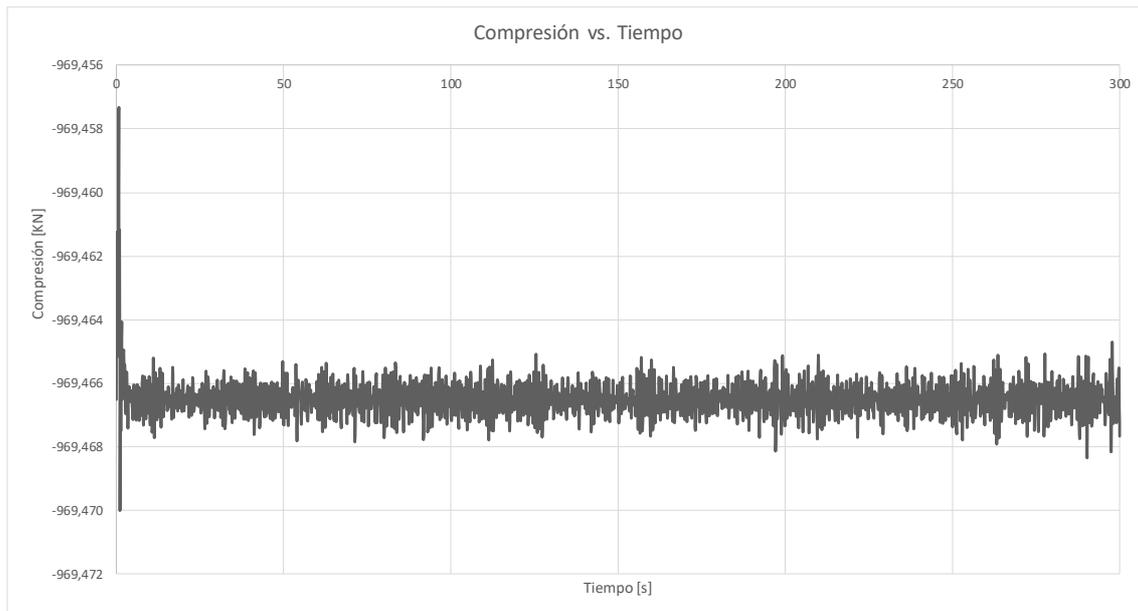


Fig. 8. Compresión vs. Tiempo en la base del poste.

4. Conclusiones

La generación de este modelo y la posibilidad de realizar una corrida de validación de resultados contemplando la acción estocástica del viento, lo convierte en un punto de partida para ampliar el espectro de análisis, lo que hace referencia a corridas para otro rango de velocidades básicas. A su vez, para un mayor número de simulaciones podrá determinarse el incremento de los valores de desplazamiento conforme se aumente la velocidad, como así también la respuesta en la base ante la modificación de las fuerzas actuantes.

Teniendo en cuenta las limitaciones establecidas por los entes reguladores de este tipo de elementos, se debe prestar atención a que exista un aumento de importante magnitud de los desplazamientos a medida que la velocidad del viento aumenta desde valores que pueden observarse comúnmente hasta aquellos que suelen presentarse con menor frecuencia, a pesar de que las limitaciones se encuentren muy por encima de los valores observados.

Etapas posteriores de trabajo incluirán la obtención de tensiones de trabajo por material y la comparación del desempeño entre ellos. Asimismo, se podrá realizar una comparativa entre los valores límites o admisibles para cada material contemplando probabilidades de falla de cada uno de los componentes anteriormente mencionados.

Trabajos futuros deben incluir la representación de la fuerza que los cables transmiten al poste al recibir los primeros el impacto del viento. De igual manera, los resultados presentados en este trabajo constituyen el inicio en el análisis del comportamiento estructural de postes de hormigón pretensado, ya que a partir de los modelos armados es posible avanzar en estudios de optimización estructural.

5. Referencias

- [1] NATARAJAN, K.; SANTHAKUMAR, A. R., "Reliability-based Optimization of Transmission Line Towers", Computers and Structures, vol. 55. p. 387-403, 1995.
- [2] RAO, G.V.: "Optimum Designs for Transmission Line Towers", Computers and Structures, vol. 57. p. 81-92. 1995.

- [3] DESAI, Y. M.; YU, P., POPPLEWELL, N.; SHAH, A. H.: “Finite Element Modeling of Transmission Line Galloping”, *Computers and Structures*, vol. 57. p. 407-420. 1995.
- [4] RODRIGUES, R. S.: “Colapso de Torres TEE sobAcao do Vento”, Tesis de Maestría, COPPE/UFRJ. Río de Janeiro, Brasil. 1999
- [5] RODRIGUES, R. S.: “Mecânica do Colapso Aeroelástico de Torres TEE”, Tesis de Doctorado, COPPE/UFRJ. Río de Janeiro, Brasil. 2004
- [6] RIBEIRO DE OLIVEIRA, M. I.: “Análise estrutural de torres de transmissão de energia submetidas a efeitos dinâmicos induzidos pelo vento”. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2006
- [7] DETKE, F.R.; REINERT, H.O.; DUARTE, J.A.; PIZZUTTI, H.D.; FANK, P.Y.; GOLEMBA, J.L.; MÖLLER, O.: “Análisis estructural por elementos finitos aplicado a sistemas de transmisión de energía eléctrica en la Provincia de Misiones, Argentina”. XIX Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones - ENIEF 2011”.
- [8] DETKE, F.R.; DUARTE, J.A.; MÖLLER, O.: “Respuesta estructural de sistemas de transmisión de energía eléctrica en la Provincia de Misiones, Argentina”. 22 Jornadas de Ingeniería Estructural, Asociación de Ingenieros Estructurales. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 2012
- [9] DETKE, F.R.; DUARTE, J.A.; PIZZUTTI, H.; GRUBER, A.; MORALES, V.; VIVANCO, C.; GOLEMBA, J.; MÖLLER, O.: “Optimización de postes de hormigón pretensado para líneas de transmisión eléctrica”. XX Congreso sobre Métodos Numéricos y sus aplicaciones. Mendoza, Argentina 2013.
- [10] AGUIRRE, M.A.; DETKE, F.R.; MERCANTI, J.A.; MÖLLER, O.: "Interacción dinámica entre conductores y postes en líneas de transmisión eléctrica". XXI Congreso sobre Métodos Numéricos y sus aplicaciones. Bariloche, Río Negro, Argentina, 2014.
- [11] CIRSOC 102. Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones. Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)- Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (CIRSOC), Buenos Aires, 2005.
- [12] CIRSOC 201. Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón. Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)- Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (CIRSOC), Buenos Aires, 2005.
- [13] COLLINS, M. P.; MITCHELL, D. (1997). *Prestressed concrete structures*. Response Publications.
- [14] Reglamentación de Líneas Aéreas Exteriores de Media Tensión y Alta Tensión AEA 95301. Asociación Electrotécnica Argentina, Noviembre 2007.