

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

Maia A. Metrailler^{a*}, Ricardo R. Miranda^a, Gerardo M.López^a, Diego A. García^b

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

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

e-mails: maiaa2709@gmail.com, 3755557641.rr@gmail.com, gerardomatiaslopez3.14@gmail.com,
garciaDiego@fio.unam.edu.ar

Resumen

En el noreste argentino, especialmente en la Provincia de Misiones, la construcción de líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica en el nivel de media tensión ha sido predominantemente resuelta mediante la utilización de postes de madera tratada. Se presenta como objeto de análisis del presente trabajo, el estudio del comportamiento estructural de postes de madera de *Eucalyptus grandis* para líneas de media tensión. Se busca estimar numéricamente mediante un software comercial, los desplazamientos máximos que presentan estas estructuras soporte en su extremo superior ante la acción de cargas de viento consideradas de forma estática a partir de los lineamientos establecidos por el Reglamento Argentino CIRSOC 102 y las cargas estáticas transmitidas por los cables conductores. Además, se obtienen las tensiones máximas que los esfuerzos generan en el plano de contacto con el suelo. El Módulo de Elasticidad del material del poste se considera según su distribución de probabilidad y se consideran también distintas condiciones de vinculación de la estructura con el suelo. 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 – Postes de Madera, Comportamiento Estructural, Líneas eléctricas de Media Tensión.

1. Introducción

Este trabajo se enmarca 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”. Particularmente este trabajo trata sobre el estudio del comportamiento estructural de estructuras soporte de madera.

La literatura técnica informa de los estudios que se vienen realizando a nivel internacional, con mayor intensidad desde los años 80’, con aportes al conocimiento del comportamiento estructural de líneas de transmisión sometidas a la acción de cargas aleatorias, de su respuesta ante acciones dinámicas producidas por acción de viento y sismos, y de modernos enfoques de análisis de confiabilidad en presencia de variables de comportamiento no determinístico.

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

*Autor en correspondencia.

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. El grupo de investigación comienza sus actividades en el año 2008 con la formulación del proyecto de investigación “Optimización de estructuras de hormigón para líneas aéreas de energía eléctrica con restricciones de confiabilidad”, proyecto que finaliza en diciembre del 2011. Siguiendo la misma temática, las actividades continúan a partir de febrero del 2012 con la aprobación del proyecto “Estructuras de hormigón bajo acciones dinámicas: Optimización con restricciones de confiabilidad”, con fecha de finalización en diciembre del 2014. La producción científica del grupo se manifiesta en la participación de congresos nacionales [10]-[15] e internacionales [16]. 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.

Particularmente, en este trabajo se aborda el estudio de la respuesta estructural de postes de madera de *Eucalyptus grandis* modelados numéricamente. Relacionados a este tipo de postes, en Torrán et al. [17] se presentan resultados de ensayos estáticos realizados en postes para determinar su resistencia a flexión y el módulo de elasticidad. Los resultados de estos ensayos fueron volcados luego en el Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601[18]. En Gonzalez de Paz et al. [19] se presenta un modelo numérico que considera la variabilidad en las propiedades del material y en la carga estocástica del viento. En el presente trabajo se presenta un estudio numérico realizado en el software comercial ABAQUS acerca del comportamiento estructural de postes de madera para líneas de media tensión. Las propiedades del material se consideraran según su distribución de probabilidad y las cargas actuantes según los lineamientos de la normativa. De esta manera se compararan los resultados de desplazamientos máximos en la cima del poste con los límites establecidos por la Asociación Electrotécnica Argentina (AEA) [20] y de tensiones máximas en la línea de empotramiento con resultados experimentales reportados en [17]. Como resultado de estudio se obtienen las velocidades para las cuales existe una mayor probabilidad de falla del sistema en términos de desplazamientos máximos y de tensiones que superen la resistencia del material.

2. Materiales y Métodos

El sistema estructural a estudiar está formado por el poste de madera de *Eucalyptusgrandis* con su vinculación correspondiente y las cargas originadas por el peso de los conductores y la acción del viento considerara en forma estática. En las siguientes secciones se presenta cada uno de los componentes del sistema estructural en estudio.

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

Las dimensiones adoptadas para el análisis son para un poste de madera utilizado en las redes eléctricas de Misiones: diámetro medio adoptado de 0.106 m, 14 m de altura total del poste, 2.4 m del mismo se encuentra bajo tierra y 11.6 m desde la superficie de la tierra hasta su extremo superior. Como así también las cargas son de las líneas eléctricas construidas por EMSA (Electricidad de Misiones Sociedad Anónima). Las cargas consideradas propias del sistema soporte son: 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 y el peso del poste igual a 3482.55 N. 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.

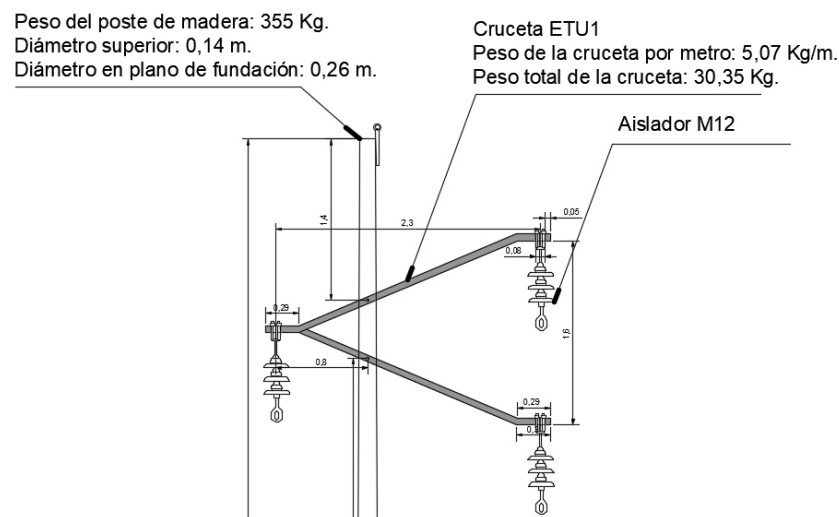


Fig. 1. Esquema de vinculación entre líneas de energía eléctrica de media tensión y el poste de madera.

2.2. Descripción de la carga de viento y su aplicación sobre el poste de madera

El análisis de las cargas de viento se realizó conforme a lo especificado en el Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones (Reglamento CIRSOC 102 [21]). Partiendo de la fórmula de presión:

$$q_z = 0,613 * K_z * K_{zT} * K_D * V^2 * I \quad (1)$$

en donde: q_z es la presión dinámica, K_z es el coeficiente de exposición para la presión dinámica, K_{zT} es el factor topográfico, K_D es el factor de direccionalidad del viento, V es la velocidad básica del viento e I es el factor de importancia. Para la selección del factor de exposición K_z , se consideró el tipo de exposición C el cual corresponde a terrenos abiertos con obstrucciones dispersas, con alturas generalmente menores que 10 m. Esta categoría incluye campo abierto plano y terrenos agrícolas. El factor topográfico K_{zT} , tiene un valor igual a 1, porque la topografía es llanura por hipótesis. El factor de direccionalidad del viento K_D vale 0,85. La velocidad básica del viento V , se plantea como variable y obteniendo resultados para 4 valores de velocidad diferentes (5, 10, 15 y 20 m/s). El factor de importancia I se consideró igual a 1,15. Además, del mismo reglamento extraemos la fórmula siguiente para el cálculo de la fuerza debido a la acción del viento:

$$F_z = q_z * G * C_F * A_F \quad (2)$$

en donde: G es el factor de efecto de ráfaga considerado igual a 0.85, C_F es el coeficiente de fuerza neta igual a 2 y A_F es el área proyectada normal al viento el cual depende de la influencia de cada una de las 20 fuerzas en las que se ha discretizado la fuerza total. En la Fig. 2 se muestra la distribución adoptada de las 20 fuerzas a lo largo de la altura del poste de madera.

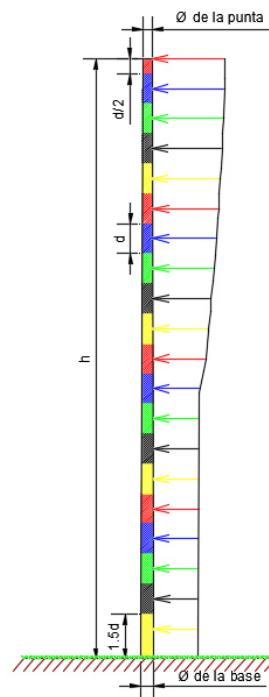


Fig. 2. Esquema de discretización utilizado para la aplicación de las cargas producidas por la acción del viento.

2.3. Descripción de las propiedades materiales consideradas para el poste de madera

La madera utilizada en este tipo de estructuras soporte de líneas de energía eléctrica de media tensión es el *Eucalyptus grandis*, cuyos parámetros materiales se hallan estipulados en el Reglamento CIRSOC 601 [18]. En el estudio se utilizan el valor medio del módulo de elasticidad igual a 9500 N/mm², el percentil 5 % igual a 6400 N/mm² y el percentil 95 % igual a 12600 N/mm². Además, durante la simulación numérica se verifica que la máxima tensión en la sección no sobrepase los valores reportados en [17].

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

Para contemplar el vínculo que difiere de un empotramiento perfecto en el plano suelo – poste, se recurre a incluir una serie de restricciones al movimiento que impone el suelo a la estructura [22]-[23]. Las expresiones consideran el módulo de Elasticidad del suelo (E_f) considerado igual a 20000 kPa, el módulo de Poisson del suelo (μ_f) igual a 0.28 y el ancho $2b$ de la fundación que actúa de soporte. En este caso, para la base se adopta un cuadrado de 1m por 1m. Para las restricciones rotacionales, de desplazamiento vertical y de desplazamiento horizontal, se tienen las siguientes expresiones, respectivamente:

$$k_{\theta} = \frac{2 \times E_f \times b^3}{(1 + \mu_f) \times (1 - \mu_f)} = 5,425 \times 10^6 Nm \quad (3)$$

$$k_V = \frac{4,3 \times E_f \times b}{2 \times (1 + \mu_f) \times (1 - \mu_f)} = 23,33 \times 10^6 Nm \quad (4)$$

$$k_H = 2 \times E_f \times b = 20 \times 10^6 Nm \quad (5)$$

Se adoptan 4 casos de condición de vínculo: en la primera de ellas asume un empotramiento perfecto (CASO 1), en el segundo caso establece la posibilidad de giro a través de implementar un resorte rotacional ubicado en la base del poste (CASO 2). El tercer caso asume, además del resorte rotacional, un resorte en la dirección horizontal (CASO 3), mientras que en la última de las posibilidades se contempla además la presencia de un resorte en la dirección vertical (CASO 4).

3. Resultados Numéricos

En la siguiente sección se muestran los resultados numéricos obtenidos a través del software ABAQUS. En la Fig. 3 se muestra un ejemplo de los desplazamientos obtenidos a lo largo del poste para uno de los casos considerados.

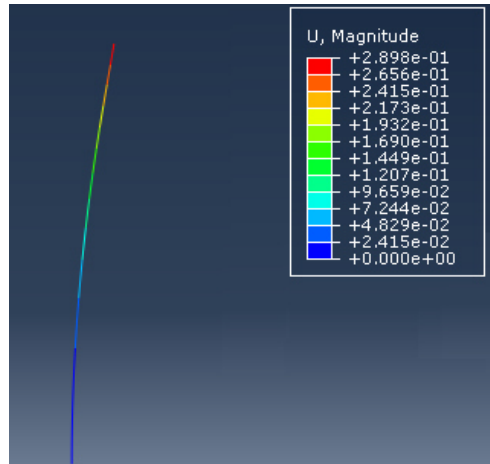


Fig. 3. Desplazamientos obtenidos a lo largo del poste a través del software de elementos finitos ABAQUS.

La Asociación de Electrotecnia Argentina (AEA) [20] 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 0.406 m y 0.696 m para estructuras de retención y suspensión, respectivamente. En la Fig. 4 se muestran los resultados obtenidos para una velocidad del viento de 5 m/s. Se puede observar que los resultados considerando los distintos valores del Módulo de Elasticidad (E0.05, Em y E0.95) 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. También se observa que los desplazamientos aumentan ligeramente en los casos de vinculación 2, 3 y 4; pero la diferencia entre ellos es despreciable al igual que la diferencia entre los resultados para estas restricciones y las obtenidas considerando empotramiento perfecto (Caso 1).

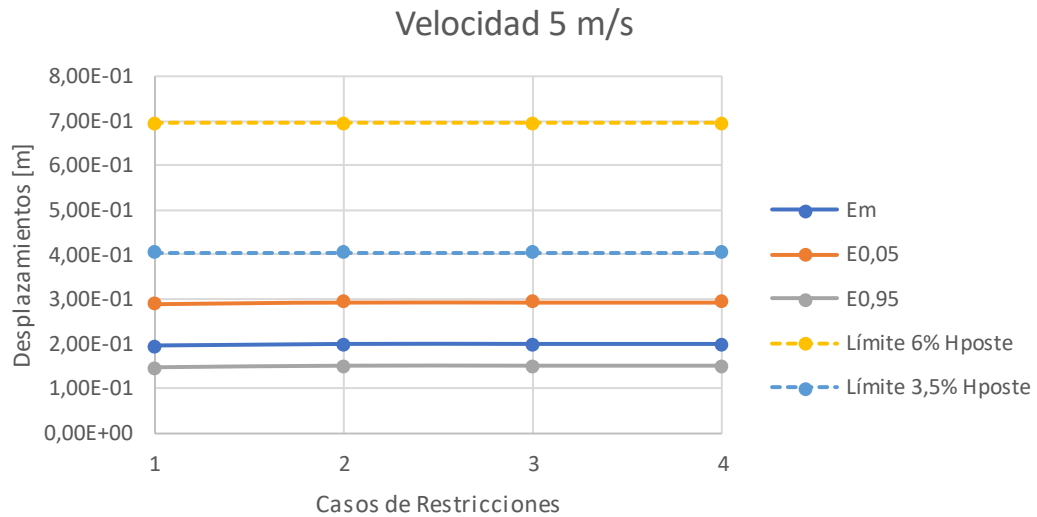


Fig. 4. Comparación de los desplazamientos obtenidos en la cima del poste para una velocidad del viento de 5 m/s con los límites establecidos por la AEA considerando distintos valores del Módulo de Elasticidad y de restricciones en la fundación del poste.

En la Fig. 5 se presentan los resultados obtenidos para una velocidad del viento de 10 m/s, se puede observar que hay una baja probabilidad ligeramente inferior al 5 % de superar los desplazamientos máximos en el caso de estructuras de retención. En la Fig. 6 se presentan los resultados obtenidos para una velocidad del viento de 15 m/s, en este caso se observa una probabilidad muy superior al 5 % de superar los desplazamientos máximos en el caso de estructuras de retención. En la Fig. 7 se presentan los resultados obtenidos para una velocidad del viento de 20 m/s, se puede observar que una probabilidad superior al 50 % de superar los desplazamientos máximos en el caso de estructuras de retención, lo cual ya implica un alto riesgo para asegurar la efectividad del servicio de transmisión de energía eléctrica. Cabe mencionar que en ningún caso se superó el límite establecido para estructuras de suspensión, aunque se obtuvieron grandes desplazamientos para las velocidades del viento mayores consideradas. Según la escala Fujita de clasificación de tornados, la velocidad del viento para un tornado que produce daños leves (EF0) se encuentra en el rango entre 29 m/s y 38 m/s. Lo cual indica que el límite superior de velocidad adoptado representa un evento menor pero de magnitud considerable.

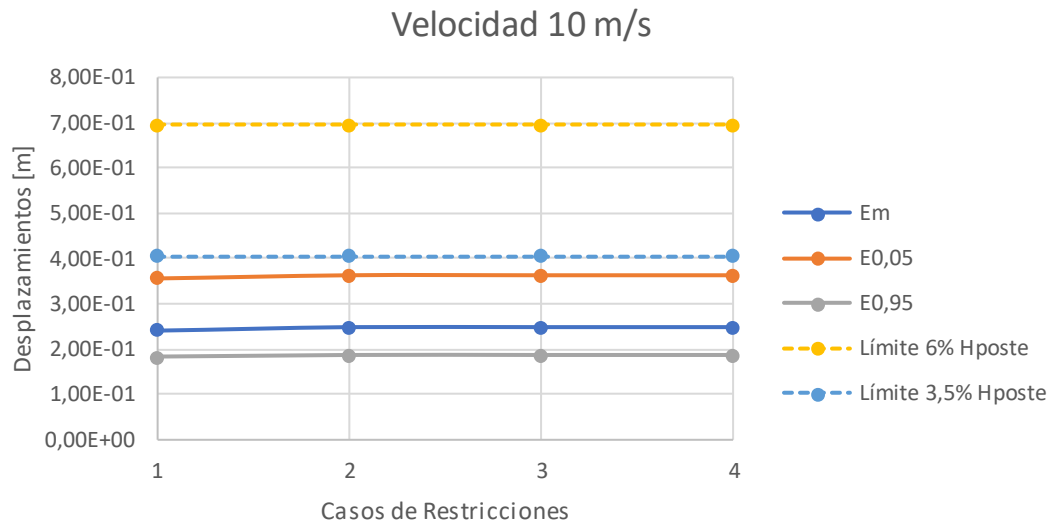


Fig. 5. Comparación de los desplazamientos obtenidos en la cima del poste para una velocidad del viento de 10 m/s con los límite establecidos por la AEA considerando distintos valores del Módulo de Elasticidad y de restricciones en la fundación del poste.

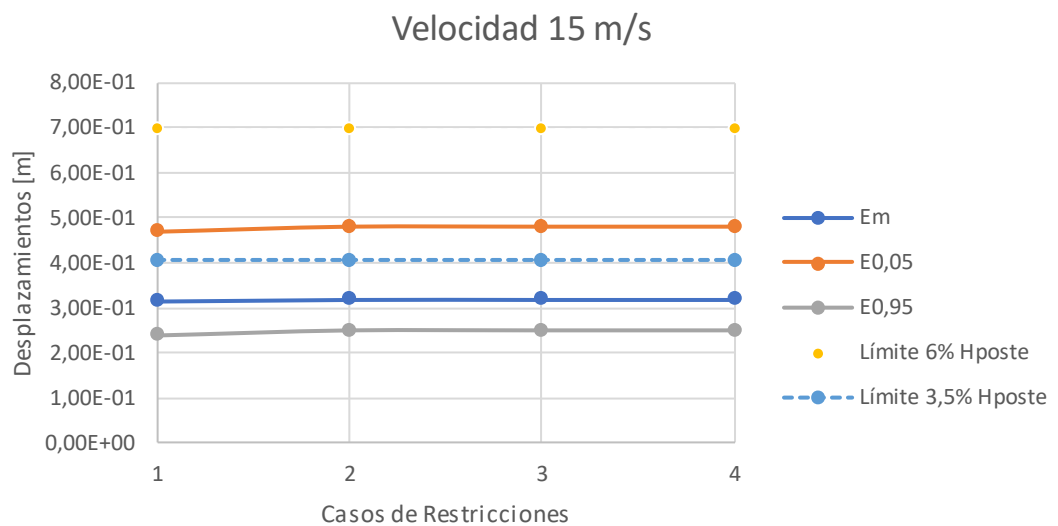


Fig. 6. Comparación de los desplazamientos obtenidos en la cima del poste para una velocidad del viento de 15 m/s con los límite establecidos por la AEA considerando distintos valores del Módulo de Elasticidad y de restricciones en la fundación del poste.

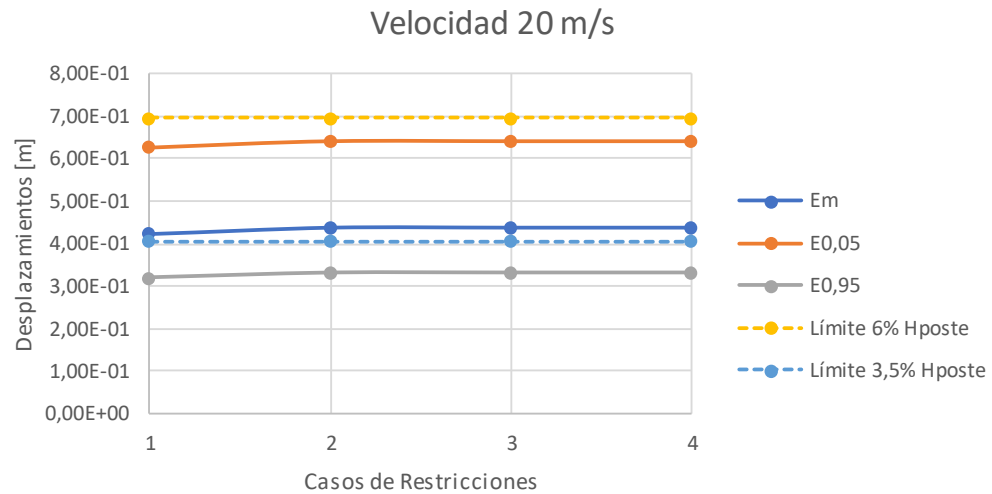


Fig. 7. Comparación de los desplazamientos obtenidos en la cima del poste para una velocidad del viento de 20 m/s con los límites establecidos por la AEA considerando distintos valores del Módulo de Elasticidad y de restricciones en la fundación del poste.

En la Fig. 8 se muestran las tensiones máximas obtenidas en la línea de empotramiento del poste con el suelo para las distintas velocidades consideradas. En comparación con los resultados de ensayos experimentales en postes de *Eucalyptus grandis* reportados en [17] para dos muestras de postes con valores característicos de resistencia a flexión (percentil 5%) en el momento de la rotura del poste que varían entre 43.9 y 49.9 N/mm², valores medios que varían entre 56.3 y 62.9 N/mm² y valores máximos que varían entre 70.2 y 77.7 N/mm²; se observa que para velocidades comprendidas entre 10 y 15 m/s hay una alta probabilidad (cercana al 50 %) de que se produzca la rotura de los postes debido a la resistencia del material.

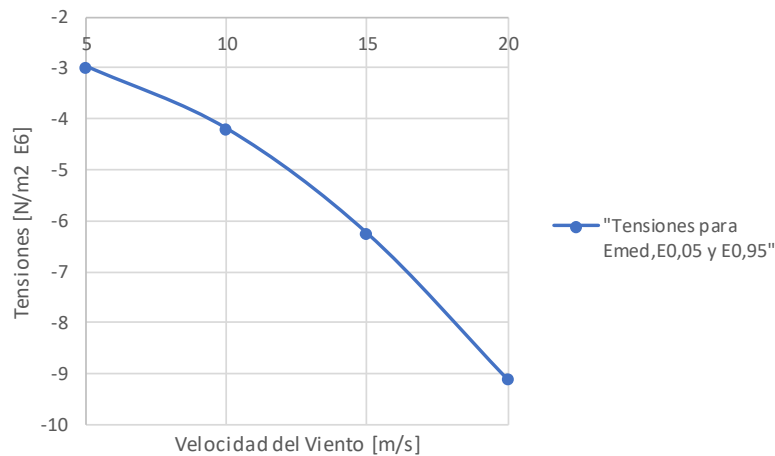


Fig. 8. Comparación de las máximas tensiones obtenidas en la línea de empotramiento del poste para los distintos valores de velocidad del viento considerados.

4. Conclusiones

Considerando las limitaciones establecidas por los entes reguladores de este tipo de elementos, se debe prestar atención al 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, el límite correspondiente a estructuras de retención puede verse superado por velocidades del orden de 15 m/s y superiores, mientras que las limitaciones para estructuras de suspensión no se ven sobrepasadas para el rango de intensidades elegido.

Se puede observar que, para los distintos módulos de Elasticidad de la madera contemplados y establecidos por el reglamento CIRSOC 601, las curvas de desplazamientos ante la variación de las rigideces de la base, presentan similitudes de forma, pero son mayores cuando el módulo se reduce.

Los desplazamientos dados para una determinada velocidad del viento son similares para las diferentes condiciones de rigidez de la base del poste que se han planteado como hipótesis, y van en aumento al incrementarse la magnitud de la velocidad del viento.

En cuanto a las tensiones en la sección de contacto con el suelo, aumentan conjuntamente la velocidad y comparando con los resultados publicados por otros autores y a la vista de los resultados numéricos presentados en el presente trabajo se observa que para la velocidad del viento de 15 m/s hay una alta probabilidad de falla del material. Esta probabilidad de falla por la resistencia del material es incluso superior a la probabilidad de falla del sistema por desplazamientos mayores a los establecidos por la Asociación Electrotécnica Argentina (AEA).

Trabajos futuros deben incluir la representación estocástica de la fuerza del viento y la fuerza que los cables transmiten al poste al recibir los primeros el impacto del viento. Igualmente, los resultados presentados en este trabajo constituyen un punto de partida para el estudio del comportamiento estructural de postes de madera de *Eucalyptus grandis* los cuales son muy utilizados en la región.

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 sob Acao 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 os 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
- [10] Detke F.R.; Reinert H.O.; Duarte J.A.; Pizzutti H.D.; Fank P.Y.; Golemba J.L.; Moller, 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".

- [11] Mercanti J.A.; Pizzutti H.D.; Aguirre M.A.; Fank P.Y.; Moller O.: “Acción del viento como proceso estocástico aplicado a líneas de transmisión de energía eléctrica”. XIX Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones - ENIEF 2011.
- [12] Detke F.R.; Duarte J.A.; Moller 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
- [13] Pizzutti H.; Aguirre M.A.; Mercanti J.A.; Moller O.: “Modelización del comportamiento estático y dinámico de cables conductores en líneas eléctricas”. XX Congreso sobre Métodos Numéricos y sus aplicaciones. Mendoza, Argentina 2013.
- [14] Detke F.R.; Duarte J.A.; Pizzutti H.; Gruber A.; Morales V.; Vivanco C.; Golemba J.; Moller O.: “Optimización de postes de hormigón pretensado para líneas de transmisión eléctrica”. XX Congreso sobre Métodos Numéricos y sus aplicaciones. Mendoza, Argentina 2013.
- [15] Aguirre M.A.; Detke F.R.; Mercanti J.A.; Moller O.: “Interacción dinámica entre conductores y postes en líneas de transmisión eléctrica”. XXI Congreso sobre Métodos Numéricos y sus aplicaciones. Bariloche, Río Negro, Argentinas, 2014.
- [16] Detke F.R.; Duarte J.A.; Mercanti J.A.; Aguirre M.A.; Moller O.: “Influencia del costo por daños en optimización de estructuras para líneas de transmisión eléctrica”. XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Montevideo, Uruguay, 2014.
- [17] E. A. Torrán, M. A. Sosa Zitto, A. D. Cotrina, J. C. Piter. Bending strength and stiffness of poles of Argentinean Eucalyptus grandis. Maderas. Ciencia y tecnología, 11(1), 71-84, 2009.
- [18] Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601, Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)- Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (CIRSOC), Buenos Aires; 2016
- [19] L. V. González de Paz; D. A. García; M. B. Rosales. Reliability of Wood Utility Poles under Stochastic Wind Load and Material Considering Knots. MecánicaComputacional, Volume XXXV. Number 21. Uncertainty Quantification and Stochastic Modeling (A). 2017.
- [20] Reglamentación de Líneas Aéreas Exteriores de Media Tensión y Alta Tensión AEA 95301. Asociación Electrotécnica Argentina, Noviembre 2017
- [21] Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones CIRSOC 102, Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)- Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (CIRSOC), Buenos Aires; 2005.
- [22] J. A. Inaudi, E. E. Matheu, R. L. Poepelman, A. Matusевич, Foundation Flexibility Effects on the Seismic Response of Concrete Gravity Dams, Indian Geotechnical Journal 38:187-203 · January 2008 .
- [23] Richart, F. E., Hall, J. R., & Woods, R. D. (1970). Vibrations of soils and foundations.