

ROTACIÓN DE BASES PRISMÁTICAS DE HORMIGÓN PARA SOPORTES DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE MEDIA TENSIÓN

Julio Mercanti¹, Javier Duarte¹, Oscar Möller², Delfina Laria¹

¹ Laboratorio de Ingeniería Civil (LIC), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones, Juan Manuel de Rosas 325, N3360 Oberá, Misiones, Argentina.
e-mail: jamercanti@yahoo.com

² Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Facultad Cs. Ex., Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Riobamba y Berutti, 2000 Rosario, Argentina.

RESUMEN

Se presentan resultados de la rotación de fundaciones prismáticas de hormigón empotradas en el terreno para postes de hormigón pretensado premoldeados usuales en líneas de transmisión eléctrica sometidas a la acción del viento y al peso de los materiales, y aplicado a líneas de 33kV. La respuesta en rotaciones fue obtenida mediante la aplicación de un modelo computacional formulado ad hoc que considera la acción dinámica del viento, caracterizado como un proceso estocástico con variabilidad aleatoria tanto en el tiempo como en el espacio, y contempla no linealidades físicas y geométricas asociadas a los materiales componentes, y el terreno de fundación. Se obtienen también los desplazamientos máximos en la cima en la dirección transversal al eje de la línea y se suministran otros resultados con vistas a la proposición de funciones de estados límites de servicio por desplazamientos que pudieran comprometer el funcionamiento de la línea. Se presentan resultados de algunas funciones de viento generadas, respuestas en rotaciones en la base y desplazamientos en la cima del sistema estructural y se obtienen conclusiones contribuyentes a optimizar diseños.

Palabras clave: Línea de transmisión eléctrica, acción del viento, bases prismáticas, desplazamiento en la cima, estados límites de servicio.

ABSTRACT

Results are presented on the rotation of prismatic concrete foundations embedded in the ground for prestressed precast concrete poles used in power transmission lines subjected to the action of wind and the weight of the material, applied to 33kV lines. The rotational response was obtained by applying a computational model formulated ad hoc that considers the dynamic action of the wind, characterized as a stochastic process with random variability both in time and space, and considers physical and geometrical nonlinearities associated with the component materials and the foundation soil. The maximum displacements at the top in the direction transverse to the line axis are determined and results obtained are provided with a view to proposing serviceability limit state functions for displacements that could compromise the operation of the line. Results of some generated wind functions, responses in rotations at the base and displacements at the top of the structural system are presented and conclusions contributing to optimize designs are obtained.

Organiza:

1. INTRODUCCIÓN

El análisis de la respuesta estructural en desplazamientos de soportes de líneas de transmisión de energía eléctrica en media y alta tensión bajo acciones horizontales es un tema de interés.

En el presente trabajo se presentan resultados de rotaciones de las fundaciones de soportes de suspensión, obtenidas de un modelo estructural de simulación de una porción de línea compuesta de dos tramos (vanos) de una línea de 33kV en simple terna, bajo la acción dinámica del viento actuando en dirección perpendicular al eje de la misma, para condiciones ambientales típicas de la Provincia de Misiones, Argentina. Los efectos de las rotaciones se relacionan con los desplazamientos en la cima, transversales al eje de la línea, que también se presentan como resultados de la simulación efectuada.

Los resultados derivan de la utilización de un modelo estructural simplificado, continuación de trabajos ^{1, 2, 3, 4} que se vienen desarrollando en el Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería (Universidad Nacional de Misiones). Modelo que contempla no linealidades físicas y geométricas de comportamiento de los distintos componentes del sistema, y que fue construido con objetivos más amplios, principalmente orientados a la optimización del diseño estructural con restricciones de confiabilidad de postes premoldeados de hormigón pretensado usualmente utilizados como soportes de suspensión simple.

Con el objetivo de efectuar comparaciones, y considerando que en el diseño de fundaciones de soportes de hormigón premoldeados es habitual adoptar la tipología de bases prismáticas de hormigón simple, encastradas (embebidas) en el terreno, calculadas siguiendo los lineamientos del método de Sulzberger, (el que invocamos aquí como modelo Sz), se presentan resultados en rotaciones, estimadas a partir de este modelo estático de análisis estructural. De la comparación efectuada surgen algunas consideraciones que se presentan como conclusiones del trabajo realizado.

2. GEOMETRIA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MODELO IMPLEMENTADO

El modelo utilizado fue descrito por Duarte et al (2022)². Comprende dos vanos consecutivos en alineación recta de una línea de simple terna en el nivel de 33kV, de 120m de longitud, adyacentes a un poste premoldeado de hormigón pretensado de suspensión simple de 13,50 m de longitud total y altura libre de 12,00m, Figura 1, fundado en una base prismática de sección cuadrada de hormigón simple embebida en el terreno, considerado este último como un espacio homogéneo semiinfinito a partir del nivel del terreno natural, coincidente con el nivel superior de la base.

El cabezal está constituido por cruceta metálica tipo canadiense que sustenta tres conductores eléctricos Al Al 120mm² y sus cadenas de aisladores. El cable de guardia AG ¼" 25mm² es afianzado en la cima del poste, Figura 2.

Organiza:

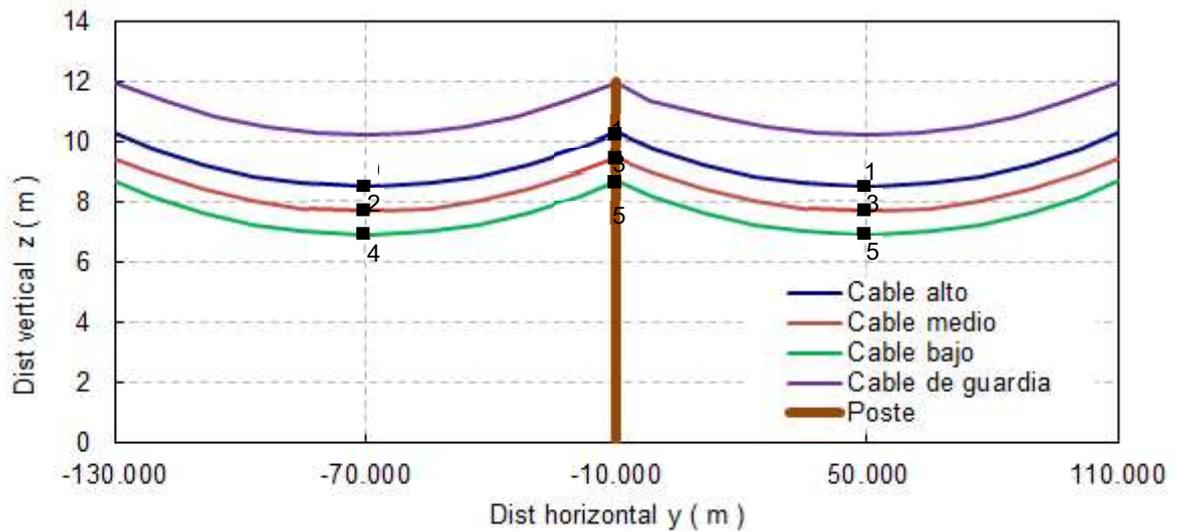


Figura 1: Esquema de estructura de suspensión comprendida en el modelo estructural de una línea de 33kV en simple terna con vanos de 120m

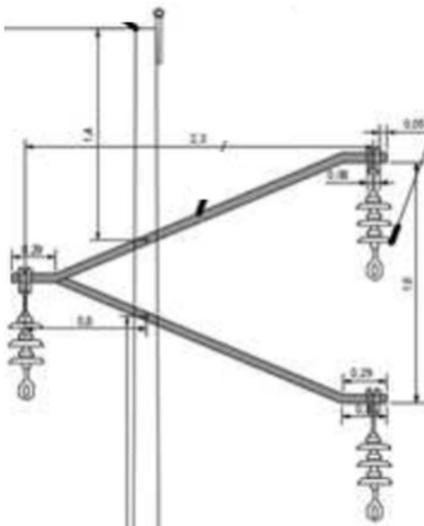


Figura 2: Cabezal del soporte. Cruzeta tipo canadiense, aisladores, conductores e hilo de guardia

3. MODELO NUMÉRICO

El modelo numérico de elementos finitos formulado es corrido en el software SAP2000 nonlinear, y comprende un conjunto de componentes que se vinculan en nodos cuyas coordenadas espaciales fueron adoptadas respetando la configuración inicial del sistema estructural representado.

Así, para los conductores, el hilo de guardia y los aisladores, fueron dispuestos elementos tipo "cable", configurados respetando la geometría original del prototipo estudiado. Cada conductor se representa por 10 elementos en cada vano, y cada elemento está subdividido internamente en 16 segmentos.

Organiza:

Para las crucetas metálicas tipo canadienses, se utilizaron elementos de barra de sección maciza conocida, vinculadas en 2 nodos al poste de hormigón estructural. Estas sostienen las cadenas de aisladores que sujetan los cables. Cada cadena de aisladores se modeliza como elementos de cable, sin rigidez a flexión para permitir el movimiento de los conductores perpendicular al eje de la línea.

El poste troncocónico de sección anular fue modelado con elementos de barra de comportamiento elástico. Para representar el comportamiento no lineal del hormigón estructural, se incorpora un resorte rotacional en la unión con la fundación. Mediante un preprocesamiento de la sección anular que aloja las barras de la armadura pasiva y los cordones pretensados, se obtuvo la relación momento-rotación del resorte no lineal.

La fundación está constituida por una base prismática de hormigón simple de planta cuadrada y su geometría e interacción dinámica con el terreno circundante es simulada mediante un elemento de barra que conecta el resorte rotacional antedicho con un punto ubicado a dos tercios de profundidad contada desde el nivel del terreno, en el que se concentran y reducen los grados de libertad de la base a tres desplazamientos lineales en la dirección de los ejes cartesianos del sistema y a tres desplazamientos angulares, y a los que se asignan sendos resortes y amortiguadores dinámicos, lineales y rotacionales.

Las acciones aplicadas son el peso propio del conjunto y la acción del viento horizontal, perpendicular a la línea, considerada como proceso estocástico correlacionado espacialmente.

4. MODELADO DE LA ACCIÓN DEL VIENTO

La acción horizontal del viento produce presiones fluctuantes que se traducen en fuerzas: positivas sobre la cara a barlovento de la estructura y presiones fluctuantes negativas en la cara a sotavento. La carga instantánea sobre la estructura, originada por la interacción con el viento, resulta entonces en tres componentes. La componente longitudinal es la más significativa y sus efectos han sido adecuadamente estimados utilizando teorías cuasi-estáticas expresada en términos de las fluctuaciones de velocidad con Castro, et al (2015) ⁶:

$$F(t) = \frac{1}{2} \rho A C_D [\bar{U} + u(t)]^2 \cong \frac{1}{2} \rho A C_D \bar{U}^2 + \rho A C_D \bar{U} u(t) \quad (1)$$

donde ρ es la densidad del aire, A es el área cargada por el viento y C_D es el coeficiente de arrastre. \bar{U} es la velocidad media y $u(t)$ es la parte fluctuante.

Esta expresión posibilita efectuar desarrollos que consideran la aleatoriedad de comportamiento de la velocidad del viento abordándola como miembros de procesos estocásticos que, convertidos a fuerzas, se aplican al modelo estructural. Se corresponde con la contenida en el Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones CIRSOC 102 (2005) ⁷:

$$F_z = q_z G C_F A \quad (2)$$

Organiza:

Esta expresión se utiliza para análisis estáticos donde el efecto de ráfagas se incorpora con el coeficiente G . También se evalúa la presión dinámica q_z , a la altura z :

$$q_z = 0.613 K_z K_{zt} K_d V^2 I \quad (3)$$

en la que 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.

Caracterización probabilística

El viento presenta una distribución de velocidades aleatorias correlacionadas espacialmente, y entonces una descripción adecuada se puede realizar mediante procesos estocásticos.

Se sigue el método de representación espectral desarrollado por Shinozuka⁸ para obtener la componente turbulenta o fluctuante mediante un proceso estocástico estacionario de media nula. Esta metodología necesita como información inicial la función de densidad espectral de potencia y una función de coherencia.

Para representar la velocidad turbulenta del viento se utiliza la función de densidad espectral de potencia $S_{xx}(f)$ propuesta por Davenport (1961)⁹ cuya expresión general es

$$\frac{f S_{xx}(f)}{\sigma^2(z)} = \frac{2}{3} \frac{f_L^2}{[1 + f_L^2]^{4/3}} \quad (4)$$

donde f es la frecuencia en Hz definida desde 0 a ∞ , $\sigma^2(z)$ es la variancia del proceso, z la altura desde el nivel del terreno, y f_L es la frecuencia adimensional definida como

$$f_L = f \frac{L_u}{U(z)} \quad (5)$$

con L_u la longitud de turbulencia, y $U(z)$ la velocidad media.

Para caracterizar la velocidad media función de la altura z se aplica la ley potencial, partiendo de la velocidad media a 10 m de altura V_{10} .

$$U(z) = b \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha V_{10} \quad (6)$$

Se utilizan los parámetros para $V_{10} = 45$ m/s (Provincia de Misiones) y condición de exposición "C" del Reglamento CIRSOC 102 (2005).

Se adopta la función de coherencia para evaluar la correlación espacial entre los procesos estocásticos calculados en coordenadas (y_j, z_j) y (y_k, z_k) , siendo z la altura desde el terreno e y la coordenada en dirección perpendicular a la acción del viento.

Organiza:

$$Coh(y, z, f) = \exp \left\{ - \frac{2f \left[(C_Y (y_k - y_j))^2 + (C_Z (z_k - z_j))^2 \right]^{1/2}}{U(z_j) + U(z_k)} \right\} \quad (7)$$

con valores de los coeficientes $C_Y = 16$, $C_Z = 10$

Siguiendo el procedimiento sintetizado por Duarte un miembro r del proceso estocástico para un punto genérico $j : (y_j, z_j)$, correlacionado espacialmente con los otros puntos $1, 2, \dots, j, \dots, M$, resulta (Ballaben et al (2013) ¹⁰):

$$x_j(t)_{,r} = \sum_{k=1}^M \sum_{n=0}^N |H_{jk}(f_n)| \sqrt{2 \Delta f} \cos \left[2\pi f_n t + \theta_{jk}(f_n) + \phi_{kn,r} \right] \quad (8)$$

en que M es el número de puntos en que se discretiza el espacio, N es el número de frecuencias en que se discretiza el espectro, Δf es el intervalo de frecuencias, siendo entonces $f_n = n \Delta f$, ϕ_{kn} son ángulos de fase aleatorios con distribución uniforme $0, 2\pi$.

El reglamento CIRSOC 102 (2005) presenta un mapa de la república Argentina con velocidades de viento que corresponden a ráfagas de 3 seg de duración, denominada velocidad básica V_0 . A partir de esos valores se calculan las presiones q_z de la ec.(3) a, utilizar en el análisis estático de la estructura.

Cuando se realiza análisis dinámico para calcular la respuesta de la estructura en función del tiempo, no se puede utilizar la velocidad de ráfaga de 3 seg durante toda la duración de la simulación, por ejemplo 300 seg, porque no es real. Una mejor aproximación es considerar la velocidad media horaria, cuyos parámetros para la ley potencial están dados en CIRSOC 102 (2005) y agregar ráfagas de 3seg con arribo aleatorio como un proceso de Poisson.

Una mejor representación de los procesos de velocidades del viento debe considerar las características no estacionarias, donde se tiene en cuenta que la acción del viento no aparece instantáneamente, si no que comienza desde velocidad nula y creciendo hasta los valores del régimen estacionario. Al final, los valores decaen desde los estacionarios a valores nulos. Un modelo simple para tener en cuenta la no estacionariedad en amplitudes consiste en multiplicar el proceso estacionario por una función envolvente dependiente del tiempo.

En la Figura 3 se muestra un miembro del proceso estocástico de velocidad de viento, generado para el centro del vano sobre uno de los conductores, con el arribo de 5 ráfagas.

5. MODELADO DEL SOPORTE (POSTE) DE SECCIÓN ANULAR PRETENSADA

Geometría y armaduras

La Figura 4 ilustra una sección típica de poste para líneas de transmisión eléctrica de 33 kV, adoptada en el modelo. Se observa la geometría anular con armadura pasiva y armadura pretensada (no se indica la armadura helicoidal transversal).

Organiza:

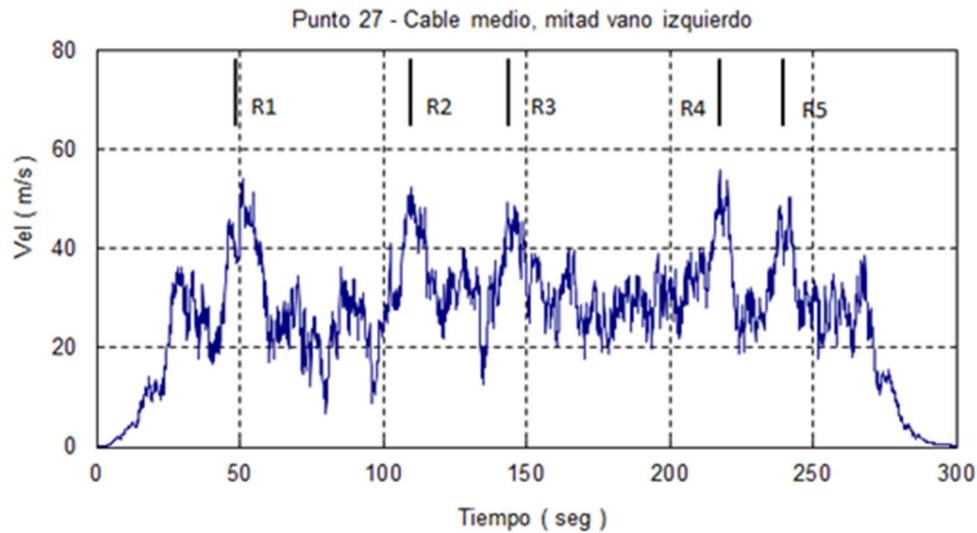


Figura 3: Miembro del proceso estocástico velocidad de viento

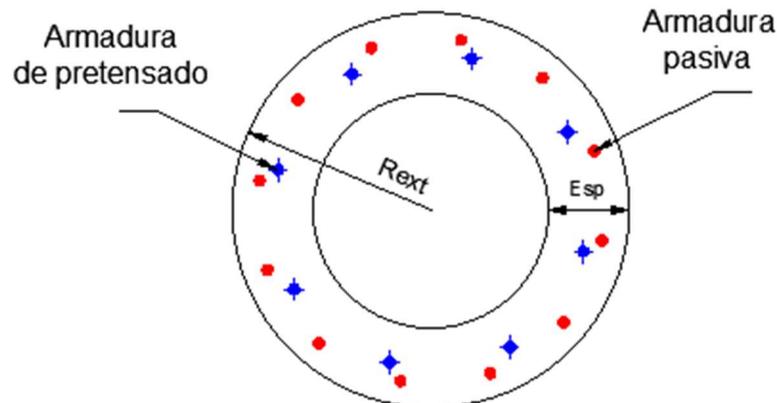


Figura 4: Sección anular con armadura pasiva y pretensada

El tamaño de la sección, la cantidad de barras de cada tipo de acero, y los parámetros de las relaciones constitutivas de los materiales, son variables aleatorias cuyos valores se van asignando en cada una de las 250 combinaciones simuladas.

Relación momento curvatura

La relación momento-curvatura es objeto de un preprocesamiento que luego se incorpora al modelo siguiendo el procedimiento que se consigna:

Se discretiza la sección en franjas de hormigón y en “capas” de armadura. El pretensado se introduce como deformación efectiva inicial en las armaduras pretensadas, y con un proceso iterativo se ajustan las deformaciones en las capas de hormigón y barras de armadura pasiva hasta lograr el equilibrio interno. Se aplica el peso propio del sistema como fuerza axial externa.

Se aplican incrementos de curvaturas, para cada incremento se realiza el proceso iterativo hasta lograr equilibrio interno de fuerzas axiales, y entonces se evalúa el

momento flector. La curvatura es llevada hasta su valor máximo positivo y negativo en 4 ciclos completos, alcanzando alguno de los estados límites que definen la falla: deformación límite en el hormigón confinado, deformación límite de tracción en el acero pasivo y en el pretensado, y deformación límite de compresión en el acero pasivo. La Figura 5 presenta el resultado de un caso analizado.

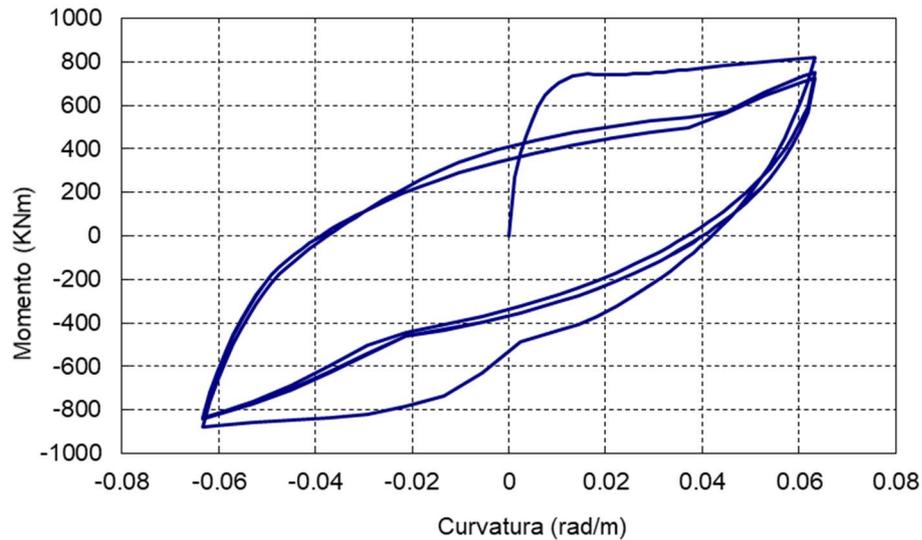


Figura 5: Relación momento curvatura cíclica

Finalmente se aplica una rectificación bilineal de la curva envolvente para facilitar el análisis dinámico no lineal, definiendo los parámetros mostrados en la Figura 6

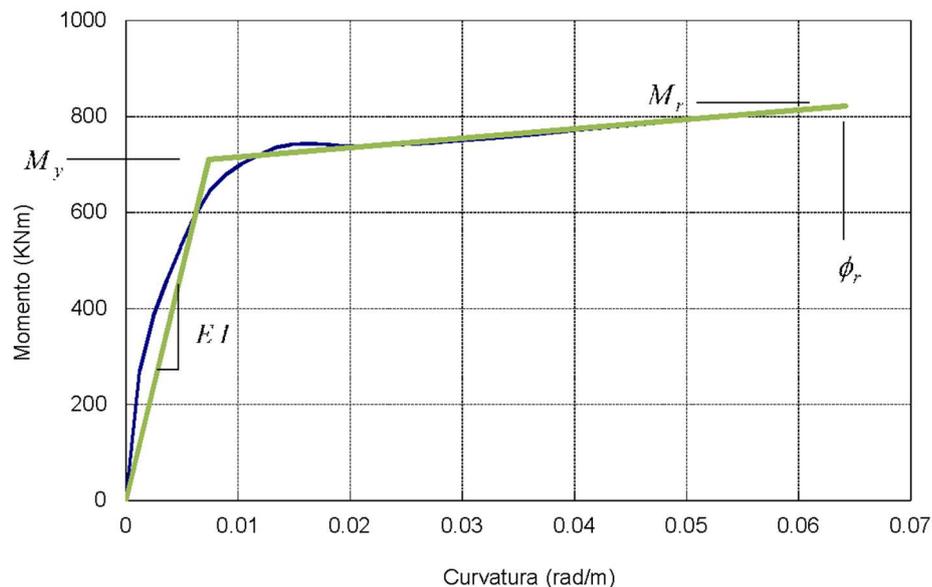


Figura 6: Rectificación de la curva envolvente y definición de parámetros

Organiza:

6. MODELADO DEL SUELO CIRCUNDANTE. SIMULACIÓN DE LA INTERACCIÓN CON LA FUNDACIÓN

Con el objeto de simular la interacción de la estructura del soporte sometido a cargas dinámicas producidas por el viento, con el suelo circundante a su fundación, se aplica una metodología propuesta por Gazetas (1991)¹¹. Consiste en la asignación de coeficientes de rigidez (K), y de amortiguamiento (C) dinámicos (resortes y amortiguadores) a un punto singular de la base, representativo de las respuestas en desplazamientos y rotaciones de la fundación, en correspondencia con sus 6 grados de libertad (3 desplazamientos, 3 rotaciones) referidos a los ejes principales del sistema. La figura 7 esquematiza la asignación de tales dispositivos.

La obtención de tales coeficientes se efectúa a partir de expresiones algebraicas y de gráficos adimensionales convertidos a expresiones apropiadas para el procesamiento numérico, correspondientes a los distintos modos de oscilación para fundaciones completamente encastradas en suelos homogéneos no estratificados, constitutivos de idealizados espacios semi-infinitos.

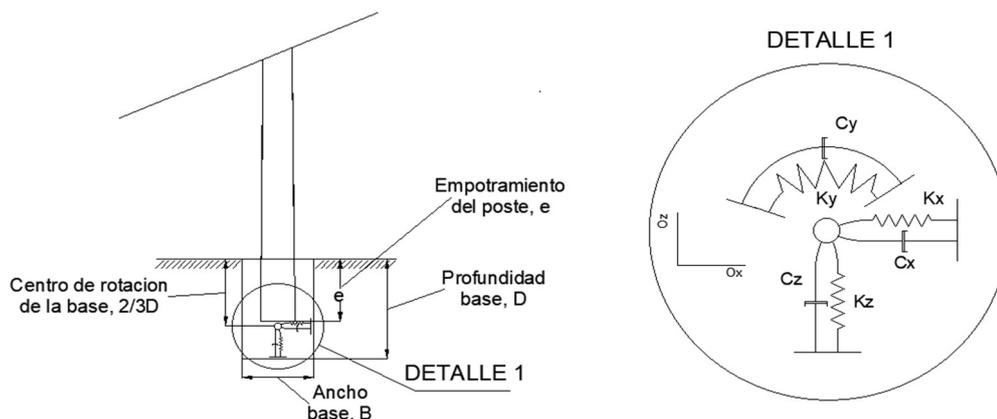


Figura 7. Coeficientes de rigidez (K) y amortiguamiento (C) dinámicos (traslacionales y rotacionales, plano xz)

El procedimiento para su obtención requiere información sobre la geometría de la base (dimensiones en planta, $B_x = B_y$, profundidad embebida en el terreno, D , todas en metros), propiedades del suelo (velocidad de onda de corte, V_s (m/s); densidad, ρ (kg/m³); coeficiente de Poisson, μ ; y relación de amortiguamiento, β_0 , así como la frecuencia dominante de las cargas dinámicas incidentes, f (Hz).

Las aplicaciones se efectuaron sobre suelos arcillo-limosos, genéricamente denominados “suelos colorados” característicos del ambiente geográfico de la Provincia de Misiones, Argentina, cuyos parámetros geotécnicos variables se caracterizan con valores considerados típicos, adoptados con aproximación razonable y suficiente para los alcances del estudio.

Se considera la base prismática de planta cuadrada empotrada en un suelo con perfil estratigráfico simplificado constituido por un único material (espacio semiinfinito con límite superior el nivel del terreno). Aproximación que representa razonablemente una elevada frecuencia de ocurrencia del comportamiento estratigráfico regional.

Organiza:

Los coeficientes dinámicos obtenidos corresponden al punto singular (nodo 94 en el modelo estructural) ubicado en el centro de rotación del macizo, considerado a una distancia de 2/3 de su profundidad contada a partir del nivel superior de la misma (que coincide con el nivel del terreno), y el inicio del empotramiento del poste en la fundación.

El modelo de interacción dinámica suelo-fundación así incorporado, reemplaza a uno anteriormente adoptado que representaba al suelo de fundación con elementos finitos tridimensionales, y permite obtener considerable ahorro de tiempos de procesamiento, sin disminución significativa en la aproximación de los resultados esperados.

En la Tabla 1, se consignan valores obtenidos para K y C asociados a los tres modos de vibración traslacionales (1 a 3), y a los tres modos rotacionales (4 a 6), correspondientes a la combinación C 242 de variables principales, que sorteadas aleatoriamente se ingresan como datos del procesamiento.

Combinación	Lado de la base. Bx = By	Profundidad de la base, D	Velocidad de corte, Vs	Densidad del suelo, ρ	Coef de Poisson del suelo, ν
	[m]	[m]	[m/seg]	[Mg/m ³]	[adim]
C 242	0.89	1.62	165.50	1.68	0.209
COEFICIENTES DE RIGIDEZ (K) Y DE AMORTIGUAMIENTO (C) DINAMICOS					
Modo 1		Modo 2		Modo 3	
Vertical, Oz		Horizontal, Oy (transversal)		Horizontal, Ox (longitudinal)	
K	C	K	C	K	C
kN/m	kN seg/m	kN/m	kN seg/m	kN/m	kN seg/m
288088.46	4940.31	574502.10	8189.67	574502.10	8189.67
Modo 4		Modo 5		Modo 6	
Balanceo alred de eje longitudinal Ox		Balanceo alred de eje transversal Oy		Torsión alrededor del eje Oz	
K	C	K	C	K	C
kN/m	kN seg/m	kN/m	kN seg/m	kN/m	kN seg/m
411472.65	4978.57	501561.30	5934.44	336545.43	3571.58

Tabla 1. Valores de K y C para los modos de vibración obtenidos para la combinación de variables principales y frecuencia de excitación $f = 1,5\text{Hz}$

Organiza:

7. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA

En la Figura 8 se grafican las rotaciones R_y , obtenidas en torno del eje Y (paralelo al eje de la línea). Corresponden a la Subcombinación C 242-8 (cuyos datos de entrada se indican en el Cuadro 1), y al nodo 94 en el modelo de elementos finitos formulado, el que se sitúa a $2/3$ de la profundidad D de la base, contada a partir del nivel del terreno. El gráfico reproduce los valores de 3000 pulsos de tiempo, separados de 0.10 segundos para una corrida que simula 5 minutos (300 segundos) de acción dinámica y aleatoria del viento, actuando en la dirección X, perpendicular al eje de la línea. La rotación máxima es $R_y = 2.23 \text{ e-4 radianes}$.

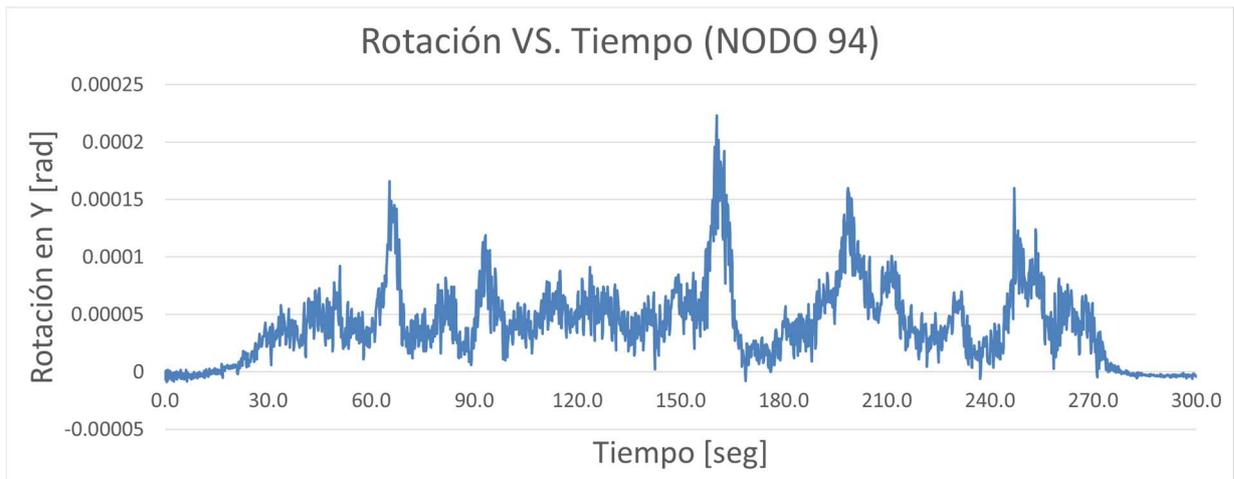


Figura 8. Respuesta en rotaciones R_y (rad) en el nodo 94, para la combinación C 242-8, bajo la acción dinámica del viento

COMBINACIÓN C 242-8		
Lado de la base	$B_x=B_y$	0.89 m
Profundidad de la base	D	1.62 m
Velocidad de corte	V_s	165.50 m/seg
Densidad del suelo	ρ	1.68 $[\text{Mg}/\text{m}^3]$
Velocidad básica del viento	V	38.92 m/seg
Coefficiente de Poisson	μ	0.209

Cuadro 1. Datos de entrada para la Combinación C 242-8

Para la misma combinación, además, resulta de interés representar la respuesta del desplazamiento en el nodo 74 del modelo, el que corresponde a la cima del poste. En la Figura 8 se grafican los resultados obtenidos. El máximo desplazamiento alcanzado es de $u_x = 0.126\text{m}$

Organiza:

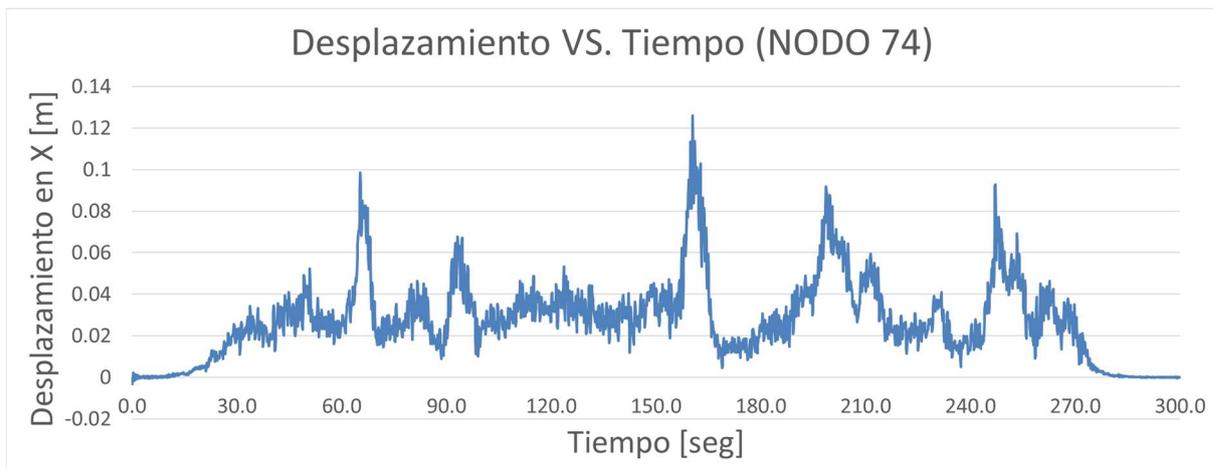


Figura 8. Respuesta en desplazamientos u_x (m) en el nodo 74, para la combinación C 242-8, bajo la acción dinámica del viento

8. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Se planteó el interés en comparar resultados de la simulación numérica efectuada mediante el modelo dinámico no lineal descripto (MD), con el procedimiento de diseño de fundaciones para suspensiones simples habitualmente implementado en líneas de alta y media tensión: el método de Sulzberger (Sz). Para fundaciones prismáticas encastradas en el suelo ((embebidas y sin zapatas), se efectúan comparaciones de las rotaciones R_y obtenidas con el modelo bajo acciones dinámicas, con las que se pueden derivar de la aplicación del método estático de Sulzberger. Si bien en este último no se procesan los posibles giros que podría experimentar la base bajo la acción de las cargas, se aproximó su determinación según la metodología que se describe a continuación.

Caracterización de suelos regionales y parámetros geotécnicos adoptados

El primer paso consiste en establecer consistencia entre los parámetros de suelo adoptados en el modelo estructural (MD), y propiedades índice requeridas e inherentes para la determinación de la resistencia lateral y de fondo en (Sz). Interesan principalmente el Coeficiente de Compresibilidad lateral, C_D , la tensión admisible, σ_{adm} , la densidad, ρ y el coeficiente de rugosidad suelo-hormigón, μ_s .

A efectos de una mayor aproximación en la descripción del tipo de suelos (nominados subtropicales para la Provincia de Misiones) al que se aplican los procedimientos de análisis que se informan, según Ayala, et al (2016)¹², se efectúa la siguiente descripción: “El área estudiada está cubierta prácticamente en su totalidad por limos arcillosos castaño rojizos o suelos rojos conocidos localmente como suelos "colorados" o "lateríticos". Son suelos residuales cuya génesis está vinculada con la alteración del basalto, roca predominante en el subsuelo regional, por descomposición de sus minerales”.

Organiza:

En ese estudio se procura establecer relaciones, basadas en estudios de campo y laboratorio entre el número de golpes obtenidos en ensayos SPT, la tensión admisible y el coeficiente de compresibilidad lateral asignables a estos suelos. Una limitación, (además de la variabilidad que caracteriza a los parámetros geotécnicos de todo tipo de suelos) es que el número de golpes correlacionados es, en general bajo ($N < 10$). Por otra parte, sus resultados son comparados con información precedente atribuida a Agua y Energía Eléctrica, AAEE, para suelos cohesivos (no se informan mayores referencias a dicha fuente). Su consideración en el presente trabajo resulta pertinente pues proporcionan información, en general, de carácter más conservador.

En la Tabla 2, se consignan valores adoptados (inferidos, para $N > 10$), y un límite superior de 15) para tensiones admisibles (σ_{adm}) y coeficientes de compresibilidad lateral (C_D), según Ayala y según AAyEE.

N° Golpes SPT	Tensión Adm		Coef de Compresib	
	[kg/cm ²]		[kg/cm ³]	
	s/ Ayala	s/ AAyEE	s/ Ayala	s/ AAyEE
8	1.75	1.20	4.50	3.00
11	3.00	1.75	9.00	5.00
15	4.00	2.50	12.00	7.00

Tabla 2. Relaciones entre N (SPT), σ_{adm} y C_D

Estimación de rotación de las bases por el método de Sulzberger

Para cada combinación analizada se evalúan Maciejewski (1964)¹³ los parámetros:

$$tg \alpha_1 = 6 \mu G / (B C_D D^2) \quad (9)$$

$$tg \alpha_2 = 2 G / (B^3 C_B) \quad (10)$$

en que:

μ : coeficiente de fricción suelo-hormigón de la base;

G: resultante de las cargas verticales transmitidas por el soporte, el suelo gravante circundante y el peso propio de la base;

B: dimensión en planta de la base prismática de sección cuadrada;

D: profundidad de la base;

C_D : coeficiente de compresibilidad horizontal a la profundidad D;

$C_b = 1,20 C_D$: coeficiente de compresibilidad vertical o de fondo (a la profundidad D).

Siguiendo el procedimiento indicado en la referencia ¹⁴, si $tg \alpha_1 < 0,01$, bajo la acción del momento volcador M_v producido por la fuerza F, resultante de las acciones horizontales y reducidas a la cima del poste, es:

Organiza:

$$M_v = F (HL + 2/3 D) \quad (11)$$

con HL: altura libre del poste,

indicando que el eje de giro de la fundación se despega del fondo y acontece a una distancia cercana a 1/3 D, contado desde la cota de fundación. Para tal condición:

$$M_s = (B D^3 / 36) C_D \operatorname{tg} \alpha \quad (12)$$

M_s : momento resistente lateral;

$\operatorname{tg} \alpha$: tangente del ángulo efectivo con que rota la fundación;

y si, además, $\operatorname{tg} \alpha_2 < 0.01$

$$M_b = G [B / 2 - 0.47 (G / (B C_b \operatorname{tg} \alpha))]^{0.5} \quad (13)$$

M_b = momento resistente de fondo;

La obtención del ángulo de rotación efectivo, expresado por $\operatorname{tg} \alpha$, se obtiene de la condición de equilibrio impuesta por:

$$M_v = M_s + M_b \quad (14)$$

La que se obtiene provocando por tanteos sucesivos y tolerancia de aproximación aceptable al valor calculado para M_v .

Del conjunto de 250 combinaciones de los parámetros de entrada formulados para las corridas del modelo dinámico, se escogieron 5, tales que presentaran velocidades de onda de corte V_s , compatibles con suelos blandos, como los arcillo-limosos suelos colorados, y con Velocidad básica de viento en torno a 45m/s, valor según CIRSOC 102 (2005) correspondiente al extremo nordeste de Argentina (provincia de Misiones). A ellas se les asignó parámetros geotécnicos según Tabla 2 para N adoptado, y se aplicaron los coeficientes de compresibilidad apoyándose en las observaciones de Ayala ¹².

En Tablas 3(a) y 3(b) se resumen los pasos de procesamiento y los valores calculados para $\operatorname{tg} \alpha$, que cumplimentan con aproximación suficiente la condición de equilibrio (14). Los valores procesados corresponden a postes de altura libre HL = 12,00m, y longitud total de 13,50m, a los cuales se asignó una fuerza horizontal aplicada en la cima del poste, $F = 0,50t$, y se adoptó un peso total de la estructura (conductores, hilo de guardia, cadenas de aisladores, herrajes, cruceta, poste, base y suelo gravante), $G = 8,00t$ (ambos, valores medios para este tipo de estructuras). Además de dimensiones de la base, se consignan valores de entrada para las 5 combinaciones corridas con el modelo MD, velocidad de onda de corte V_s , densidad del suelo r , coeficiente de Poisson ν , y velocidad básica del viento V , con las que se procesaron los valores máximos de rotaciones R_y . Y se informan los valores de Coeficiente de Compresibilidad adoptados (inferidos de Ayala, y de los atribuidos a AAyEE)

Organiza:

TABLA 3(a). ESTIMACIÓN DE $tg \alpha$ por el Método de SULZBERGER (Ayala)						N° de Combinaciones				
						C 41	C 50	C 230	C 240	C 242
1	Velocidad básica del viento			V	m/s	45.60	49.60	50.64	40.09	38.90
GEOMETRIA DEL POSTE Y DE LA BASE										
2	Lado de la base			B	m	0.98	1.08	1.44	1.17	0.89
3	Profundidad de la base			D	m	2.54	2.38	1.82	1.82	1.62
PROPIEDADES DEL SUELO										
4	Velocidad de Onda de Corte			Vs	m/s	171.00	166.00	168.30	172.20	165.50
5	Densidad del suelo			ρ	Mg/m ³	1.61	1.70	1.71	1.50	1.68
6	N° de golpes SPT			N	adim	11.00	8.00	8.00	11.00	8.00
7	Coef. de Compresib. Horiz. (lateral)	S/Ayala		C_D	t/m ³	9000.00	4500.00	4500.00	9000.00	4500.00
8	Coef. de Compresib. De Fondo	S/Ayala		C_B	t/m ³	10800	5400	5400	10800	5400
9	Coeficiente de fricción suelo-H°			μ	adim	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
10	$tg \alpha_1$		$6\mu G / bC_D D^2$	$tg \alpha_1$	adim	0.000339	0.000697	0.000895	0.00055	0.001827
						<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
11	$tg \alpha_2$		$2G / a^2 b C_B$	$tg \alpha_2$	adim	0.001598	0.002352	0.000992	0.000925	0.004203
						<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
12	Momento resistente de fondo	$tg \alpha_2 > 0.01$	$(ba^3/12) (C_B tg \alpha)$	Mb	tm	1.155	1.723	1.731	0.928	2.710
13	Momento resistente lateral	$tg \alpha_1 < 0.01$	$(bD^3/36) (C_D tg \alpha)$	Ms	tm	5.672	5.121	3.093	3.915	4.541
14	Momento resistente de fondo	$tg \alpha_2 < 0.01$	$G(b/2 - 0.47raiz(G/bC_B tg \alpha))$	Mb	tm	1.150	1.695	3.501	2.672	1.994
15	Momento de vuelco (solicitante)	$tg \alpha_1 < 0.01$	$F (HL + 2/3 D)$	M	tm	6.845	6.792	6.605	6.605	6.539
16	Momento resistente total		$Ms + Mb$		tm	6.822	6.793	6.594	6.587	6.535
17	$tg \alpha$			$tg \alpha$	adim	0.00142	0.002804	0.00285	0.00222	0.0096

Organiza:

TABLA 3(b). ESTIMACIÓN DE $tg \alpha$ por el Método de SULZBERGER (AAyEE)						N° de Combinaciones				
						C 41	C 50	C 230	C 240	C 242
1	Velocidad básica del viento			V	m/s	45.60	49.60	50.64	40.09	38.90
GEOMETRIA DEL POSTE Y DE LA BASE										
2	Lado de la base			B	m	0.98	1.08	1.44	1.17	0.89
3	Profundidad de la base			D	m	2.54	2.38	1.82	1.82	1.62
PROPIEDADES GEOTÉCNICAS										
4	Velocidad de Onda de Corte			Vs	m/s	171.00	166.00	168.30	172.20	165.50
5	Densidad del suelo			ρ	Mg/m3	1.61	1.70	1.71	1.50	1.68
6	N° de golpes SPT			N	adim	11.00	8.00	8.00	11.00	8.00
7	Coef. de Compresib. Horiz. (lateral)	S/AAyEE		C_D	t/m3	5000.00	3000.00	3000.00	5000.00	3000.00
8	Coef. de Compresib. De Fondo	S/AAyEE		C_B	t/m3	6000	3600	3600	6000	3600
9	Coeficiente de fricción suelo-H°			μ	adim	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
10	$tg \alpha_1$		$6\mu G / BC_D D^2$	$tg \alpha_1$	adim	0.00061	0.001046	0.001342	0.000991	0.004453
						<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
11	$tg \alpha_2$		$2G / B^3 C_B$	$tg \alpha_2$	adim	0.002877	0.003528	0.001488	0.001665	0.010245
						<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	>0.01
12	Momento resistente de fondo	Si $tg \alpha_2 > 0.01$	$(B^4/12) (C_B tg \alpha)$	Mb	tm	1.157	1.714	5.518	3.767	2.441
13	Momento resistente lateral	Si $tg \alpha_1 < 0.01$	$(BD^3/36) (C_D tg \alpha)$	Ms	tm	5.681	5.096	3.095	3.938	4.090
14	Momento resistente de fondo	Si $tg \alpha_2 < 0.01$	$G(B/2 - 0.47 \text{raiz}(G/BC_B tg \alpha))$	Mb	tm	1.152	1.688	3.502	2.678	2.368
15	Momento de vuelco (solicitante)	Si $tg \alpha_1 < 0.01$	$F (HL + 2/3 D)$	M	tm	6.845	6.792	6.605	6.605	6.539
16	Momento resistente total		$M_s + M_b$		tm	6.833	6.784	6.597	6.616	6.531
17	$tg \alpha$			$tg \alpha$	adim	0.00256	0.0042	0.004278	0.00402	0.01297

Organiza:

En el Cuadro 2 se resumen los valores de las rotaciones de la base R_y , obtenidas para las combinaciones consideradas, obtenidas con aplicación del modelo de EF MD, y los correspondientes a $\text{tg } \alpha$, obtenidas por el procedimiento indicado, basado en el método de Sulzberger, Sz.

	N° de Combinaciones				
	C 41	C 50	C 230	C 240	C 242
Rotación Máxima R_y , obtenida con el MD [rad]	0.000083	0.000102	0.000132	0.000101	0.000223
Inclinación $\text{tg } \alpha$ estimada con Sz (para C_D s/Ayala)	0.00142	0.002804	0.00285	0.00222	0.0096
Inclinación $\text{tg } \alpha$ estimada con Sz (para C_D s/AAyEE)	0.00256	0.0042	0.004278	0.00402	0.01297(*)
(*) el valor obtenido supera el valor de 0,01 establecido como limite según Sulzberger: se pierde la hipótesis de comportamiento elástico del terreno.					

Cuadro 2. Comparación de Rotaciones R_y con MD vs Inclinación $\text{tg } \alpha$ según Sz

Se aprecia que las estimaciones de inclinación de la base y el poste dados por $\text{tg } \alpha$ resultan en general superiores en un orden de magnitud a las rotaciones máximas obtenidas mediante la aplicación del modelo dinámico de elementos finitos MD.

9. CONCLUSIONES

Se analizó una estructura para transmisión de energía eléctrica de 33kV compuesto por dos tramos de conductores de 120m de vano, con un poste de suspensión de 12m de alto de sección anular de hormigón estructural y fundación prismática de base cuadrada embebida en un suelo típico de la provincia de Misiones.

Con la velocidad del viento horizontal actuando en dirección perpendicular al eje de la línea, considerada como un proceso estocástico, transformado en presión sobre conductores y poste incluyendo la correlación espacial, más el peso propio del conjunto, se realizaron análisis dinámicos no lineales de un modelo de elementos finitos que representa el sistema, donde el terreno es modelado simplificadaamente con resortes y amortiguadores dinámicos concentrados. Se obtuvieron varios parámetros de respuesta. Entre ellos, la rotación de la base y el desplazamiento de la cima del poste.

Además, se evaluó la rotación de la base estimada recurriendo al conocido método de diseño de Sulzberger, utilizado habitualmente por los ingenieros en proyectos de líneas de transmisión eléctrica, y aplicado al soporte como un método estático equivalente.

Las conclusiones más significativas de este trabajo son:

- Es posible realizar análisis dinámico no lineal con modelo de elementos finitos y comportamiento del suelo con parámetros concentrados, utilizando software

Organiza:

comercial, con múltiples corridas por la aleatoriedad de la acción del viento.

- Se obtienen las funciones del tiempo de los parámetros de respuesta que son necesarios para verificar los estados límites de diseño, a analizar en trabajo futuro.
- La comparación con los resultados de la rotación de la base calculada con análisis estático equivalente mediante el método de Sulzberger, muestra en este ejemplo que la rotación dinámica máxima es un orden de magnitud menor que la estática, lo que es lógico por varios motivos:
 - (i) En la acción dinámica del viento sobre los conductores considerando la correlación espacial, los valores picos del arribo de ráfagas se transmiten a la fundación en forma amortiguada y en diferentes tiempos;
 - (ii) La acción estática representa una envolvente de estas situaciones y con valores conservadores;
 - (iii) En el equilibrio dinámico intervienen las fuerzas de inercia y de amortiguamiento, no presentes en el equilibrio estático.

REFERENCIAS

1. Detke, F.R., Reinert, H.O., Duarte, J.A., Pizzutti, H.D., Fank, P.Y., Golemba, J.L., Möller, O. (2011) "Análisis estructural por elementos finitos aplicados a sistemas de transmisión eléctrica en la provincia de Misiones, Argentina". *Mecánica Computacional Vol. XXX*, pág. 2651-2667, AMCA. ISSN 1666-6070.
2. Pizzutti, H.D., Aguirre, M.A., Mercanti, J.A., Möller, O. (2013) "Modelización del comportamiento estático y dinámico de cables conductores en líneas eléctricas". *Mecánica Computacional Vol. XXXII*, pág. 2215-2235, AMCA. ISSN 1666-6070.
3. Aguirre, M.A., Detke, F.R., Mercanti, J.A., Möller, O. (2014) "Interacción dinámica entre conductores y postes en líneas de transmisión eléctrica". *Mecánica Computacional Vol. XXXIII*, pág. 3543-3557, AMCA. ISSN 1666-6070.
4. García, D.A., Detke, F.R., Metrailler, M.A., Miranda, R., Mercanti, J.A., Möller, O. (2018) "Análisis estructural de postes para soporte de líneas de transmisión de energía eléctrica". *Mecánica Computacional Vol. XXXVI*, pág. 901-910, AMCA. <http://www.amcaonline.org.ar>. ISSN 2591-3522 (electrónico), 1666-6070 (impreso).
5. Duarte, J., Mercanti, J., Golemba, J.L., Möller, O., Bande Worde, F., Statkiewicz, M. B., Fischer, R. (2022), "Modelo simplificado para líneas de transmisión eléctrica solicitadas por viento aleatorio". *XXVII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural. Asociación de Ingenieros Estructurales (AIE)*.
6. Castro, H.G., De Bortoli, M.E., Paz, R.R., Marighetti, J.O. (2015) "Una metodología de cálculo para la determinación de la respuesta dinámica longitudinal de estructuras altas bajo la acción del viento" *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol.31, N° 4, pp.235–245.
7. CIRSOC 102. (2005) 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 Organiza:

(CIRSOC)

8. Shinozuka, M., Deodatis, G. (1991) "Simulation of stochastic processes by spectral representation" *Applied Mechanics Rev*, Vol.44, Nº 4, pp.191-204.
9. Davenport, A.G. (1961) "The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol.87, pp.194–211.
10. Ballaben, J., Rosales, M.B. (2013) "Spectral representation method and its application to wind loads on a guyed tower" *MACI* 4, pp.465-468.
11. Gazetas, George: "Foundation Vibrations", en *Foundation Engineering Handbook*, Segunda Edición, 1991.
12. Ayala, A.R., Reinert, H.O., Siviero, N.R. (2016) "Correlaciones de parámetros geotécnicos obtenidos de estudios de Líneas de Alta Tensión en suelos tropicales en la Provincia de Misiones". XXIII CAMSIG (Congreso Argentino de Mecánica de Suelos y Geotécnica).
13. Maciejewski, T. (1964). "Cálculo de Fundaciones para líneas de transmisión de energía eléctrica con el método de Sulzberger". *Revista Electrotécnica*. Bs As.
14. "Cálculo de fundaciones de estructuras soportes por el método de Sulzberger". <https://pdfcoffee.com/54231463-calculo-de-fundaciones-metodo-sulzberger-pdf-free.html#Gonzalo+Torrise>.

Organiza: