

## **ANÁLISIS ESTRUCTURAL POR ELEMENTOS FINITOS APLICADO A SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA PROVINCIA DE MISIONES, ARGENTINA**

**Fernando R. Detke<sup>a</sup>, Hugo O. Reinert<sup>a</sup>, Javier A. Duarte<sup>a</sup>, Horacio D. Pizzutti<sup>a</sup>,  
Pamela Y. Fank<sup>a</sup>, José L. Golemba<sup>a</sup>, Oscar Möller<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> *Departamento de Ingeniería civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones, Rosas 325, Oberá, Misiones, Argentina, detke@fiobera.unam.edu.ar*

<sup>b</sup> *Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Universidad Nacional de Rosario, Riobamba y Berutti, 2000 Rosario, Argentina, moller@fceia.unr.edu.ar*

**Palabras clave:** Sistemas de transmisión de energía eléctrica, Hormigón pretensado, Modelo estructural, Acción dinámica del viento.

**Resumen.** Se presenta en este trabajo un modelo estructural para representar numéricamente el comportamiento de sistemas de transmisión de energía eléctrica. El poste y su fundación son modelados con elementos finitos, mientras que los conductores, cable de guardia, cadenas de aisladores, crucetas y ménsulas son considerados como cargas. El poste de hormigón pretensado es representado por elementos de barra, con un resorte rotacional no lineal en la unión con la fundación para representar el comportamiento no lineal físico que puede ocurrir en esa zona del poste. La fundación y el suelo circundante se modelan con elementos-sólido, teniendo en cuenta así la interacción suelo estructura para aproximar los reales desplazamientos del conjunto. Las acciones son la carga estática gravitatoria permanente y la acción dinámica del viento horizontal considerada como un proceso estocástico. Como aplicación numérica se muestran parámetros de respuesta de un sistema formado por dos vanos de 250 metros de longitud, representativo de un sistema con desarrollo lineal sobre el terreno de topografía plana y rugosidad compatible con ambientes rurales, para una línea de transmisión de energía eléctrica de 132kV, considerando datos de velocidad de viento para la Provincia de Misiones, Argentina.

## 1 INTRODUCCIÓN

En el análisis de estabilidad de sistemas estructurales de líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica tiene importancia fundamental la incidencia de las fuerzas dinámicas generadas por la acción del viento en conductores eléctricos, cables de guardia, aisladores y estructura soporte. Dichas fuerzas son trasladadas al suelo de fundación si el sistema responde adecuadamente en términos de desplazamientos y esfuerzos internos.

Estas fuerzas que resultan de la integración de presiones, actuantes sobre los componentes del sistema, presentan un carácter no determinístico, pues derivan de la acción del viento, problema que se aborda con adecuada aproximación a través de su consideración como procesos aleatorios o estocásticos (Álvarez Marín, 2003, Blessmann, 1988, Castro et al., 2007).

El modelo estructural aquí tratado representa numéricamente el comportamiento bajo la acción aleatoria del viento de la fracción de un sistema de líneas de transmisión con nivel de tensión nominal de 132kV, Clase C-1, modalidad característica en los proyectos implementados en la Provincia de Misiones, conforme se observa en la Figura 1.



**Figura 1:** Línea de 132kV. Aristóbulo del Valle, Provincia de Misiones, Argentina.

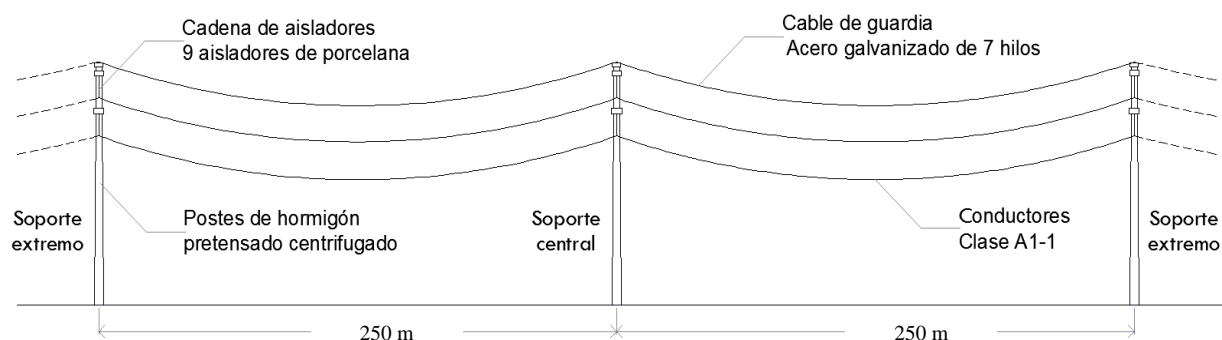
El objetivo de este trabajo es validar un modelo numérico que permitirá recopilar en forma eficaz, con técnicas de simulación numérica, resultados de comportamiento estructural que puedan ser útiles en la elaboración de diversas herramientas de diseño probabilístico. Para ello se define un conjunto de variables aleatorias principales y otro grupo de variables secundarias. Con esta técnica de evaluación estructural se podrá detectar en un estudio posterior qué variables son más importantes y poder generar funciones de costo del sistema estructural, que permitan optimizar el uso de los recursos y la seguridad de los mismos.

Los estados límites adoptados en este sistema estructural son dos: falla por agotamiento mecánico en el poste y falla por giro de la fundación al superarse los valores de capacidad portante del suelo. De la definición de estos estados límites surgen los parámetros de respuesta estructural seleccionados para el análisis: el desplazamiento máximo en el extremo superior del poste (cima), el esfuerzo de flexión en la unión del poste con su fundación, el giro relativo del poste medido en el resorte no lineal (rotula plástica), la rotación de la base medida desde una de sus caras, y la deformación específica del suelo en contacto con la fundación

Estos parámetros de respuesta permiten efectuar una evaluación cuantitativa de prestación del sistema y su comparación con los resultados de la aplicación de procedimientos reglamentarios de base determinística (AEA 95301, 2007; NBR 6123, 1988; Schiffrer et al., 1985).

## 2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y MECÁNICAS DE LOS ELEMENTOS COMPONENTES

La aplicación del análisis numérico se realiza sobre un tramo de dos vanos de 250 metros, representativo de una línea de 132kV, con desarrollo lineal sobre terreno plano de ambiente rural. El sistema está constituido por estructuras de suspensión simple, conformadas por: poste premoldeado de hormigón armado y pretensado, crucetas y ménsulas de hormigón armado que sustentan tres conductores eléctricos, cadenas de aisladores y un cable de guardia, como se ilustra en la Figura 2, con sus correspondientes bases de hormigón simple y terreno de fundación.



**Figura 2:** Tramo del sistema considerado en el modelo estructural.

Las características geométricas y mecánicas de los componentes mencionados se presentan en la Tabla 1 y cuya información ha sido empleada para la modelación del sistema.

En el presente trabajo los componentes del sistema estructural estudiado se dividen en dos grupos:

a) Elementos simulados en forma de acción externa, compuestos por crucetas y ménsulas de hormigón armado, conductores eléctricos, cadenas de aisladores y cable de guardia.

b) Elementos que constituyen el modelo computacional, formados por poste de hormigón armado y pretensado, base de hormigón simple y suelo de fundación.

Los parámetros que definen las características de los elementos del grupo a) son fijos y representativos de los sistemas de transmisión eléctrica utilizados en la región.

Los elementos del grupo b) poseen algunos parámetros geométricos y mecánicos variables (principales y secundarias), para ser utilizados a posteriori en un proceso de confiabilidad y optimización estructural. En la tabla 2 se definen las variables básicas o principales y sus límites, superior e inferior, de aplicación en el modelo estudiado.

Estas variables principales con sus respectivos límites se utilizan para obtener una muestra de 250 combinaciones mediante la técnica de Diseño de Experimentos, con el fin de adquirir una cantidad suficiente de resultados para realizar la aproximación de los parámetros de respuesta aplicando Redes Neuronales (Zhang, 2003).

Por otro lado, se definen variables secundarias para considerar la aleatoriedad de las propiedades mecánicas de los materiales y de la acción dinámica del viento. Para ello, con curvas teóricas de distribución estadística de resistencias y un generador de números aleatorios, se obtienen 10 subcombinaciones de valores para  $f'_c$ ,  $f_y$  y  $f_{py}$ , resistencias nominales del hormigón y de las armaduras pasivas y activas respectivamente. Así mismo, la acción del viento fue simulada numéricamente contemplando la aleatoriedad en uno de sus parámetros de la función periódica, el ángulo de fase (Mercanti et al, 2010).

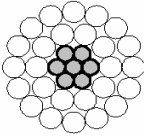

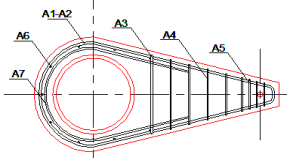
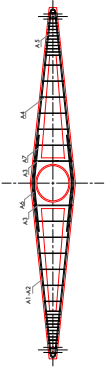

Elemento	Forma Geométrica	Parámetros principales		
		Descripción	Unidad	Valores
Cable conductor de energía	 <p>Aluminio/Acero 26/7</p>	Diámetro del conductor	[m]	0,0278
		Sección real	[m <sup>2</sup> ]	0,0002825
		Peso del conductor	[KN/m]	0,0098
		Coef. de dilatación lineal	[1/°C]	1,89E-05
		Módulo de elasticidad	[KN/m <sup>2</sup> ]	7,70E+07
		Masa total	[KN.seg <sup>2</sup> /m]	0,1000372959
		Carga de rotura	[KN]	42,75
Cable de guardia	 <p>Acero 50-7</p>	Diámetro del conductor	[m]	0,009
		Sección real	[m <sup>2</sup> ]	0,00005
		Peso del conductor	[KN/m]	0,00394
		Coef. de dilatación lineal	[1/°C]	1,15E-05
		Módulo de elasticidad	[KN/m <sup>2</sup> ]	1,850E+08
		Masa total	[KN.seg <sup>2</sup> /m]	0,1000372959
		Carga de rotura	[KN]	42,75
Ménsula de cable de guardia	 <p>Hormigón H-30 CIRSOC 201/82 Acero AND 420 Hormigón H-30</p>	Diámetro interior	[m]	0,4
		Diámetro exterior	[m]	0,64
		Longitud	[m]	1,32
		Ancho máximo	[m]	0,64
		Ancho mínimo	[m]	0,13
		Espesor medio	[m]	0,205
		Sección de acero longitudinal	[m <sup>2</sup> ]	0,00061
		Sección de acero transversal	[m <sup>2</sup> /m]	0,00028
		Módulo de elasticidad del	[KN/m <sup>2</sup> ]	34000000
		Peso	[KN]	2,535
		Volumen	[m <sup>3</sup> ]	0,1014
		Masa	[KN.seg <sup>2</sup> /m]	0,2583
		Módulo de elasticidad del acero	[KN/m <sup>2</sup> ]	200000000
		Cruceta de cable conductor de energía	 <p>Hormigón H-30 CIRSOC 201/82 Acero AND 420</p>	Diámetro interior
Diámetro exterior	[m]			0,78
Longitud	[m]			5,48
Ancho máximo	[m]			0,78
Ancho mínimo	[m]			0,13
Espesor medio	[m]			0,255
Sección de acero longitudinal	[m <sup>2</sup> ]			0,001572
Sección de acero transversal	[m <sup>2</sup> /m]			0,000224
Módulo de elasticidad del	[KN/m <sup>2</sup> ]			34000000
Peso	[KN]			10,5625
Volumen	[m <sup>3</sup> ]			0,4225
Masa	[KN.seg <sup>2</sup> /m]			1,0763344
Módulo de elasticidad del acero	[KN/m <sup>2</sup> ]			200000000

Tabla 1: Características geométricas y mecánicas de los elementos.

Poste de hormigón armado y pretensado	 Hormigón H-30 CIRSOC 201/82 Acero AND 420 Acero APL 1700	Diámetro cima	[m]	X(1)
		Conicidad	[m/m]	0,015
		Longitud	[m]	25
		Diámetro base	[m]	f(X(1))
		Espesor del poste	[m]	X(2)
		Cuantía de acero activo	[%]	X(3)
		Cuantía de acero pasivo	[%]	X(4)
		Peso	[KN]	VARIABLE
		Volumen	[m <sup>3</sup> ]	VARIABLE
		Masa	[KN.seg <sup>2</sup> /m]	VARIABLE
		Módulo de elasticidad del	[KN/m <sup>2</sup> ]	VARIABLE
Módulo de elasticidad del acero	[KN/m <sup>2</sup> ]	200000000		
Base de hormigón simple	Prisma de base cuadrada	Lado de la base	[m]	X(5)
		Altura de la base	[m]	X(6)
		Módulo de elasticidad del	[KN/m <sup>2</sup> ]	23500000
		Tensión especificada	[KN/m <sup>2</sup> ]	25000
Suelo		Módulo de elasticidad del suelo	[KN/m <sup>2</sup> ]	X(7)

Continúa Tabla 1: Características geométricas y mecánicas de los elementos.

Variable	Símb	Denom.	Lím. INF.	Lím. SUP.	Ud.
Diámetro de la cima del poste	$\varnothing_p$	X(1)	0,21	0,45	m
Espesor del poste	$e_p$	X(2)	0,07	0,12	m
Cuantía de armadura de pretensado	$\rho_{pret}$	X(3)	0,15	2,5	%
Cuantía de armadura pasiva	$\rho_{pas}$	X(4)	0,3	5	%
Lado de la base cuadrada	$a_b$	X(5)	0,80	1,80	m
Profundidad de la base	$h_b$	X(6)	1,80	3,00	m
Elasticidad del suelo	$E_s$	X(7)	6000	30000	KN/m <sup>2</sup>
Velocidad básica del viento	$V_o$	X(8)	5	80	m/s

Tabla 2: Variables principales y sus límites numéricos.

### 3 ACCIONES SOBRE EL MODELO

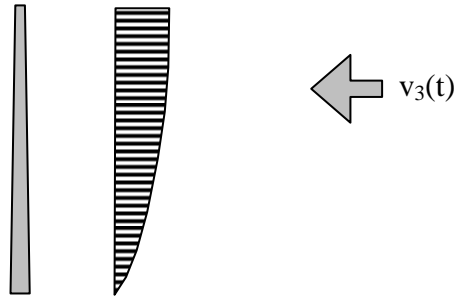
#### 3.1 Acciones gravitatorias de los elementos del grupo a)

Los conductores, cable de guardia, ménsulas y crucetas de soporte y otros elementos de fijación son modelados como una masa aplicada y reducida a la cima del poste, reproduciendo las propiedades mecánicas y de comportamiento características de los cables bajo la acción del peso propio, con límites máximos reglamentarios de flecha en el centro de los vanos, y la fuerza de tiro correspondiente en sus extremos.

#### 3.2 Acción del viento sobre elementos constitutivos del modelo.

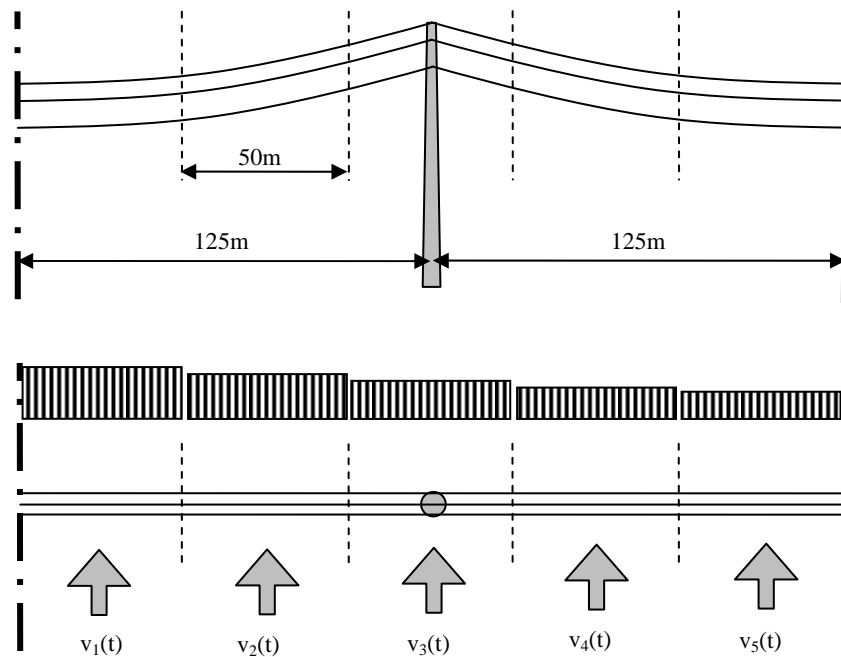
La acción dinámica del viento aplicada sobre el modelo se reduce a una carga puntual, dependiente del tiempo, ubicada en la cima del poste. Esta carga produce el mismo esfuerzo instantáneo de flexión en el pie del poste que la acción distribuidas en todo el modelo.

Para cuantificar la acción del viento a aplicar se utilizan distintas hipótesis dependiendo del elemento considerado. Así, para el caso del poste, se obtiene una carga que representa al diagrama de presiones exponencial tal como se observa en la Figura 3.



**Figura 3:** Acción del viento sobre el poste.

En cuanto para los cables (conductores e hilo de guardia), el frente de ráfagas se discretiza en bandas o fajas de 50m de ancho, considerando la correlación espacial y temporal en la dirección transversal y las distintas alturas medias de cada tramo de cable según se muestra en la Figura 4.



**Figura 4:** Acción del viento sobre cables.

Los registros de viento son simulados numéricamente mediante rutinas en lenguaje FORTRAN de las que se toma un intervalo de duración total de 300 segundos, considerando una componente de turbulencia adicionada a la velocidad media, uno de los cuales se detalla en la Figura 5 (Mercanti et al., 2010).

Para evitar efectos de impacto por aplicación súbita de la carga, que distorsionan el comportamiento del modelo, se contempla una “rampa de carga y descarga” de crecimiento y descenso progresivo en los primeros y últimos 30 segundos, del intervalo analizado. Las presiones generadas por esta acción son integradas en toda la estructura y reducido a la cima del poste como se observa en la Figura 6.

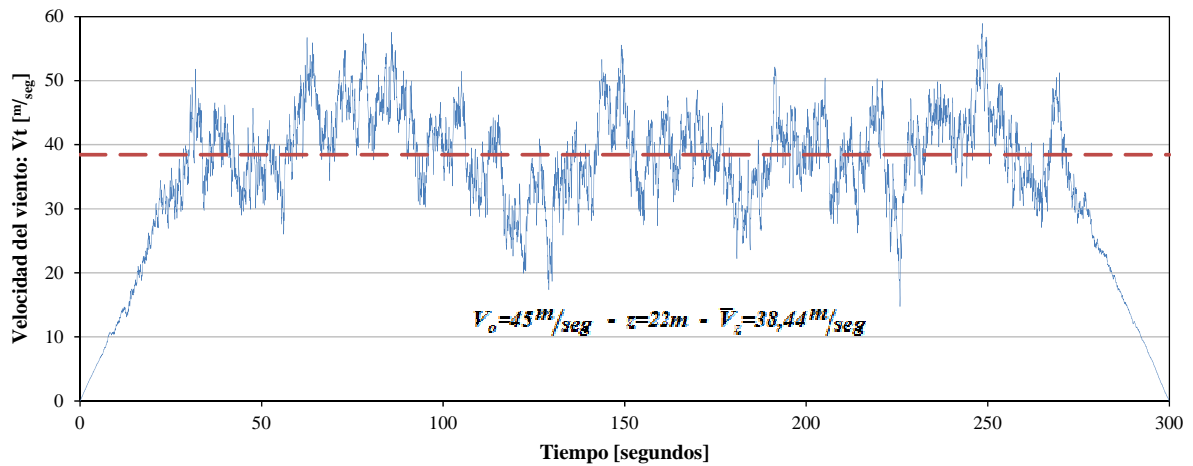


Figura 5: Registros de viento de una combinación.

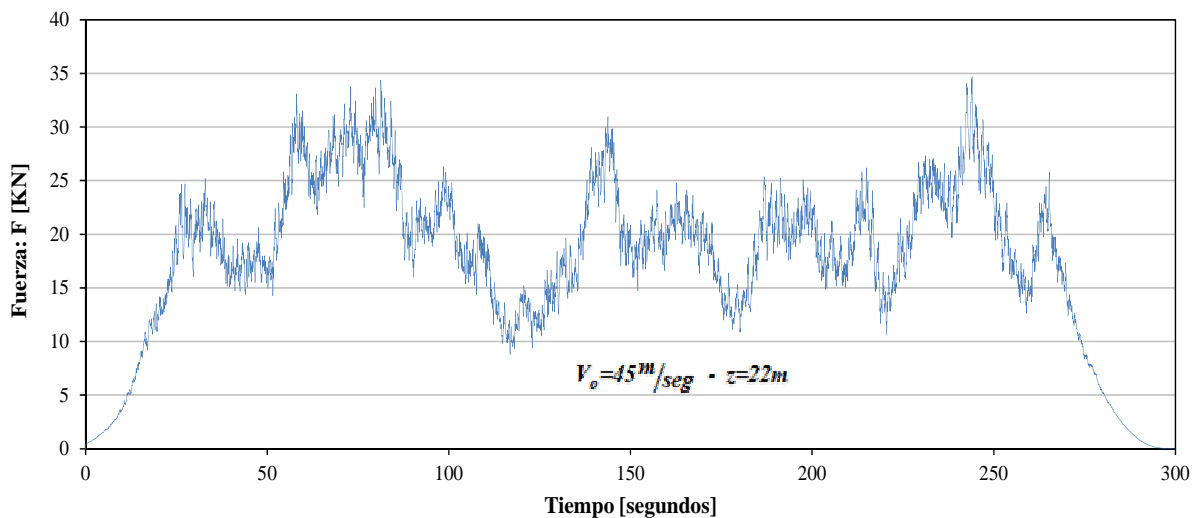


Figura 6: Acción del viento reducida a la cima del poste.

#### 4 GENERACIÓN Y ANÁLISIS DEL MODELO

La composición y desarrollo de la solución al problema abordado del modelo estructural, caracterizado anteriormente, se realiza a partir de la modelación digital en el software de análisis estructural SAP2000 Versión V.14.2.0, que resuelve el problema por el método de los elementos finitos, y cuya discretización se ilustra en la Figura 7.

#### 4.1 Definición de los materiales utilizados

Se definen para este modelo seis tipologías de materiales:

4.1.1. Hormigón para poste (H30 05): Material hormigón utilizado para los postes, en el cual se definen la resistencia especificada y el módulo de elasticidad. Para este hormigón se ha establecido que la descripción constitutiva del material en el campo plástico se efectúa con el modelo de Takeda (Takeda et al., 1970). La definición de la curva Tensión-Deformación sigue el modelo de Mander (Priestley et al., 1996). Las propiedades mecánicas de este material forman parte del conjunto de variables secundarias.

4.1.2. Hormigón para base (H25 05): Material hormigón que conforma el dado de fundación del sistema soporte. El mismo sigue idéntica configuración constitutiva que la utilizada en H30 05. Este material no tiene sujeta ninguna variable aleatoria (principal o secundaria).

4.1.3. Acero pretensado para sección (acero Pre): Material acero de refuerzo generado para simular la cuantía de armadura activa en las secciones del poste que están elaboradas mediante el módulo SECTION DESIGNER. Los parámetros mecánicos de este material son incluidos en el grupo de variables secundarias

4.1.4. Acero de armaduras pasivas (ADN 420): Material acero de refuerzo generado para simular la cuantía de armadura pasiva en las secciones del poste, elaboradas mediante el módulo SECTION DESIGNER. Los parámetros mecánicos de este material son incluidos en el grupo de variables secundarias, (Park et al., 1979).

4.1.5. Acero para tendones (APL 1700): Material acero de refuerzo tipo tendón generado para simular la acción de pre compresión de la armadura activa sobre el hormigón del poste. Este material es asignado al elemento tendón. Sus características mecánicas se corresponde con las del material acero Pre.

4.1.6. Suelo Colorado: material definido de modo genérico que simula el comportamiento mecánica del suelo regional con aproximación razonable y suficiente para los alcances de este estudio. Sus parámetros son obtenidos de una serie de ensayos realizados en el laboratorio de estructuras de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones. El módulo de elasticidad de este material constituye una de las variables principales del problema.

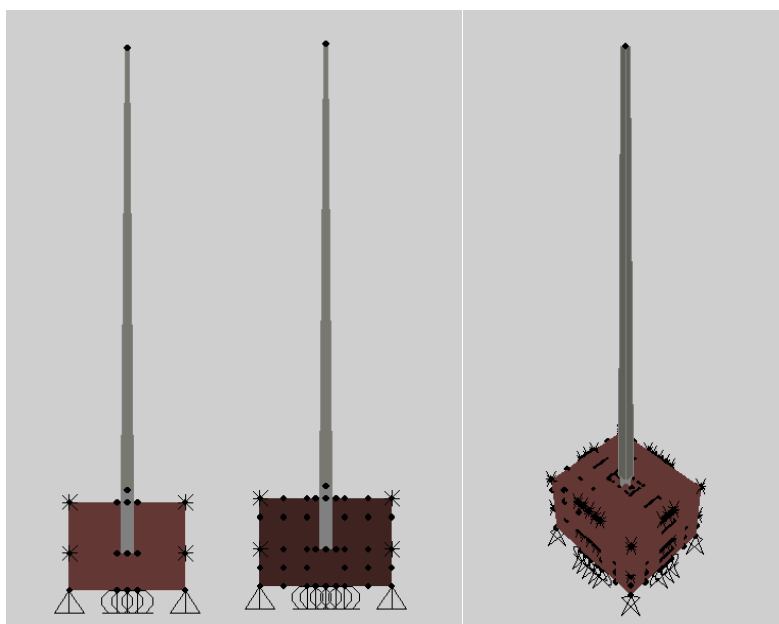


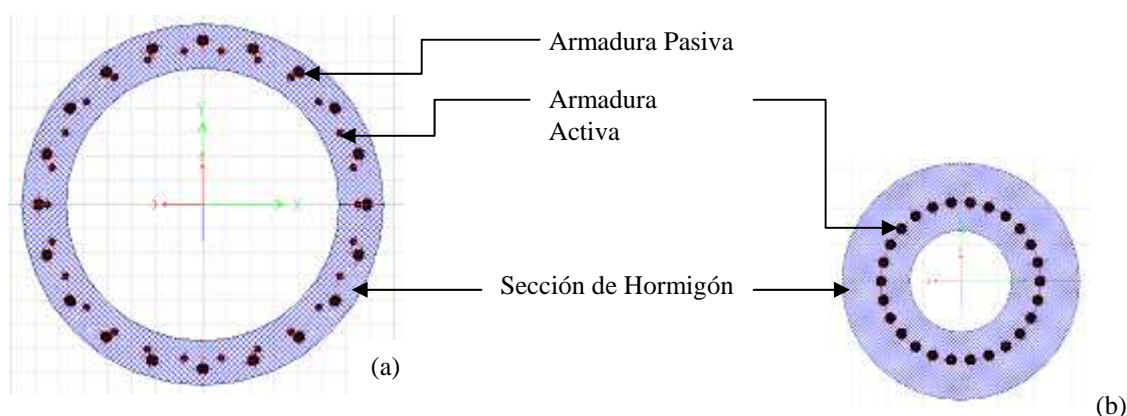
Figura 7: Modelo digital.



## 4.2 Definición de los elementos componentes en el modelo digital

Con respecto a los elementos finitos que se han utilizado para representar a la estructura, se puede decir:

4.2.1. Para la estructura soporte (poste) se consideraron elementos de barra de sección circular anular variable, modeladas en hormigón armado y pretensado, en función de un diámetro de partida en la cima y de la conicidad propia del poste. Esta barra de sección variable está definida mediante dos secciones elaboradas en el módulo SECTION DESIGNER del SAP2000, tal como muestra la figura 8. A estas secciones se asignan los materiales 4.1.1, 4.1.3, 4.1.4 referidos en párrafo anterior. Esto permite ajustar al máximo las propiedades geométricas y mecánicas de los elementos con la realidad de la estructura.



**Figura 8:** Secciones del Poste. (a) en la base. (b) en la cima.

Se comienza definiendo una sección anular de diámetro pertinente a la combinación que se está elaborando, luego se agregan las armaduras pasivas y activas asignando los materiales correspondientes a cada caso. Una ventaja del uso de este módulo es la posibilidad de poder visualizar diagramas momento-curvatura de las secciones creadas como así también los límites entre el campo elástico y la zona de plastificación de la sección. También provee datos de estados límites últimos (momento de rotura y curvatura en ese instante).

4.2.2. El efecto de pretensado aplicado al poste es modelado como una carga aplicada en ambos extremos mediante la concatenación con la barra de un elemento tendón, el cual cumple el objetivo de simular el efecto de precompresión en forma de acción externa. El mismo se combina con el elemento barra que simula al poste, de manera tal de obtener como consecuencia una barra precomprimida por una carga equivalente a la fuerza de pretensado.

4.2.3. Respecto al resorte no lineal, que es el elemento mecánico incorporado para estudiar la falla por agotamiento seccional del poste, se configura bajo las siguientes hipótesis:

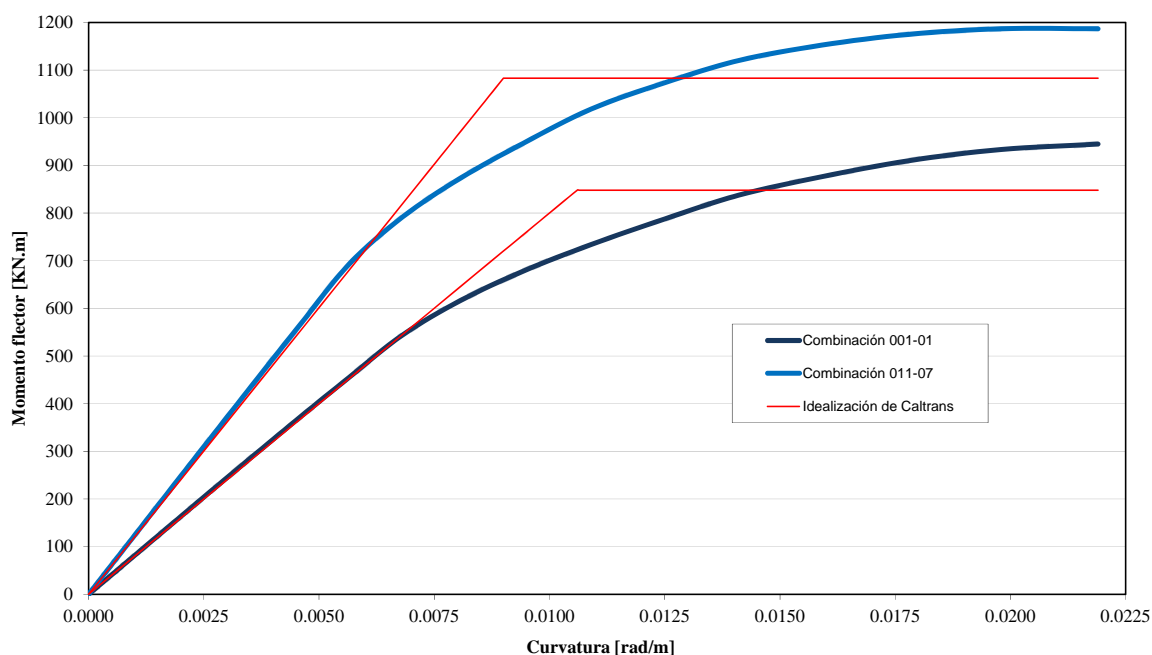
P-M2-M3, es el modelo utilizado para el resorte no lineal que combinado con el modelo de fibras contempla un mecanismo de interacción entre esfuerzo axial (P) y flexión (M2-M3). La fibra P-M2-M3 de esta rotula, modela el comportamiento axial de una serie de "fibras" representativas en forma longitudinal, distribuidas a través de la sección transversal del elemento barra. Cada fibra tiene una ubicación, un área tributaria y una curva de tensión-deformación. Los esfuerzos axiales están integrados en la sección para calcular los valores de P, M2 y M3

El comportamiento no lineal de la sección deriva directamente del de las fibras. Por tanto la validez de los resultados obtenidos depende de la precisión de los modelos empleados para el material. Se supone que las secciones planas y normales a la directriz de la pieza

permanecen planas y perpendiculares a dicho eje durante toda la historia de deformaciones del elemento. Se desprecian los efectos producidos por el cortante en la distribución de tensiones normales.

La precisión de la respuesta del modelo depende de la finura de la discretización que se emplee. En este trabajo se utiliza un mallado de 10 por 10 en ambas direcciones de la sección. Un mayor número de fibras proporciona una mayor precisión de la respuesta obtenida, a costa de un mayor coste computacional tanto en tiempo de cálculo como en las necesidades de memoria ya que, al tratarse de un modelo no lineal, será necesario almacenar un mayor número de variables históricas necesarias para seguir la pista al ciclo de histéresis de cada una de las fibras.

La idealización de Caltrans, constituye un criterio simplificado para la idealización de la relación momento-curvatura, representándolo en forma bilineal de manera de compensar las energías a ambos lados de la curva real, tal como lo muestra la Figura 9.



**Figura 9:** Relaciones momento-curvatura para modelo de fibras e idealización de Caltrans.

4.2.4. La cimentación se modela como elementos sólidos tridimensionales convenientemente discretizados que simulan la fundación propiamente dicha, conformando un prisma de hormigón simple de sección rectangular y eje vertical, en el cual se superpone el elemento barra que modela el poste, generándose de esta manera un empotramiento del mismo en la fundación.

4.2.5. Se modela a su vez una porción limitada del suelo circundante con el fin de capturar la interacción suelo-estructura. Las propiedades del suelo se asumen elásticas, despreciando los efectos de amortiguamiento.

En cuanto a los límites de análisis del suelo, se establecieron mediante una serie de pruebas que permitieron definir una solución de compromiso entre el costo computacional y la relevancia de los límites impuestos en los resultados obtenidos. Es así que se fijó en 2.70m el suelo circundante en las direcciones coincidentes con la planta de la base, y en 1.80m en la dirección vertical. En cada una de estas direcciones se estableció como condición de borde la restricción al desplazamiento en la dirección normal al plano de borde.

### 4.3 Casos de análisis utilizados.

**Análisis gravitatorio (DEAD):** analiza la estructura considerando solo las cargas muertas aplicadas al sistema, incluyendo el peso propio de la estructura. Este análisis es de tipo lineal estático. Las cargas permanentes comprenden los pesos de la estructura de suspensión (postes, cruceta, ménsulas, cadenas de aisladores, herrajes) y de los conductores y cable de guardia, según especificaciones de fabricantes.

**Análisis No lineal de Precomprensión (Pretesado):** este análisis es el primer caso no lineal que se resuelve en el problema. El mismo intenta simular el efecto del pretensado en los elementos que componen el poste de hormigón estructural.

**Análisis No lineal Dinámico de la acción del viento (V escalado Hg):** este análisis es de tipo no lineal y aplica a la estructura por intermedio de un patrón de carga predefinido y una señal temporal de amplitud y periodo estocásticos, una acción dinámica que intenta simular la acción que ejercen los cables y sus sistemas de apoyos sobre la estructura soporte principal que es el poste de hormigón estructural. Para la resolución de las ecuaciones de movimiento de la estructura se define el método de Newmark como técnica de integración paso a paso.

## 5 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para este trabajo se analizan doce combinaciones representativas del conjunto de doscientos cincuenta, evaluando los parámetros de respuesta para las diez subcombinaciones correspondientes, totalizando ciento veinte experimentos.

Se presenta en la tabla 3 el conjunto de variables elegidas aleatoriamente de cuatro combinaciones las que son utilizadas, más adelante, como representativas del modelo para mostrar las repuestas del poste y la interacción base-suelo.

Variable	Ud.	Denom.	Combinaciones			
			C 001	C006	C011	C015
Diámetro de la cima del poste	m	X(1)	0.245	0.324	0.341	0.322
Espesor del poste	m	X(2)	0.070	0.078	0.086	0.090
Cuantía de armadura de pretensado	%	X(3)	2.260	0.890	1.16	1.14
Cuantía de armadura pasiva	%	X(4)	4.800	4.840	3.75	4.28
Lado de la base cuadrada	m	X(5)	1.000	1.050	1.10	1.10
Profundidad de la base	m	X(6)	2.450	2.300	2.15	2.85
Elasticidad del suelo	$\text{kN}/\text{m}^2$	X(7)	27427	20232	9306	7073
Velocidad básica del viento	$\text{m}/\text{s}$	X(8)	63.0	54.9	11.7	42.6

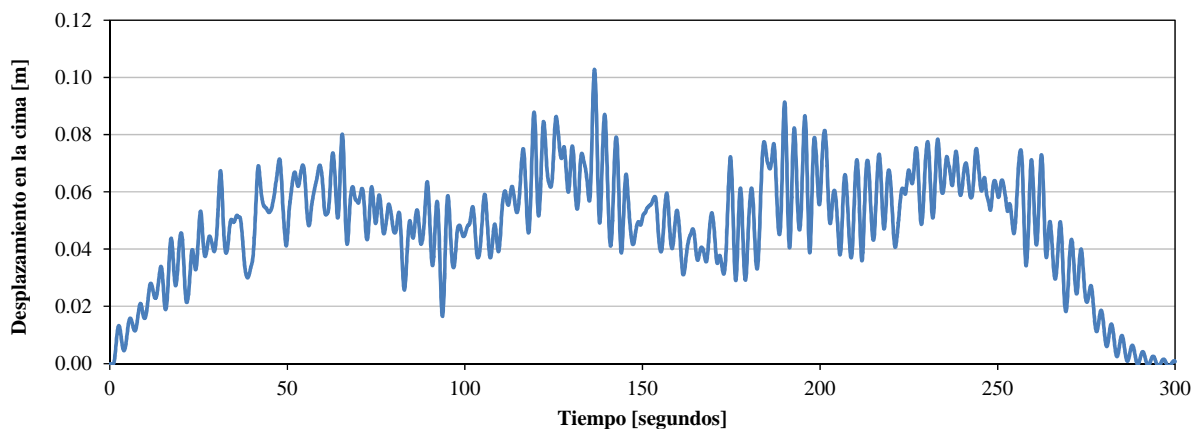
Tabla 3: Combinaciones y variables principales seleccionadas.

### 5.1 Análisis de resultados del poste

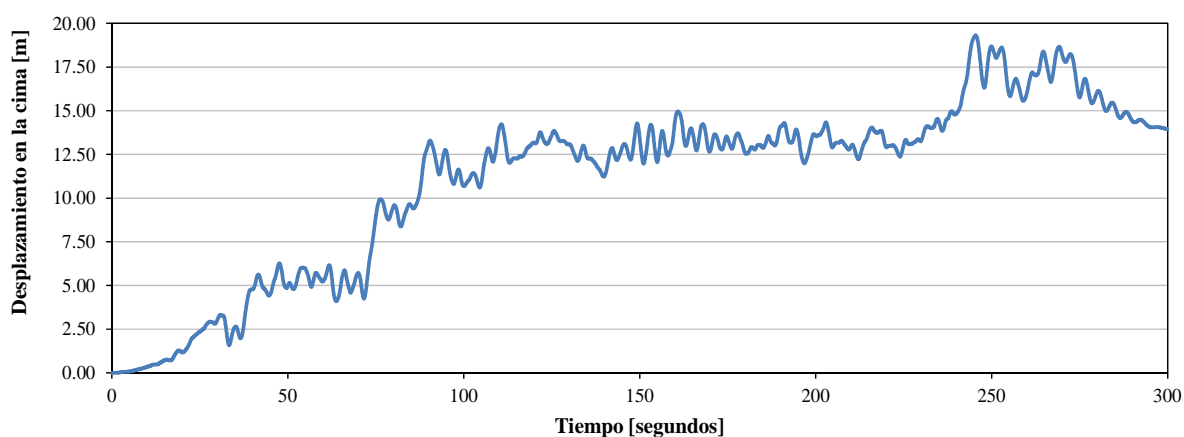
Como respuesta del comportamiento del poste se muestra el desplazamiento de su cima, medido en la dirección del viento y la relación momento-rotación de la rótula plástica ubicada en la base del poste.

En la Figura 10 y Figura 13 se puede apreciar el desplazamiento de la cima del poste y las relaciones momentos-rotaciones de la sección de la base del mismo. El comportamiento del elemento se desarrolla preponderantemente en el campo elástico, para acciones del viento moderadas a bajas, ver Tabla 3.

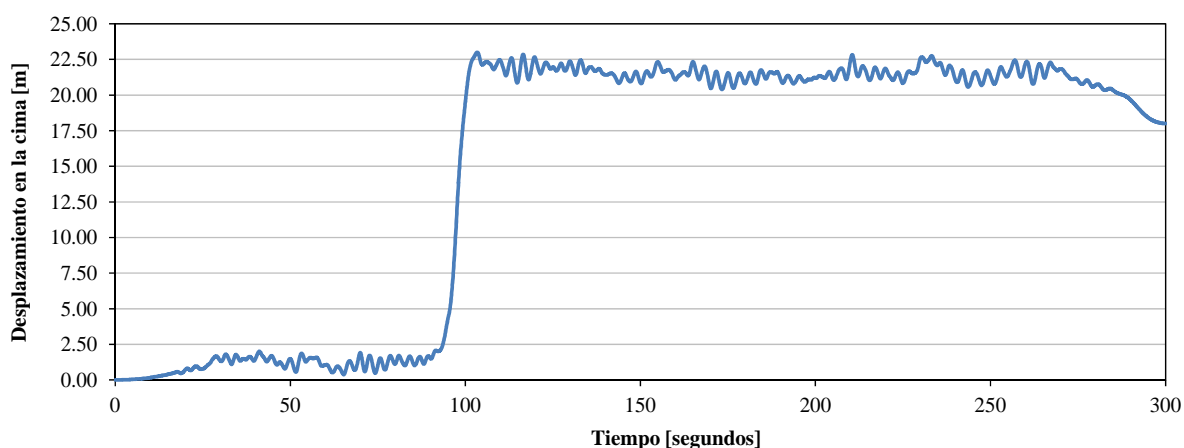
Por otro lado las Figuras 11, 12 y 14 muestran las mismas respuestas del poste indicadas en el párrafo precedente, pero la conjunción de los parámetros de las combinaciones utilizadas hace que el comportamiento del elemento se realice mayoritariamente en el campo plástico.



**Figura 10:** Respuesta desplazamiento en la cima. Combinación C011-07.



**Figura 11:** Respuesta desplazamiento en la cima. Combinación C001-01.



**Figura 12:** Respuesta desplazamiento en la cima. Combinación C006-04.

Se destaca que para la subcombinación 001-01, la respuesta es fuertemente cíclica debido a cargas y descargas del sistema producto de la acción dinámica del viento. Este fenómeno de fatiga que se observa, señala un nuevo punto de estudio a corto plazo, dado que es interesante detectar que incidencia tienen los procesos de fatiga en una estructura de estas características en términos de su capacidad portante.

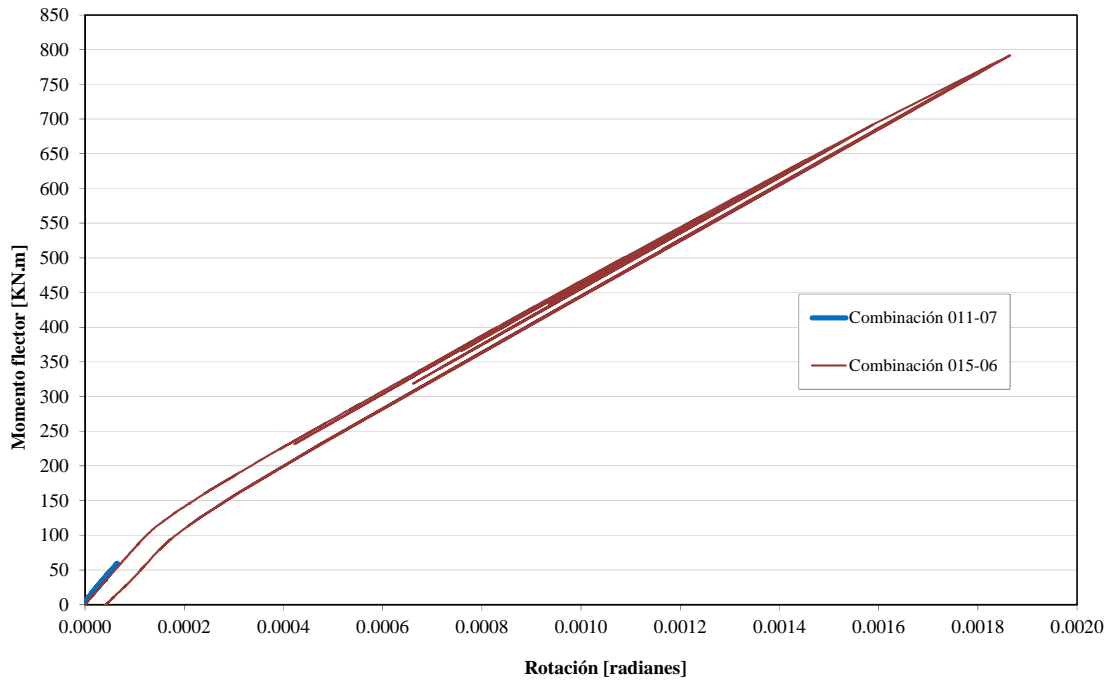


Figura 13: Relación momento-rotación. Resorte no lineal. Comportamiento elástico.

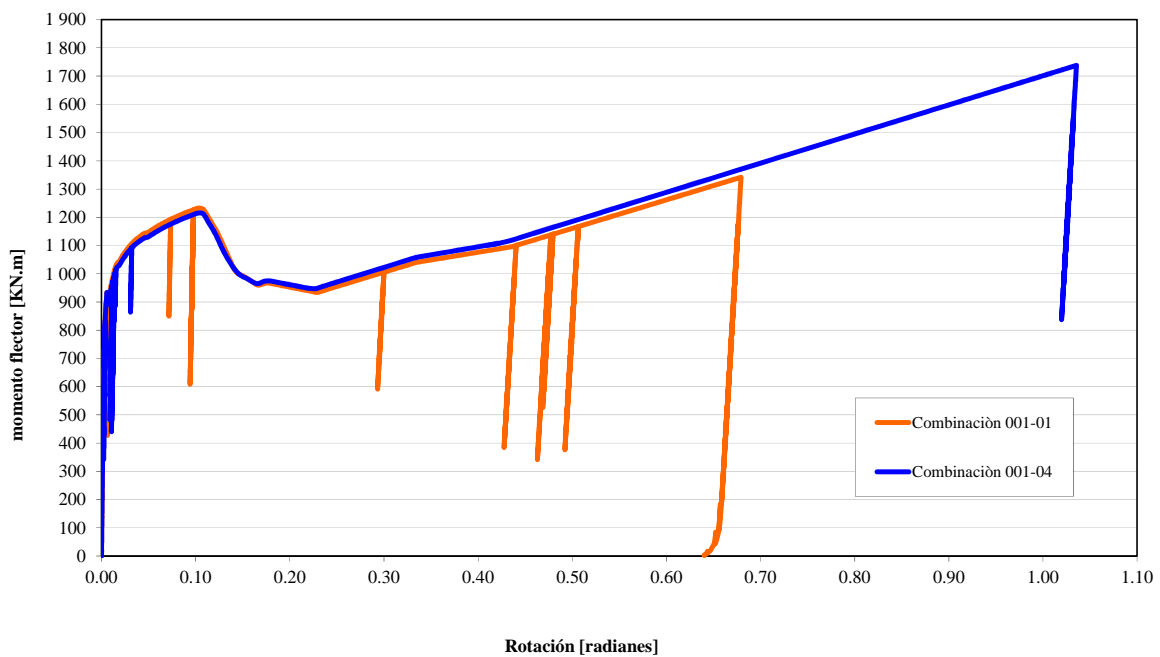


Figura 14: Relación momento-rotación. Resorte no lineal. Comportamiento plástico.

## 5.2 Análisis de resultados de la interacción base-suelo

Como respuesta del comportamiento del sistema base-suelo de fundación se muestra la rotación de la base en la dirección de la acción del viento y la deformación específica de elementos de suelo ubicados a ambos lados de las caras perpendiculares a la dirección del viento de la base.

Recordando que los parámetros mecánicos que definen al material suelo colorado del modelo tienen un comportamiento lineal. Comparando las deformaciones específicas mostradas en las Figuras 15 y 16 con los resultados obtenidos experimentalmente, los modelos correspondientes a estas combinaciones actúan en el régimen elástico.

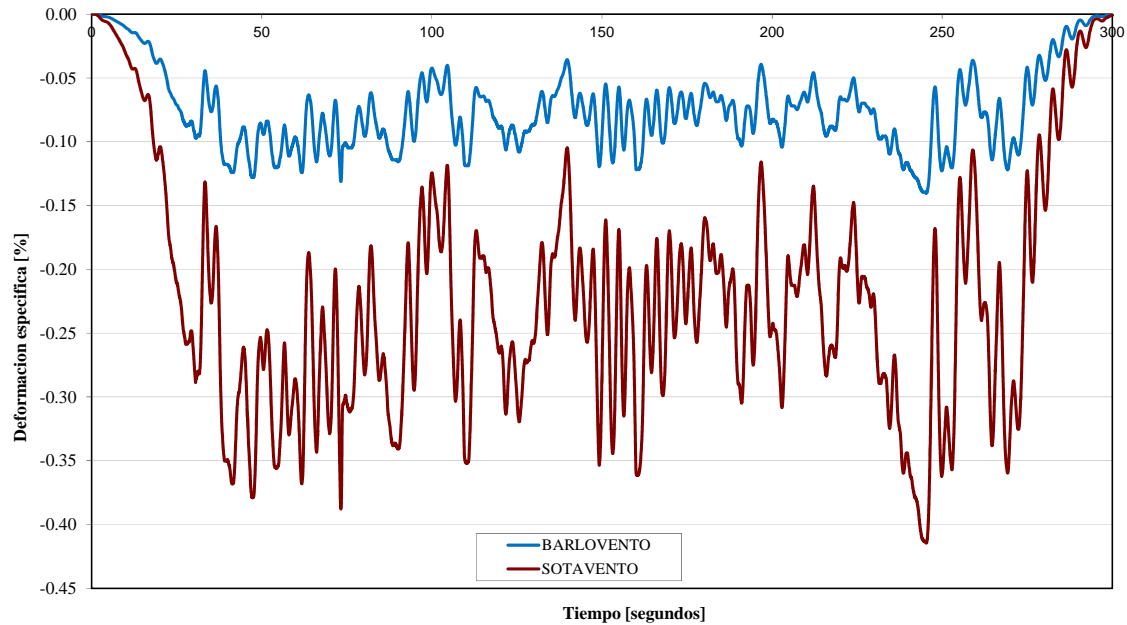


Figura 15: Deformación unitaria del suelo. Combinación 001-01.

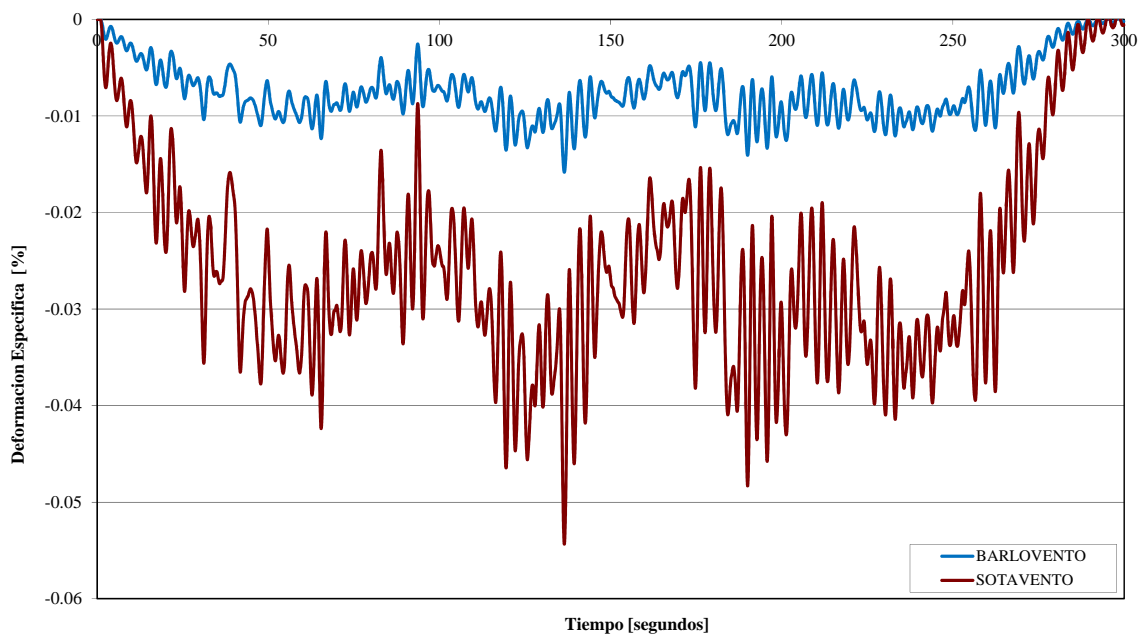
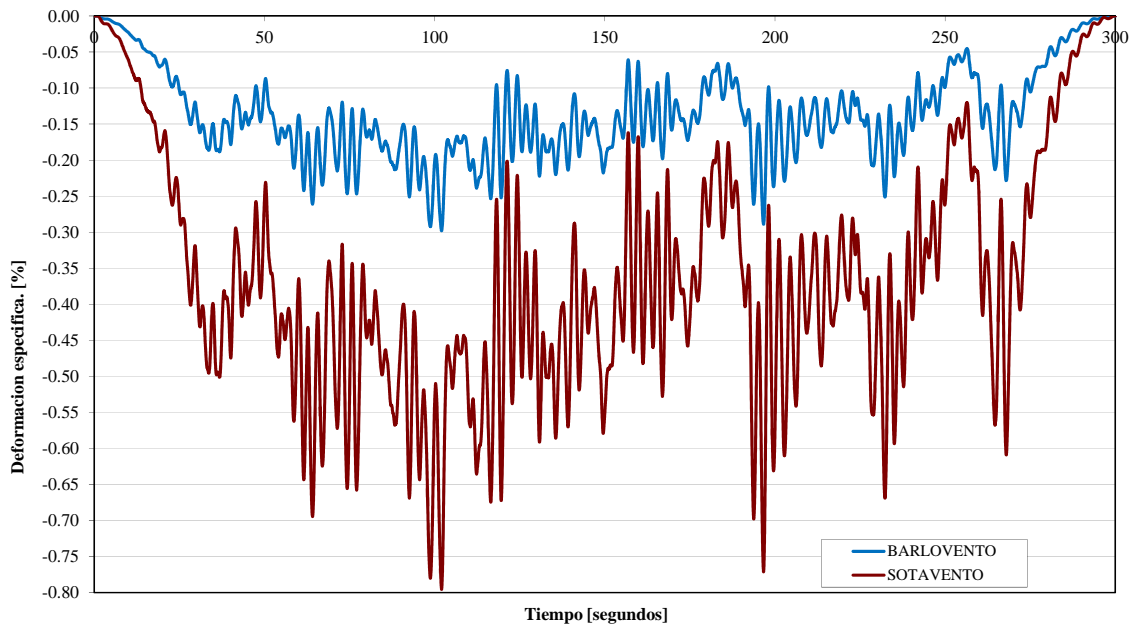


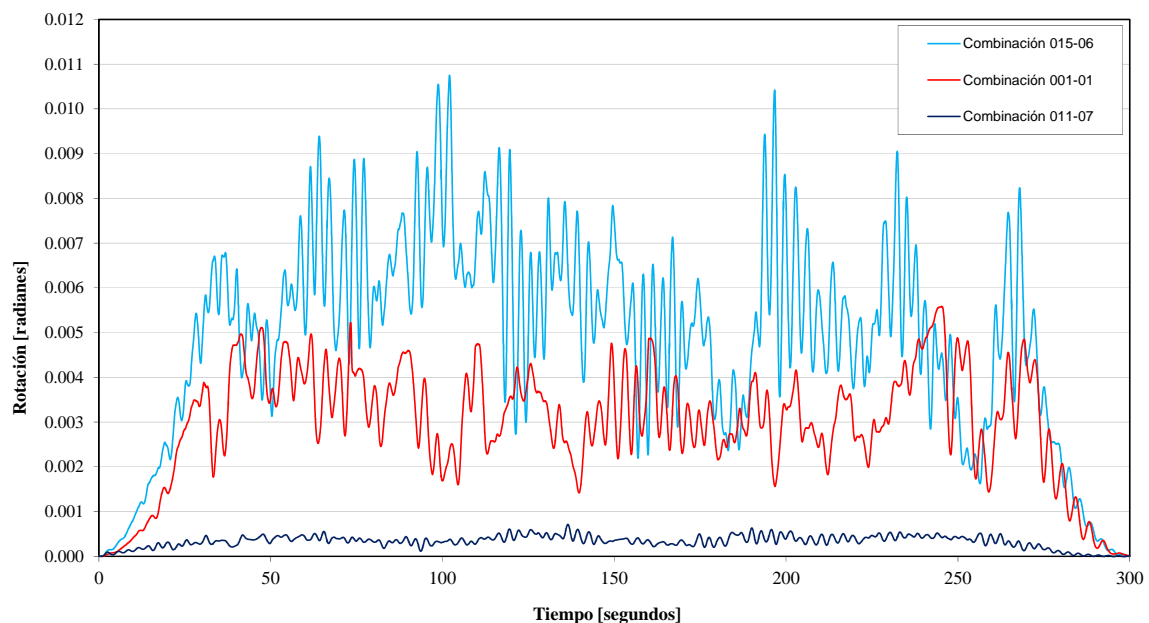
Figura 16: Deformación unitaria del suelo. Combinación 011-07.

Por otro lado, la misma comparación realizada para el modelo cuya respuesta se observa en la Figura 17, responde a un comportamiento no lineal del material, dado que la deformación específica supera el límite elástico determinado en laboratorio para ese tipo de suelo.



**Figura 17:** Deformación unitaria del suelo. Combinación 015-06.

El análisis de la Figura 18 indica que tanto las combinaciones 011-07 y 001-01 presentan giros de la base de pequeña magnitud, correspondiéndose con las respuestas mostradas para las deformaciones del suelo de los mismos modelos. Así mismo existe correspondencia biunívoca con las respuestas de la combinación 015-06 en la cual las deformaciones y los giros resultan mayores, indicando su pertenencia al campo elasto-plástico.



**Figura 18:** Giro de la base para distintas combinaciones.

### 5.3 Análisis estructural según procedimiento estático equivalente.

Desarrollado basándose en la teoría de estabilidad de estructuras, y cumpliendo con las prescripciones emanadas de las reglamentaciones vigentes (AEA 95301, 2007; NBR 6123, 1988). En ellas la acción dinámica del viento es transformada a una acción estática equivalente actuando en todos los elementos del sistema, bajo diferentes hipótesis y estados de carga.

El desplazamiento en la cima del poste, como así también las solicitaciones en la base del mismo (momentos flectores y esfuerzo de corte) arrojan valores entre un quince a un veinticinco por ciento mayores para los modelos analizados digitalmente respecto de los resueltos con procedimiento estático equivalente (Detke et al., 2010).

## 6 CONCLUSIONES

El análisis de los parámetros de respuesta de desplazamientos y esfuerzos internos, muestra que los mismos son consistentes tanto para el comportamiento elástico como para las incursiones en el campo plástico, indicando que el modelo estructural propuesto es razonable. Las comparaciones cuantitativas con procedimientos de cálculo estático equivalente de reglamentos también manifiestan que el modelo digital es aceptable.

Si bien el modelo computacional representa al prototipo real, se debe tener en cuenta los criterios de simplificación al sistema de cargas actuantes. La acción más importante no considerada es el comportamiento dinámico de los cables, que será incorporada en trabajos futuros.

Los límites establecidos en la idealización de Caltrans son aceptables para definir fronteras entre los comportamientos de tipo elástico y plástico. De todas formas es necesario realizar la confirmación experimental de los resultados arrojados por el modelo. Así también se debe validar el comportamiento elastoplástico del suelo, recurriendo a técnicas de idéntica índole, atendiendo que el mismo es considerado como un material elástico en el modelo computacional.

La técnica de simulación del análisis estructural planteada se puede extender a otro tipo de problemas estructurales, pudiendo la misma cubrir un amplio espectro. Los conceptos y criterios utilizados para la confección del modelo computacional así lo confirman, puesto que se logran captar diferentes situaciones estructurales en un mismo modelo, las que pueden ser aplicadas a otro tipo de problemas.

Incorporando los elementos aquí no analizados (cruceas, cadenas de aisladores y cables), el modelo será utilizado en el proceso de evaluación probabilística de la respuesta de líneas de transmisión de energía eléctrica, con el objetivo final de optimizar el sistema, que significa encontrar un diseño que minimice el costo total y verifique índices de confiabilidad mínimos en cada nivel de desempeño requerido.

## REFERENCIAS

- Álvarez Marín, D.A. Control estructural estocástico de puentes sometidos a vibraciones producidas por el viento usando aletas separadas. *Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Manizales*, 2003.
- AEA 95301. *Reglamentación de líneas aéreas exteriores de media tensión y alta tensión*. Asociación Electrotécnica Argentina, Buenos Aires, 2007.



- Blessmann, J. *O vento na engenharia estrutural*. Editora da Universidade. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1988.
- Castro, H.G., De Bortoli, M.E., Wittwer, A.R.; Marighetti, J.O. Simulación numérica del campo de velocidades del viento atmosférico utilizando el método de representación espectral. *Mecánica computacional*, Vol XXVI, pp. 144-160, AMCA, 2007.
- Detke F.R., Reinert H.O., Duarte J.A., Klimczuk C. M., Fank P.Y., Möller O., Modelo estructural de sistemas de transmisión de energía eléctrica en la Provincia de Misiones, Argentina, *I Jornadas Regionales de Investigación en Ingeniería - UTN FRRe*, 2010.
- Mercanti, J.A., Aguirre M.A., Fank P.Y., Möller O., Acción dinámica del viento como proceso estocástico aplicado a sistemas de transmisión de energía eléctrica, *I Jornadas Regionales de Investigación en Ingeniería - UTN FRRe*, 2010.
- Mohamed Al Satari and Saif Hussain., Vibration Based Wind Turbine Tower Foundation Design Utilizing Soil - Foundation -Structure Interaction. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China. October 12-17, 2008.
- NBR 6123. Forças devidas ao vento em edificações. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*. Rio de Janeiro, 1988.
- Park, R., Paulay, T. *Estructuras de concreto reforzado*, Primera Edición, México, Editorial Limusa, 1979.
- Priestley, M. N. J., Seible, F. and Calvi, G. M. *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, tenth edition, United States of America, chapters 1, 4 y 5, 1996.
- Schiffner, M., Bruschi M. G. Construcción de líneas aéreas de energía eléctrica de tensiones nominales mayores de 1 kv. *DIN VDE 0210/12.85*, 1985.
- Takeda, T., Sozen, M. and Nielsen, N. Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 96, ST12, pp. 2557-2573, 1970.
- Zhang, J. Performance-based seismic design using designed experiments and neural networks, *PhD. Thesis, Department of Civil Engineering, University of British Columbia*, Canada, 2003.