

ASENTAMIENTOS PERMANENTES EN TORRES EÓLICAS DE EJE HORIZONTAL DEBIDOS A CARGA SÍSMICA

PERMANENT SETTLEMENTS IN HORIZONTAL-AXIS WIND TURBINE TOWERS DUE TO SEISMIC LOADING

**Diego F. Turello^{a,b,c}, Mauro S. Maza^a, Franco P. Soffietti^{a,b}, Sergio Preidikman^{a,b},
Fernando G. Flores^{a,b} y Federico Pinto^{a,b}**

^a*Depto. Estructuras FCFyN UNC, 5000 Córdoba, Argentina. diego.turello@unc.edu.ar*

^b*IDIT – UNC-CONICET, Av. Vélez Sarsfield 1611, Córdoba, Argentina*

^c*GIMNI – UTN-FRSF, Lavaisse 610, 3000 Santa Fe, Argentina.*

Palabras clave: Modelado de suelos, Interacción suelo-estructura, Interacción fluido-estructura, Aeroelasticidad computacional, Energía eólica, Turbina eólica.

Resumen.

En los últimos años, ha prevalecido una tendencia en el diseño de aerogeneradores de eje horizontal: el aumento de su tamaño con el fin de maximizar la energía extraída del recurso eólico. La interacción suelo-estructura afecta significativamente el comportamiento de la estructura durante eventos sísmicos. Ignorar esta interacción puede conducir a estimaciones inexactas del comportamiento estructural y, por lo tanto, comprometer la seguridad y la eficiencia de la estructura. Las torres eólicas generalmente utilizan fundaciones superficiales, las cuales pueden sufrir asentamientos diferenciales permanentes durante la fase de excitación sísmica debido a la degradación de rigidez del suelo donde se apoyan y a que el sistema de cargas debido a la interacción fluido-estructura tiene una componente de vuelco importante, lo que podría significar un riesgo alto para este tipo de estructuras. El propósito de este trabajo es investigar los posibles asentamientos permanentes en torres eólicas sometidas a sismo con el propósito de evaluar el desempeño de la estructura fundada sobre zapatas superficiales.

Keywords: Soil modelling, Fluid-structure interaction, Soil-structure interaction, Computational aeroelasticity, Wind energy, Wind turbine.

Abstract. In recent years, there has been a prevailing trend in the design of horizontal-axis wind turbines: increasing their size to maximize the extraction of wind energy resources. Soil-structure interaction significantly influences the behavior of structures during seismic events. Neglecting this interaction can lead to inaccurate estimations of structural behavior, thereby compromising the safety and efficiency of the structure. Wind towers typically employ shallow foundations, which may experience permanent differential settlements during the seismic excitation phase due to soil stiffness degradation at their supports. Additionally, the load system resulting from fluid-structure interaction has a significant overturning component, further increasing the risk for this type of structure. The purpose of this study is to investigate potential permanent settlements in wind towers subjected to seismic activity in order to evaluate the performance of structures founded on shallow footings.

1. INTRODUCCIÓN

En el diseño y análisis de grandes aerogeneradores de eje horizontal, la tendencia actual es ampliar su tamaño para optimizar la energía obtenida del viento. Al ser instaladas en zonas con actividad sísmica, las turbinas están expuestas al riesgo de experimentar solicitaciones sísmicas durante su vida útil, lo que hace fundamental estudiar su comportamiento estructural bajo tales condiciones de carga.

En este trabajo se estudian principalmente las deformaciones permanentes en una torre eólica de gran tamaño (LHAWT) con fundación de base aislada (BA) circular, considerando un modelo detallado de interacción suelo-estructura (ISE) y la acción de carga sísmica. Como variante estructural, se considera el caso donde la base se complementa con pilotes, denominándose esta tipología como BP en adelante. La modelación se realiza mediante un enfoque de elementos finitos que permite capturar con precisión la respuesta no lineal del suelo y la fundación bajo diferentes condiciones de carga.

El análisis de los asentamientos se lleva a cabo en el dominio del tiempo para considerar las no linealidades geométricas y material tanto en las fundaciones, las interfaces o el suelo circundante.

Para tener en cuenta la interacción suelo-estructura, se utiliza un modelo de elementos finitos que incluye tanto a la torre, la fundación y el suelo circundante, así como también las interfaces entre los distintos dominios. Para cada dominio se adoptan diferentes tipos de elementos finitos de acuerdo al tipo de estructura que modelan. El suelo se representa utilizando el modelo constitutivo Hardening Soil with Small Strains (HS-small) implementado en el software Plaxis (ver [Brinkgreve et al. \(2016\)](#)). Este modelo es particularmente adecuado para simular la respuesta del suelo bajo cargas dinámicas y cíclicas, ya que incorpora los efectos de rigidez no lineal y la reducción de rigidez con pequeñas deformaciones, lo que permite una representación más precisa del comportamiento del suelo en condiciones reales.

Para la simulación de las condiciones sísmicas, se emplean diferentes registros ajustados a los espectros de respuesta definidos por la normativa CIRSOC-INPRES (ver [INPRES \(2013\)](#)).

El modelo de elementos finitos permite calcular con precisión los desplazamientos verticales y horizontales de la fundación, así como los asentamientos diferenciales entre distintos puntos de la zapata. Estos resultados son fundamentales para evaluar la estabilidad de la torre y el impacto de los asentamientos en su comportamiento global. En particular, se considera la influencia de la rigidez del suelo y la capacidad de carga de la fundación, evaluando los criterios de seguridad establecidos en normativas internacionales como la IEC 61400-6 y el Eurocódigo 7 (ver [Svensson \(2010\)](#)).

Ante carga sísmica, los asentamientos diferenciales permanentes pueden exceder los límites de diseño, lo que puede resultar en la necesidad de considerar soluciones alternativas de fundación, la consideración de planes de remediación sobre la super-estructura, o estudio de la viabilidad de utilización de la torre eólica luego del evento sísmico.

Este estudio aporta una contribución al diseño y análisis de fundaciones de torres eólicas, destacando la importancia de una modelación detallada en la previsión y control de los asentamientos en contextos con variadas condiciones geotécnicas y sísmicas.

2. MODELO ESTRUCTURAL ANALIZADO

En este trabajo, se modela la torre de la turbina eólica junto con las estructuras de fundaciones y el suelo. Sobre la torre se coloca un sistema de cargas externas y masas que tiene en cuenta las cargas gravitatorias del Hub, la Nacelle y las palas del aerogenerador, junto con los momentos

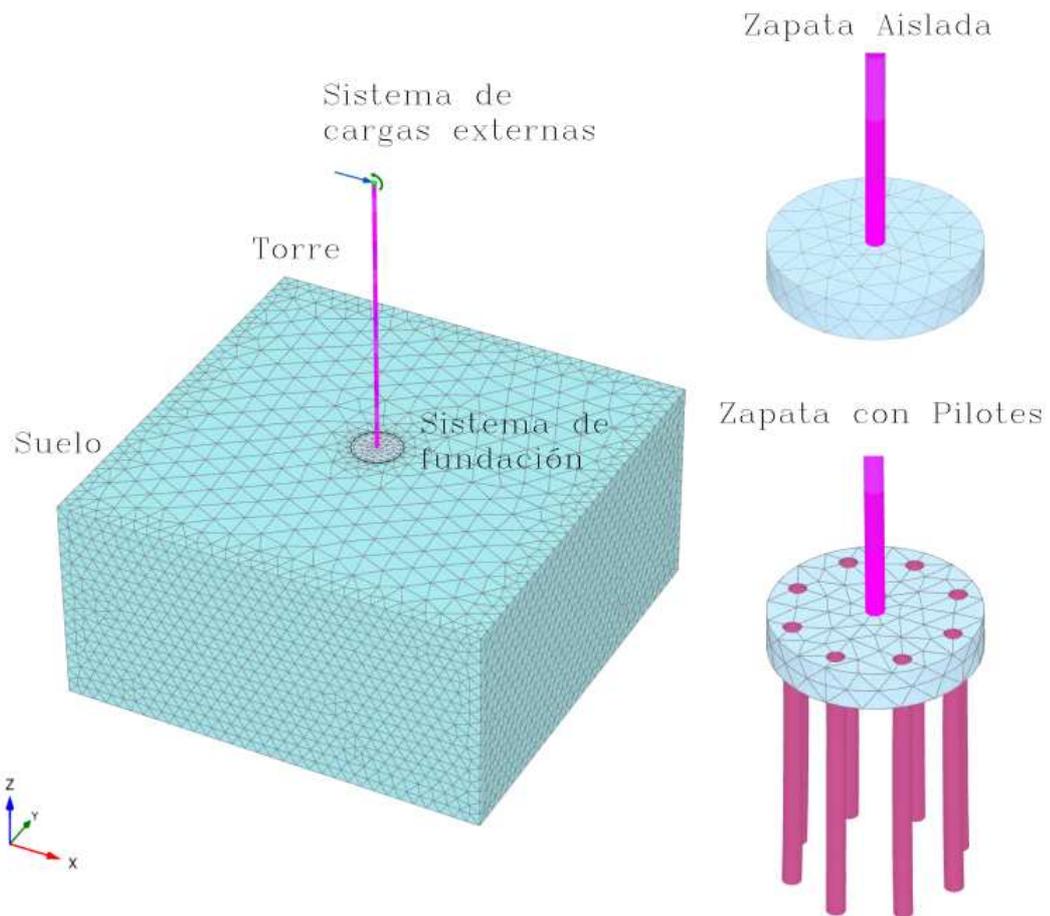


Figura 1: Esquema del modelo estructural analizado, junto con las alternativas para el sistema de fundación.

que se generan sobre el nudo superior de la torre debido a las excentricidades de estos elementos respecto a la torre. Además, se tiene en cuenta las cargas generadas por la interacción fluido estructura en la condición normal de operación de la turbina. Estas cargas se incorporan de forma simplificada en este análisis al considerarlas constantes en el tiempo. La masa de cada una de las palas es de $m_p = 1,12 \times 10^5$ kg. La masa de las palas, la góndola, el cubo y las vigas de unión suman $M_p + M_g + M_c = 17,43 \times 10^5$ kg¹.

La torre se modela con elementos de viga, mientras que la zapata y el suelo se discretiza mediante elementos de sólidos 3D.

Entre la zapata y el suelo se consideran interfaces no lineales donde se reduce la resistencia del material del suelo, además de tener un comportamiento distinto en compresión o tracción.

El suelo (y la zapata) se modela con elementos de sólido 3D (tetraedros de 10 nodos) con una interpolación de segundo orden en desplazamientos. Para el suelo se adopta un material no lineal que tiene en cuenta la degradación de rigidez a baja deformación. El modelo utilizado es el hardening soil model with small strain [Brinkgreve et al. \(2016\)](#), [Benz et al. \(2009b\)](#), [Benz et al. \(2009a\)](#), [Schanz et al. \(2019\)](#). La Tabla 1 resume los parámetros materiales para arenas sueltas y densas. Cabe mencionar que en este trabajo solo se mostraran resultados para los casos

¹Las palas están compuestas por los modelos snl-100 del Sandia National Laboratories, con 100 m de longitud y cuyas propiedades mecánicas se pueden ver en la publicación de [Griffith \(2013\)](#)

de arenas sueltas.

La torre y en general las vigas se modelan mediante elementos unidimensionales de viga de 3 nodos con grados de libertad traslacionales y rotacionales. A estos elementos se les asigna un material elástico lineal. En este modelo se adopta una torre constituida por una sección transversal anular de acero, con diámetro exterior variable entre $d_{et} = 10,87$ m a $6,13$ m y espesor variable entre $t_t = 0,0347$ m a $0,0253$ m, para las secciones de la base de la torre y la sección superior, respectivamente. El material adoptado para la torre tiene propiedades mecánicas: $E_t = 2,1 \times 10^2$ GPa, $\nu_t = 0,3$, $\rho_t = 7850$ kg/m³. La altura de la torre hasta la góndola es de $H = 135$ m.

En este trabajo se consideran dos tipologías de fundaciones, la primera es considerando una base aislada de $D_B = 20$ m y $h_b = 4$ m y la segunda es considerando la misma base pero con la adicción de 8 pilotes de diámetro $D_p = 0,80$ m y longitud $L_p = 30$ m. En la Figura 1 se muestran estas dos tipologías junto con el modelo de elementos finitos. El material adoptado para las fundaciones tiene las siguientes propiedades mecánicas: $E_h = 30$ GPa, $\nu_t = 0,17$, $\rho_t = 2500$ kg/m³. Los pilotes se modelan como elementos de vigas embebidos en sólidos Turello et al. (2016a), Turello et al. (2016b), Brinkgreve et al. (2016), Smulders et al. (2019).

Parámetro	Nombre	Unidad	Arena suelta	Arena densa
Soil unit weight above phreatic level	γ_{unsat}	kN/m ³	16	16
Soil unit weight below phreatic level	γ_{sat}	kN/m ³	20	20
Secant stiffness in standard drained triaxial test	E_{50ref}	kN/m ²	7.83E+03	3.13E+04
Tangent stiffness for primary oedometer loading	E_{oedref}	kN/m ²	6.26E+03	2.51E+04
Unloading / reloading stiffness	E_{urref}	kN/m ²	2.35E+04	9.39E+04
Power for stress-level dependency of stiffness	m	-	0.50	0.50
Cohesion	c'	kN/m ²	0.00	0.00
Friction angle	φ'	°	30	32
Dilatancy angle	ψ'	°	0.00	0.00
Shear strain at which $G_s = 0,722 G_0$	$\gamma_{0,7}$	-	1.00E-04	1.00E-04
Shear modulus at very small strains	G_{0ref}	kN/m ²	6.52E+04	2.61E+05
Poisson's ratio	ν'	-	0.20	0.20
Shear wave velocity	V_s	m/s	200	400

Tabla 1: Propiedades materiales para el suelo. Hardening Soil Model with Small Strains.

3. REGISTROS SÍSMICOS

Los registros sísmicos considerados en este trabajo son los correspondientes a las señales registradas en los sismos de Loma Prieta (LP), Imperial College (IC) y Chichi (CC), los cuales se ajustan a los espectros elásticos de diseño del reglamento INPRES (2013), considerando zona 4 para suelos tipo-b y factor de importancia B.

En la Figura 2-(a) se muestran las historias de aceleraciones como fracciones de la aceleración de la gravedad para las diferentes señales consideradas y en la Figura 2-(b) se muestran los espectros del INPRES (2013) y los correspondientes a las señales ajustadas. Se puede ver que las señales ajustan bien a los espectro de diseño salvo en la zona del plafón con menores períodos, lo que se debe a una limitación en el software utilizado para ajustar los acelerogramas. Las señales consideradas se corrigen por línea de base Wong y Ibarra (2023).

La estructura tiene un periodo fundamental que cae fuera del plafón, $T_1 \approx 6,10$ s – $6,76$ s para las hipótesis de base fija y base flexible *soft*, respectivamente; para el segundo modo el

período se encuentra entre $T_2 \approx 0,45 \text{ s} - 0,50 \text{ s}$, cayendo en el plafón del espectro [Turello et al. \(2021\)](#).

En la Figura 2-(d) se muestra la intensidad de Arias ([Arias \(1970\)](#)) para los registros considerados y en la Figura 2-(c) el contenido de frecuencias.

En la Tabla 2 se resumen los parámetros más relevantes de las 3 señales analizadas en este trabajo. Puede verse que la señal CC es la de mayor PGA, sin embargo, la señal IC es la de mayor IA y tiempo de duración significativo.

Con estas señales se generan 2 hipótesis de carga, la primera en la que se aplica solo la componente horizontal del sismo en la dirección x y en adelante se la denomina *SH*; y la segunda donde se aplica una combinación de sismo horizontal y sismo vertical que se denomina *SHV* (direcciones x y z). La componente vertical en este caso se adoptó como $2/3$ de la componente horizontal.

Las señales se aplican sobre la base del modelo (*Compliant base* en PLAXIS) y sobre los laterales se aplican condiciones de contorno que simulan el problema de propagación de campo libre (*Free field* en PLAXIS).

	Registros		
	LP	IC	CC
PGA (g)	0.54	0.49	0.57
IA (m/s)	3.70	4.33	2.31
D_{5-95} (s)	14.87	29.14	15.93

Tabla 2: Parámetros de los registros sísmicos considerados.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

En la Figura 3 se muestran los asentamientos en dirección z del nudo central de la zapata y los giros según el eje y , ambos en función del tiempo y para las dos hipótesis sobre las cargas sísmicas, si solo se considera la componente horizontal o si se consideran las componentes horizontales y verticales (*SH* o *SHV*, respectivamente). Puede verse que para la base aislada, en la situación de carga gravitatoria inicial el desplazamiento máximo en dirección z es $U_z = 0,107 \text{ m}$ y el giro $G_y = 3 \times 10^{-4}$. Luego, durante la etapa de sismo (*SH* o *SHV*), se puede ver la evolución de los desplazamientos verticales y los giros para las distintas señales analizadas. Entre líneas de puntos se indican los tiempos significativos del sismo, es decir el tiempo entre una intensidad de Arias del 5 % y el 95 %. Puede verse que tanto los asentamientos como los giros permanentes se desarrollan durante este periodo de tiempo de sismo significativo. Para todas las señales consideradas y la hipótesis de arena suelta los asentamientos permanentes son mayores para la hipótesis de sismo horizontal-vertical *SHV* que para la hipótesis de sólo sismo horizontal *SH*. Los giros G_y se estabilizan alrededor de valores permanentes que dependen de la señal considerada. Luego de la fase de excitación severa, la torre y la zapata oscilan alrededor de esta configuración deformada. El movimiento de *Rocking* no se amortigua tan rápidamente como los desplazamientos verticales.

En la Figura 4 se comparan los resultados obtenidos con las dos tipologías de fundación estudiadas, la base aislada (*BA*) y la base con pilotes (*BP*) cuando el sismo se compone de la señal horizontal y vertical (*SHV*). Para el caso de la base con pilotes para carga gravitatoria, el desplazamiento máximo en dirección z es $U_z = 0,011 \text{ m}$ y el giro $G_y = 3,40 \times 10^{-5}$. Como era esperable, los desplazamientos y giros permanentes en la zapata con pilotes son mucho menores

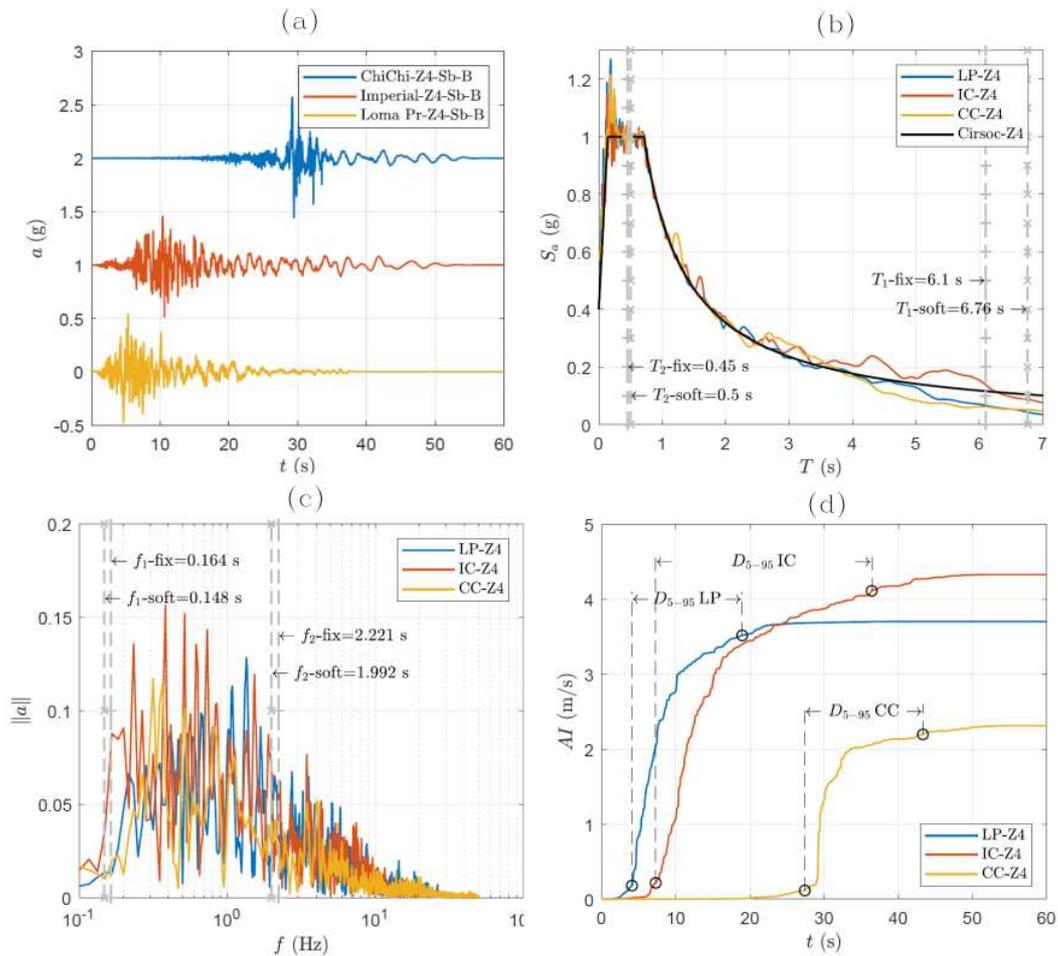


Figura 2: (a) Aceleraciones, (b) Espectros elásticos de diseño, (c) Contenido de frecuencias de los registros sísmicos considerados y (d) Intensidad de Arias de los registros considerados.

(del orden del 10 % de los valores calculados para la BA) a los verificados en la zapata aislada para todos los registros considerados. Es interesante ver las deformadas de la zapata en ambas situaciones,

En la Figura 5 se muestran los asentamientos máximos en dirección z del nudo central de la zapata y los giros permanentes según el eje y en función de la intensidad de Arias de las señales consideradas. Puede verse que a mayor intensidad de Arias mayor es el asentamiento permanente en las dos hipótesis consideradas, SH o SHV. Sin embargo, los asentamientos para las hipótesis SHV son sensiblemente mayores a la hipótesis SH. Los giros máximos permanentes son mayores para la señal IC en la hipótesis SHV, que es la de mayor IA.

Si se toma como referencia la norma internacional IEC 61400-6:2020 *Wind energy generation systems - Part 6: Tower and foundation design requirements*, Madsen y Risø (2008), en ausencia de especificaciones impuestas por el fabricante se puede considerar:

- el giro máximo permitido es de 3×10^{-3}
- el asentamiento máximo de 0,025 m

Puede verse que los asentamientos para el caso de la zapata aislada en arena suelta superan ampliamente este límite aún para las cargas de servicio gravitatorias. En las hipótesis de sismo

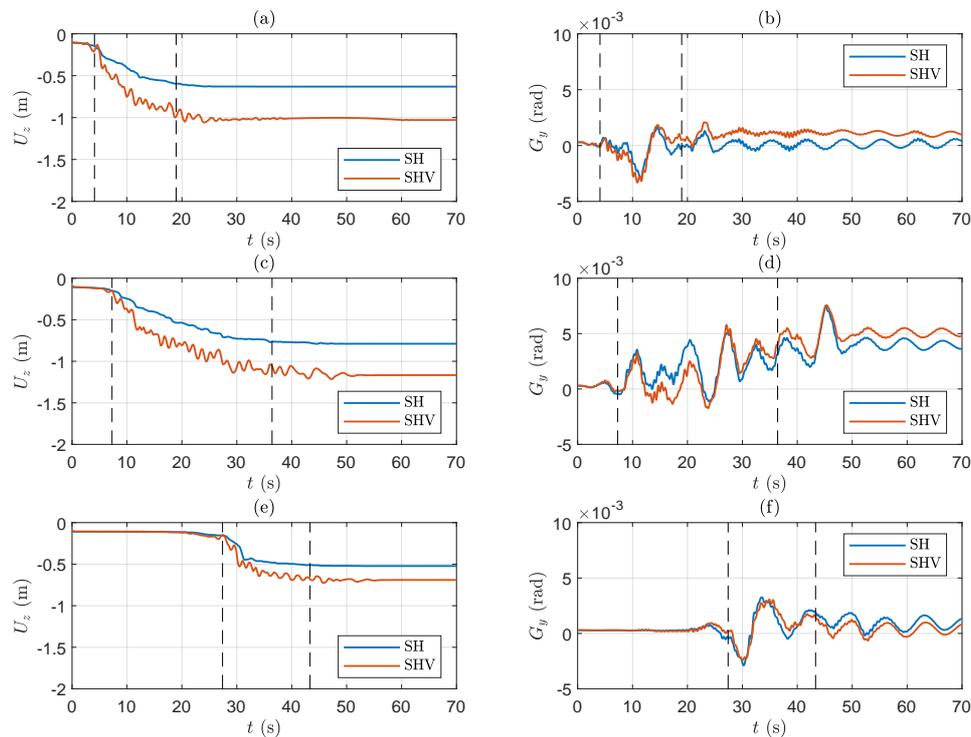


Figura 3: Asentamientos U_z y giros G_y en función del tiempo para los distintos sismos considerados y las distintas estrategias para considerar la carga sísmica. Se muestran desplazamientos y giros respectivamente para: (a) y (b) el registro de Loma Prieta (LP), (c) y (d) el registro de Imperial College (IC) y (e) y (f) el registro de Chichi (CC).

los asentamientos son mucho mayores al límite impuesto en la IEC 61400-6. Por otro lado los giros permanentes parecen mantenerse dentro del límite salvo para la señal de mayor IA (la señal correspondiente al sismo de IC).

En la misma Figura 5 se muestra el caso de la base con pilotes, donde puede verse la misma tendencia que en el caso de la base aislada pero con valores de asentamientos menores. Esto se debe a que la presencia de los pilotes transfiere cargas en profundidad, involucrando una mayor porción de sólido.

Una diferencia importante en la respuesta puede verse al evaluar los giros de la zapata. Al comparar la respuesta de la base aislada (BA) y la base con pilotes (BP) puede verse que además de reducir los valores de las deformaciones permanentes, en general se reducen significativamente las oscilaciones luego de la fase de sismo severo (Figura 5 (b) y (f)). En Figura 5 (d) no se ve una reducción de las oscilaciones luego de la fase de sismo, solo la disminución de giros permanentes.

De estos resultados puede verse que los asentamientos experimentados en ambos casos dependen en gran medida de la IA de la señal considerada y no de su PGA, la que si puede dominar otras variables como por ejemplo las aceleraciones en la super-estructura.

En la Figura 6 se muestran las deformadas de las dos tipologías estudiadas para los distintos sismos considerados. Los registros están ordenados en sentido creciente de IA. En esta Figura se puede ver que además de reducir los asentamientos máximos, la inclusión de los pilotes reducen

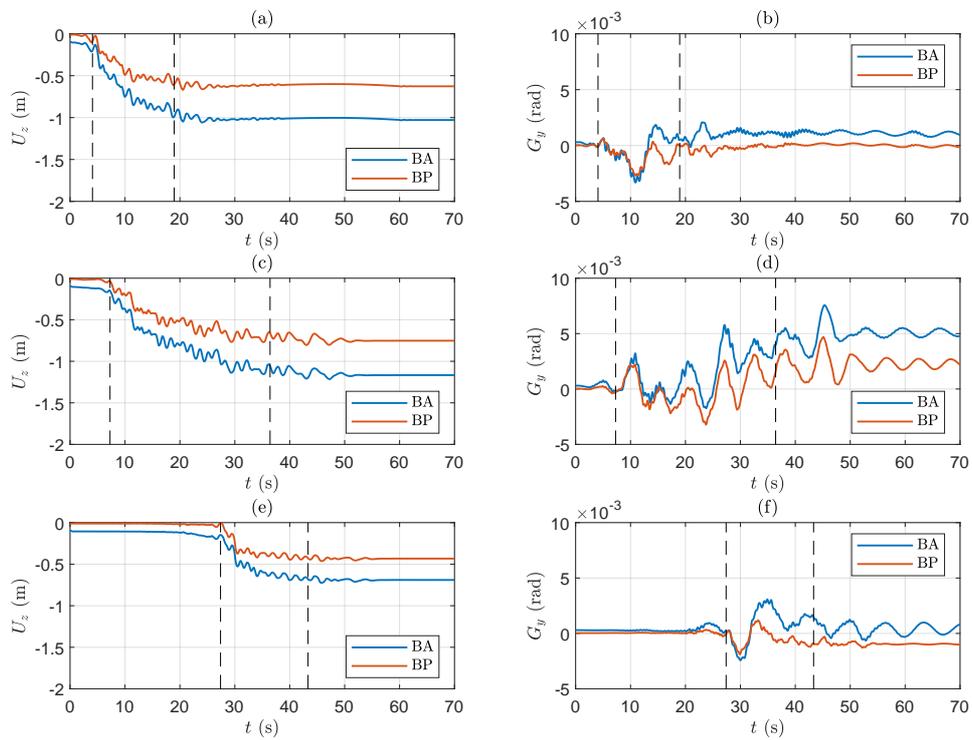


Figura 4: Asentamientos U_z y giros G_y en función del tiempo para los distintos sismos considerados y las dos tipologías de fundación consideradas, la base aislada (BA) y la base con pilotes (BP). Se muestran desplazamientos y giros respectivamente para: (a) y (b) el registro de Loma Prieta (LP), (c) y (d) el registro de Imperial College (IC) y (e) y (f) el registro de Chichi (CC).

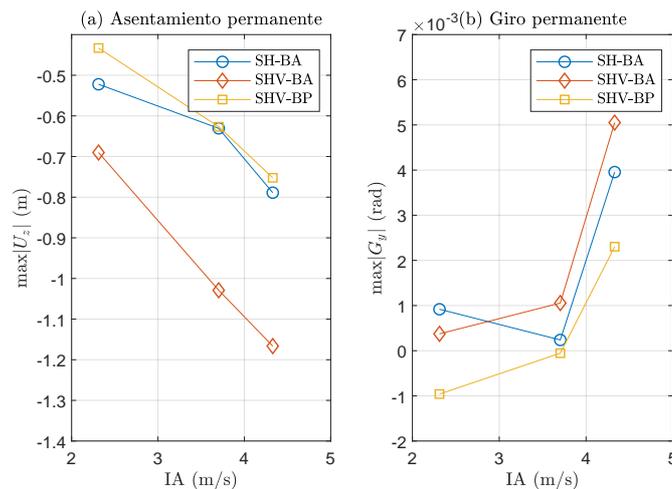


Figura 5: Asentamientos U_z y giros G_y en función de la IA de los distintos sismos considerados, las distintas estrategias para considerar la carga sísmica y tipologías de fundación.

los giros permanentes para el caso de la señal de mayor IA.

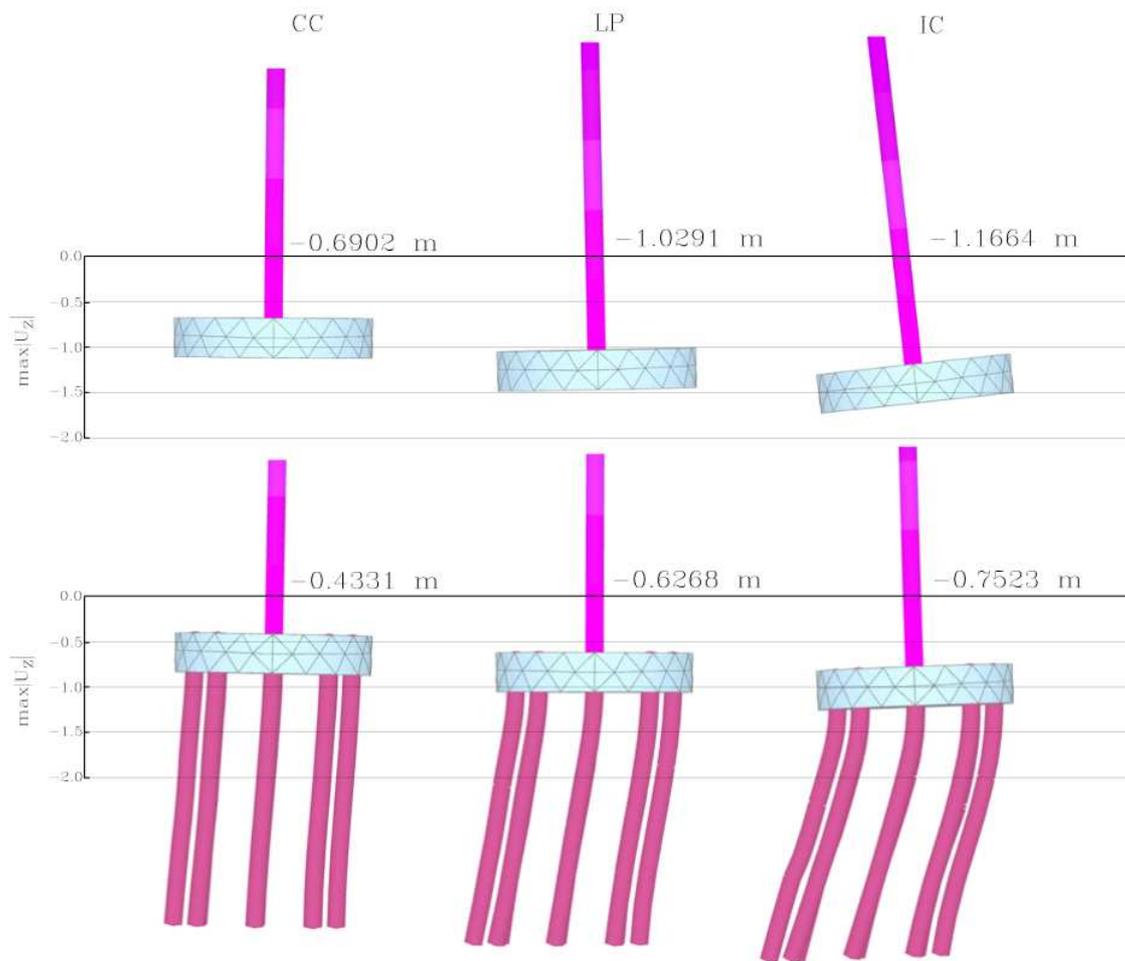


Figura 6: Asentamientos y deformada final de la estructura $\max|U_z|$ para los distintos sismos considerados y tipologías de fundación ordenadas para IA crecientes.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se generó un modelo de elementos finitos de un generador eólico de eje horizontal y gran tamaño que tiene en cuenta las estructuras de fundación más habituales en la práctica ingenieril y que tiene en cuenta el suelo donde se apoyan las estructuras de fundación. El objetivo del trabajo es investigar el desempeño de estas estructuras ante carga sísmica, por ello el modelo cuenta con bordes en el límite del dominio de suelo que son capaces de modelar la interacción entre los desplazamientos de free-field (problema de propagación de ondas de campo libre) y la absorción de las ondas salientes del dominio analizado. Se consideraron 3 registros sísmicos distintos escalados al espectro de zona 4 del CIRSOC-INPRES. El dominio del sólido (suelo) se modela a través de un material no lineal que tiene en cuenta la degradación de la rigidez con la deformación de corte. Del análisis de los resultados obtenidos puede verse que para la base aislada: considerar solo el registro actuando en dirección horizontal (SH) produce asentamientos permanentes hasta un 61 % menores que al considerar el sismo con componentes horizontales y verticales (SHV). Los giros permanentes luego de la fase de sismo severo en general son menores para el caso de solo SH que para el caso de SHV. El modo de rocking o cabeceo de la fundación no se amortigua tan rápidamente como los desplazamientos verticales. A mayor IA de los registros mayores serán los asentamientos permanentes y los giros perma-

mentes en la estructura. Los valores obtenidos para el caso de una arena suelta a media y una composición de estrato blando de gran potencia indican que para registros ajustados al espectro de zona 4 del CIRSOC-INPRES superarían los límites admisibles establecidos en códigos internacionales de diseño de aerogeneradores. La inclusión de pilotes en esta configuración, reduce los asentamientos hasta en un 61 % al transferir cargas en profundidad e involucrar una masa de suelo mas grande. Los giros también se reducen en general en magnitud, pero la mayor diferencia se da en la forma de la estructura deformada. En este escenario, si bien los asentamientos verticales siguen siendo considerables, los giros se encontrarían dentro de los límites establecidos en la IEC 61400-6. Los giros asociados al rocking se amortiguan mas rápidamente que para el caso de la base aislada Cabe destacar que en esta oportunidad, la interacción fluido-estructura se tiene en cuenta de forma simplificada, quedando como futura contribución el modelado acoplado del problema de interacción suelo-fluido-estructura.

REFERENCIAS

- Arias A. A measure of earthquake intensity. *Seismic design for nuclear plants*, páginas 438–483, 1970.
- Benz T., Schwab R., y Vermeer P. Small-strain stiffness in geotechnical analyses. *Bautechnik*, 86(S1):16–27, 2009a.
- Benz T., Vermeer P., y Schwab R. A small-strain overlay model. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 33(1):25–44, 2009b.
- Brinkgreve R., Kumarswamy S., Swolfs W., Waterman D., Chesaru A., Bonnier P., et al. Plaxis 2016. *PLAXIS bv, the Netherlands*, páginas 1–16, 2016.
- Griffith D.T. The snl100-01 blade: carbon design studies for the sandia 100-meter blade. *Sandia National Laboratories Technical Report, SAND2013-1178*, 2013.
- INPRES C. Reglamento argentino para construcciones sismorresistentes. *Parte I, Construcciones en General*, 2013.
- Madsen P.H. y Risø D. Introduction to the iec 61400-1 standard. *Risø National Laboratory, Technical University of Denmark*, 2008.
- Schanz T., Vermeer P., y Bonnier P.G. The hardening soil model: Formulation and verification. *Beyond 2000 in computational geotechnics*, páginas 281–296, 2019.
- Smulders C., Hosseini S., y Brinkgreve R. Improved embedded beam with interaction surface. En *Proceedings of the 17th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Reykjavík, Iceland*, páginas 1–6. 2019.
- Svensson H. Design of foundations for wind turbines. 2010.
- Turello D., Pinto F., y P.J. S. Embedded beam element with interaction surface for lateral loading of piles. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 40(4):568–582, 2016a. ISSN 1096-9853. doi:10.1002/nag.2416. Nag.2416.
- Turello D., Pinto F., y P.J. S. Three dimensional elasto-plastic interface for embedded beam elements with interaction surface for the analysis of lateral loading of piles. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 41(6):859–879, 2016b. ISSN 1096-9853. doi:10.1002/nag.2633. Nag.2633.
- Turello D.F., Maza M.S., Preidikman S., Flores F.G., y Pinto F. Interacción suelo-estructura y fluido-estructura en el modelado de torres eólicas de eje horizontal ante carga sísmica. *Mecánica Computacional*, 38(17):695–706, 2021.
- Wong C.J. y Ibarra L.F. The type-oriented algorithm for baseline correction of acceleration time histories. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 175:108162, 2023.