

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

*The paper was published in the proceedings of XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE) and was edited by Dr. Norma Patricia López Acosta, Eduardo Martínez Hernández and Alejandra L. Espinosa Santiago. The conference was held in Cancun, Mexico, on November 17-20, 2019.*

# Comportamiento dinámico de un sistema de cimentación a base de pilas coladas *in situ* con anomalías

María Clara MADRIGAL<sup>a,1</sup>, Luis OSORIO<sup>a</sup>, César ROSALES<sup>a</sup>, Eduardo BOTERO<sup>a</sup> y Efraín OVANDO<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México

**Resumen.** Los sistemas de cimentación con pilas coladas *in situ* se han convertido en una de las soluciones más adoptadas para la construcción de estructuras cada vez más altas y robustas como edificios y viaductos en la zona poniente de la Ciudad de México. Sin embargo, la presencia de juntas frías a lo largo de la longitud efectiva de las pilas, así como reducciones o ensanchamientos de la sección transversal de las mismas, son anomalías que se pueden presentar durante el proceso constructivo, y pueden modificar el comportamiento dinámico ante un evento sísmico de gran magnitud. Con este propósito, en este artículo se revisa el comportamiento de un sistema de cimentación con una anomalía en una pila, empleando el método de diferencias finitas implementado en el programa FLAC 3D V6.0.

**Palabras Clave.** Anomalías, interacción suelo-estructura, pilas, diferencias finitas, cimentaciones profundas, modelado numérico.

## 1. Introducción

La expansión urbana hacia la zona de Lomas de la Ciudad de México ha fomentado el desarrollo de estructuras altas y robustas que requieren de sistemas de cimentación con elementos profundos para soportar y transferir las cargas de forma adecuada a estratos más competentes. Para la construcción de este tipo de obras en la zona poniente de la ciudad en donde predominan suelos volcánicos firmes y compactos con alto contenido de gravas, los sistemas de cimentación profundos con pilas de sección considerable coladas *in situ*, se han convertido en una de las soluciones más frecuentes. Sin embargo, para garantizar el buen comportamiento de estos sistemas de cimentación y generar las condiciones óptimas de servicio y estructurales de estas obras, es fundamental tener un estricto control de calidad tanto en los procesos constructivos como de los materiales utilizados durante la ejecución de los elementos colados *in situ*.

Dentro de los diferentes tipos de pruebas no destructivas utilizados para el control de calidad de las pilas coladas *in situ*, se encuentra la prueba de integridad de pilas (PIT) [1]. En la ejecución de esta prueba se aplica un impacto en la cabeza de la pila de forma axial generando una onda que se propaga a través de la pila hasta la punta y regresando luego a la cabeza de ésta [2]. Cuando se presenta alguna anomalía a lo largo de la pila,

---

<sup>1</sup>María Clara Madrigal, Coordinación de Geotecnia, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México; E-mail: MMadrigalM@iingen.unam.mx.

se producen cambios en la impedancia generando una reflexión temprana de la onda, la cual es analizada para predecir la profundidad de la misma [2].

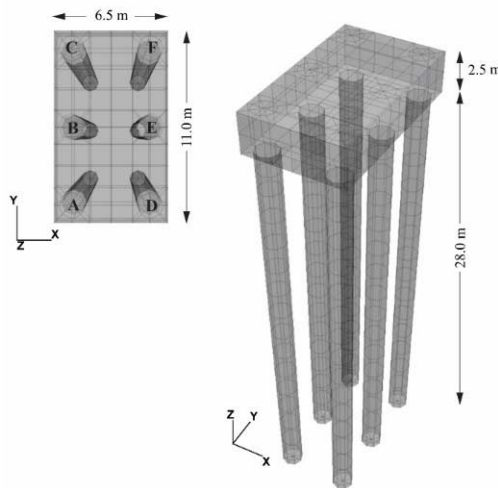
Las anomalías más comunes que se pueden generar durante el proceso constructivo de las pilas de cimentación son las juntas frías, reducciones o ensanchamientos de la sección transversal, entre otras. Éstas pueden modificar el comportamiento del sistema suelo-cimentación-estructura, exhibiendo efectos de interacción no deseados bajo un escenario sísmico de gran magnitud.

En este contexto, con el propósito de contribuir en la toma de decisiones y evaluar los efectos ante la probabilidad de que se presenten este tipo de singularidades durante la construcción de una obra de ingeniería, en este artículo se revisa el comportamiento dinámico de un sistema de cimentación con una pila con anomalía, empleando el método de diferencias finitas explícito del programa FLAC 3D V6.0. [3]

## 2. Problemática

### 2.1. Descripción del apoyo

El sistema de cimentación del apoyo 5 de un viaducto localizado en la zona poniente de la Ciudad de México, está constituido por una columna de 9.0 m de altura y un sistema de cimentación basado en una zapata de 11.0 m de largo, 6.5 m de ancho y 2.5 m de altura, apoyada en 6 pilas construidas *in situ* de 1.5 m de diámetro y 28.0 m de longitud (Figure 1). Las pruebas de integridad (PIT) realizadas en cada uno de los elementos de cimentación detectaron la presencia de una junta fría a 15.7 m de profundidad en la Pila F.



**Figura 1.** Sistema de cimentación del apoyo 5.

Para determinar los efectos en la interacción suelo-estructura debido a la presencia de la junta fría en este elemento de la cimentación, se revisó el comportamiento del apoyo considerando las siguientes condiciones: características óptimas de diseño, Pila F corta con 15.7 m de longitud efectiva, y finalmente, sin tomar en cuenta el aporte de ésta al sistema de cimentación.

## 2.2. Modelo geotécnico

A partir de la información obtenida de la campaña de exploración realizada en el sitio en donde se localiza el apoyo de estudio, se definió el modelo geotécnico que se presenta en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Modelo geotécnico para el apoyo 5.

Estrato	Profundidad [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Descripción
1	0.0 a 5.0	14.0	Arcilla arenosa de baja plasticidad
2	5.0 a 24.0	19.0	Arena arcillosa de alta compacidad
3	24.0 a 30.0	20.0	Arena arcillosa con gravas
4	30.0 a 50.0	23.0	Gravas y arena arcillosa

## 3. Ambiente sísmico

### 3.1. Caracterización del ambiente sísmico

El ambiente sísmico del sitio donde se encuentra el apoyo a revisar se definió a partir del espectro de diseño de la zona de Lomas (Zona I) del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal [4]. Con este espectro y tres sismos (sismos semilla) con magnitud  $M_s$  mayor a 6.5 registrados en una estación sismológica ubicada en la zona de influencia, se generaron tres historias de aceleraciones sintéticas de tal forma que sus espectros de respuesta fueran compatibles con el espectro de respuesta de diseño definido para la zona de estudio.

Las señales sintéticas se obtuvieron empleando el programa RSPMatch 99 [5]. Este programa implementa el algoritmo de Lilhanand & Tseng (1987, 1988) [6][7] para modificar una historia de aceleraciones en el dominio del tiempo y hacerla compatible con el espectro de referencia especificado. En la Figura 2 se presentan los espectros de respuesta obtenidos a partir del ajuste espectral de los registros de los sismos semilla.

### 3.2. Análisis de respuesta de sitio

Para realizar el análisis de respuesta de sitio unidimensional del depósito de suelo de interés se utilizó el programa SHAKE [8][9]. Para considerar la no linealidad del suelo se tuvieron en cuenta las curvas de degradación de módulo de rigidez al corte,  $G$ , y de amortiguamiento  $\xi$  de Vucetic & Dobry (1/91)  $IP=15$  [10] para la arcilla arenosa de baja plasticidad del estrato 1, de Seed & Idriss (1970) [11] para la arena arcillosa del estrato 2 y la arena arcillosa con gravas del estrato 3, y de Seed *et al.*, (1986) [12] para la grava y arena arcillosa de alta compacidad del estrato 4.

Las características dinámicas de los geomateriales estudiados se obtuvieron a partir de las velocidades de onda de corte del suelo, de pruebas de cross hole ejecutadas en el depósito en donde se encuentra desplantado el apoyo 5, hasta una profundidad de estudio de 46 m (Figure 3).

Una vez terminado el proceso de calibración, en donde se verificó que la respuesta en campo libre en el modelo de FLAC 3D es congruente a la obtenida mediante el análisis unidimensional, se procedió a realizar el análisis de interacción suelo-estructura considerando una combinación del movimiento de  $0.30X+Y$  (30% de la intensidad de

sismo en la dirección X y 100% en la dirección Y) en cada uno de los casos de estudio (Figure 4), por considerarse ésta la combinación más desfavorable.

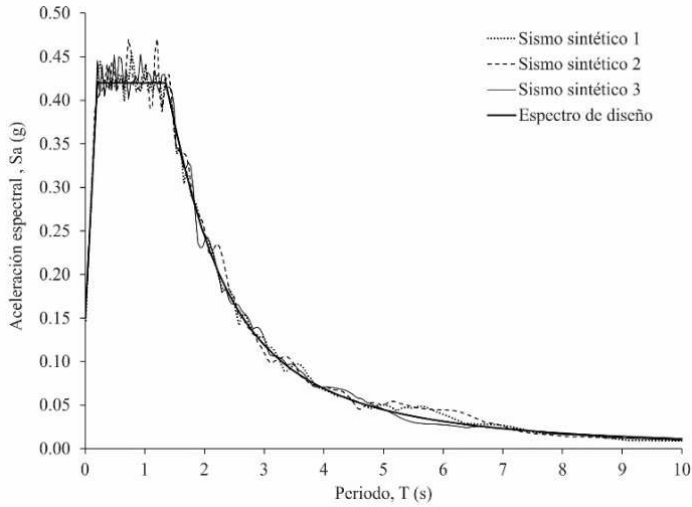


Figura 2. Espectros de respuesta en roca de sismos sintéticos.

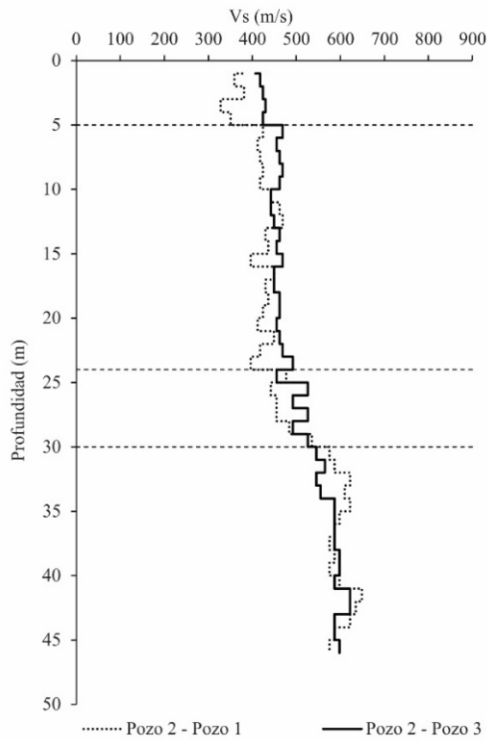
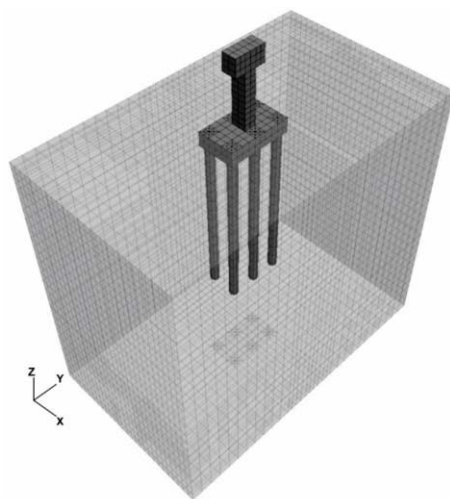


Figura 3. Perfiles escalonados de velocidad de onda de corte.

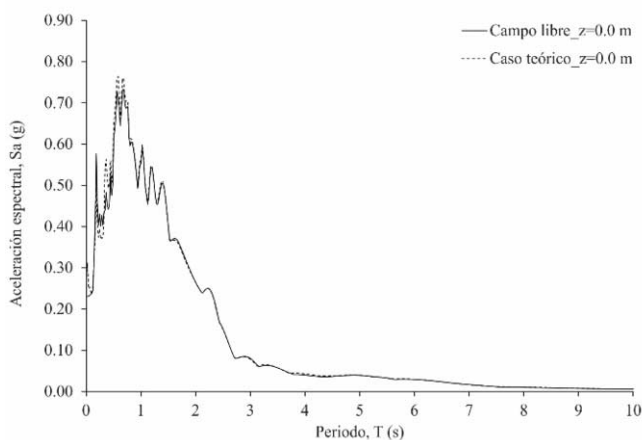


**Figura 4.** Malla de diferencias finitas en FLAC 3D V6.0 para el análisis dinámico.

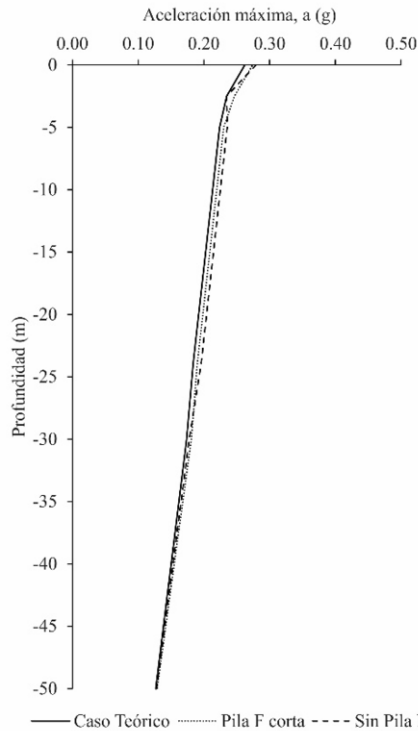
#### 4. Resultados

Para establecer la magnitud de la interacción suelo-estructura y determinar la influencia del apoyo en la respuesta del suelo, se compararon los espectros de respuesta del caso teórico y en campo libre obtenidos en la superficie del terreno (Figure 5). En esta figura se puede observar que no se esperan efectos importantes producto de la interacción suelo-estructura para las condiciones de diseño.

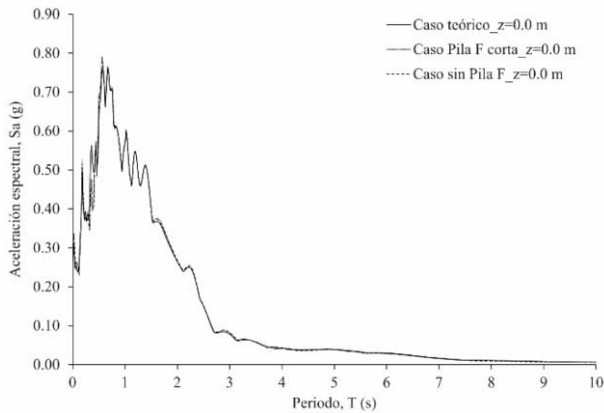
En las Figuras 6 y 7 se presenta una comparación entre las aceleraciones máximas y los espectros de respuesta para cada uno de los análisis, respectivamente. De lo anterior se pudo observar que en general se presenta el mismo comportamiento dinámico considerando las características de diseño del apoyo, la Pila F corta y sin considerar el aporte de la Pila F al sistema de cimentación.



**Figura 5.** Comparación de los espectros de respuesta caso teórico y campo libre.



**Figura 6.** Comparación de aceleraciones máximas.



**Figura 7.** Comparación de los espectros de respuesta caso teórico y campo libre.

Por otro lado, en la Figura 8 se presentan las distribuciones de esfuerzos verticales que se generaron en las pilas C y E, adyacentes a la Pila F, a las profundidades de 2.8 m, 5.0 m, 24.0 m, 30.0 m y 30.5 m, debido a la ocurrencia del evento sísmico, para el caso teórico, Pila F corta y sin considerar el aporte de la Pila F al sistema de cimentación. En esta figura se puede observar que para el caso de análisis sin Pila F se presenta un

incremento de esfuerzos del 21 % en la Pila C y del 18 % en la Pila E a una profundidad de 2.8 m, en comparación con los esfuerzos teóricos. En este sentido, si bien no se pueden observar efectos desfavorables en términos de la interacción suelo-cimentación-estructura, es evidente que al no considerarse el aporte de la Pila F se presenta una redistribución de los esfuerzos en las pilas adyacentes.

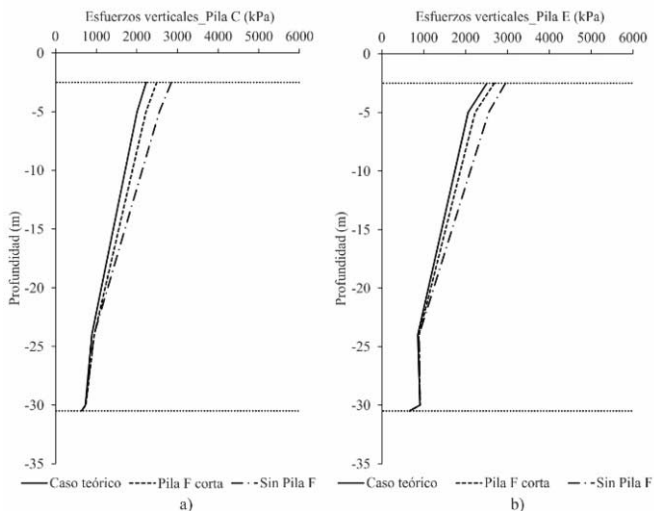


Figura 8. Esfuerzos verticales a) en Pila C, b) en Pila E.

Finalmente, para establecer si estos incrementos en las pilas C y E exceden la capacidad de los elementos estructurales de la cimentación, se obtuvieron los diagramas de interacción que se presentan en la Figura 9, donde se puede observar que las cargas y momentos actuantes generados por los efectos bidireccionales de la combinación de acciones actuantes  $0.30X+Y$  no superan la capacidad estructural de las pilas.

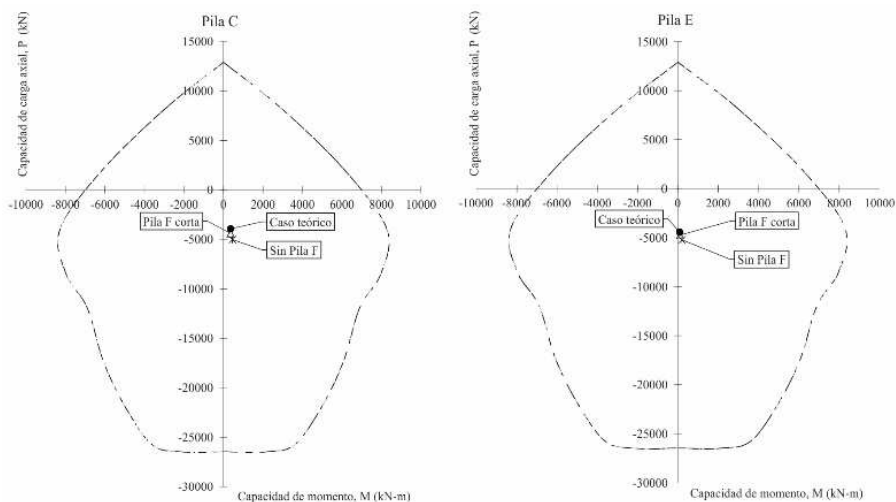


Figura 9. Diagramas de interacción a) de la Pila C, b) de la Pila E.



## 5. Conclusiones

En este artículo se revisó el comportamiento dinámico de un apoyo de un viaducto en la zona de Lomas de la Ciudad de México, en donde se realizaron pruebas de integridad (PIT) en las pilas coladas *in situ* y se detectó una anomalía a una profundidad de 15.7 m en una de ellas. Al compararse los espectros de respuesta del caso teórico y del campo libre se pudo concluir que debido a las propiedades del depósito de suelo y a la rigidez estructural del apoyo, no se presentaron efectos de interacción suelo-estructura importantes. Por otro lado, al compararse las aceleraciones máximas y los espectros de respuesta considerando las características de diseño, la pila con integridad dudosa corta y sin considerar el aporte de la misma al sistema de cimentación, se pudo observar que la presencia de la junta fría no afectó el comportamiento dinámico de la estructura bajo el escenario sísmico planteado. Es importante resaltar que este trabajo se llevó a cabo con el objetivo de reducir la incertidumbre acerca del comportamiento dinámico esperado ante la presencia de una anomalía en este sistema de cimentación y contribuir en la toma de decisiones ante la inminente probabilidad de que se presenten este tipo de peculiaridad durante la construcción del viaducto. Aunque en este caso de estudio no se evidenciaron cambios significativos en términos de la interacción suelo-cimentación-estructura por la presencia de la junta fría en la pila, es evidente que en ausencia de la Pila F se presenta una redistribución de los esfuerzos en las pilas restantes. Por lo anterior, los resultados aquí obtenidos no se pueden generalizar para otros casos de estudios ya que estos dependen de las condiciones y propiedades del depósito de suelo y de las características de los elementos estructurales. Finalmente, se recomienda revisar el comportamiento dinámico estructural para garantizar la integridad del sistema de cimentación y de la superestructura.

## Referencias

- [1] ASTM International. (2007). Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations. ASTM D 5882-07.
- [2] Gaviria, C.A., Gómez, D. & Thomson, P. (2009). Evaluación de la integridad de cimentaciones profundas: Análisis y Verificación *In Situ*. *DYNA* 76 (159): 23-33.
- [3] Itasca Consulting Group Inc. (2017). FLAC 3D: Fast lagrangian analysis of continua in three dimensions, User's Guide. Sixth Edition. Minneapolis: USA.
- [4] RCDF. (2004). Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal, México.
- [5] Abrahamson, N. (1992). Non-Stationary spectral matching, *Seismol. Res. Lett.* 63, 30.
- [6] Lilhanand, K & Tseng, W.S. (1987). Generation of synthetic time histories compatible with multiple-damping response spectra, *SMiRT-9*, K2/10.
- [7] Lilhanand, K & Tseng, W.S. (1988). Development and application of realistic earthquake time histories compatible with multiple damping response spectra, *Ninth World Conf. Earth. Engin.* (2):819-824. Tokyo: Japan.
- [8] Schnabel, P., Lysmer, J. & Seed, H. (1972). A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Report EERC 72-12. University of California, Berkeley: USA.
- [9] Idriss, I.M. & Sun, J.I. (1992). User's manual for SHAKE91: A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits. Center for Geotechnical Modeling. Department of Civil and Environmental Engineering. University of California, Davis, USA.
- [10] Vucetic, M. & Dobry, R. 1991. Effect of soil plasticity on cyclic response. *Geotechnical Engineering*, ASCE, 117: 89-107
- [11] Seed, H.B. & Idriss, I.M. 1970. Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses. Report EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley: USA
- [12] Seed, H.B., Wong, R.T, Idriss, I.M & Tokimatsu, K. 1986. Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils. *Geotechnical Engineering*, ASCE, 112(11):1016-1032.