

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.

Influencia de una falla activa en la respuesta sísmica de un paso elevado

Juan Manuel MAYORAL^{a,1}, Daniel DE LA ROSA^a y Mauricio ALCARAZ^a

^a*Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México*

Resumen. Este artículo presenta la evaluación del desempeño sísmico de los apoyos de un puente de 300 m de largo que atraviesa una falla geológica activa, para establecer un sistema de mejoramiento en la cimentación que sea capaz de atenuar la demanda sísmica que actúa sobre la estructura. Se desarrollaron modelos numéricos tridimensionales de diferencias finitas para evaluar la respuesta en campo libre, tomando en cuenta los efectos topográficos y de sitio, así como la interacción suelo-estructura a lo largo del puente considerando la presencia de la falla. El ambiente sísmico se caracterizó a través de un espectro de peligro uniforme, EPU. Se desarrollaron sismos sintéticos para el sitio en estudio llevando a cabo un ajuste espectral en el dominio del tiempo. Los modelos numéricos consideraron tanto la cimentación convencional como el mejoramiento, el cual está conformado por un faldón de concreto armado de profundidad variable. Con base en los resultados obtenidos del análisis, se pudo comprobar que el mejoramiento propuesto reduce significativamente las aceleraciones espectrales en los apoyos, y mejora su capacidad de carga para soportar asentamientos diferenciales debido a un posible desplazamiento de la falla.

Palabras Clave. Efectos topográficos, suelos rígidos, vulnerabilidad sísmica, riesgo sísmico.

1. Introducción

En este artículo, se presentan los resultados de un estudio de un puente que forma parte de una autopista de 76 km de longitud que está siendo construida en la región central de México. Para estudiar su comportamiento, se desarrollaron modelos numéricos tridimensionales de diferencias finitas con el software FLAC^{3D} [1]. El puente en estudio cruza una falla geológica normal activa (es decir, ha tenido movimiento en los últimos 4000 años), y se encuentra ubicado en el graben de Acambay, que, a su vez, está asociado con la actividad sismo tectónica del Cinturón Volcánico Transmexicano. La falla se presenta en el contacto entre suelos tobáceos y una roca andesítica, y tiene una longitud de 8 km. El ambiente sísmico se caracterizó a través de un espectro de peligro uniforme, EPU, considerando un periodo de retorno de 1000 años. En el análisis sísmico, se consideraron eventos normales y de subducción. Asimismo, en los análisis numéricos, se consideró un posible desplazamiento vertical de la falla de 40 cm asociado a un periodo de retorno de 5335 años. La variabilidad de las aceleraciones debidas a efectos topográficos y a efectos de sitio fue considerada en los análisis, así como la presencia de

¹ Researcher, Geotechnical Department, Institute of Engineering, National University of Mexico, Building N° 4, P.O. Box 04510, Mexico City, Mexico, JMayoralV@iingen.unam.mx

la falla antes mencionada. La Figura 1 presenta la ubicación de la carretera, el puente en estudio, así como la estación sísmica.

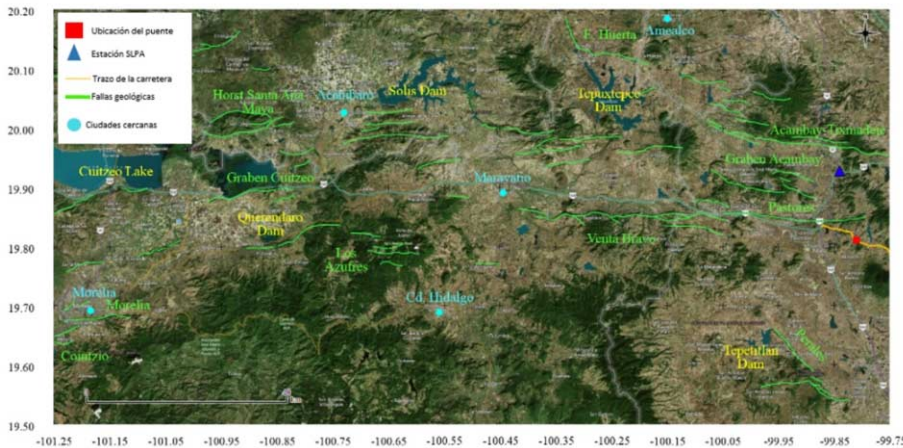


Figura 1. Ubicación de caso estudio y estación sísmica.

2. Descripción de proyecto

Como se muestra en la Figura 1, el puente en estudio se ubica a 3.5km hacia el sureste del graben de Acambay, en el Cinturón Volcánico Transmexicano, CVT. El puente tiene una longitud de 300 m de largo. El puente consta de 7 apoyos (5 columnas y dos caballetes), mismos que están ligados con traveses pretensados (Nebraska NU/240) y vigas metálicas (Figura 2). Los claros del puente son de 46 m, excepto en la parte central, que es de 80 m (entre el apoyo S-4 y S-5). El claro de 80 m es soportado por 6 traveses metálicas de 1 m de ancho y 2 cm de espesor ($f_y = 338,445 \text{ kPa}$; $E = 196200000 \text{ kPa}$). Los soportes del puente están compuestos por marcos estructurales de altura variable, tal como se resume en la Tabla 1. Las columnas son huecas con una sección transversal rectangular. Los apoyos están unidos monolíticamente con una zapata de cimentación de dimensiones variables (Tabla 1). La cimentación masiva tiene aproximadamente 3 m de espesor, y está estructurada como se describe en la Tabla 1. La resistencia a la compresión simple a los 28 días, f'_c , de las columnas es de 29,419 kPa, y de 24,516 kPa para las pilas de cimentación. La Figura 2 muestra una representación esquemática de los apoyos del puente, así como de las vigas que soportan los claros del mismo.

3. Aspectos geológicos

El puente en estudio se encuentra dentro del llamado CVT, que consiste en un arco volcánico continental activo que atraviesa México de este a oeste, desde el Golfo de México hasta el océano Pacífico. En esta área, se desarrollan depresiones tectónicas, incluida la falla de Acambay-Tixmadejé. Esta es una falla normal de 42 km, y fue la principal fuente de sismos fuertes del evento de Acambay en 1912 [2]. En [2] se presenta una serie de estudios que permitieron establecer una tasa de deslizamiento de 0.17

mm/año y un movimiento vertical promedio por evento de 0.60 m, así como un periodo de ocurrencia de 3600 años para sismos con $M_w > 6.0$. La falla de Pastores, con una longitud de 32 km, delimita al sur al graben de Acambay, tal y como se muestra en la Figura 1. El terremoto de Acambay en 1912 provocó una ruptura del suelo de 0.50 m y de 20 km de largo [3]. La sismicidad histórica ha demostrado que la zona sismogénica intraplaca Acambay tenía un potencial de ruptura de la falla de 13.5 km de largo aproximadamente.

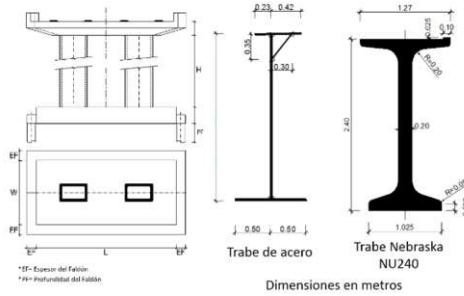


Figura 2. Representación esquemática de los apoyos del puente y vigas de concreto y acero.

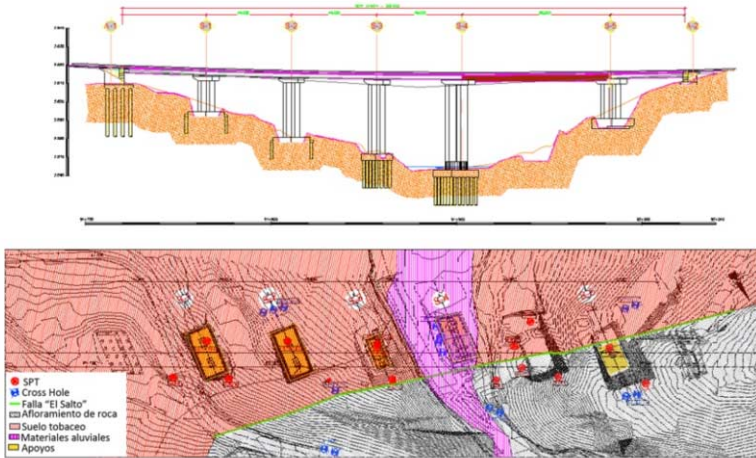


Figura 3. Vista en planta y elevación del puente.

Tabla 1. Apoyos del puente.

Apoyos	Dimensiones (m)			Cimentación Convencional	Cimentación Masiva, EF Espesor=3.0m
	W	L	H		
S-1	11	25	16.9	Profundidad de la zapata 2.8m	Espesor de 3.0m y 8.0m de profundidad
S-2	11	25	29.8	Profundidad de la zapata 2.8m	Espesor de 3.0m y 8.0m de profundidad
S-3	8	23.5	38.1	12 pilas. 1.5 ϕ , 25.3m de profundidad	Espesor de 3.0m y 8.0m de profundidad
S-4	8	23.5	44.9	12 pilas, 1.5 ϕ , 24.0m de profundidad	Espesor de 3.0m y 8.0m de profundidad
S-5*	11	22	17.6	Profundidad de la zapata 2.8m	Este apoyo no fue mejorado

4. Caracterización geotécnica

Para caracterizar las condiciones del subsuelo donde se desplantan los apoyos S-1 a S-5, se realizaron 25 pruebas de penetración estándar, SPT, con recuperación. El nivel freático fue detectado en algunas pruebas a los 21 m de profundidad. Se llevaron a cabo 6 ensayos cross hole, CH-1 a CH-6, para medir la distribución de la velocidad de onda de corte con la profundidad. Con base en la exploración de campo, se estableció que el perfil de suelo está compuesto principalmente por suelos tobáceos y por un afloramiento de roca andesítica. La Figura 4 muestra el perfil geológico y geotécnico del suelo. Los puntos de control indicados en el perfil (i.e. S-1, S-2, S-3, S-4 y S-5) corresponden a las ubicaciones de los apoyos del puente. Debido a la falta de información experimental sobre las propiedades dinámicas del suelo, estas se estimaron con base en las curvas de degradación de módulo de rigidez y de relación de amortiguamiento propuestas por Vucetic & Dobry [4] para los suelos finos en función del índice de plasticidad, PI, considerando la información obtenida de las pruebas índice. Con respecto a los estratos areno limosos, se consideraron apropiadas las curvas propuestas por Seed & Idriss [5]. Para las gravas se utilizaron las curvas propuestas por Seed et al. [6]. Curvas similares propuestas por Seed & Idriss han sido utilizadas con éxito en el análisis unidimensional de propagación de ondas para predecir la respuesta medida durante el terremoto de 1985 en Michoacán, México [7, 8]. Se consideró un comportamiento lineal del macizo rocoso bajo carga dinámica.

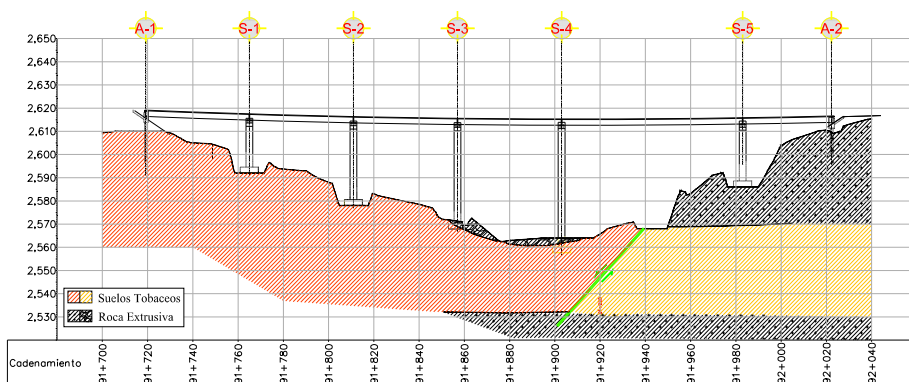


Figura 4. Perfil geotécnico del sitio en estudio.

5. Ambiente sísmico

El ambiente sísmico se caracterizó a través de un EPU, considerando un periodo de retorno de 1000 años (Figura 6) considerando fuentes sismogénicas asociadas a eventos de subducción, normales (profundidad media) y locales (superficial). Para eventos de subducción, se utilizaron las relaciones de atenuación propuestas por Arroyo et al. [9] y por García & Jaimes [10]. Para sismos normales, se consideró la relación propuesta por García et al. [11]. Por otro lado, debido a la falta de expresiones adecuadas para los sismos locales, su contribución se estimó a partir de las relaciones propuestas por Abrahamson & Silva [12]. Para desarrollar una historia de aceleraciones cuyo espectro de respuesta coincida razonablemente con el espectro de respuesta de diseño para el

periodo de retorno del análisis, la historia de tiempo seleccionada, generalmente llamada sismo semilla, se modificó utilizando el método propuesto por Lilhanand and Tseng [13] modificado por Abrahamson [14]. El sismo semilla se seleccionó de los registrados en la estación sismológica SLPA, ubicada en suelo firme, aproximadamente a 13.5 km del sitio en estudio (Figura 1). Se consideraron apropiadas las propiedades lineales equivalentes para este estudio, llevado a cabo con el software SHAKE [15], mismo que ha sido ampliamente validado por varios autores al comparar sus resultados con datos medidos y analíticos.

6. Respuesta de campo libre

Se desarrolló un modelo numérico tridimensional de diferencias finitas del sitio en estudio con el software FLAC^{3D} para obtener la variación de la respuesta sísmica debida a efectos de sitio, efectos topográficos y a la discontinuidad asociada a la falla normal debajo del puente. (Figura 5). La relación esfuerzo deformación del suelo se asumió como elastoplástica, siguiendo un criterio de falla Mohr-Coulomb. El modelo está compuesto por 161,187 elementos sólidos y 182,684 nodos. Las principales unidades geotécnicas se identificaron de la siguiente manera: 1) suelos tobáceos Qtb y Qdl, 2) suelos aluviales Qal, y 3) roca extrusiva Ba. El sismo se deconvolvió con SHAKE y se aplicó en la base del modelo. Las fronteras de campo libre se aplicaron en los bordes del modelo. Para considerar la posibilidad de tener un movimiento adicional debido al desplazamiento de la falla durante el evento dinámico, ésta se modeló con un elemento Gap. La Figura 6 muestra una comparación de los espectros de respuesta calculados con SHAKE y FLAC^{3D}, considerando los efectos topográficos. Debido a la alta resistencia que exhiben los suelos tobáceos, las fuerzas cortantes que actúan a lo largo de la falla no superan la resistencia en la interfaz de ésta durante el evento sísmico. Por lo tanto, no hay un desplazamiento relativo en la falla al final del sismo, tal y como se muestra en la Figura 7.

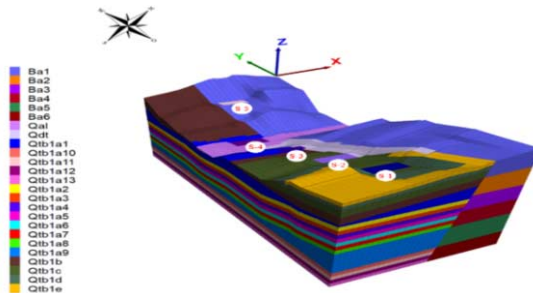


Figura 5. Modelo numérico tridimensional, y unidades geotécnicas.

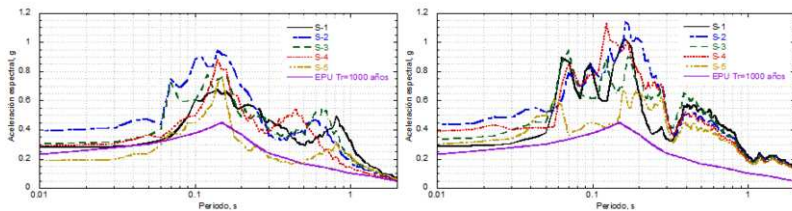


Figura 6. Espectros de respuesta calculados en los puntos de control (a) SHAKE y (b) FLAC^{3D}.

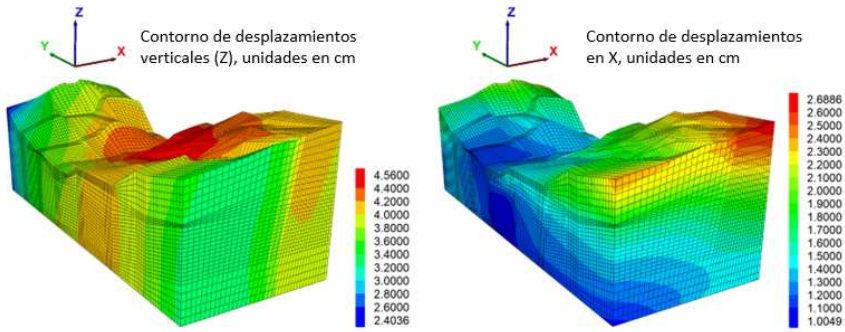


Figura 7. Desplazamientos del suelo debidos al evento sísmico.

7. Interacción suelo-estructura

La Figura 8 muestra el modelo tridimensional de diferencias finitas utilizado para los análisis de interacción sísmica suelo-estructura. Las columnas y marcos fueron modelados con elementos Beam y las losas con elementos Shell. La cimentación masiva se compone de paneles de concreto de 3 m de espesor, estructuralmente unidos a la zapata de cimentación. La longitud de estos paneles es de 8 m. El mejoramiento considerado tiene como objetivo reducir las aceleraciones espectrales en la dirección transversal y longitudinal sin modificar sustancialmente el contenido de frecuencia de las aceleraciones que actúan en la estructura. En la Tabla 1 se presenta la configuración propuesta para cada apoyo. La cimentación masiva se presenta esquemáticamente en la Figura 2. En la Figura 9 se muestra la comparación de espectros de respuesta calculados para el modelo mostrado en la Figura 5 (campo libre), y para los modelos que consideran la cimentación convencional y la cimentación masiva. Como se puede observar, la cimentación masiva reduce sustancialmente la demanda sísmica de la estructura calculada considerando la cimentación convencional. Se observa un cambio menor en el contenido de frecuencias.

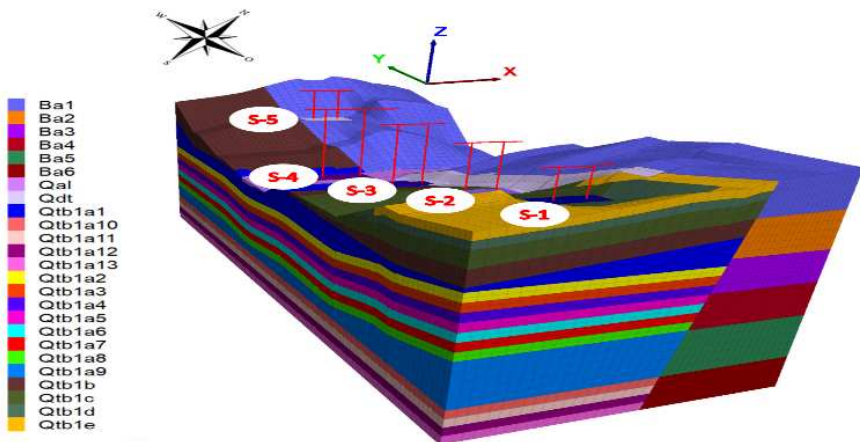


Figura 8. Modelo numérico con mejoramiento y puntos de control.

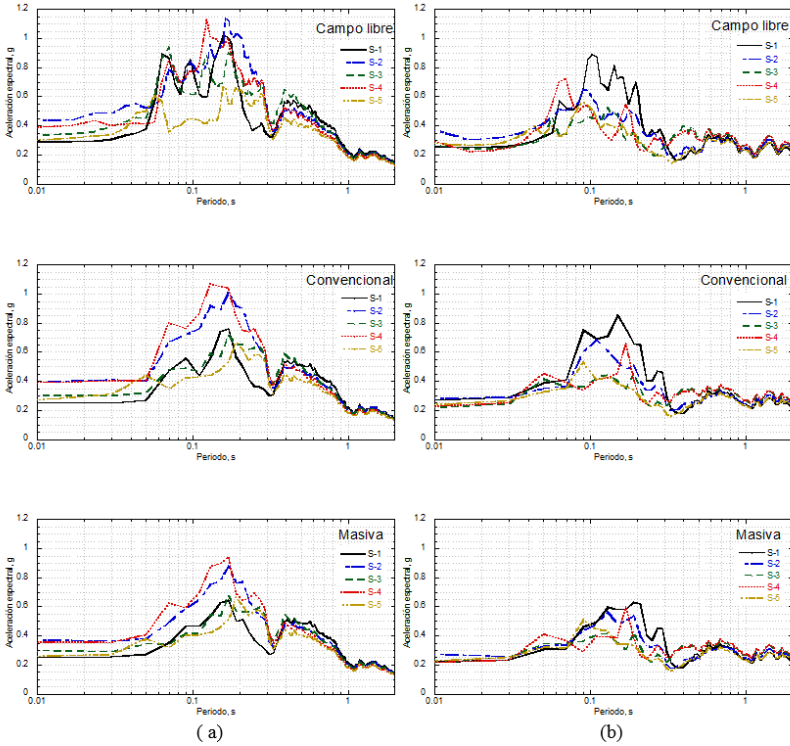


Figura 9. Espectros de respuesta en la dirección (a) transversal y (b) vertical.

8. Desplazamiento de la falla

Aunque no se observó un deslizamiento de la falla en los análisis dinámicos, para complementar este trabajo, se consideró un desplazamiento actuando en el apoyo S-4. Este apoyo se encuentra desplantado sobre en el material tobáceo, muy cerca de la roca andesítica (Figura 4). Se evaluó la capacidad de carga del mejoramiento masivo, y su contribución al puente para soportar un desplazamiento relativo de 0.4 m asociado a un periodo de retorno de 5335 años. En la Figura 10 se puede observar un desplazamiento relativo entre el apoyo S-4 y el suelo tobáceo de 11.98 cm. Por lo tanto, la cimentación masiva parece reducir considerablemente los desplazamientos del suelo.

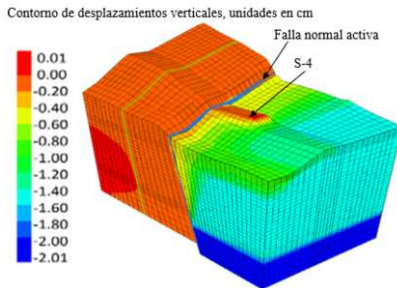


Figura 10. Desplazamiento debido a un posible deslizamiento de la falla.

9. Conclusiones

Los efectos de sitio y topográficos a lo largo del puente tienen un impacto moderado a alto en la respuesta sísmica del suelo. La mayor diferencia se observa en los apoyos ubicados en los materiales tobáceos, S-1 a S-4. Esto puede estar asociado con la resistencia y rigidez de los materiales tobáceos, que presentaron velocidades de onda de corte, V_s , que oscilan entre 267 y 900 m/s. Sin embargo, se observó una amplificación significativa de las aceleraciones debido a los efectos topográficos. Esta amplificación se produce principalmente en aquellos soportes con cambios bruscos de geometría y elevación de la topografía. La cimentación convencional es incapaz de reducir eficientemente estas amplificaciones. Sin embargo, con la cimentación masiva, es posible reducir considerablemente la demanda sísmica de la estructura. El efecto del mejoramiento en la aceleración máxima del terreno, PGA, y contenido de frecuencias es relativamente pequeño, tal y como se esperaba, debido al hecho de que el graben de Acambay exhibe una falla normal predominante. Debido a la alta resistencia que exhiben los suelos tobáceos, las fuerzas cortantes que actúan a lo largo de la falla no superan la resistencia en la interfaz de ésta durante el evento sísmico. Por lo tanto, no hay un desplazamiento relativo en la falla al final del sismo. Por lo tanto, la cimentación masiva reduce considerablemente los desplazamientos del suelo durante el evento sísmico, y atenúa significativamente la demanda sísmica en la superestructura.

Referencias

- [1] Itasca Consulting Group. FLAC. 2005. Fast Lagrangian analysis of continua, User's guide.
- [2] Langridge R, Weldon R, Moya J, Suárez G. 2000. Paleoseismology of the 1912 Acambay earthquake and the Acambay-Tixmadejé fault, Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Geophysical Research*
- [3] Urbina F, Camacho H. 1913. The Acambay-Tixmadejé mega seismic zone, Mexico State. *Newsletter of the Geological Institute of Mexico* 1913(32): 125.
- [4] Vucetic M & Dobry R. 1991. Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal Geotechnical Engineering* 114(1): 89-107.
- [5] Seed HB, Idriss IM. 1970. Soil moduli and damping factor for dynamic response analysis, Report no. UCB/EERC-70/10. Berkeley: University of California.
- [6] Seed HB, Wong RT, Idriss IM, Tokimatsu K. 1986. Moduli and Damping factors for Dynamic Response Analyses of Cohesionless Soils. *Journal Geotechnical Engineering ASCE* 112: 1016-1032.
- [7] Mayoral JM, Romo MP, Osorio L. 2008. Seismic parameters characterization at Texcoco Lake, Mexico. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 28(7): 507-521.
- [8] Seed HB, Romo MP, Sun J, Jaime A, Lysmer J. 1988. Relationships between soil conditions and earthquake ground motions. *Journal of Earthquake Spectra* 4(2): 687-730.
- [9] Arroyo D, García D, Ordaz M, Mora MA, Singh SK. 2010 Strong ground-motion relations for Mexican in-terplate earthquakes. *Journal of Seismology* 14(4): 769-785.
- [10] García-Soto D, Jaimes MA. 2017. Ground-motion prediction model for vertical response spectra from Mexican interplate earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America* 107(2): 887-900.
- [11] García D, Singh SK, Herráiz M, Ordaz M, Pacheco F 2005. Inslab earthquakes of central Mexico: peak ground-motion parameters and response spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America* 95(6): 2272-2282.
- [12] Abrahamson NA, Silva W. 1997. Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes. *Seismological Research Letters* 68(1): 94-127.
- [13] Lilhanand Ky & Tseng WS. 1988. Development and application of realistic earthquake timehistories compatible with multiple damping response spectra. In *Proceedings of the 9th world conference on earthquake engineering*, Tokyo, Japan 1988(2): 819-824.
- [14] Abrahamson NA. 1993. Non-stationary spectral matching program, unpublished.
- [15] Schnabel PB, Lysmer J, Seed HB. 1972. SHAKE: a computer program for earthquake responder analysis of horizontally latered sites. *CA: College of Engineering, University of Berkeley* 1972 (Rep., No. EERC72-12).