

# 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 del parámetro $V_s$ en la respuesta de sitio de un depósito granular caracterizado a partir de pruebas Cross Hole y de correlaciones empíricas

Luis OSORIO<sup>a,1</sup>, María Clara MADRIGAL<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.** La medición de las velocidades de onda de corte,  $V_s$ , en un depósito de suelo, permite estimar las propiedades dinámicas del mismo. Estos perfiles de velocidad se pueden obtener de forma directa a partir de pruebas de campo como el Cross-Hole, Down-Hole o pruebas de sonda suspendida, y de forma indirecta mediante correlaciones empíricas a partir del número de golpes de la prueba de penetración estándar (SPT) o de la resistencia de punta del cono eléctrico (CPT). Con este propósito, en este artículo se presenta un análisis de la influencia en la respuesta de sitio de un depósito de suelo granular al definir de manera directa o indirecta el perfil de velocidad de onda de corte.

**Palabras Clave.** Cross-Hole, SPT, correlación, propiedades dinámicas, velocidad de onda de corte, respuesta de sitio, SHAKE.

## 1. Introducción

Los efectos de interacción suelo-estructura derivados de un movimiento sísmico dependen principalmente del perfil estratigráfico donde se encuentra cimentada la estructura (en particular de los espesores de los estratos que lo constituyen), de las propiedades dinámicas del depósito de suelo, de la distribución de la velocidad de onda de corte con la profundidad, del contenido de frecuencias del movimiento de entrada y del tipo de cimentación.

El comportamiento dinámico de los suelos está gobernado por el módulo de rigidez al corte,  $G$ , que representa la rigidez del suelo ante cualquier perturbación, y el coeficiente de amortiguamiento,  $\zeta$ , el cual proporciona una medida de las características disipadoras de energía del suelo cuando es sometido a cargas cíclicas. La medición de las velocidades de onda de corte,  $V_s$ , a través del perfil estratigráfico se debe de estimar de forma precisa ya que este parámetro permite determinar las propiedades dinámicas del depósito de suelo.

---

<sup>1</sup>Luis Osorio Flores, Instituto de Ingeniería, Coordinación de Geotecnia, Universidad Nacional Autónoma de México, México; E-mail: LOsorioF@iingen.unam.mx.

Los perfiles de velocidad de onda de corte se pueden determinar de forma directa a partir de pruebas de campo como el Cross Hole, Down Hole o pruebas de sonda suspendida, y de forma indirecta mediante correlaciones empíricas a partir del número de golpes para la prueba de penetración estándar (SPT) o de la resistencia de punta del cono eléctrico (CPT).

Con este propósito, en este artículo se presenta una comparación de la respuesta de sitio al determinar las propiedades dinámicas de tres depósitos de suelo granulares a partir de perfiles de velocidad de onda de corte,  $V_s$ , obtenidos de manera directa de pruebas de Cross Hole y de manera indirecta a partir del número de golpes para la prueba de penetración estándar (SPT).

### 1.1. Prueba Cross Hole Sísmico

La prueba de Cross Hole sísmico se basa en la norma ASTM D4428/D4428M-00 [1]. Para esta prueba se hacen dos o tres pozos a una profundidad deseada donde en uno de ellos se genera una perturbación mecánica a una determinada profundidad (pozo emisor) y se registra el tiempo que tardan las ondas sísmicas S y P en recorrer la distancia entre la fuente sísmica y los geófonos o acelerómetros triaxiales dispuestos en los pozos receptores. Durante la prueba, todos los dispositivos se colocan a la misma profundidad para que la onda generada viaje a través del medio circundante siguiendo una trayectoria recta. Los datos de tiempo de arribo de las ondas sísmicas S y P y la distancia entre pozos permiten determinar las velocidades de onda de corte  $V_s$  y de compresión  $V_p$ .

### 1.2. Correlación empírica

Seed *et al.* (1983) [2] propuso la correlación empírica que se presenta en la Eq. (1) para evaluar el potencial de licuación de depósitos arenosos ante un evento sísmico. En esta ecuación  $N$  representa el número de golpes para la prueba de penetración estándar corregido por energía y sobrecarga, y  $V_s$ , la velocidad de onda de corte en  $m/s$ .

$$V_s = 61\sqrt{N} \quad (1)$$

Esta correlación está en función del estado de esfuerzos del depósito de suelo y no depende del nivel de deformación inducido por un movimiento sísmico.

## 2. Modelos geotécnicos

Para determinar los perfiles estratigráficos de los sitios de estudio, los cuales se encuentran ubicados en la zona de Lomas de la Ciudad de México, y las propiedades mecánicas de cada uno de los estratos, se realizaron campañas de exploración y ensayos de laboratorio. A partir de los resultados obtenidos se definieron los siguientes modelos geotécnicos que se presentan en las Tablas 1, 2 y 3.

**Tabla 1.** Modelo geotécnico de sitio 1.

Estrato	Profundidad [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Descripción
1	0.0 a 1.8	22.1	Arena con grava
2	1.8 a 8.0	14.9	Arena arcillosa
3	8.0 a 16.0	16.8	Arcilla limosa
4	16.0 a 35.0	22.2	Arena con grava
5	35.0 a 45.0	14.9	Arena arcillosa
6	45.0 a 50.0	20.0	Arena arcillosa con grava

**Tabla 2.** Modelo geotécnico de sitio 2.

Estrato	Profundidad [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Descripción
1	0.0 a 5.0	18.8	Grava arcillosa de alta compacidad
2	5.0 a 14.5	19.4	Arena arcillosa de mediana compacidad
3	14.5 a 28.0	19.2	Arena arcillosa de alta compacidad
4	28.0 a 50.0	20.3	Gravas de alta compacidad

**Tabla 3.** Modelo geotécnico de sitio 3.

Estrato	Profundidad [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Descripción
1	0.0 a 4.0	17.0	Relleno
2	4.0 a 8.0	19.4	Arena limosa de alta compacidad
3	8.0 a 20.0	23.4	Grava y arena limosa de alta compacidad
4	20.0 a 30.0	22.0	Arena limosa de alta compacidad
5	30.0 a 50.0	23.7	Roca andesita fracturada

### 3. Caracterización del ambiente sísmico

Para definir el ambiente sísmico de la zona de estudio se identificó la estación sísmica más cercana dentro del área de influencia y se seleccionaron tres registros como sismos semilla con magnitud  $M_s$  mayores a 6.5 (Tabla 4). Lo anterior, con el propósito de generar tres acelerogramas sintéticos cuyos espectros de aceleraciones fueran compatibles con el espectro de respuesta de diseño definido para la zona de Lomas (Zona I) según el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal [3].

Las señales sintéticas se obtuvieron empleando el programa RSPMatch 99 [4]. Este programa implementa el algoritmo de Lilhanand & Tseng (1987, 1988) [5][6] para modificar una historia de aceleraciones en el dominio del tiempo y hacerla compatible con el espectro de referencia especificado. En la Figura 1 se presentan los espectros de respuesta obtenidos a partir del ajuste espectral de los registros de los sismos semilla.

**Tabla 4.** Sismos registrados en la estación UI21.

Eventos	Fecha	$M_s$	Componente	Aceleraciones máximas [gal]
Evento 1	09/08/2000	6.5	NS / V / EW	5.02 / 2.07 / 5.19
Evento2	11/01/1997	6.9	NS / V / EW	9.12 / 3.99 / 9.21
Evento3	30/09/1999	7.5	NS / V / EW	14.78 / 7.80 / 16.33

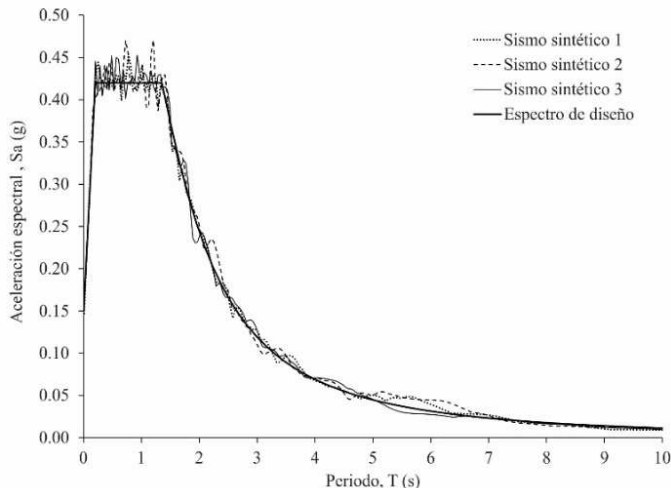


Figura 1. Espectros de respuesta de sismos sintéticos en roca.

#### 4. Análisis de respuesta de sitio

##### 4.1. Perfiles de velocidad de onda de corte

Para realizar una comparación de la respuesta dinámica de los perfiles estratigráficos ante un movimiento sísmico, se determinaron los perfiles de velocidad de onda de corte mediante métodos directos e indirectos. Con esta idea, se realizaron pruebas de Cross Hole sísmico y se utilizó la correlación de Seed *et al.* (1983) [2]; esta última en función del número de golpes para la prueba de penetración estándar (SPT). Con los perfiles de  $V_s$  obtenidos se definieron las propiedades dinámicas para cada estrato. En la Figura 2 se presenta una comparación entre los perfiles de velocidad de onda de corte obtenidos mediante métodos directos e indirectos para cada sitio de estudio.

En esta figura se pudo observar que en general las pruebas Cross Hole permitieron identificar estratos de baja y alta compacidad que las pruebas de penetración estándar (SPT) no lograron detectar.

En este contexto, se pudo observar que los perfiles de velocidad de onda de corte generados a partir de la correlación empírica sobre estiman las  $V_s$  de los estratos con baja resistencia, en tanto que subestiman las velocidades de los estratos más competentes y en el mejor de los casos proporcionan un promedio de los valores de velocidad de onda de corte determinados con las pruebas Cross Hole a lo largo de los tres perfiles estratigráficos de estudio.

##### 4.2. Propiedades dinámicas

Para realizar el análisis de respuesta de sitio unidimensional de los depósitos suelo se utilizó el programa SHAKE [7][8]. Por otro lado, para considerar la no linealidad del suelo se tuvieron en cuenta las curvas de degradación del módulo de rigidez al corte,  $G$ , y de amortiguamiento,  $\zeta$ , que se presentan en las Tablas 5, 6 y 7 para cada estrato de los sitios de estudio.

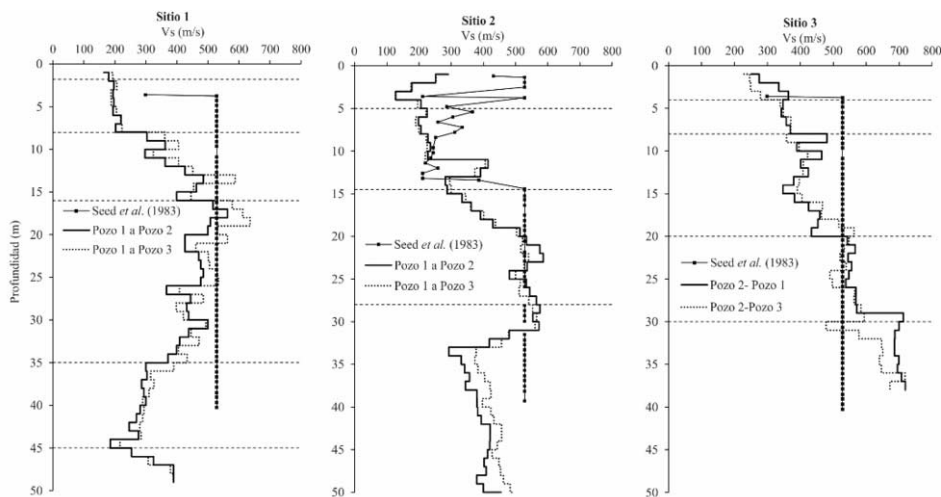


Figura 2. Perfiles de velocidad de onda de corte.

Tabla 5. Lista de curvas de degradación utilizadas para el sitio 1.

Estrato	Profundidad [m]	Curvas de degradación
1	0.0 a 1.8	Seed et al. (1986) [9]
2	1.8 a 8.0	Vucetic & Dobry (1/91) IP=30 [10]
3	8.0 a 16.0	Vucetic & Dobry (1/91) IP=30 [10]
4	16.0 a 35.0	Seed et al. (1986) [9]
5	35.0 a 45.0	Vucetic & Dobry (1/91) IP=15 [10]
6	45.0 a 50.0	Seed & Idriss (1970) [11]

Tabla 6. Lista de curvas de degradación utilizadas para el sitio 2.

Estrato	Profundidad [m]	Curvas de degradación
1	0.0 a 5.0	Seed et al. (1986) [9]
2	5.0 a 14.5	Vucetic & Dobry (1/91) IP=15 [10]
3	14.5 a 28.0	Seed & Idriss (1970) [11]
4	28.0 a 50.0	Seed et al. (1986) [9]

Tabla 7. Lista de curvas de degradación utilizadas para el sitio 3.

Estrato	Profundidad [m]	Curvas de degradación
1	0.0 a 4.0	Seed & Idriss (1970) [11]
2	4.0 a 8.0	Seed & Idriss (1970) [11]
3	8.0 a 20.0	Seed et al. (1986) [9]
4	20.0 a 30.0	Seed & Idriss (1970) [11]
5	30.0 a 50.0	Schnabel (1973)

## 5. Resultados

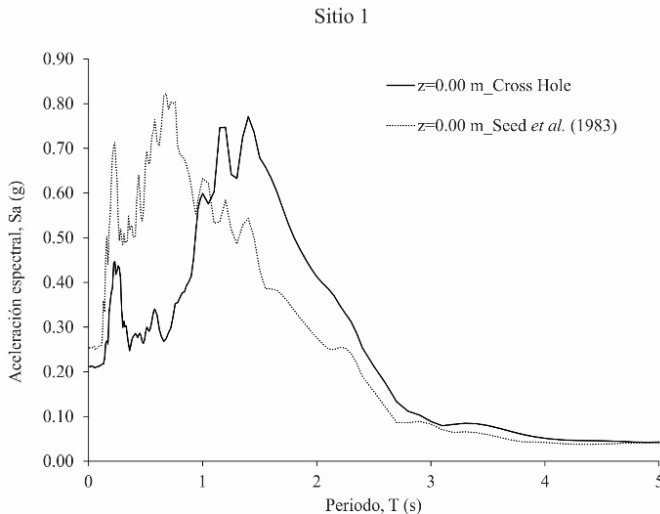
En las Figuras 3, 4 y 5 se presenta para cada depósito de suelo granular una comparación de los espectros de respuesta de sitio obtenidos con el programa SHAKE considerando

como propiedades dinámicas de los geomateriales, aquellas definidas a partir de los perfiles de velocidad de onda de corte generados de manera directa o indirecta.

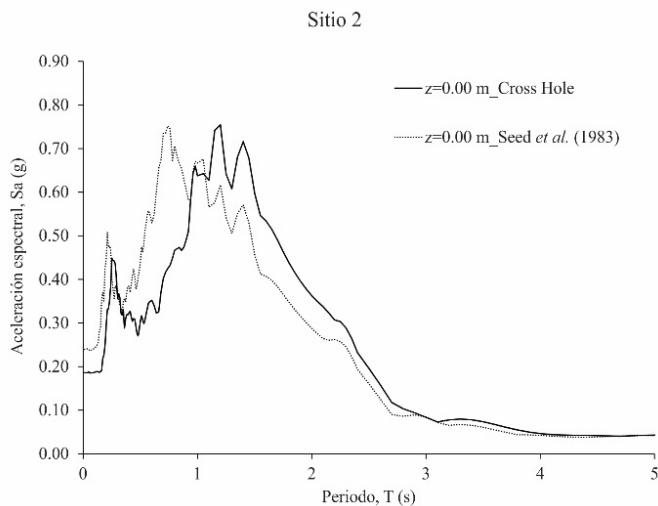
En las Figuras 3 y 4 se puede observar que al considerarse el perfil de velocidad de la prueba Cross Hole, para el sitio 1, el periodo del suelo se encuentra alrededor de 1.40 s y la aceleración máxima del terreno es igual a 0.21 g. Por otro lado, para el sitio 2, el periodo del suelo se encuentra alrededor de 1.20 s y la aceleración máxima del terreno es igual a 0.19 g. Sin embargo, al considerarse el perfil de velocidades de la correlación empírica, el sitio 1 presenta un periodo del suelo de 0.70 s y una aceleración máxima del terreno de 0.25 g, mientras que el sitio 2 presenta un periodo del suelo de 0.74 s y una aceleración máxima de 0.24 g. Estas diferencias en las respuestas de sitio de los depósitos de suelo se deben a que las propiedades dinámicas determinadas a partir del perfil de velocidades de la prueba Cross Hole representan un suelo menos competente que aquel determinado a partir del perfil de velocidad de la correlación empírica.

Es importante resaltar que para el sitio 1 y 2 no se presentan cambios importantes en la ordenada espectral al considerarse los perfiles de velocidad obtenidos de manera directa o indirecta.

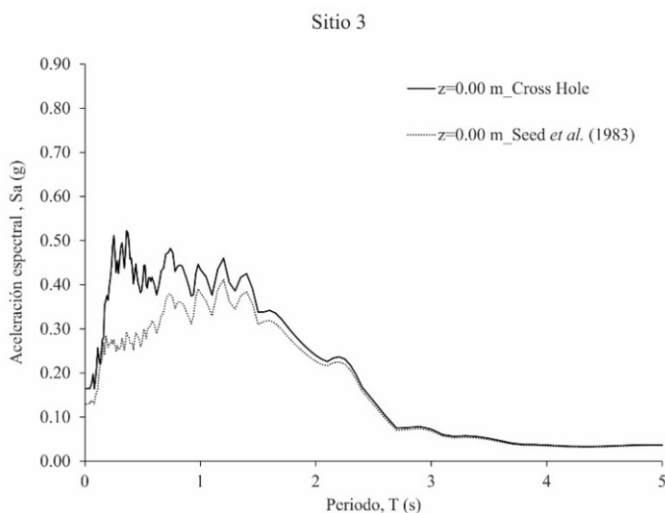
En la Figura 5 se puede observar que al considerarse el perfil de velocidad de la prueba Cross Hole el periodo fundamental del depósito de suelo para el sitio 3 se encuentra alrededor de 0.36 s y la aceleración máxima del terreno es igual a 0.16 g. Por otro lado, al considerarse el perfil de velocidades obtenido con la correlación empírica, este sitio presenta un periodo fundamental de 1.20 s y una aceleración máxima del terreno de 0.13 g. Estas diferencias estriban en la capacidad que tiene la prueba Cross Hole para detectar estratos competentes, en particular en el sitio 3 donde se encontró un estrato a una profundidad de 30 m con velocidades de onda de corte mayores a 500 m/s.



**Figura 3.** Comparación de espectros de respuesta en superficie para el sitio 1.



**Figura 4.** Comparación de espectros de respuesta en superficie para el sitio 2.



**Figura 5.** Comparación de espectros de respuesta en superficie para el sitio 3.

## 6. Conclusiones

En este artículo se presenta una comparación de la respuesta de sitio al determinar las propiedades dinámicas de tres depósitos de suelo granulares, ubicados en la Zona de la Lomas de la Ciudad de México, utilizando los perfiles de velocidad de onda de corte,  $V_s$ , obtenidos de pruebas de Cross Hole y de la correlación de Seed *et al.*, (1983), ésta última en función del número de golpes para la prueba de penetración estándar (SPT).

Al compararse los perfiles de velocidad obtenidos mediante métodos directos e indirectos, se pudo observar en particular que las pruebas de Cross Hole permitieron identificar en cada uno de los sitios de estudio estratos de baja y alta compacidad, en



tanto que las pruebas de penetración estándar no. En consecuencia, al realizarse los análisis de respuesta de sitio unidimensional utilizando el código de SHAKE, se pudo observar que en los depósitos de suelo 1 y 2 cuando se consideran las propiedades dinámicas obtenidas a partir de las pruebas de Cross Hole, el comportamiento dinámico en términos de los espectros de respuesta en la superficie es más representativo de estratos de suelos con baja rigidez, en contraste con aquellos determinados a partir de los perfiles de velocidad con la correlación empírica.

Por otro lado, para el depósito de suelo 3, el espectro de respuesta en superficie obtenido cuando se consideran las propiedades dinámicas determinadas a partir de las pruebas de Cross Hole, es característico de un depósito con geomateriales de rigidez importante, destacando la capacidad de esta prueba para detectar un estrato competente a una profundidad de 30 m con velocidades de onda de corte mayores a 500 m/s.

En conclusión, la determinación de la velocidad de onda de corte es un parámetro muy importante y tiene una gran influencia en los análisis de respuesta de sitio y de interacción suelo-estructura, por lo tanto, es fundamental realizar pruebas de campo que permitan identificar y caracterizar adecuadamente cada uno de los estratos que componen el perfil estratigráfico de estudio ya que la caracterización incorrecta de este parámetro afectará de manera significativa el comportamiento dinámico del depósito y de la estructura bajo un escenario sísmico severo.

## Referencias

- [1] ASTM International. (2000). Standard Test Method for Crosshole Seismic Testing. ASTM D4428/D4428M-00.
- [2] Seed, H.B., Idriss, I.M. & Arango, I. (1983). Evaluation of liquefaction potential using field performance data. *Geotechnical Engineering*, 109 (3): 458-483.
- [3] RCDF (2004). Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal, México.
- [4] Abrahamson, N. (1992). Non-Stationary spectral matching, *Seismol. Res. Lett.* 63, 30.
- [5] Lilhanand, K & Tseng, W.S. (1987). Generation of synthetic time histories compatible with multiple-damping response spectra, *SMIRT-9*, K2/10.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [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