



## DETERMINACIÓN DE LOS PERÍODOS DOMINANTES DEL SUELO PARA ALGUNOS SITIOS DE LA CIUDAD DE PUEBLA

Araceli Aguilar<sup>a</sup>, Jessica Romero<sup>b</sup>, Susana Rendón<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Docente, de la Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Ciudad Universitaria, Colonia San Manuel s/n, Puebla, México, araceli.aguilar@correo.buap.mx

<sup>b</sup> Estudiante de maestría de la Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Ciudad Universitaria, Colonia San Manuel s/n, Puebla, México

<sup>c</sup> Estudiante de licenciatura de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Ciudad Universitaria, Colonia San Manuel s/n, Puebla, México

### RESUMEN

Los efectos de sitio dependen del período dominante y de la velocidad de propagación de ondas que miden las características dinámicas de los suelos, el período puede medirse directamente en campo o determinarse a través de análisis dinámicos que consideran la estratigrafía y las propiedades de los estratos. Para calcular el período de algunos suelos de la ciudad de Puebla se emplearon velocidades de propagación de ondas de corte obtenidas con la técnica del “down hole”, el cual es un método invasivo que se basa en los principios de la sismica y consiste en introducir un sensor en el interior de una perforación para realizar mediciones directas de los tiempos de arribo de las ondas generadas en una fuente cercana a la superficie y que viajan hasta ser captadas por los sensores, mientras que las características geotécnicas de los estratos se definieron con perforaciones de Sondeos de Penetración Estándar (SPT). En este trabajo se presentan los períodos calculados para ocho sitios localizados al sur de la ciudad y se clasificaron sísmicamente de acuerdo al criterio del National Earthquake Hazard Reduction Program (NEHRP); obteniéndose valores que varían de 0.22 a 0.34 s que corresponden a suelos muy densos y suelos rígidos.

### 1. INTRODUCCIÓN

La velocidad de propagación de ondas de corte ( $V_s$ ) es un parámetro útil en la caracterización dinámica del suelo el cual también permite cuantificar sus propiedades de rigidez y deformabilidad, mediciones de gran importancia en la ingeniería civil. La velocidad promedio de onda de corte de los primeros 30 m ( $V_{s30}$ ), fue inicialmente propuesta para la clasificación del sitio y la definición de los coeficientes de sitio para la estimación de los espectros de respuesta (Borcherdt, 1994). Este criterio lo han usado diferentes códigos o reglamentos internacionales de construcción e.g. International Building Code (IBC), National Earthquake Hazard Reduction Program (NEHRP), Eurocódigo 8.

### 2. PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS SÍSMICAS EN MEDIOS ELÁSTICOS

Las ondas sísmicas son perturbaciones elásticas (fractura de la corteza terrestre) que se transmiten por el medio, la energía de propagación será determinada por las propiedades del medio por el que viajan. Dentro de las ondas sísmicas, se encuentran las ondas de cuerpo y las de superficie; en el campo de la geotecnia, las de mayor importancia son las ondas de corte. Entre las aplicaciones de la  $V_s$  podemos mencionar la determinación del módulo de rigidez al corte ( $G$ ) ante pequeñas deformaciones, la evaluación del potencial de licuación de suelos, la interacción suelo-estructura (Stokoe et al., 2004).



### 3. EL DOWN HOLE EN LA INGENIERÍA GEOTÉCNICA

Los métodos sísmicos in situ aplicados en geotecnia estudian los movimientos de las partículas asociados a las perturbaciones, para conocer la velocidad de propagación de las ondas en el medio, la cual está determinada por las propiedades físicas y elásticas de los materiales atravesados. El down hole es un método sísmico invasivo que se utiliza para determinar la velocidad de onda primaria y secundaria en función de la profundidad. Éste se realiza dentro de un pozo para generar las ondas, se instalan uno o varios geófonos triaxiales dentro del pozo para detectar la llegada de las ondas, los cuales se sitúan a una profundidad específica en la perforación. La fuente sísmica y los geófonos son conectados a un sismógrafo, al activar la fuente sísmica se acciona un sistema que registra en forma digital las formas de onda captadas por los geófonos. Efectuados los registros, se cambia la profundidad de los geófonos y se repite el procedimiento experimental (ASTM, 2008). En la figura 1 se muestra la ejecución de la técnica.

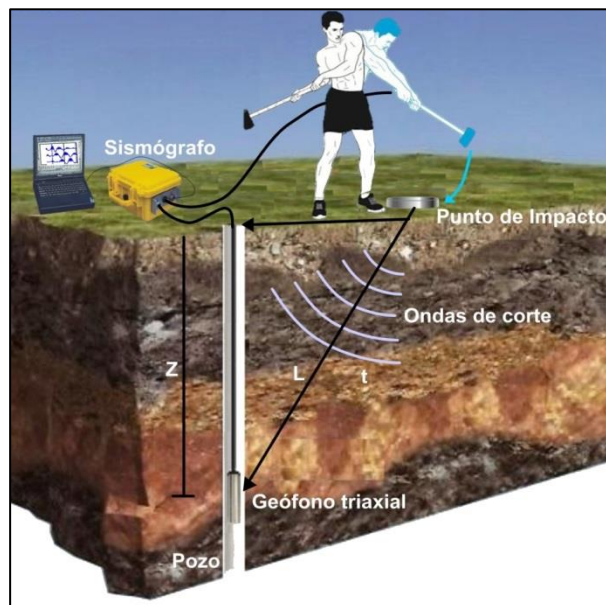


Figura 1. Ejecución del down hole.

El objetivo del ensayo es medir el tiempo y la distancia de viaje de las ondas primarias (P) y/o secundarias (S) desde la fuente emisora al geófono. Para esto se traza una curva de tiempos de arribo y profundidad. El valor inverso de las pendientes de esta curva representa la velocidad promedio de las ondas sísmicas en los estratos del suelo, con éstas se obtiene el perfil de velocidades sísmicas. En la Figura 2 se presentan los perfiles de velocidades de secundarias o de corte ( $V_s$ ) obtenidos para cada sitio.

### 4. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se ubica al sur de la ciudad de Puebla, en la figura 3 se presenta el mapa geotécnico de la ciudad propuesto por Azomoza en 1998, en la misma figura en la parte inferior se destaca el área de estudio con la finalidad de ubicar los ocho sitios donde se realizaron las mediciones con down hole y los SPT, como se puede observar en esta figura, geotécnicamente se localizan en la zona de depósitos eólicos de origen volcánico. Estos depósitos se describen como



tobas arenosas y gravosas y suelos tobáceos, productos de la actividad volcánica regional. En las tobas existe generalmente un alto grado de cementación que les da la consistencia de una roca suave; en los suelos, esta consistencia es variable, dependiendo de su compactación, cementación y grado de alteración. A partir de los SPT se definieron perfiles estratigráficos para cada sitio. A manera de ejemplo sólo se describe la secuencia estratigráfica del sitio 7; como primera capa, se identificó un relleno heterogéneo con un espesor de cinco metros, el cual está constituido por arenas limosas que empaquetan gravas de aproximadamente  $\frac{1}{2}$ " , el segundo estrato de seis metros de espesor de una roca que presenta vesículas aisladas, de muy mala a buena calidad; subyaciendo a esta roca y hasta los 20 m de profundidad se encuentra una arena fina a gruesa limosa de compactación muy densa que empaquetan gravas de tamaño máximo de 1", a continuación y hasta la profundidad explorada se presentan intercalaciones de capas de aproximadamente un metro de espesor de arena limosa de compactación muy densa y roca de muy mala calidad.

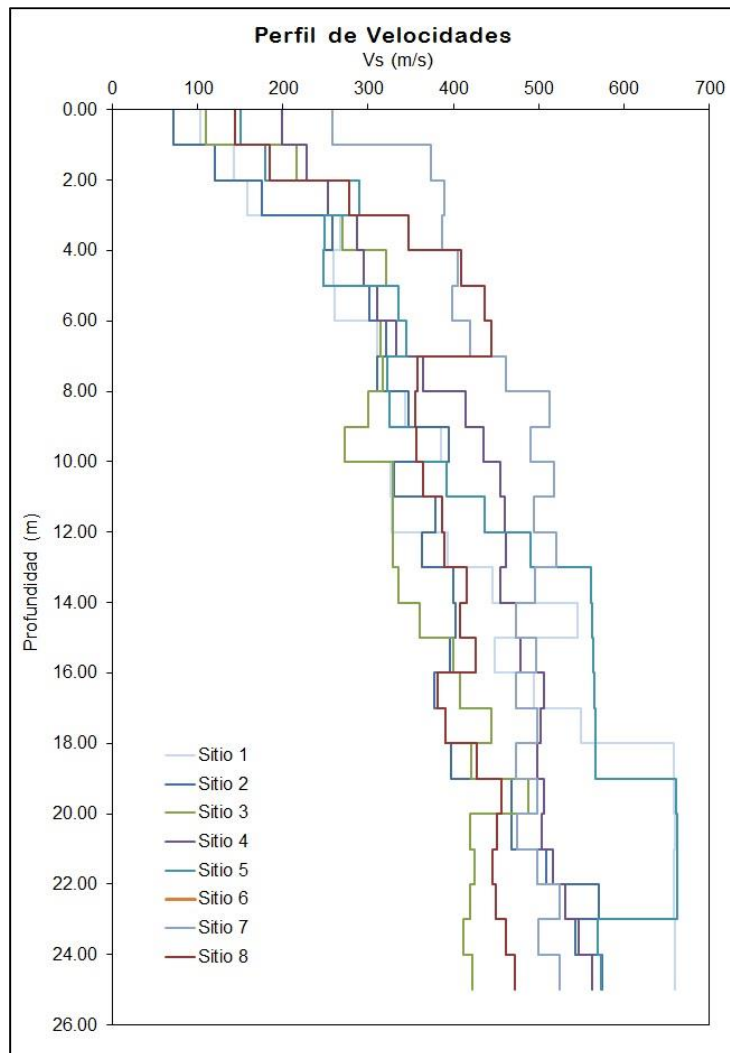


Figura 2. Perfiles de velocidades secundarias obtenidos con el down hole.



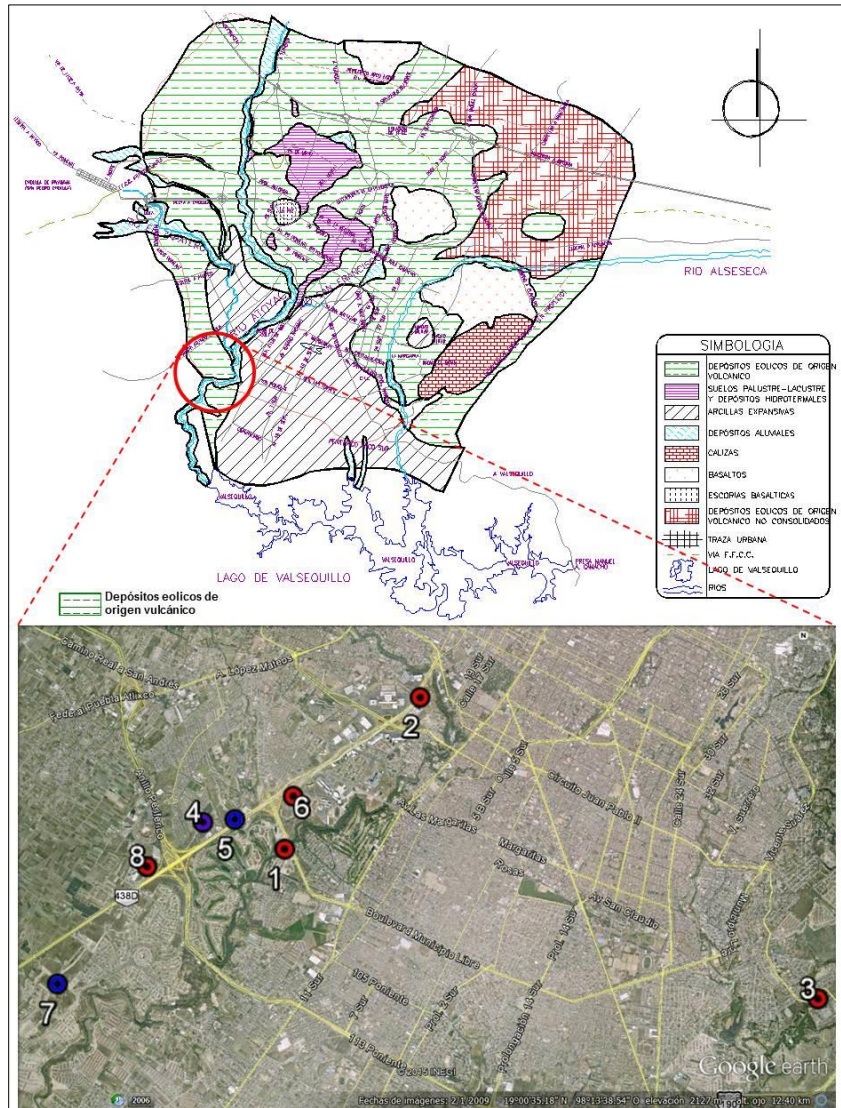


Figura 3. Ubicación de los sitios de la ciudad donde se realizaron las mediciones con down hole.

### 5.- CÁLCULO DE LA VELOCIDAD EFECTIVA Y DEL PERÍODO DOMINANTE

La respuesta de un depósito de suelo ante excitación sísmica es función de varios factores que están relacionados con la geometría y las propiedades dinámicas de los materiales que conforman el depósito (CFE, 2008). Los efectos de sitio dependen exclusivamente de dos parámetros (período dominante y la velocidad de propagación) que miden las características dinámicas más relevantes del suelo.

El promedio de la velocidad de corte en los 30 m superiores del perfil del suelo ( $V_{s30}$ ) es una medida universalmente aceptada para la clasificación sísmica de los suelos. De acuerdo al NEHRP los suelos se clasifican en seis grupos diferentes que se describen en la Tabla 1. Cabe mencionar que varios países tienen un sistema de clasificación igual o similar: USA (IBC, 2006); Europa (Eurocódigo 8, 2004); Canadá (NBCC, 2005).



Tabla 1. Clasificación sísmica del suelo usando  $V_{s30}$  como indicador de la respuesta del sitio (NEHRP, 2003).

Tipo	Descripción	$V_{s30}$ (m/s)
A	Roca dura	> 1500
B	Roca	760 – 1500
C	Roca blanda / suelo muy denso	360 – 760
D	Suelo rígido	180 – 360
E	Suelo blando	< 180
F	Suelos especiales (licuables, colapsables, arcillas muy plásticas, suelos orgánicos)	

Para este trabajo, la velocidad media de onda de corte ( $V_{s30}$ ) se calculó con la ecuación:

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{s_i}}} \quad (1)$$

donde:  $d_i$  = espesor del  $i$ -ésimo estrato y  $V_{s_i}$  = velocidad de corte de la  $i$ ésima capa de un total de  $n$ , existentes en los 30 m superiores.

Mientras que el período fundamental de vibración del suelo ( $T_s$ ), se calculó con la ecuación:

$$T_s = \frac{4H}{V_{s30}} \quad (2)$$

donde:  $H$  = espesor del depósito y  $V_{s30}$  = velocidad promedio de onda de corte en el depósito de suelo.

En la Tabla 2 se presentan los valores  $V_{s30}$ , el período dominante y la clasificación sísmica del terreno según el NEHRP. De acuerdo a este criterio el suelo que predomina es el tipo D (5 sitios, círculos de color rojo de la Figura 3), mientras que el tipo C se tiene en tres sitios (círculos de color azul de la Figura 3). La velocidad efectiva más alta fue de 451 m/s y corresponde al sitio 7, clasificado como tipo C (roca blanda/suelo denso); para este sitio en la estratigrafía definida, se observaron tres estratos de roca a las profundidades de 5 m, 21 y 23 m con espesores variables de 6, 1 y 2 m respectivamente, en todos los casos la roca presenta muy mala a buena calidad.

El período más alto (0.34 s), que se obtuvo fue para el sitio 2 clasificado sísmicamente como tipo D y geotécnicamente identificado como una formación de suelos tobáceos conformada por la intercalación de arena fina a media arcillosa y limosa, arcilla arenosa de alta y baja plasticidad y limo arenoso de alta y baja plasticidad, de compacidad media a muy densa y consistencia media a dura, respectivamente, los estratos presentan gravas aisladas. Mientras que el período más bajo (0.22 s) fue para el sitio 7.



Tabla 2. Velocidad efectiva y período dominante.

Sitio	Vs (m/s)	Ts (s)	Tipo
1	330	0.30	D Suelo rígido
2	290	0.34	D Suelo rígido
3	317	0.32	D Suelo rígido
4	389	0.26	C Roca blanda / suelo muy denso
5	381	0.26	C Roca blanda / suelo muy denso
6	341	0.32	D Suelo rígido
7	451	0.22	C Roca blanda / suelo muy denso
8	357	0.28	D Suelo rígido

## 6.- CONCLUSIONES

La velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) es un parámetro de gran utilidad para la caracterización dinámica a los suelos, ya que con este valor se puede determinar el período dominante de éstos; para la obtención de estas velocidades el down hole resultó un método eficaz.

Se clasificó sísmicamente el suelo de ocho sitios de la ciudad de Puebla de acuerdo al criterio del NEHRP, el suelo que resultó predominante fue el tipo D que corresponde a suelos rígidos, para lo cual se determinaron los períodos dominantes y velocidades efectivas haciendo uso de las velocidades de propagación de ondas de corte de cada sitio, el período más alto y más bajo son 0.34 y 0.22 s, respectivamente.

El criterio que se utilizó fue el del NEHRP que dio buenos resultados comparándolos con los datos geotécnicos obtenidos de los SPT, es recomendable revisar la metodología que recientemente se presentó en el Manual de CFE e implementar el programa PRODISIS para el cálculo de los períodos.

## AGRADECIMIENTOS

A la empresa Ingeniería Civil en Desarrollo (ICD), S. A. de C. V., al Ing. José Genaro Azomoza Ponce y el M. I. Miguel Ángel Figueras Corte, por facilitarnos la información geotécnica y geofísica utilizada en este trabajo.

## REFERENCIAS

- ASTM (1998). D 7400 – 08. “Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing”
- Azomoza G., Vera A. y Reyes L. (1998). “Zonificación geotécnica para el área urbana del valle de Puebla”, *Memorias del XIX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Publicación SMMS, Puebla, Pue.
- Borcherdt R.D. (1994). “Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification),” *Earthquake Spectra*, 617-653.
- Building Seismic Safety Council (BSSC). (2003). NEHRP Recommended Provisions For New Buildings And Other Structures. 2003 Edition Part 1: Provisions, prepared by the Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency (Report FEMA 450).
- Comisión Federal de Electricidad (CFE), (2008). “Manual de Diseño de Obras Civiles”. Diseño por sismo.
- Kramer S. L., (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. University of Washington. Prentice Hall.
- Eurocódigo 8 (2004). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1.
- IBC (2006). International Building Code, International Code Council, U.S.A.
- Ingeniería Civil en Desarrollo (ICD), (1999-2004). Archivo particular.
- Stokoe K.H., Joh S-H y Woods R.D. (2004), “The contributions of in situ geophysical measurements to solving geotechnical engineering problems”, Proc. 2nd Int Conf on