



Perfiles de velocidad de onda de corte y análisis del comportamiento sísmico del suelo en el poniente de Guadalajara, Jal.

Shear wave profiles and soil seismic behavior in the West part of Guadalajara, Jal.

Salvador LAZCANO

Director de Suelo-Estructura, Guadalajara, Jal

RESUMEN: Se presentan 18 perfiles de velocidad de onda de corte (V_s) contra profundidad en diferentes sitios del poniente de Guadalajara. Estos perfiles se determinaron mediante la técnica geofísica sísmica tipo ReMi (Loui, 2001), que es una de las metodologías de análisis de ondas de superficie. Con esta información, se realizan análisis comparativos de comportamiento sísmico del suelo mediante tres metodologías: la clasificación de suelos según el IBC (2006), el análisis semi-empírico con el programa PRODISIS del Manual de Diseño por Sismo de la Comisión Federal de Electricidad (2008) y el análisis detallado con ProShake (1998). Finalmente se presenta una panorámica general de las condiciones del comportamiento sísmico del suelo de Guadalajara en la zona poniente, y se proponen líneas de futura investigación. El trabajo se enfoca particularmente a la zona poniente, ya que es en donde en años recientes se está presentando un crecimiento importante de edificios altos.

ABSTRACT: Eighteen different shear wave velocity (V_s) versus depth profiles obtained in the West part of Guadalajara are shown. These profiles were obtained with ReMi technique (Loui, 2001), which is one of the surface wave analysis methods. With these information, there is a comparative analysis among three different methods: IBC (2006) soil type classification, semi-empirical method used in the PRODISIS software of the Seismic Manual for Earthquake Design of the Federal Commission of Electricity (CFE, 2008), and detailed analysis with the software ProShake (1998). Finally, a general view of soil earthquake behavior in the West part of Guadalajara is presented, and future research is proposed. The study is focused on a limited area of Guadalajara (the West part), where the main tall building construction has been taken place in recent years.

1 INTRODUCCIÓN

Cuando ocurre un sismo, se genera ondas elásticas que viajan primordialmente por las rocas, pero al encontrarse en su camino con depósitos de suelo que sobreyacen a la roca, por tener estos suelos una rigidez contrastantemente menor, ocurre el fenómeno de refracción. Es entonces que las ondas sísmicas tienden a propagarse casi verticalmente a través de los depósitos de suelo hasta llegar a la superficie de los mismos. El camino ascendente de las ondas elásticas en los suelos está gobernado en forma importante por la velocidad de propagación de la onda de corte (V_s), y de ahí la conveniencia de conocer los perfiles de variación de la velocidad de onda de corte contra profundidad en depósitos de suelos.

Un criterio empírico para determinar el comportamiento de suelos, parte de investigaciones realizadas por *Borcherdt (1994)*, que proponen un método de clasificación con base en la velocidad promedio de onda de corte en los 30 m superficiales (V_{s30}). Este criterio se ha popularizado en los últimos años y lo utilizan diferentes códigos o reglamentos en varios países, entre otros Estados Unidos, en

donde se utiliza el llamado “Código Internacional para la Construcción” (IBC, 2006).

En México el nuevo *Manual de Diseño por Sismo de la Comisión Federal de Electricidad (2008)* incluye un método semi-empírico para análisis (PRODISIS) que requiere del conocimiento de la variación de V_s a profundidad.

Métodos analíticos más sofisticados como el SHAKE (*Schnabel et al., 1972*) con sus múltiples variantes, D-MOD (*Matasovic, 2006*), *DEEPSOIL* (*Hashash et al., 2011*) y otros, requieren igualmente del conocimiento de V_s contra profundidad.

2 ONDAS ELÁSTICAS

Las ondas elásticas son pequeñas perturbaciones mecánicas en un medio constituido por partículas, como son los depósitos de suelos, y cuyo paso no altera prácticamente las condiciones del medio (suelo). Las ondas elásticas se dividen en dos grandes grupos, las de cuerpo, que viajan en el interior del medio elástico, y las de superficie, que se propagan a lo largo de la frontera de un medio semi-infinito, como se puede idealizar un depósito de suelos. Las ondas de cuerpo se subdividen a su vez en ondas de compresión o primarias (V_p) y de corte

o secundarias (V_S). A su vez, las ondas de superficie se subdividen en Love y Rayleigh. Las ondas de corte y las Rayleigh son las de mayor importancia en la geotecnia.

3 PRUEBAS GEOFISICAS PARA DETERMINAR VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE (V_S)

Para determinar la velocidad de onda de corte en suelos (V_S) lo más conveniente es recurrir a pruebas geofísicas de campo para encontrar directamente los valores mediante alguno de los métodos de geofísica sísmica.

Con frecuencia, a falta de estas pruebas geofísicas se recurre a ecuaciones empíricas para estimar V_S partiendo las resistencias a la penetración estándar (N). Sin embargo, es conocida la susceptibilidad de los resultados de la prueba de penetración estándar dependiendo de los equipos y metodologías con la que se realizó, por lo que los valores de V_S calculados a partir de dicha prueba deben verse con mucha cautela. En el caso particular de las arenas pumíticas de Guadalajara es aún más cuestionable esta metodología, por tratarse de suelos triturables que tienen variantes importantes en comparación de las arenas comunes (Padilla, 1998; Pender *et al.*, 2006; Mesri y Vardhanabhuti, 2009; Lazcano, 2010).

En ocasiones se recurre erróneamente a determinar la velocidad de onda de corte (V_S) a partir de la medición de la velocidad de onda de compresión (V_P). Esto no debe hacerse si no se conoce la relación de Poisson (μ) de los diferentes estratos de suelo, ya que la onda V_P viaja a una velocidad que fluctúa a entre 70 y 140% mayor que las V_S , para valores de μ de entre 0.25 y 0.4, rango frecuente en suelos y rocas. Además, en caso de haber nivel freático, no es posible detectar estratos de suelo sumergido cuya V_P sea menor a 1,480 m/s, que es la velocidad de onda a la compresión en el agua.

La determinación de la velocidad de la onda de corte (V_S) tiene múltiples aplicaciones en el campo de la geotecnia, entre otras, la determinación del módulo de rigidez al cortante ante pequeñas deformaciones ($G_O = V_S^2 \rho$), la evaluación del potencial de licuación de suelos, el análisis de asentamientos e interacción suelo-estructura (Stokoe *et al.*, 2004).

La V_S se ha determinado en campo por muchos años con las pruebas *downhole* y *crosshole*. Sin embargo, en los últimos veinte años se ha ido popularizando otra alternativa para determinar V_S , que consiste en medir la velocidad de propagación de ondas de superficie tipo Rayleigh (V_R), que para fines prácticos es igual (alrededor de 93%) a la velocidad de onda de corte.

3.1 Métodos de ondas de superficie

Cuando se golpea en la superficie de un depósito de suelos, se generan ondas elásticas tanto de cuerpo (compresión y corte) como de superficie (principalmente tipo Rayleigh). 67% de la energía aplicada se propaga como ondas Rayleigh, 27% como ondas de corte y 7% como ondas de compresión (Woods, 1968). Esto se conocía desde hacía tiempo, pero no había tecnología suficiente para monitorear y analizar las ondas de superficie, por lo que durante muchos años los métodos geofísicos sísmicos estuvieron enfocados únicamente al registro y análisis de ondas de compresión y corte.

La onda Rayleigh se puede visualizar como las ondas en la superficie de un estanque de agua; el movimiento de partícula es en una elipse vertical, paralela a la dirección de propagación y con dirección retrógrada hasta cierta profundidad en que se vuelve prógrada (Richart *et al.*, 1970).

En un depósito de suelos perfectamente homogéneo, la onda Rayleigh viaja a una velocidad que es independiente de su longitud de onda. Sin embargo, si en un medio (por ejemplo depósitos de suelo) hay estratos con rigideces, densidades o relaciones de Poisson variables, entonces la velocidad de la onda de Rayleigh dependerá de su longitud de onda. Cuando la velocidad y la frecuencia (o longitud de onda) de una onda son dependientes entre sí, se dice que la onda es dispersiva. Este comportamiento que exhiben las ondas Rayleigh en materiales no uniformes, como es el caso general de los depósitos de suelos, es el principio en el que se fundamentan los diferentes métodos de análisis de onda de superficie (Matthews *et al.*, 1996).

La mayor parte de la energía de las ondas de superficie está contenida dentro de una zona que se extiende a una profundidad de aproximadamente una longitud de onda. De esta manera, las frecuencias bajas permiten caracterizar estratos de suelo profundos, mientras que las frecuencias largas los estratos superficiales.

Si se generan ondas de superficie en un rango amplio de frecuencias, se puede inferir un perfil con la variación de velocidades de ondas Rayleigh (V_R) a profundidad. Como la velocidad de las ondas Rayleigh es ligeramente menor (alrededor de 7%) que la de corte (V_S), para fines prácticos se consideran equivalentes.

El primer método de análisis de onda de superficie que se desarrolló fue el SASW (*Spectral Analysis of Surface Waves*) (Nazarian y Stokoe, 1984). Posteriormente surgieron los métodos MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) (Park *et al.*, 1999) y ReMi (*Refraction Microtremor*) (Louie, 2001) y otros más.

Cada uno de estos métodos de análisis de onda de superficie tiene ventajas y desventajas en aspectos como precisión, profundidad de exploración,

capacidad para detectar múltiples estratos, posibilidad de trabajar en lugares con mucho ruido ambiental, rapidez de ejecución y costo.

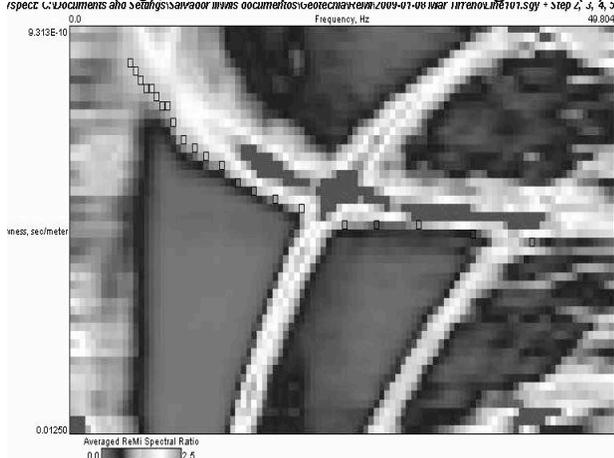
3.2 Descripción del método ReMi

La técnica de refracción de microtremores (ReMi) utiliza tendido y equipo para registro similar al de la prueba de refracción sísmica, pero se analizan las ondas Rayleigh de otras ondas elásticas y finalmente determina la variación de velocidad de onda de corte (V_s) a profundidad.

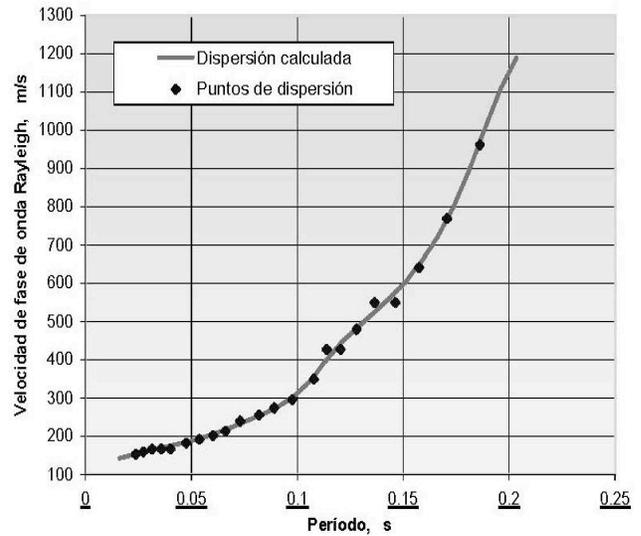
Para la realización de la prueba ReMi se coloca un tendido superficial lineal con 12 o más geófonos, el registro de la vibración se realiza con un sísmógrafo digital, y se registra tanto vibración ambiental (microtremores) como vibración inducida (impactos, vehículo en circulación, etc.).

A diferencia de la prueba tradicional de refracción sísmica, ReMi puede usarse sin problemas en ambientes urbanos y es capaz de detectar estratos blandos entre estratos con rigideces mayores, mientras que refracción sísmica sólo puede detectar variación de rigideces progresivamente mayores.

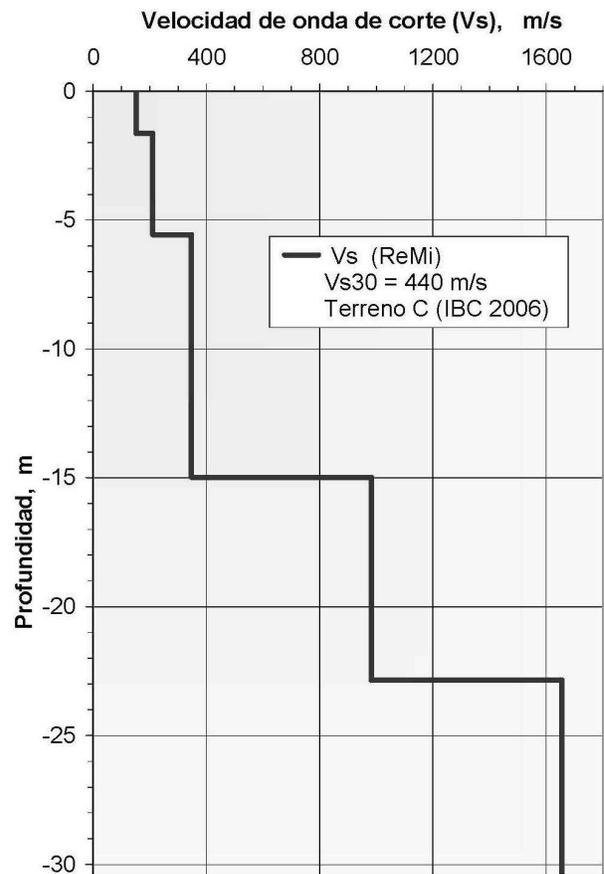
Una vez realizado el registro en campo, el primer paso del análisis ReMi consiste en generar un espectro de velocidad de frecuencias contra tardanzas (inverso de la velocidad), llamado espectro p-f, como se ilustra en la Figura 1 (a). En este espectro p-f se detecta con facilidad el primer modo de vibrar de las ondas Rayleigh, que es un trazo que va de la esquina superior izquierda de la gráfica hacia la inferior derecha. Después del espectro p-f el segundo paso consiste en determinar la gráfica de períodos contra velocidad de fase de onda Rayleigh (Figura 1 (b)). Finalmente, mediante un modelo interactivo con la gráfica período-velocidad de fase de onda Rayleigh se traza la curva de dispersión y con ella se establecen los espesores de los diferentes estratos y la velocidad de onda de corte (V_s), como se puede ver en la Figura 1 (c).



(a)



(b)



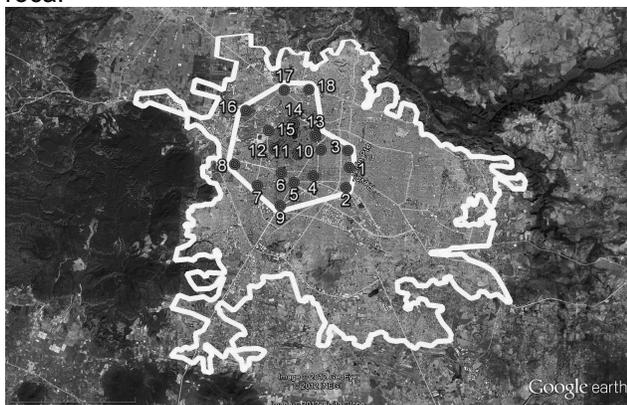
(c)

Figura 1. Tres pasos consecutivos del método ReMi: (a) Espectro de velocidad (p-f), (b) Gráfica período-velocidad de fase de onda Rayleigh con la curva de dispersión y (c) Perfil de velocidad de onda de corte (V_s) contra profundidad obtenido a partir de la curva de dispersión.

4 PERFILES DE VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE

Durante ocho años en varias decenas de proyectos hemos utilizado la técnica de refracción de microtemores (ReMi) junto con sondeos directos. En varios sitios hemos comparado la profundidad a la roca obtenida con ReMi contra la profundidad real determinada con sondeos directos y sus diferencias has sido menores a 10%.

En la Figura 2 se muestran 18 sitios ubicados en la sección noroeste de la zona metropolitana de Guadalajara, en donde se determinaron perfiles de velocidad de onda de corte (V_s) contra profundidad, y en la Tabla 1 está la información. Los sitios que se presentan quedan dentro de un área de aproximadamente 90 km^2 (uno por cada 5 km^2), que es cerca de una quinta parte de la mancha urbana de Guadalajara, y es la sección en donde se están construyendo la mayoría de los edificios altos. Algunos perfiles fueron presentados con anterioridad (Lazcano, 2007; Lazcano, 2010) y parte de ellos se modificaron de acuerdo a la profundidad real de la roca.



Sitio	Ubicación
1	Catedral
2	Antigua Biblioteca Pública, junto al parque Agua Azul
3	Registro Civil No. 1
4	Fco. Javier Gamboa y Lerdo de Tejada
5	Hotel Riu Plaza, López Mateos y Lázaro Cárdenas
6	Centro comercial La Gran Plaza
7	Patria y Guadalupe
8	Universidad Panamericana campus Guadalajara, Cd. Granja
9	López Mateos y Mariano Otero
10	Colomos y Manuel M. Dieguez
11	Eulogio Parra y Pablo Casals
12	Pablo Neruda y Paseo Jacarandas
13	Punto Sao Paulo, Prol. Av. Américas y Sao Paulo
14	Patria y Eva Briseño
15	Patria y Paseo Royal Country
16	Paseo Valle Real y Federalistas
17	Periférico y Laureles
18	Nueva Biblioteca Pública, Periférico y Parres Arias

Figura 2. Plano del área metropolitana de Guadalajara y la zona estudiada y listado de los sitios en donde se determinaron perfiles de velocidad de onda de corte (V_s).

Tabla 1. Perfiles de velocidad de onda de corte (V_s) contra profundidad

Sitio	Estratos	1	2	3	4	5
1	Prof. (m)	0-1.5	1.5-4	4-21	21-31	>31
	Vs (m/s)	110	180	255	435	880
2	Prof. (m)	0-4	4-9	9-25	> 25	
	Vs (m/s)	180	123	309	1300	
3	Prof. (m)	0-1.5	1.5-10	10-32	> 32	
	Vs (m/s)	143	298	363	1260	
4	Prof. (m)	0-4.5	4.5-11	11-50	>50	
	Vs (m/s)	154	369	382	850	
5	Prof. (m)	0-5	5-13	13-53	53-54	> 54
	Vs (m/s)	180	290	450	235	950
6	Prof. (m)	0-5	5-11	11-57	> 57	
	Vs (m/s)	165	290	575	1000	
7	Prof. (m)	0-3	3-12	12-44	> 44	
	Vs (m/s)	167	217	596	1200	
8	Prof. (m)	0-6	6-11	11-24	24-62	> 62
	Vs (m/s)	175	260	420	610	860
9	Prof. (m)	0-3	3-11	11-25	25-85	> 85
	Vs (m/s)	185	260	445	450	800
10	Prof. (m)	0-3	3-9	9-31	> 31	
	Vs (m/s)	188	253	399	1400	
11	Prof. (m)	0-1.5	1.5-4.5	4.5-7.5	7.5-60	> 60
	Vs (m/s)	95	215	255	570	1000
12	Prof. (m)	0-2	2-9	9-34	> 34	
	Vs (m/s)	158	220	420	950	
13	Prof. (m)	0-1	1-4	4-9	> 9	
	Vs (m/s)	95	225	339	1400	
14	Prof. (m)	0-2	2-6.5	6.5-10	10-17	> 17
	Vs (m/s)	123	180	250	612	1900
15	Prof. (m)	0-4	4-14	14-46	> 46	
	Vs (m/s)	180	448	513	1200	
16	Prof. (m)	0-2	2-5	5-10.5	10.5-38	> 38
	Vs (m/s)	111	196	607	696	1200
17	Prof. (m)	0-2.5	2.5-8.5	8.5-23	23-72	> 72
	Vs (m/s)	216	289	445	624	1900
18	Prof. (m)	0-3	3-8	8-14	14-37	> 37
	Vs (m/s)	144	280	350	367	1000

Los perfiles estratigráficos en todos los casos están constituidos por depósitos piroclásticos de diversos períodos eruptivos de la Sierra La Primavera ubicada al poniente de Guadalajara (Lazcano, 2004). Estos depósitos están constituidos por arena pumíticas en algunos estratos con limo o grava (llamada localmente "jal"), hasta llegar a la roca basal que es basalto en unas zonas e ignimbrita en otras. En algunos sitios, antes del basalto, puede haber hasta unos 3 m de espesor de suelo residual de arcilla rojiza con boleos o bloques rocosos.

5 ANALISIS DE COMPORTAMIENTO SISMICO DE SUELOS

A partir de la década de 1960 ha habido avances importantes en la comprensión de los efectos de sitio en sismos. Para ello ha contribuido particularmente la información obtenida en terremotos recientes, el desarrollo y perfeccionamiento de pruebas de campo y laboratorio para medir propiedades dinámicas de suelos y las nuevas herramientas para análisis sismo-geotécnico, como son los programas SHAKE (Schnabel *et al.*, 1972), D-MOD (Matasovic, 2006), DEEPSOIL (Hashash *et al.*, 2011) y muchos otros.

Dependiendo del grado de complejidad y la importancia de un proyecto, para analizar el comportamiento sísmico de depósitos de suelos se puede recurrir desde herramientas sencillas como son la clasificación de suelos de acuerdo a criterios o reglamentos como el IBC (2006) y el Eurocódigo 8 (2004), hasta métodos analíticos con diferentes grados de complejidad, siendo uno de los más populares el programa SHAKE (Schnabel *et al.*, 1972) y sus variantes, entre ellas el ProShake (1998) que utilizamos para el presente trabajo.

Una alternativa intermedia entre la clasificación sísmica de suelos según reglamentos y los métodos analíticos sofisticados, son los métodos de análisis semi-empíricos como es el programa PRODISIS incluido en el Manual de Diseño por Sismo de la CFE (2008), que también utilizamos para estudiar el comportamiento sísmico de los suelos en la zona poniente de Guadalajara.

5.1 Clasificación según IBC

En la Tabla 2 se presenta la clasificación sísmica del terreno de acuerdo al IBC (2006), que como se mencionó en la introducción, se basa en los valores promedio de velocidad de onda de corte en los 30 m superficiales (V_{s30}). Canadá (NBCC, 2005), la Comunidad Europea (Eurocódigo 8, 2004) y varios países más tienen un sistema de clasificación igual o similar.

Tabla 2. Clasificación sísmica de suelos (IBC 2006)

Tipo	V_{s30} (m/s)	Descripción
A	> 1,500	Roca dura
B	760 – 1,500	Roca
C	360 – 760	Roca blanda y suelo muy denso
D	180 – 360	Suelo rígido
E	< 180	Suelo blando
F	Suelos especiales (licuables, colapsables, arcillas muy plásticas, suelos orgánicos)	

En la Tabla 3 se presenta para cada uno de los sitios antes mencionados, los valores promedio de velocidad de onda de corte en los 30 m superficiales (V_{s30}), la clasificación sísmica del terreno de acuerdo al IBC (2006), la profundidad inferida de la roca (estrato con $V_s > 720$ m/s) o determinada con

sondeos directos y el período fundamental de vibración del suelo (T_s), que se calculó con la ecuación: $T_s = 4 H / V_{s\text{ prom}}$, donde: H: espesor del depósito de suelos; $V_{s\text{ prom}}$: velocidad promedio de onda de corte en el depósito de suelos.

De esta Tabla 3 se tiene que en promedio en la zona estudiada V_{s30} es de 352 m/s, con valores extremos de 260 y 557 m/s. El suelo es tipo D en 12 sitios, tipo C en 5 y tipo F en uno (antigua Biblioteca Pública), debido al potencial de licuación en la zona, debido a la presencia de arenas, arenas limosas y limos blando bajo el nivel freático que se encontró a alrededor de 2.5 m abajo de la superficie. Los períodos fundamentales de vibración del suelo varían entre 0.16 y 0.80 s, con valor promedio de 0.47 s.

Tabla 3. Clasificación IBC y períodos fundamentales de los suelos en diferentes sitios.

Sitio	V_{s30} (m/s)	IBC	Prof. roca (m)	T_s (s)
1	262	D	31	0.47
2	260	F	25	0.45
3	318	D	32	0.41
4	311	D	50	0.58
5	324	D	54	0.60
6	357	D	60	0.52
7	339	D	45	0.45
8	321	D	62	0.63
9	339	D	84	0.80
10	329	D	31	0.37
11	353	D	60	0.53
12	319	D	33	0.41
13	557	C	9	0.16
14	425	C	17	0.26
15	395	C	46	0.43
16	424	C	38	0.33
17	396	C	72	0.57
18	301	D	37	0.47
Prom	351.7	D	44.2	0.469

5.2 Análisis con PRODISIS

PRODISIS es un programa incluido en el Manual de Diseño por Sismo de la CFE (2008) que realiza diferentes funciones, entre ellas determina los parámetros de aceleraciones, velocidades y desplazamientos máximos en la roca para un sitio dado, y además se puede determinar el espectro para diseño sísmico para ese sitio. Para encontrar la aceleración, velocidad y desplazamiento máximo en la roca es necesario proporcionar las coordenadas geográficas del sitio (longitud y latitud) y para el espectro sísmico se necesita conocer el perfil de velocidad de onda de corte (V_s) y densidad contra profundidad, hasta llegar a la roca basal.

Una vez que se proporciona la información del depósito del suelo arriba indicada, PRODISIS calcula el período fundamental de vibración del suelo (T_s) la aceleración máxima en la roca (a_{or}) y

en la superficie del depósito de suelos (a_o), el factor de amplificación entre la aceleración en la superficie y en la roca (F_s) y el coeficiente sísmico (c).

En la Tabla 4 se presentan los principales parámetros que definen el espectro para diseño sísmico de acuerdo al Manual de Diseño por Sismo de la CFE (2008), para cada uno de los sitios presentados en las Tablas 1 y 2.

Tabla 4. Algunos parámetros para determinar los espectros sísmicos según el Manual de la CFE (2008)

Sitio	T_s (s)	$a_{o,r}$ (g)	a_o (g)	F_s	C (g)
1	0.34	0.10	0.16	1.70	0.62
2	0.39	0.10	0.20	2.07	0.82
3	0.35	0.10	0.19	1.96	0.76
4	0.52	0.10	0.14	1.51	0.49
5	0.51	0.10	0.15	1.51	0.50
6	0.40	0.10	0.14	1.45	0.51
7	0.33	0.10	0.17	1.67	0.64
8	0.43	0.10	0.13	1.34	0.46
9	0.75	0.10	0.13	1.33	0.40
10	0.32	0.10	0.20	2.05	0.83
11	0.42	0.10	0.14	1.44	0.49
12	0.33	0.10	0.17	1.69	0.64
13	0.11	0.10	0.13	1.31	0.62
14	0.20	0.10	0.25	2.54	1.19
15	0.36	0.10	0.16	1.63	0.60
16	0.22	0.10	0.16	1.66	0.65
17	0.46	0.10	0.15	1.56	0.52
18	0.40	0.10	0.16	1.65	0.58
Prom	0.380	0.10	0.163	1.671	0.629

De esta Tabla 3 se tiene que los períodos fundamentales de vibración del suelo varían entre 0.11 y 0.75 s, con valor promedio de 0.38 s. Las aceleraciones máximas en la roca ($a_{o,r}$) son de 0.10 g en todos los casos y la aceleración en la superficie del depósito de suelos (a_o) es de 0.16 g en promedio, con valores extremos de entre 0.13 y 0.25 g. Los factores de amplificación entre la aceleración en la superficie y en la roca (F_s) fluctúan entre 1.31 y 2.54, con un valor promedio de 1.67. El valor promedio de coeficiente sísmico es de 0.63 g, con valores extremos de entre 0.40 y 1.19 g.

5.3 Análisis con ProShake

ProShake es una variante del programa SHAKE, y es un método unidimensional lineal-equivalente, basado en un análisis que estima inicialmente un módulo de rigidez (G) y amortiguamiento (β) lineal-elástico que iterativamente las va variando en función de las deformaciones. El proceso se repite hasta que convergen suficientemente las propiedades calculadas con las utilizadas en el último ciclo anterior.

Además los diversos métodos unidimensionales lineal-equivalente, hay métodos unidimensionales no-lineales y también bi y tri-dimensionales lineales-equivalentes y no-lineales. En todos estos, la determinación del perfil velocidad de onda de corte contra profundidad es parte de la información

requerida, ya que la variación de movimiento en función del tiempo (generalmente acelerogramas) y la variación del módulo de rigidez al cortante (G) y del amortiguamiento (β) en función de las deformaciones son dos aspectos de gran importancia. Esto hace que estos métodos de análisis sean más complejos que los planteamientos del IBC (2006) y del PRODISIS, pero se justifica su uso en proyectos importantes, zonas de alta sismicidad o suelos complejos.

El método unidimensional lineal-equivalente tiene sus limitantes, como son casos en donde se produzcan (1) fuertes aceleraciones del terreno, o (2) variaciones en la topografía del sitio, o en la (3) estratificación del suelo, o cuando haya (4) suelos potencialmente licuables o (5) arcillas blandas. Para el caso particular de Guadalajara, en general no aplican ninguna de las cinco limitaciones, en algunos casos pudiera aplicar el punto (2) (topografía accidentada en zonas de laderas con pendientes fuertes) o el punto (4) (muy pocas zonas, como es el sitio 2 ubicado junto al parque Agua Azul, en donde pudiera ocurrir licuación).

En la Catedral (sitio 1) se realizó análisis con ProShake utilizando el perfil de velocidad de onda de corte (V_s) contra profundidad que se presentó en la Tabla 2. En la Figura 3 está los espectros de respuesta para un amortiguamiento de 5%, obtenido en el análisis para aceleraciones de 0.015 y 0.1 g. Se determinaron estos dos espectros para tener dos panoramas contrastantes, por un lado, con la aceleración baja, lo registrado en roca en el sismo de octubre de 1995 (Chávez González, 1995), que es uno de los mayor intensidad en la segunda mitad del siglo XX, y por otro lado la aceleración de 0.1 g de acuerdo a lo que indica el programa PRODISIS, y que cubre períodos de retorno de entre 3,400 y 3,500 años.

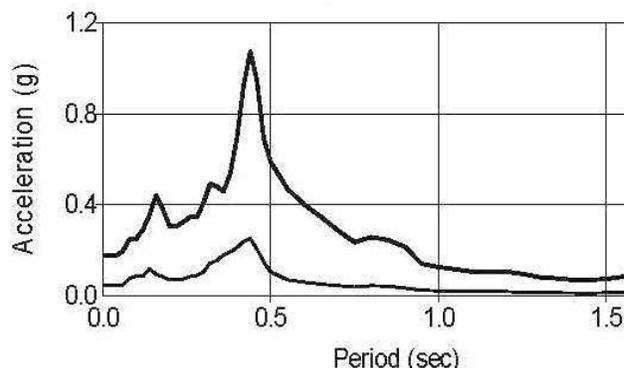


Figura 3 Espectros de respuesta calculado para aceleraciones máximas en roca de 0.015 y 0.10 g, párale sitio 1 (Catedral)

En sitio 5 (Hotel Riu Plaza Guadalajara) se realizó análisis con ProShake utilizando el perfil de velocidad de onda de corte (V_s) contra profundidad que se presentó en la Tabla 2, y en la Figura 4 están los espectros de respuesta para un amortiguamiento de 5%, para aceleraciones de 0.015 y 0.1 g.

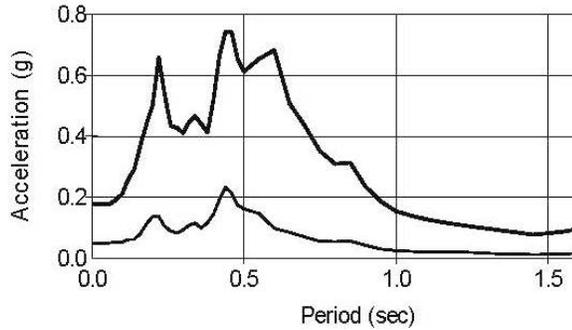


Figura 4 Espectros de respuesta calculado para aceleraciones máximas en roca de 0.015 y 0.10 g, para el sitio 5 (Hotel Riu Plaza).

Los valores máximos de aceleraciones espectrales para aceleraciones en roca de 0.1 g son de 1.1 y 0.74 g para el sitio 1 (Catedral) y el 5 (Hotel Riu), respectivamente.

En la Tabla 5 se presentan diferentes parámetros calculados con ProShake para algunos de los sitios presentados en la Tabla 1. Los parámetros que se presentan son la aceleración máxima en la superficie y en campo libre (a_o), el factor de amplificación (F_s) entre la aceleración en la roca y en la superficie del suelo y los períodos del suelo (T_s). Esto se hizo para dos acelerogramas diferentes que se ajustaron para el peligro sísmico local. La aceleración máxima en la roca ($a_{o,r}$) usada fue de 0.10 g, que es la que indica el PRODISIS para la zona estudiada, para períodos de recurrencia de entre 3,400 y 3,500 años. El sismo 1 está asociado a epicentros de sismos intra-placa, como es el caso del terremoto de 1875, mientras que el sismo 2 refleja la s características de sismos en la zona de subducción, como fue el terremoto de 1932 (Lazcano, 2001).

Tabla 5. Parámetros de análisis de respuesta del suelo en diferentes sitios, realizados con ProShake.

Sitio	Sismo 1			Sismo 2		
	a_o (g)	F_s	T_s (s)	a_o (g)	F_s	T_s (s)
1	0.20	1.95	0.48	0.26	2.61	0.71
5	0.13	1.27	0.75	0.13	1.29	1.03
8	0.32	3.16	0.45	0.31	3.06	0.54
13	0.27	2.66	0.21	0.18	1.78	0.35
15	0.26	2.55	0.42	0.19	1.94	0.53
Prom	0.236	2.318	0.462	0.214	2.136	0.632

De la Tabla 5 tenemos que los factores de amplificación (F_s) para los dos acelerogramas analizados varían entre 1.27 y 3.16, siendo 2.22 el valor promedio. Por lo que respecta a períodos del suelo, el valor promedio es de 0.55 s, con valores extremos entre 0.21 y 1.03 s.

Es importante observar como en los cinco sitios, el acelerograma del sismo 2 da valores de cerca de 1.4 veces mayores, en promedio.

6 CONCLUSIONES

- La determinación del perfil de variación de V_s contra profundidad es fundamental en muchos reglamentos o criterios para diseño sísmico, entre otros en el IBC (2006) de Estados Unidos, el Eurocódigo 8 (2004) y el Manual de Diseño por Sismo de la CFE (2008) de México.
- Lo más conveniente para determinar la velocidad de onda de corte en suelos (V_s) es medir directamente ésta mediante algún método de geofísica sísmica como *downhole*, *crosshole* o análisis de ondas de superficie.
- Si normalmente debe tenerse cautela en la evaluación de V_s en función de correlaciones empíricas con la resistencia a la penetración estándar (N), en el caso de las arenas y gravas pumíticas de Guadalajara esto es más cuestionable, ya que estos suelos tienen diferencias importantes en comparación con los suelos más comunes, sobre todo por tener partículas triturables (Pender *et al.*, 2006; Mesri y Vardhanabhuti, 2009; Lazcano, 2010).
- El método de análisis de ondas de superficie tipo ReMi ha probado ser una alternativa confiable y económica para la caracterización sísmica de depósitos de suelo. Es una técnica no-invasiva, que involucra un volumen grande de suelo y da valores promedio de las características de los mismos, pero hay que reconocer que las pruebas *downhole* y *crosshole* dan información más detallada de la variación de V_s .
- En varios proyectos en Guadalajara se encontraron diferencias menores a 10% a la profundidad a la roca ($V_s > 720$ m/s), entre lo medido con ReMi y la profundidad real.
- De los 18 sitios estudiados, según el IBC (2006) el suelo es tipo D en 12 sitios, tipo C en 5 y tipo F en uno (antigua Biblioteca Pública), debido al potencial de licuación en la zona.
- En la Tabla 6 se presentan una comparación de los períodos de vibración del suelo obtenidos con tres diferentes metodologías.

Tabla 6. Comparativa de períodos de vibración del suelo con diferentes metodologías.

Metodología	T_s (s)		
	Mínimo	Máximo	Promedio
4H / V_s prom	0.16	0.80	0.47
PRODISIS	0.11	0.75	0.38
ProShake	0.21	1.03	0.55

- De la Tabla 6 tenemos que los valores de T_s obtenidos con el PRODISIS son de entre 70 y 80% los obtenidos por otros criterios. Como el

T_s es un valor fundamental en la definición del espectro para diseño sísmico, es conveniente revisar la metodología propuesta en el Manual de Diseño por Sismo de la CFE (2008).

- Se determinaron factores de amplificación (F_s) entre la aceleración en la roca y en la superficie del suelo en cinco de los dieciocho sitios estudiados. Comparando dos metodologías se encontró que el PRODISIS arroja valores de entre 64 y 70% de lo obtenido en ProShake. Esta es otra razón, al igual que le concluido de los periodos de vibración del suelo (T_s), para revisar la metodología propuesta en el Manual de Diseño por Sismo de la CFE (2008).
- A reserva de investigación adicional, deben verse con cautela los resultados del PRODISIS para la zona metropolitana de Guadalajara. Es conveniente que los valores de periodos de vibración del suelo (T_s) obtenidos en PRODISIS se incrementen al menos 15% y los factores de amplificación (F_s) entre la aceleración en la roca y en la superficie del suelo en al menos 20%. Consecuentemente, las coordenadas del espectro (incluyendo el coeficiente sísmico) también aumentarán.
- Las aceleraciones en roca de los sismos mayores en la región en fechas recientes (1973, 1985, 1995 y 2003) en Guadalajara, difícilmente alcanzaron valores de 0.015 g, mientras que las aceleraciones que se pueden esperar, de acuerdo al PRODISIS, son de alrededor de 0.1 g. Así, las estructuras que se han construido en los últimos 50 años han tenido solicitaciones mucho menores de las que se pudieran presentar en el futuro (ver Figuras 3 y 4).
- Es importante impulsar la instrumentación sísmica en Guadalajara y alrededores. Esto servirá, entre otros aspectos, para calibrar los métodos analíticos contra la realidad.

REFERENCIAS

- Borcherdt R.D. (1994). "Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification)," *Earthquake Spectra*, 10(4), 617-653.
- Chávez González M. (1995). "Geotecnia, riesgo y seguridad sísmica de la zona metropolitana de Guadalajara, México", Memo. X Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ing. de Cimentaciones, Guadalajara, México, 4:33-93.
- Eurocódigo 8 (2004). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1*.
- IBC (2006). *International Building Code*, International Code Council, U.S.A.
- Hashash Y.M.A., Groholski D.R., C.A. Phillips, Park D. y Musgrove M. (2011). *DEEPSOIL 4.0, User Manual and Tutorial*.
- Lazcano S. (2001). "Sismicidad histórica de Guadalajara, Jal.", Memo. XIII Congreso Nal. de Ing. Sísmica, Guadalajara, Jal.
- Lazcano S. (2004). "Contexto histórico y geotécnico de Guadalajara", Memo. XXII Reunión Nacional Mec. Suelos, Guadalajara, México, 1: 53-66.
- Lazcano S. (2007). "Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie", trabajo de ingreso a la Academia de Ingeniería de México.
- Lazcano S. (2010). "Experiences in pumice soil characterization by surface wave analysis", Proc. 5th Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Eng. and soil dynamics, San Diego, E.U.A., paper No. 1.28b.
- Louie J.N. (2001). "Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremors arrays", *Bull. Seismological Soc. America*, 91: 347-364.
- Matasovic N. (2006). *D-MOD_2 A computer program for seismic response analysis of horizontally layered soil deposits, earthfill dams and solid waste landfills, User's manual*, GeoMotions.
- NBCC (2005). *National Building Code of Canada*, Volúmenes 1 y 2, 12a Edición, National Research Council of Canada, Ottawa, Canadá.
- Mesri G. y Vardhanabhuti B. (2009). "Compression of granular material", *Canadian Geotech Journal*, 46(4):369-392.
- Nazarian S. y Stokoe K.H. (1984). "In Situ Shear Wave Velocities From Spectral Analysis of Surface Waves", Proc. 8th World Conf. on Earthquake Engr., San Francisco, California, III: 31-38.
- Padilla E. (1998). "The practice of the standard penetration test in degradable soils", Proc. 1st Int. Conf. on Site Characterization, Atlanta, E.U.A., (2): 947-952.
- Park C.B., Miller R.D. y Xia J. (1999). "Multi-channel analysis of surface waves", *Geophysics*, 64 (3): 800-808.
- Pender M.J., Wesley L.D., Larkin T.J. y Pranjoto S. (2006). "Geotechnical properties of a pumice sand", *Soils and Foundations*, 46(1):69-81, Japanese Geotechnical Society.
- ProShake (1998). *Ground response analysis program*, EduPro Civil Systems, Inc.
- Richart F.E., Hall J.R. y Woods R.D. (1970). *Vibrations of Soils and Foundations*, Prentice Hall.
- Schnabel B., Lysmer J. y Seed H.B. (1972). "SHAKE", Reporte EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, U. de California, Berkeley.
- 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 Site Characterization, Porto, Portugal.
- Woods R.D. (1968). "Screening of Surface Waves in Soils", *Jour. Soil Mech., ASCE*, 94 (4): 951-979.