Estimación de la respuesta sísmica de la terraza de la ciudad de Mérida, Venezuela

Seismic response evaluation of Merida City terrace (Venezuela)

D. Grisolía, J. C. Barboza y P. Rivero * Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. * riverop@ing.ula.ve

Resumen

Se analiza la respuesta sísmica unidimensional de dos perfiles longitudinales de suelo de la terraza de la ciudad de Mérida, considerando comportamiento no lineal del material; aplicando catorce acelerogramas y nuevas relaciones de pérdida de rigidez con el incremento de la deformación cortante cíclica. Los resultados muestran como la aceleración en superficie se incrementa con el aumento en la profundidad de la roca y como las mayores amplificaciones espectrales se dan entre 0.20 y 0.40 seg el cual corresponde, aproximadamente, con el rango de períodos predominantes de buena parte de las edificaciones construidas sobre la terraza de la ciudad de Mérida.

Palabras Claves: Comportamiento no lineal, dinámica de suelos, microzonificación sísmica.

Abstract

The one-dimensional seismic response of two longitudinal soil profiles of the terrace of Merida City is analyzed with nonlinear behavior. Fourteen bedrock earthquake acelerograms and new curves representing the variation of the tangent shear modulus with the shear deformation were used. The results indicate as the acceleration in surface is increased with the increase in the depth of the bedrock. Also, the greater spectral amplifications occur for periods between 0.20 and 0.40 seg that corresponds, approximately, with the rank of predominant periods of the buildings constructed on this terrace.

Key words: Nonlinear behavior, soils dynamic, seismic microzonation.

1 Introducción

La ciudad de Mérida, capital del estado Mérida, ubicada en los Andes centrales venezolanos, ha sido sacudida y parcialmente destruida, al menos, durante tres (3) terremotos ocurridos en tiempos históricos, el último de ellos el 28 de Abril de 1894. Las fallas más importantes en el área corresponden al sistema de fallas de Boconó, consistente de fallas transcurrentes y estrales casi verticales, que se extienden unos 500 km en dirección Norte-Este, atravesando los Andes venezolanos y pasando muy cerca de la ciudad de Mérida y de otras ciudades importantes del Occidente venezolano.

En el estudio "Microzonificación Sísmica de la Meseta de Mérida" realizado en 1976 (MOP, 1976), la respuesta en superficie fue estimada mediante el análisis de dos (2) perfiles longitudinales de suelo, representados bajo un modelo unidimensional con el programa SHAKE, el cual utiliza un modelo equivalente lineal para aproximar el comportamiento dinámico del suelo. Esto permitió evaluar los niveles de amplificación en la superficie de los depósitos, respecto a las aceleraciones contenidas en los sismos aplicados en la base rocosa. Con ello se establecieron los potenciales niveles de riesgo en determinados sectores de la ciudad, comparando los períodos predominantes de la respuesta local de los depósitos de suelo, con los períodos fundamentales de las edificaciones existentes.

Los efectos de la condición local del suelo sobre la amplificación del movimiento del terreno, han sido reconocidos a partir de los niveles de daños significativos, atribuidos a efectos de sitio, alcanzados durante los terremotos de Caracas 1967, México 1985, Loma Prieta 1989, Northridge 1994, Kobe 1995, Kocaeli 1999 y Chi-Chi 1999.

En este trabajo, los perfiles de suelo de las dos (2) secciones longitudinales de la terraza de la ciudad de Mérida, se representan con un modelo unidimensional, incorporando un modelo de comportamiento no lineal del suelo y con nuevas relaciones que representan la pérdida de rigidez con el incremento de la deformación cortante cíclica, para actualizar los

niveles de aceleración en la superficie de los depósitos determinados en el Estudio de Microzonificación Sísmica. Se utiliza el programa WAVES y acelerogramas en la base de los depósitos representativos de las acciones sísmicas estimadas en el más reciente estudio de amenaza sísmica de la región.

2 Relación tensión-deformación de los suelos bajo cargas cíclicas

La Fig. 1 describe las relaciones cíclicas tensión deformación, que definen el comportamiento dinámico no lineal de los suelos. El lazo de histéresis muestra las relaciones entre la tensión cortante τ y la deformación por corte γ para el primer ciclo de una carga unidireccional de corte cíclica.



Fig. 1. Ciclo de histéresis en los suelos (Vucetic and Dobry, 1994).

El lazo se idealiza como perfectamente simétrico y cerrado en el punto D. El módulo de corte secante se define como G = τ_c / γ_c , donde τ_c es la amplitud de la tensión cortante cíclica correspondiente a la amplitud de deformación cortante γ_c . Para deformaciones muy pequeñas, que corresponden a niveles de $\gamma \leq 10^{-6}$ % o menos, G = G_{máx}, siendo G el módulo de corte que mide la rigidez dinámica del suelo. El lazo histerético encierra el área definida como ΔE , la cual representa la energía total perdida durante el ciclo y se usa para definir la relación de amortiguamiento viscoso equivalente del material:

$$D = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta E}{G \gamma_c^2}$$
(1)

Tanto G como D dependen de la amplitud de deformación cíclica por corte γ_c y se representan según las relaciones clásicas indicadas en la Fig. 2, mediante las curvas $G/G_{máx}$ versus γ_c y D versus γ_c . La determinación de la curva de amortiguamiento de la Fig. 2 se hace a partir de la curva central, asumiendo que el comportamiento del suelo satisface el criterio de Masing; el cual estipula que las curvas de descarga y recarga cíclica son semejantes a la

curva central, con módulo tangente en los extremos del lazo de histéresis igual al módulo tangente inicial $G_{máx}$.



Fig. 2. Variación del módulo de corte (G/Gmáx) y amortiguamiento (D) con la deformación cortante cíclica (γ).

Ishibashi y Zhang (1993), establecieron fórmulas unificadas para la determinación de las curvas $G/G_{máx}$ y D versus γ_c sobre una amplia variedad de suelos; desde arenas hasta arcillas altamente plásticas como las de Ciudad de México. En este trabajo, las propiedades dinámicas del suelo se establecen en base a estas fórmulas cuya expresión general para la relación modular de cortante de los suelos es:

$$\frac{G}{G_{max}} = K(\gamma, I_p) \overline{\sigma}_o^{m(\gamma, I_p) - m_o}$$
⁽²⁾

donde, $K(\gamma,I_p)$ es una curva de decrecimiento función de la deformación cíclica de corte. El exponente, $m(\gamma,I_p) - m_o$ es una curva incremental en γ que decrece con el incremento de I_p y se aproxima a cero para valores altos de I_p y $\overline{\sigma}_o$ es la presión de confinamiento efectivo promedio, expresada en kN/m² que se estima a través de la relación:

$$\overline{\sigma}_{0} = \frac{1 + 2K_{0}}{3}\sigma_{v}$$
(3)

donde σ_v es el la tensión vertical efectiva y K_o es el coeficiente de presión lateral en reposo. Las otras variables vienen determinadas por las siguientes ecuaciones:

$$m(\gamma, I_{p}) - m_{o} = 0.272 \left[1 - \tanh\left\{ \ln\left(\frac{0.000556}{\gamma}\right)^{0.4} \right\} \right] e^{-0.0145 I_{p}^{1.30}}$$
(4)

$$K\left(\gamma, I_{p}\right) = 0.50 \left[1 + \tanh\left\{\ln\left(\frac{0.000102 + n(I_{p})}{\gamma}\right)^{0.492}\right\}\right]$$
(5)

donde:

Estimación de la respuesta sísmica de la terraza...

	0.0	para	$I_p = 0$	(S. Arenosos)	
$n(I_p) = -$	$3.37 \text{x} 10^{-6} \text{ I}_{p}^{1.404}$	para	$0 \le I_p \le 15$	(S. Baja Plasticidad)	(6)
	$7.0 \times 10^{-7} I_p^{1.976}$	para	$15 < I_p \le 70$	(S. Medio Plasti cos)	
	$2.7 \times 10^{-5} I_p^{1.115}$	para	$I_{p} > 70$	(S. Alta Plasticidad)	

La expresión para la determinación de D en función de $G/G_{máx}$, basada en la propuesta de Hardin and Drnevich (1972) es la siguiente:

$$D = \frac{0.333 \left(1 + e^{-0.0145 I_{p}^{1.30}}\right)}{2} \left\{ 0.586 \left(\frac{G}{G_{max}}\right)^{2} - 1.547 \left(\frac{G}{G_{max}}\right) + 1 \right\}$$
(7)

2 Perfiles de suelos

La meseta de la ciudad de Mérida está compuesta por una sedimentación extensa de limos, arenas, gravas y cantos de tamaño variable, provenientes de los flancos de las sierras que bordean al valle de Mérida: Sierra Nevada y Sierra de la Culata (MOP, 1976). La composición del subsuelo de la ciudad está constituida, en general, por tres zonas con características geodinámicas distintas:

- Zona superficial: Formada por un material heterogéneo con predominio de finos y gravas, con una velocidad de onda de corte que varía entre 300 a 800 m/seg. El espesor de la zona varía entre 4 y 16 metros y en algunos puntos se tienen hasta 20 metros de profundidad. El nivel freático se encuentra a una profundidad media de 3 metros.
- Zona intermedia: Gran porcentaje de peñones, cantos y gravas con proporción variable de finos areno-limosos, producto de la meteorización de la Formación Sierra Nevada. La velocidad de onda de corte se sitúa entre 800 y 1700 m/seg. El espesor de la zona varía entre 55 y 120 metros.
- Zona profunda: Constituida por roca fracturada y roca sana, con velocidades de onda de corte superiores a 1700 m/seg.



Fig. 3. Disposición de las secciones longitudinales AA y BB sobre la terraza de Mérida (MOP, 1976)

Las secciones longitudinales AA y BB de la terraza de la ciudad de Mérida, analizadas en el estudio de Microzonificación Sísmica de 1976, atraviesan actualmente las zonas más densamente pobladas de la ciudad y se muestran en la Fig. 3. Los dos (2) perfiles de suelo representativos de estas secciones, los cuales se corresponden con las características predominantes del subsuelo en la terraza, se muestran en las Figs. 4 y 5.





Fig. 5. Perfil de suelo correspondiente a la sección BB.

De acuerdo a la clasificación estipulada por la Norma COVENIN 1756-01, "Edificaciones Sismorresistentes", estos depósitos se tipifican como Suelo Tipo S1, con una velocidad de onda de corte promedio de 770 m/seg y 767 m/seg, para la sección AA y BB, respectivamente. Mientras que el período fundamental de vibración para la sección AA es de 0.275 seg y el de la sección BB es de 0.285 seg.

3 Acelerogramas en la base de los perfiles de suelo

Las aceleraciones máximas en roca estimadas para la ciudad de Mérida en el más reciente estudio probabilístico de amenaza sísmica en el occidente de Venezuela (Bendito *et. al.*, 2000), fueron de 0.15g para el estado límite de operatividad estructural (sismos de frecuente ocurrencia), y de 0.37g para el estado límite de seguridad estructural (sismos de rara ocurrencia). Sismos de magnitud intermedia y grande ocurriendo a corta y media distancia epicentral, son los tipos de eventos con mayores probabilidades de generar estos niveles de aceleración.

Se seleccionaron catorce registros acelerográficos de terremotos generados en fallas transcurrentes, tectónicamente similares a la falla de Boconó, y en fallas inversas para representar eventos generados en la falla de piedemonte occidental u oriental. Todos éstos de diferentes magnitudes y distancias epicentrales y registrados en roca, donde no existen efectos inherentes a la condición local del suelo. Se incluyen registros con aceleraciones máximas por debajo de 0.15g para ampliar el rango de aceleraciones generados por sismos que pudieran afectar a la ciudad de Mérida. La Tabla 1 presenta algunas de las características importantes de estos eventos.

Tabla 1. Registros acelerográficos utilizados como input en la roca.

Estación	Magnitud	DE (km)	PGA (g)
13198 Murrieta Hot Springs	6.0 Ms	63	0.049
12206 Sillent Valley Poppet Flat	7.4 Ms	52	0.050
Lamont 1060	7.3 Ms	30	0.053
47379 Gilroy Array #1	6.1 Ms	16	0.098
Zihuatenejo	8.2 Ms	135	0.103
Gonden Gate Park, S80E	5.3 Ms	11	0.105
5044 Anza	4.7 Ms	13	0.131
47375 Gilroy Array #1	5.6 Ms	9.3	0.132
Caleta de Campos S00E	8.2 Ms	27	0.141
Taft Lincoln School Tunel, S69E	7.5 Ms	56	0.179
24399 Mt Wilson CIT Seis Sta	6.7 Ms	36	0.234
N65W	6.0 Ms	11	0.269
Castaic, Old Ridge Route, N21E	6.4 Ms	30	0.315
47379 Gilroy Array #1	7.1 Ms	11	0.411
	Estación 13198 Murrieta Hot Springs 12206 Sillent Valley Poppet Flat Lamont 1060 47379 Gilroy Array #1 Zihuatenejo Gonden Gate Park, S80E 5044 Anza 47375 Gilroy Array #1 Caleta de Campos S00E Taft Lincoln School Tunel, S69E 24399 Mt Wilson CIT Seis Sta N65W Castaic, Old Ridge Route, N21E 47379 Gilroy Array #1	EstaciónMagnitud13198 Murrieta Hot Springs6.0 Ms12206 Sillent Valley Poppet Flat7.4 MsLamont 10607.3 Ms47379 Gilroy Array #16.1 MsZihuatenejo8.2 MsGonden Gate Park, S80E5.3 Ms5044 Anza4.7 Ms47375 Gilroy Array #15.6 Ms5044 Anza4.7 Ms47375 Gilroy Array #15.6 Ms500E7.5 MsCaleta de Campos S00E7.5 Ms24399 Mt Wilson CIT Seis Sta6.7 MsN65W6.0 MsCastaic, Old Ridge Route, N21E 47379 Gilroy Array #16.4 Ms7.1 Ms	EstaciónMagnitudDE (km)13198 Murrieta Hot Springs6.0 Ms6312206 Sillent Valley Poppet Flat7.4 Ms52Lamont 10607.3 Ms3047379 Gilroy Array #16.1 Ms16Zihuatenejo8.2 Ms135Gonden Gate Park, S80E5.3 Ms115044 Anza4.7 Ms1347375 Gilroy Array #15.6 Ms9.32aleta de Campos S00E7.5 Ms5624399 Mt Wilson CIT Seis Sta6.7 Ms36N65W6.0 Ms11Castaic, Old Ridge Route, N21E 47379 Gilroy Array #16.4 Ms307.1 Ms11

4 Modelo de comportamiento dinámico del suelo

El programa WAVES (Hart and Wilson, 1989), se emplea para estimar la respuesta sísmica de los perfiles de suelos, excitados por ondas de corte que se propagan verticalmente a través de un sistema unidimensional de N estratos horizontales, asumidos como homogéneos e isotrópicos. El modelo de histéresis de Ramberg-Osgood define las relaciones constitutivas para cada elemento de suelo, representado por las siguientes ecuaciones para las curvas de carga y descarga:

Carga:

$$\frac{\gamma}{\gamma_{\rm r}} = \frac{\tau}{\tau_{\rm máx}} \left(1 + \alpha \left| \frac{\tau}{\tau_{\rm máx}} \right|^{\rm R-1} \right) \tag{8}$$

Descarga :

$$\frac{\gamma - \gamma_o}{2\gamma_r} = \frac{\tau - \tau_o}{2\tau_{max}} \left(1 + \alpha \left| \frac{\tau - \tau_o}{2 \tau_{max}} \right|^{R-1} \right)$$
(9)

El modelo requiere la selección de cuatro parámetros de control: la tensión máxima de corte a la falla $\tau_{máx}$, una deformación de referencia γ_r y las constantes α y R.

5.1 Determinación de los parámetros de control

5.1.1 Tensión máxima cortante y deformación de referencia.

El módulo de corte a pequeñas deformaciones se obtiene por la ecuación de onda, función de la densidad de masa ρ y la velocidad de onda de corte V_s:

$$G_{máx} = \rho \ V_s^2 \tag{10}$$

La deformación de referencia γ_r se determina por la relación:

$$G_{máx} = \frac{\tau_{máx}}{\gamma_r}$$
(11)

El valor $\tau_{máx}$ depende del estado inicial de tensiones en el suelo y de la forma como se aplican las tensiones de corte. Una expresión para $\tau_{máx}$ a partir de la envolvente del círculo de Mohr (Hardin and Drnevich, 1972) puede ser definida por:

$$\tau_{\text{máx}} = \left\{ \left[\frac{(1+K_{0})}{2} \,\overline{\sigma}_{v} \, \operatorname{sen} \,\overline{\phi} + \overline{c} \cos \overline{\phi} \right]^{2} - \left[\frac{(1-K_{0})}{2} \,\overline{\sigma}_{v} \right]^{2} \right\}^{1/2} \quad (12)$$

donde \overline{c} y ϕ son la cohesión y el ángulo de fricción del suelo en términos de tensiones efectivas; σ_v la tensión vertical efectiva y K_o el coeficiente de presión lateral en reposo, el cual se determina para suelos normalmente consolidados no cohesivos mediante la fórmula de Jaky:

$$K_{o} = 1 - \operatorname{sen}\overline{\phi} \tag{13}$$

y para suelos cohesivos normalmente consolidados se emplea la ecuación de Alpan la cual relaciona K_o con el índice de plasticidad I_p :

$$K_{o} = 0.19 + 0.233 \log I_{p}$$
(14)

5.1.2 Constantes α y R

Los valores de α y R determinan la posición y el grado de concavidad de la curva inicial de carga de Ramberg-Osgood. Para cada elemento de suelo y a una profundidad determinada, la ecuación (2) se confronta con la curva inicial de carga del modelo de Ramberg-Osgood, expresada en función de G/G_{máx} como:

$$\frac{G(\gamma)}{G_{\text{máx}}} = \frac{1}{1 + \alpha \left| \frac{G \gamma}{G_{\text{máx}} \gamma_{\text{r}}} \right|^{R-1}}$$
(15)

Los valores de α y R se ajustan hasta lograr una correlación estadística mínima de 0.995, entre las curvas.

5 Resultados

Para determinar la influencia de la profundidad de la roca en la respuesta en la superficie de las secciones, se condujo un análisis con los registros de Anza, Coyote Lake, Duzce, Landers y Morgan Hill, escalados a 0.15g y 0.37g. La profundidad de la roca se varió entre 11 y 80 metros, así como la velocidad de la onda de corte en el estrato 3, entre 800 y 1700 m/seg. Los resultados se presentan en la Fig. 6, como una envolvente que representa la amplificación promedio de la aceleración en superficie respecto a dos niveles de aceleración máxima en la roca. Los factores de amplificación se toman como el valor promedio de la aceleración máxima para cada uno de los sismos aplicados, normalizados por la aceleración máxima en la base rocosa.

La aceleración en la superficie se incrementa con el aumento en la profundidad de la roca, para cualquier nivel de aceleración en la base. Comparativamente, los niveles de amplificación en la aceleración en superficie cuando la aceleración máxima en la roca es de 0.15g, son mayores a cuando se aplica 0.37g. El factor es de 1.5, aproximadamente, para cualquier posición de la roca. A medida que se incrementa la profundidad de la roca el estrato 3 amplifica los niveles de aceleración por su comportamiento elástico, generando amplitudes que inducen un comportamiento no lineal en los dos primeros estratos y especialmente en el estrato 2, donde tienen lugar las mayores deformaciones cortantes.



Fig. 6. Envolvente del factor de amplificación de la aceleración en la superficie.

En la Fig. 7 se muestra la respuesta de la sección AA y BB, para los catorce (14) acelerogramas de la Tabla 1, en términos del factor de amplificación de la aceleración en la superficie versus la aceleración máxima en roca. El perfil de la sección AA presenta mayores niveles de aceleraciones en la superficie que el perfil de la sección BB, y en ambos, el factor de amplificación disminuye conforme aumenta la aceleración máxima en la base de los depósitos, lo cual deja entrever el efecto del comportamiento no lineal del suelo de los dos primeros estratos.

Fig. 7. Amplificación de la aceleración en la superficie para diferentes niveles de aceleración en la base.

Revista Ciencia e Ingeniería. Vol. 24 No 3. 2003

Este efecto puede apreciarse en la gráfica de la Fig. 8, donde se ha representado la respuesta de la sección BB bajo la acción del registro de Castaic (Amáx=0.305g).

Fig. 8. Características de la respuesta de la sección BB teniendo como sismo en la roca el registro de Castaic.

Las aceleraciones se propagan a través del estrato 3, el cual siempre muestra un comportamiento lineal, e inducen un comportamiento no lineal en los estratos 2 y 1. El estrato 2 es el que presenta, invariablemente, los mayores niveles de comportamiento no lineal en ambas secciones y representa el estrato que domina la respuesta, especialmente para altas aceleraciones en la roca.

Una comparación entre las respuestas espectrales en superficie y el diagrama tensión-deformación cortante en el estrato 2 para las secciones AA y BB, se muestra en la Fig. 9. Es evidente como la amplificación espectral se da en el rango de períodos entre 0.20 seg y 0.40 seg para ambas secciones, teniendo en la base el registro de Castaic (Amáx=0.305g). Las mayores amplificaciones se tienen en la sección AA, lo cual se repite para todos los análisis efectuados e invariablemente, los períodos predominantes en ambas secciones son muy similares. También es evidente una mayor disipación de energía en la sección BB, este tipo de resultado se repite en todos los análisis.

Un resumen de los resultados de la respuesta de los perfiles en la superficie, en términos de la aceleración máxima (Amáx) y de la aceleración espectral (Sa), comparados con los valores correspondientes a los registros aplicados en la base se presenta, para cada sección, en la Tabla 2. Se evidencia como se incrementa la aceleración y como las mayores respuestas espectrales se tienen en el rango de períodos comprendido entre 0.20 seg y 0.40 seg. Estos períodos se asemejan a los períodos predominantes de buena parte de las edificaciones construidas sobre la terraza

de la ciudad de Mérida, las cuales poseen entre dos (2) y cinco (5) niveles. El hecho de que estos períodos sean similares permite suponer que estos tipos de edificaciones sean probablemente las más castigadas en caso de sismos que ocurran a corta o media distancia epicentral.

Fig. 9. (Arriba) Respuesta espectral en superficie, (Abajo) Comparación del diagrama tensión-deformación para el estrato 2.

Tabla 2. Comparación	de la respuesta	en la superficie versus
el sismo en la base	para la sección	AA y sección BB.

				_		Perfil AA	
Registro	En la base				En	la superf	icie
	Amáx	Sa(g)	Tp(s)		Amáx	Sa(g)	Tp(s)
Palmsprings	0.049	0.21	0.09		0.185	0.96	0.18
Lander	0.050	0.18	0.08		0.245	1.38	0.26
Duzce	0.053	0.27	0.18		0.308	1.49	0.28
Morgan	0.098	0.30	0.19		0.387	1.98	0.27
Zihuatenejo	0.103	0.37- 0.22	0.29- 1.08		0.522	3.15	0.30
Golgate	0.105	0.38	0.21		0.495	2.58	0.23
Anza	0.131	0.10	0.08		0.392	1.51	0.30
Coyote Lake	0.132	0.36	0.19		0.508	1.94	0.24
Caleta de C.	0.141	0.44	0.44		0.603	2.67	0.26
Talt	0.179	0.59	0.44		0.657	3.21	0.27
Northridge	0.233	0.86	0.19		0.726	3.67	0.24
Parkfield	0.269	0.86	0.25		1.048	4.33	0.25
Castaic	0.315	1.00	0.33		0.976	4.65- 3.88	0.34- 0.23
Loma Prieta	0.411	1.30	0.20	_	1.215	4.48- 4.34	0.23- 0.38

Estimación de la respuesta sísmica de la terraza...

				_		Perfil BB	
Registro	En la base				En	la superf	icie
	Amáx	Sa(g)	Tp(s)		Amáx	Sa(g)	Tp(s)
Palmsprings	0.049	0.21	0.09		0.186	1.02	0.18
Lander	0.050	0.18	0.08		0.170	0.86	0.27
Duzce	0.053	0.27	0.18		0.294	1.24	0.19
Morgan	0.098	0.30	0.19		0.320	1.66	0.19
Zihuatenejo	0.103	0.37- 0.22	0.29- 1.08		0.384	2.39	0.31
Golgate	0.105	0.38	0.21		0.367	2.17	0.23
Anza	0.131	0.10	0.08		0.350	1.44	0.32
Coyote Lake	0.132	0.36	0.19		0.428	1.55	0.21
Caleta de C.	0.141	0.44	0.44		0.510	2.24	0.21
Talt	0.179	0.59	0.44		0.532	2.63- 2.50	0.33- 0.22
Northridge	0.233	0.86	0.19		0.589	3.02	0.24
Parkfield	0.269	0.86	0.25		0.845	3.51	0.23
Castaic	0.315	1.00	0.33		0.796	3.80- 3.61	0.34- 0.23
Loma Prieta	0.411	1.30	0.20		0.970	4.05- 3.48	0.23- 0.36

La Fig. 10 presenta los resultados para las secciones AA y BB, ante sismos con igual aceleración máxima (0.10g), pero con diferentes contenidos frecuenciales, producto de un evento cercano con una distancia epicentral de 11 km (Golgate) y de un evento lejano con una distancia epicentral de 135 km (Zihuatenejo). En general, los espectros de aceleraciones son similares para ambas secciones y marcan aproximadamente los mismos períodos predominantes. Para eventos lejanos la respuesta de la sección BB incorpora una mayor riqueza de frecuencias para períodos por encima de 0.35 seg.

Fig. 10. Comparación de la amplificación espectral en la sección AA y BB ante dos eventos distintos, uno cercano y otro lejano

Finalmente, la respuesta de la terraza de la ciudad de Mérida en las dos secciones analizadas y ante los catorce registros seleccionados, puede ser caracterizada, en términos generales, mediante las curvas suavizadas que representan los valores medios más o menos una desviación estándar (+/- 1DE), mostradas en la Fig. 11.

Fig. 11. Curvas de amplificación espectral suavizadas promedio para la terraza de Mérida

6 Conclusiones

Los resultados del análisis unidimensional de dos secciones longitudinales de la terraza de la ciudad de Mérida, resaltan la amplificación en los niveles de la aceleración en la superficie, especialmente a medida que se incrementa la profundidad de la roca, ante sismos que eventualmente podrían afectarla.

La similitud entre el rango de períodos predominantes en la respuesta espectral de las secciones con el rango de períodos fundamentales de buena parte de las edificaciones construidas sobre la terraza, hace prever fuertes demandas sísmicas sobre estas edificaciones.

En virtud de lo anterior, y con el objetivo de mejorar el Código de Diseño Sismorresistente, deben realizarse estudios exhaustivos que incluyan propiedades dinámicas actualizadas de los suelos de la ciudad, especialmente las zonas no cubiertas en el estudio "Microzonificación Sísmica" del año 1976 y aquellas destinadas a la expansión urbana. Estos estudios junto con modelos más complejos con representación bidimensional o tridimensional de la terraza; permitirían determinar con mayor precisión la respuesta sísmica que incluya la influencia de la topografía, para poder establecer coeficientes de diseño sísmico y proponer un espectro de diseño en la ciudad.

Agradecimientos

Este trabajo es parte del proyecto I-661-99-02-C financiado por el Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT) de la Universidad de Los Andes.

Referencias

Bendito A, Rivero P y Lobo-Quintero W, 2000, Curvas de isoaceleración para estados de desempeño estructural en el occidente de Venezuela, IMME, Vol. 39, No. 2, pág. 1-18, Julio 2001, Caracas, Venezuela.

Hardin J and Drnevich V, 1972, Shear modulus and damping in soil: design equations and curves, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 98 SM7: 667-692.

Hart J and Wilson E, 1989, Simplified earthquake analysis

of buildings including site effects, Report No. UCB/SEMM-89/23, University of California, Berkeley.

Ishibashi I and Zhang X, 1993, Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay, Soil and Foundations, JSSMFE, Vol. 33, No. 1, 182-191.

Ministerio de Obras Públicas, 1976, Microzonificación sísmica de la meseta de Mérida, Ministerio de Obras Públicas, Caracas, Venezuela.

Vucetic M and Dobry R, 1991, Effect of soil plasticity on cyclic response, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 117, No. 1, 89-107