

Respuesta espectral modificada por el nivel freático

Spectral response modified by the phreatic level

Molina^{1*}, Danna; Rivero², Pedro y Lobo, William²

¹Departamento de Ingeniería Sísmica, FUNVISIS, Caracas, Venezuela

²Departamento de Estructuras, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela

*drmolina@funvisis.gob.ve

Recibido: 14-11-2007

Revisado: 17-10-2008

Resumen

Se analiza la respuesta espectral en términos de aceleración, velocidad y desplazamiento de diferentes perfiles de suelo, basado en el modelo hiperbólico bidimensional de deformaciones planas en condiciones no drenadas. Se utilizan 63 perfiles caracterizados por sus propiedades elásticas y dinámicas en estado seco, con nivel freático a 2 metros de profundidad y en la mitad de la altura de cada depósito; bajo las demandas impuestas por 10 acelerogramas provenientes de fuentes cercanas, intermedias y lejanas, para un total de 1890 análisis. Se hace una calibración de los resultados con un caso real que cuenta con registros sísmicos naturales obtenidos en China. Las respuestas en superficie muestran variaciones del contenido frecuencial, modificación del período predominante, y amplificaciones y atenuaciones que dependen de las propiedades del depósito, las características del movimiento sísmico y la posición del nivel freático. Se observa que la presencia del agua afecta significativamente los espectros de velocidad y desplazamiento, los cuales están relacionados directamente con los daños estructurales. Se analizan conjuntamente las respuestas espectrales pico de acuerdo a la distancia epicentral y los tipos de suelo, mediante formatos espectrales combinados de aceleración-desplazamiento, aceleración-velocidad y velocidad-desplazamiento. Este tipo de análisis se conoce en la relación aceleración-desplazamiento pero es inédito en las otras combinaciones y resulta muy práctico para comprender las interacciones cruzadas de la respuesta espectral.

Palabras clave: Respuesta espectral, nivel freático, elementos finitos.

Abstract

The spectral response to acceleration, velocity and displacement of soil deposits is studied using finite element procedures in a hyperbolic model of plane deformations under undrained conditions. The elastic and dynamic properties of 63 profiles are incorporated in the analyses, selected to be compatible with soils in dry state, with phreatic level to a depth of 2 meters and at half of the profile height. Ten (10) base rock motions having different amplitude and frequency characteristics are considered from near, intermediate and distant sources, for a total of 1890 analysis. It is shown that the frequency contents, magnitude and position of the peak response developed at the surface of a soil deposit is influenced by the combined effect of the soil properties, the characteristics of the base rock motions and the phreatic level position. It is observed that the presence of water affects the spectral response of velocity and displacement significantly, which are related directly with the structural damages. The spectral response according to the epicentral distance and soils types S1, S2, S3 y S4 are analyzed, by means of formats spectral combined of acceleration-displacement, acceleration-velocity and velocity-displacement.

Key words: Spectral response, phreatic level, finite element.

1 Introducción

La naturaleza y distribución del daño sísmico está influenciado por la respuesta del suelo frente a las cargas cíclicas y dicha respuesta está controlada por el espesor y las propiedades dinámicas del suelo, donde se observa su rol en la modificación y amplificación de las características

del movimiento de entrada: intensidad y contenido frecuencial. Esta influencia del suelo sobre el movimiento en roca, depende de las características del movimiento de entrada, es decir, del mecanismo de la fuente sísmica, directividad y magnitud del sismo, distancia epicentral, condiciones locales, espesor de sedimentos del depósito de suelo y del comportamiento dinámico de las capas del depósito. La modifi-

cación de la onda sísmica generada en el lecho rocoso y su propagación a través del estrato de suelo, pueden causar daños a las estructuras en superficie debido a la influencia de las condiciones geológicas y topográficas del suelo. Esta modificación, que puede ocurrir durante y/o después de un terremoto, conocida como efecto local, consiste en la amplificación o atenuación de las ondas, mayor duración de las mismas y/o la variación del contenido frecuencial en superficie.

En este estudio se plantea como objetivo incorporar el nivel freático bajo cargas cíclicas, para evaluar la respuesta espectral en superficie de los suelos, además de su forma espectral, la amplificación o atenuación y cambio del contenido frecuencial. Para obtener las variaciones de las respuestas espectrales ante la presencia del nivel freático.

Estudios empíricos sobre las variaciones de la respuesta dinámica del suelo ante las características del movimiento en roca han sido bien documentados en la literatura geotécnica y sismológica (Seed et al., 1984; Borchardt, 1994; Seed et al., 1987). Estas investigaciones se enfocaron en la amplificación de la aceleración pico sobre la roca y en la amplificación de las aceleraciones espectrales a partir del movimiento en roca.

A pesar de la gran cantidad de estudios realizados sobre los efectos de sitio, es en los últimos años que se comienza a incluir los efectos por la influencia de la presión de agua intersticial (presión de poro), y como ésta puede modificar el comportamiento del suelo durante la excitación sísmica. La determinación de la forma espectral considerando este fenómeno no ha sido estudiado a profundidad, como para proponer un tratamiento que permita mejorar las formas espectrales tipificadas y ampliar las descripciones de los perfiles geotécnicos. Muchas simulaciones muestran una reducción significativa de la amplitud de aceleración debido al comportamiento inelástico del suelo, que envuelve una reducción de la velocidad de onda de corte y un incremento del amortiguamiento del suelo con el incremento de carga (Hardin y Drnevich, 1972).

2 Metodología

De manera sui géneris se pueden considerar cuatro componentes para analizar la respuesta de sitio: las características del movimiento de entrada y el efecto de sitio, las características topográficas, estratificación y condiciones no lineales e inelásticas de los suelos, así como el modelo matemático aplicado y el método de análisis de la respuesta.

Según las componentes indicadas, este estudio muestra la influencia de las condiciones de sitio, tomando en cuenta la posición del nivel freático y la distancia a la fuente sísmica, en la respuesta espectral y su atenuación o amplificación.

El trabajo está basado en 63 depósitos de suelos diferentes por sus condiciones elásticas y dinámicas, donde se varía la posición del NF y se clasifican en tres grupos: seco, NF a 2m de superficie y NF en la mitad del estrato; para te-

ner un total de 189 perfiles. A su vez, se someten al efecto de 10 registros acelerográficos de diferentes distancias epicentrales y contenido frecuencial. Los registros fueron clasificados de acuerdo a su distancia epicentral así: $DE < 20$ km, $20 < DE < 80$ km y $DE > 80$ km, para un total de 1890 casos evaluados. Las respuestas de este gran total se obtienen mediante un modelo bidimensional en condiciones no drenadas, que toma en cuenta el comportamiento dinámico inelástico e histerético del suelo y la generación de presión de poro. Se aplica un modelo hiperbólico con endurecimiento isotrópico del suelo (HC) (figs. 1 y 2), que permite evaluar las amplificaciones en superficie, los cambios del contenido frecuencial del movimiento de entrada y por tanto los cambios en la respuesta espectral del suelo a través del programa de elemento finito PLAXIS V.7.2 (Plaxis, 2001), formulado para análisis de deformación y estabilidad en proyectos geotécnicos; los cuales requieren modelos constitutivos avanzados para la simulación del comportamiento no lineal y dependiente del tiempo en los suelos.

El modelo utilizado es un modelo avanzado de segundo orden que permite simular el comportamiento de suelos suaves y rígidos (Schanz *et. al.*, 1999). Donde los estados límites de esfuerzos son descritos por medio del ángulo de fricción (ϕ), cohesión (c) y ángulo de dilatancia (Ψ), estos definen la falla y están basados en la teoría de Mohr-Coulomb. La dilatancia es uno de los parámetros más importantes incorporados en este modelo, ya que la misma tiene un pronunciado efecto sobre la resistencia al corte, debido a que una considerable cantidad de energía se emplea en movilizar dicha dilatancia, en consecuencia se produce una resistencia pico o estado crítico. Este estado crítico se presenta cuando la arena contraída o dilatada alcanza un volumen o relación de vacíos constante o crítica. Los suelos arcillosos tienden a presentar dilatancia prácticamente nula (Ψ) mientras que en arenas depende de la densidad y ángulo de fricción. Bolton (1986), propone la siguiente relación empírica para materiales con ángulo de fricción $\phi < 30^\circ$ (Ecuación 1) la cual es utilizada en el estudio.

$$\psi \cong \phi - 30^\circ \quad (1)$$

La rigidez del suelo es descrita con mayor exactitud introduciendo tres rigideces diferentes: rigidez por carga triaxial o modulo secante (E_{50}), rigidez por descarga triaxial (E_{ur}) y la rigidez por carga de compresibilidad o modulo tangente (E_{oed})m determinados por relaciones empíricas utilizadas por el programa Plaxis y verificadas según el tipo de material en la literatura de mecánica de suelos, por ser estos parámetros estrictamente obtenidos en ensayos de laboratorio. Como un valor aproximado para varios tipos de suelo, se tiene: $E_{ur} \approx 3E_{50}$, $E_{oed} \approx E_{50}$, $E_{oed} = (1-\mu)E / (1-2\mu) (1+\mu)$ y $E_{oed} \approx V_p^2 * \rho$; donde: V_p es la velocidad de onda de compresión y ρ la densidad del suelo.

Este modelo toma en cuenta la dependencia del esfuerzo con el módulo de rigidez del suelo, no solo con la curva esfuerzo-deformación hiperbólica (Fig. 1), sino que controla

la dependencia de la rigidez del suelo con el nivel de esfuerzos, dado por el coeficiente (m). Se ha observado que para arcillas blandas el nivel de dependencia debe ser $m = 1$. Jambu (1963), reporta que en arenas $m = 0.5$, mientras que Von Soos (1980), reporta valores de $0.5 < m < 1.0$. El mismo distingue entre dos tipos principales de endurecimiento llamados: endurecimiento por corte (considera deformaciones irreversibles) y endurecimiento por compresión (considera deformaciones plásticas irreversibles).

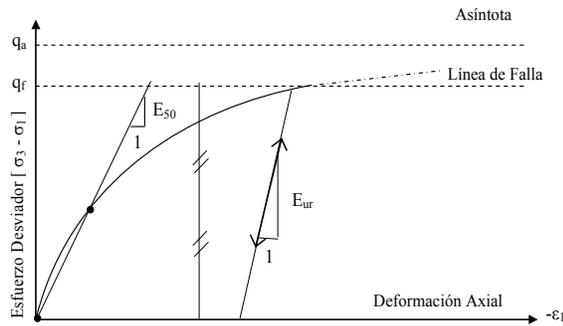


Fig. 1. Relación hiperbólica esfuerzo-deformación para la primera carga.

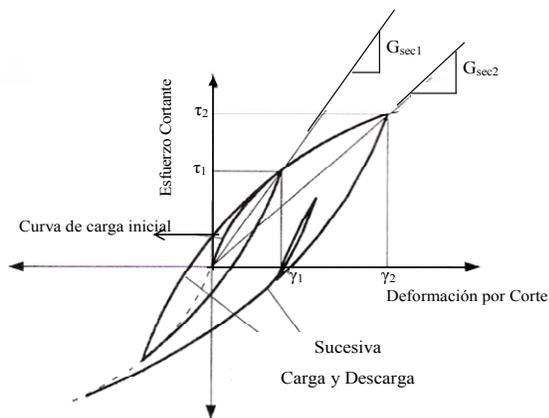


Fig. 2. Modelo hiperbólico no-lineal del suelo para definir el comportamiento de carga y descarga (Schanz et. al., 1999).

Los depósitos de suelo, fueron modelados asumiendo una propagación bidimensional de la onda sísmica sobre estratos dispuestos horizontalmente bajo un comportamiento no drenado, para permitir la generación de presión de poro, estos estratos sobre una base rocosa cuyo comportamiento es elástico-lineal-no poroso, con una relación de aspecto H/V igual a 3/2 (Fig. 4). Los bordes laterales se asumen semi-infinitos a través de los coeficientes de relajación C_1 y C_2 usados para impedir la absorción de la onda sobre los bordes absorbentes: C_1 corrige la disipación de la onda en dirección normal y C_2 en dirección tangencial. Se utiliza en este análisis de deformaciones planas, elementos triangulares de 15 nodos, con una malla muy fina, para más exactitud en el análisis sísmico (Fig. 3).

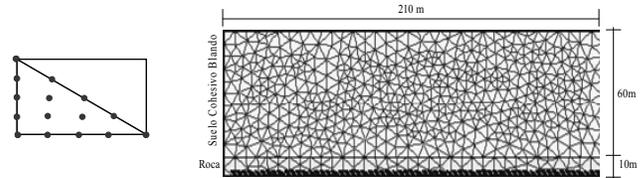


Fig. 3. (izq) Elemento triangular de 15 nodos empleado en el modelo. (Der) Perfil de 60m malla muy fina, utilizado para verificar la selección del tipo de malla y elemento.

Se evaluaron depósitos de 10, 20, 30, 40, 50, 60 y 70m de profundidad, variando la posición del nivel freático. Para un total de 63 perfiles diferentes, cada uno en estado seco, con nivel freático a 2 m de la superficie y con nivel freático en la mitad del depósito, resultando 189 depósitos diferentes. Cada uno sometido a 10 registros sísmicos de diferente contenido frecuencial, provenientes de distancias epicentrales cortas (≤ 20 km), intermedias (>20 km y ≤ 80 km) y lejanas (>80 km), los cuales son incorporados en la roca, para un total de 1890 análisis sísmicos.

3 Validación del modelo

Para validar el modelo se utiliza el trabajo de Li et. al. (1998). En este se realiza un análisis inelástico acoplado de la respuesta de sitio durante el terremoto de Lotung del 15.10.1986 con magnitud 7.1. El perfil de suelo es evaluado mediante el modelo hipoplástico incorporado en SUMDES (Li et al., 1992), que realiza un análisis unidimensional totalmente acoplado de esfuerzos efectivos, basado en la discretización de Galerkin y un esquema de integración propuesto por Newmark (1959) y Hilber et. al. (1977).

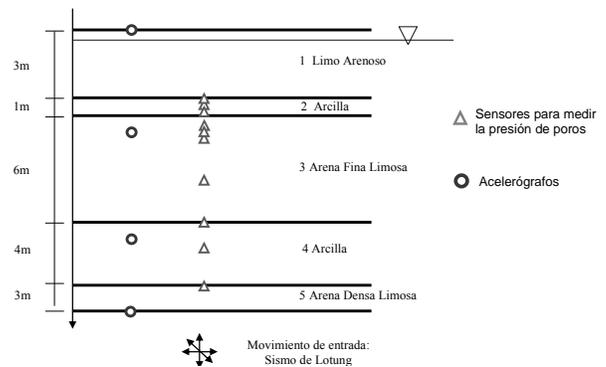


Fig. 4. Perfil de suelo con la ubicación de acelerogramas y sensores de presión de poro, usado por Li et. al. (1998).

El perfil de 17m de profundidad es mostrado en la Fig. 4, con la estratificación y la ubicación de acelerógrafos y sensores de presión de poro a diferentes profundidades y la posición del nivel freático a 0,5m de la superficie. Las Tablas 1 y 2 muestran las propiedades y parámetros del perfil de suelo.

Tabla 1. Parámetros de perfil de suelo utilizado por Li et. al. (1998)

Sub Capa	Descripción	Prof. (m)	γ_d (kg/m ³)	γ_{sat} (kg/m ³)	e_o	K (m/s)	K_o	V_s (m/s)	V_p (m/s)
1	Limo-Arenoso	3	1580.59	1992	0.7	1.0E-05	0.8	100	500
2	Arcilla	1	1440.89	1915	0.9	1.0E-07	1	121	625
3	Arena fina Limosa	6	1501.1	1952	0.82	2.2E-06	1	150	917
4	Arcilla	4	1440.89	1915	0.9	1.0E-07	1	175	1250
5	Arena Densa Limosa	3	1840.63	2165	0.48	5.4E-07	1	180	1333

Tabla 2. Parámetros básicos de rigideces del modelo con endurecimiento usado en Plaxis

Sub Capa	Descripción	E_{oed} (Kg/m ²)	$E_{50} > E_{oed}/3$	E_{50} (Kg/m ²)	$E_{50} < E_{ur}/2$	E_{ur} (Kg/m ²)
1	Limo-Arenoso	9.02E+06	3.00E+06	7.52E+05	1.13E+06	2.26E+06
2	Arcilla	1.39E+06	4.64E+05	1.16E+06	1.73E+06	3.47E+06
3	Arena fina Limosa	2.99E+06	9.96E+05	2.49E+06	3.73E+06	7.46E+06
4	Arcilla	5.41E+06	1.80E+06	4.51E+06	6.77E+06	1.35E+07
5	Arena Densa Limosa	6.76E+06	2.25E+06	6.76E+06	1.01E+07	2.03E+07

γ_d = Peso específico seco E_{oed} = Módulo secante
 γ_{sat} = Peso específico saturado E_{50} = Módulo tangente
 e_o = Relación de vacíos inicial E_{ur} = Módulo de descarga
 K = Permeabilidad V_s = Velocidad de onda de corte
 K_o = Coef. lateral en reposo V_p = Velocidad de onda en compresión

Los resultados de Plaxis, muestran ser muy próximos a los registros obtenidos directamente en campo y a los resultados del análisis realizado por Li et. al. (1992). Tal como indican las figuras 5, 6 y 7, donde se muestran las respuestas de aceleración en superficie, a 6m y a 11m de profundidad; permiten comparar estos resultados y donde se observa una buena aproximación entre ellas. Los resultados determinan similitudes en términos de amplitud y forma de la onda con los registros de campo y los obtenidos con el SUMDES. Con Plaxis se alcanzan aceleraciones en superficie de 0.15g, a 6m de profundidad 0.12g y a 11m de profundidad de 0.09g. La Fig. 8 muestra la buena aproximación de los resultados del exceso de presión de poros a 6.5 m de la superficie, obtenidos con Plaxis, al compararlos con los obtenidos por Li et. al. (1998).

Definido el modelo computacional, se seleccionan las propiedades elásticas, dinámicas y los parámetros adicionales necesarios para caracterizar diferentes depósitos de suelos según la clasificación de la Norma COVENIN 1756-2001, tomando en cuenta los valores utilizados en Rivero y Lobo-Quintero (1997) y ajustados mediante discusión con especialistas. Las tablas 3, 4 y 5 muestran los parámetros elásticos y dinámicos considerados para los diferentes depósitos de suelos y los parámetros adicionales requeridos por el modelo con endurecimiento incorporado en Plaxis y utilizados en este trabajo.

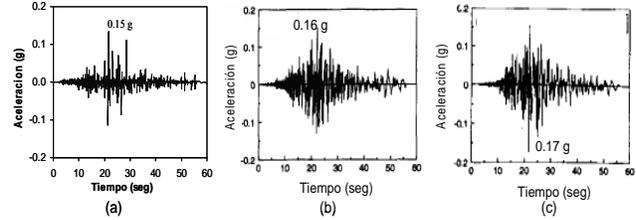


Fig. 5. Respuestas de aceleración en superficie, obtenidas con Plaxis (a), obtenidas por Li et. al. (1998) con SUMDES (b) y el registro de campo (c).

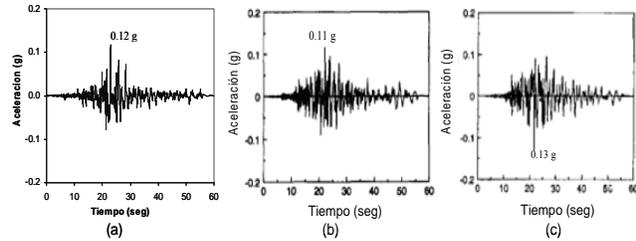


Fig. 6. Respuestas de aceleración a 6 m de la superficie obtenidas con Plaxis (a), obtenidas con SUMDES (b) y registros de campo (c).

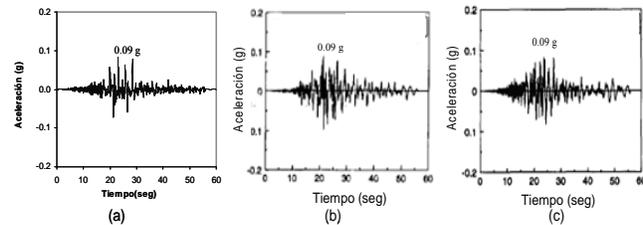


Fig. 7. Respuestas de aceleración a 11 m de superficie, obtenidas con Plaxis (a); con SUMDES (b); y el registro de campo (c)

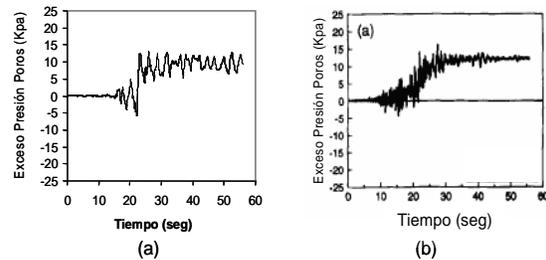


Fig. 8. Respuestas a 6.5 m de superficie, de exceso de presión de poro con Plaxis (a), y el obtenidos por Li et. al., (1998) con SUMDES (b).

Se seleccionan diez (10) registros sísmicos provenientes de distintas distancias epicentrales y con mecanismos de falla transcurrente, normal e inversa. Todos son registros en roca, obtenidos en Cosmos Virtual Data Center. Las aceleraciones espectrales de este grupo de sismos cubren un rango de periodos predominantes comprendidos entre 0.1 seg y 1.5 seg. Los espectros son procesados con el programa ViewWave V.1.39 (Kashima, 2004). La Tabla 6 presenta las características de cada uno de los sismos seleccionados.

Tabla 3. Propiedades y parámetros elásticos de los depósitos de suelo.

Propiedades elásticas								
Descripción del material	H (m)	V _s (m/s)	ν (M. Poisson)	γ _d (kg/m ³)	G _{máx} (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	C (kg/cm ²)	φ (°)
Roca sana	-	3000	0.2	3500	321101	770642	10	45
Roca sana/fracturada		700	0.25	2400	11988	29969	3	40
Suelo granular muy denso	30-50	500	0.26	1800	6116	15413	0	35
Suelo arcillo arenoso rígido a denso (IP=20)	<15	400	0.25	1500	2446	6116	1.5	20
Suelo granular denso	15-50	300	0.28	1800	1651	4228	0	38
Suelo granular denso	>50	250	0.30	1800	1147	2982	0	35
Suelo firme / medio denso	>50	200	0.32	1700	693	1830	0	32
Suelo cohesivo blando (IP=60)	<=15	150	0.40	1440	330	925	0.5	0
Suelo granular suelto	>15	100	0.35	1600	163	440	0	27
Suelo granular muy suelto	>15	70	0.36	1400	70	190	0	25

Tabla 4. Propiedades y parámetros adicionales requeridos por el modelo en Plaxis.

Descripción del Material	H(m)	V _p (m/s)	ψ (°)	γ _w (kg/m ³)	K (cm/s)	e ₀	ρ _s	K ₀
Roca Sana	-	49950	15	3750	6	0.333	357	0.293
Roca Sana/fracturada		1212	10	2730	1.5	0.493	245	0.357
Suelo Granular muy denso	30-50	1014	5	2160	0.5	0.563	183	0.426
Suelo arcillo arenoso rígido a denso (IP=20)	<15	693	0	1950	0.004	0.818	153	0.658
Suelo granular denso	15-50	543	8	2150	0.03	0.538	183	0.384
Suelo granular denso	>50	468	5	2120	0.04	0.471	183	0.426
Suelo firme / medio denso	>50	389	2	2050	0.06	0.538	173	0.470
Suelo Cohesivo Blando (IP=60)	<=15	367	0	1890	0.007	0.818	147	1.000
Suelo Granular suelto	>15	208	0	1930	0.04	0.493	163	0.546
Suelo granular muy suelto	>15	150	0	1890	0.004	0.961	143	0.577

Tabla 5. Módulo secante, tangente y de descarga requerido por el modelo con endurecimiento.

Descripción del material	Módulo secante E _{sec} (kg/m ²)	Módulo tangente E ₅₀ (kg/m ²)	Módulo de descarga E _{ur} (kg/m ²)
Roca sana	1.78E+10	1.78E+10	5.78E+10
Roca sana/fracturada	3.60E+08	3.60E+08	1.08E+09
Suelo granular muy denso	1.89E+08	1.89E+08	5.66E+08
Suelo arcillo arenoso rígido a denso (IP=20)	7.34E+07	6.61E+07	1.98E+08
Suelo granular denso	5.40E+07	5.40E+07	1.62E+08
Suelo granular denso	4.01E+07	4.01E+07	1.20E+08
Suelo firme / medio denso	2.62E+07	2.62E+07	7.86E+07
Suelo cohesivo blando (IP=60)	4.51E+07	1.58E+07	4.75E+07
Suelo granular suelto	7.07E+06	5.66E+06	1.70E+07
Suelo granular muy suelto	3.20E+06	2.56E+06	7.67E+06

Tabla 6. Acelerogramas utilizados en los análisis de respuesta del suelo.

	Terremoto	Fecha	Comp.	M	DE (km)	PGA (g)	Sa (g)	Tp (seg)
DE < 20km	San Francisco	22.03.1957	100	5.3	8	0.123	0.414	0.143
	Parkfield	28.06.1966	65	6.0	11	0.269	0.861	0.250
	Northridge	17.01.1994	22	6.7	12	0.571	2.352	0.356
	Nisqually	28.02.2001	327	6.8	13	0.155	0.490	0.140
20<DE<80km	Petrolia	26.04.1992	270	6.3	28	0.167	0.569	0.322
	San Fernando	09.02.1971	N21E	6.4	30	0.315	0.918	0.339
	Loma Prieta	18.10.1989	90	7.1	47	0.257	0.764	0.838
DE >80km	Loma Prieta	19.10.1989	95	7.1	100	0.225	0.469	0.838
	El Salvador	13.01.2001	90	7.6	139	0.098	0.286	0.250
	Hector Mine	16.10.1999	90	7.1	180	0.151	1.030	0.238

4 Análisis y discusión de resultados

Analizando el comportamiento individual de las respuestas espectrales en superficie, se agrupan los depósitos según una respuesta dinámica similar. Dicha clasificación distingue cuatro categorías de suelo S1, S2, S3 y S4 definidas a partir del periodo dominante (Tp) del espectro de respuesta de aceleración en superficie. Agrupados y normalizadas las respuestas respecto a la aceleración máxima del terreno (A₀), se catalogan por distancia epicentral y posición del nivel freático, evidenciándose como el período dominante aumenta a medida que el suelo pierde sus propiedades dinámicas y son demandadas por sismos de fuentes intermedias y lejanas.

Además, los materiales granulares muestran una atenuación de la aceleración espectral (Sa) en superficie respecto al sismo hasta de 98%, amplificación de los desplazamientos (Sd) a T ≥ 0.5 seg hasta del 100% respecto al sismo y un 25% respecto al estado seco, mientras que las velocidades espectrales se incrementan a T ≥ 1 seg hasta un 30% respecto al estado seco. Un comportamiento inverso se observa en los suelos cohesivos, con incrementos de la Sa de 48% y de las Sv de 45% respecto al estado seco, mientras que los Sd atenúan su respuesta hasta un 40% respecto al estado seco. Los materiales sueltos generan amplificaciones de las tres respuestas espectrales, determinándose incrementos en Sa de 30%, los Sd hasta 80% y las Sv hasta 75% respecto al estado seco.

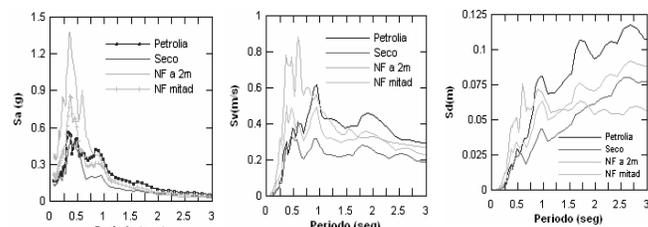


Fig. 9. Espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento en superficie para un depósito de 70m con material granular suelto (Vs= 70m/s), ante el registro de Petrolia.

El análisis individual de las respuestas espectrales pico muestran la importancia de ser analizadas conjuntamente (Sa, Sd, Sv), por verse afectadas de manera diferente por efectos de sitio (Fig. 9). Esto indica que es conveniente calificar los suelos, incluyendo el estudio de los desplazamientos y las velocidades espectrales. Ya que la variación en la forma es uno de los aspectos más importantes atribuidos a los efectos de sitio, la incorporación de nivel freático, puede coadyuvar a comprender mejor la tipificación de las formas espectrales y la descripción de los perfiles geotécnicos. De manera resumida se indican en la Tabla 7 las características generales obtenidas de los diferentes perfiles evaluados en sus respuestas espectrales de aceleración, velocidad y desplazamiento en superficie, según la distancia epicentral.

Tabla 7. Resumen de las características generales en las respuestas espectrales obtenidas en superficie.

Distancia Epicentral	Respuestas Espectrales en Superficie		
	Sa	Sv	Sd
DE < 20 km	Amplifica con el aumento de espesor del depósito, en suelos densos y cohesivos; con algunas respuestas particulares por suelos sueltos ($V_s < 100 \text{ m/s}$). Los no cohesivos atenúan la respuesta en todo el rango de T.	En materiales no cohesivos se atenúan a periodos cortos y para T altos se incrementa. Mientras que en suelos cohesivos el comportamiento es inverso y en sueltos se incrementa en todo el rango de T.	Los mayores se alcanzan en materiales no cohesivos para T altos, estos experimentan altas presiones de poros. En suelos cohesivos se amplifican a T cortos y se atenúan en $T > 0.75 \text{ seg}$. En sueltos se incrementa en todo el rango de T con presencia de NF a 2m de superficie.
20 < DE < 80 km	Amplifica en suelos sueltos para la T cortos hasta 0.75seg de manera significativa en presencia de NF. Los cohesivos incrementan la respuesta respecto al sismo de entrada más pronunciadamente, mientras que los no cohesivos que generan mayores presiones de poros atenúan la respuesta en superficie.	Incrementan con el aumento del espesor del depósito, de acuerdo a la intensidad del sismo en la zona de periodos intermedios. En materiales sueltos con presencia de NF se ven amplificadas. Par los cohesivos incrementa en la zona de T cortos y en los no cohesivos para $T > 0.8 \text{ seg}$.	Se incrementan con el aumento del espesor del depósito en materiales no cohesivos, determinando mayores respuestas que en eventos cortos y lejanos. En suelos sueltos y no cohesivos se ve amplificada la respuesta a $T > 0.75 \text{ seg}$, mientras que los cohesivos en el rango de periodos cortos
DE > 80 km	Se amplifica de manera menos pronunciada y se da un aumento de T_p en suelos con $V_s < 300 \text{ m/s}$ y $H > 20 \text{ m}$. Los no cohesivos atenúan la respuesta y los cohesivos la amplifican levemente.	Se dan leves ampliaciones respecto al sismo manteniendo el contenido frecuencial del mismo, en todos los materiales y profundidades, sin variaciones significativas por el NF.	No se generan variaciones importantes de amplificación ni atenuación, bajo estos sismos de frecuencias bajas.

Como la amenaza sísmica puede aumentar a causa de la geología de la zona, es conveniente que las normativas de diseño sismorresistentes la reflejen adecuadamente. Por tanto, se analizan las clasificaciones del suelo y los factores de amplificación, tomando valores promedios de las respuestas y sus espectros normalizados de respuesta elástica de aceleración, velocidad y desplazamiento, incluyendo el efecto de cambios en la presión de poro. Para visualizar la variación de cada categoría de suelo en sus respuestas espectrales de aceleración, velocidad y desplazamiento, en base a la distancia epicentral; se representan mediante espectros combinados de aceleración vs. desplazamiento, aceleración vs. velocidad y velocidad vs. desplazamiento, representando los períodos de vibración a través de líneas oblicuas. El diagrama Sa vs. Sd es conocido como diagrama de capacidad y permite superponer sobre él la curva de capacidad de la estructura y compararla con la demanda sísmica.

Se analizan las clasificaciones del suelo y los factores de amplificación, tomando valores promedios de las respuestas y sus espectros normalizados de respuesta elástica de aceleración, velocidad y desplazamiento, incluyendo el efecto de cambios en la presión de poro. Para visualizar apropiadamente la variación de cada categoría de suelo en sus respuestas espectrales de aceleración, velocidad y desplazamiento, de acuerdo a la distancia epicentral; se representan mediante espectros combinados de aceleración vs.

desplazamiento, aceleración vs. velocidad y velocidad vs. desplazamiento, representando los períodos de vibración a través de líneas oblicuas. El diagrama Sa vs. Sd es conocido como diagrama de capacidad y permite superponer sobre él la curva de capacidad de la estructura y compararla con la demanda sísmica.

La Fig. 10 (a, b, c, d) muestra los espectros combinados de aceleración-desplazamiento (Sa vs. Sd), donde la aceleración está normalizada respecto a la máxima aceleración del terreno. Se observan leves ampliaciones en ambas respuestas, que cubren un amplio rango de períodos, dichas ampliaciones ocurren en los suelos S1 a $T \leq 0.3 \text{ seg}$, cuando hay presencia del nivel freático. La categoría S4 presenta un comportamiento similar en los tres estados de saturación, donde la aceleración es amplificada en el rango de períodos altos (entre 1 y 2 seg) y se atenúa para $T > 3 \text{ seg}$. En la Fig. 10(a) se observa que la categoría S1 responde de manera particular con mayores niveles de amplificación de aceleración y desplazamiento bajo eventos de fuente intermedia y lejana. Mientras que en la Fig. 10(b) se aprecia una amplificación importante de la Sa y Sd de la categoría de suelos S2, bajo eventos de fuentes cercanas. La categoría S3, que se muestra en la Fig. 10(c) tiene las mayores ampliaciones espectrales cuando son demandados por eventos de fuente intermedia, y la categoría S4 aparece solo bajo eventos de fuente lejana, mostrando mayores desplazamientos a períodos altos que los obtenidos por la categoría S3 al ser demandada por eventos de fuente intermedia, Fig. 10(d).

La Fig. 11(a) muestra espectros **aceleración-velocidad** (Sa vs. Sv) para cada categoría de suelo. Se observa que el tipo S1 incrementa la velocidad para períodos bajos con amplificación de la aceleración espectral, ante eventos cercanos e intermedios. Cuando se someten a eventos lejanos, las velocidades se reducen en periodos cortos, pero, al atenuarse las aceleraciones a periodos altos, las velocidades se incrementan. La categoría S2, Fig. 11(b), ante eventos cercanos incrementa las velocidades y aceleraciones para $T < 0.75 \text{ seg}$, pero para períodos mayores a 1 seg, la aceleración se atenúa y las velocidades se incrementan considerablemente. Ante eventos de fuente intermedia incrementan las aceleraciones espectrales con aumento del periodo hasta 1 seg. Esta categoría S2 bajo eventos lejanos tiene velocidades menores que las generadas por esta categoría ante eventos cercanos e intermedios. La categoría S3 reporta incrementos de aceleración y velocidades para períodos altos, como muestra la Fig. 11(c) y la categoría S4 alcanza las mayores velocidades con amplificación de la aceleración para períodos entre 1 y 1.5 seg, como indica la Fig. 11(d).

La Fig. 12(a) muestra los espectros combinados de velocidad-desplazamiento (Sv vs. Sd) para la categoría S1, se observa que las mayores velocidades y desplazamientos se alcanzan cuando es sometida a eventos de fuente lejana y con el nivel freático a 2m de la superficie, en la zona de períodos cortos. Bajo eventos cercanos e intermedios los in

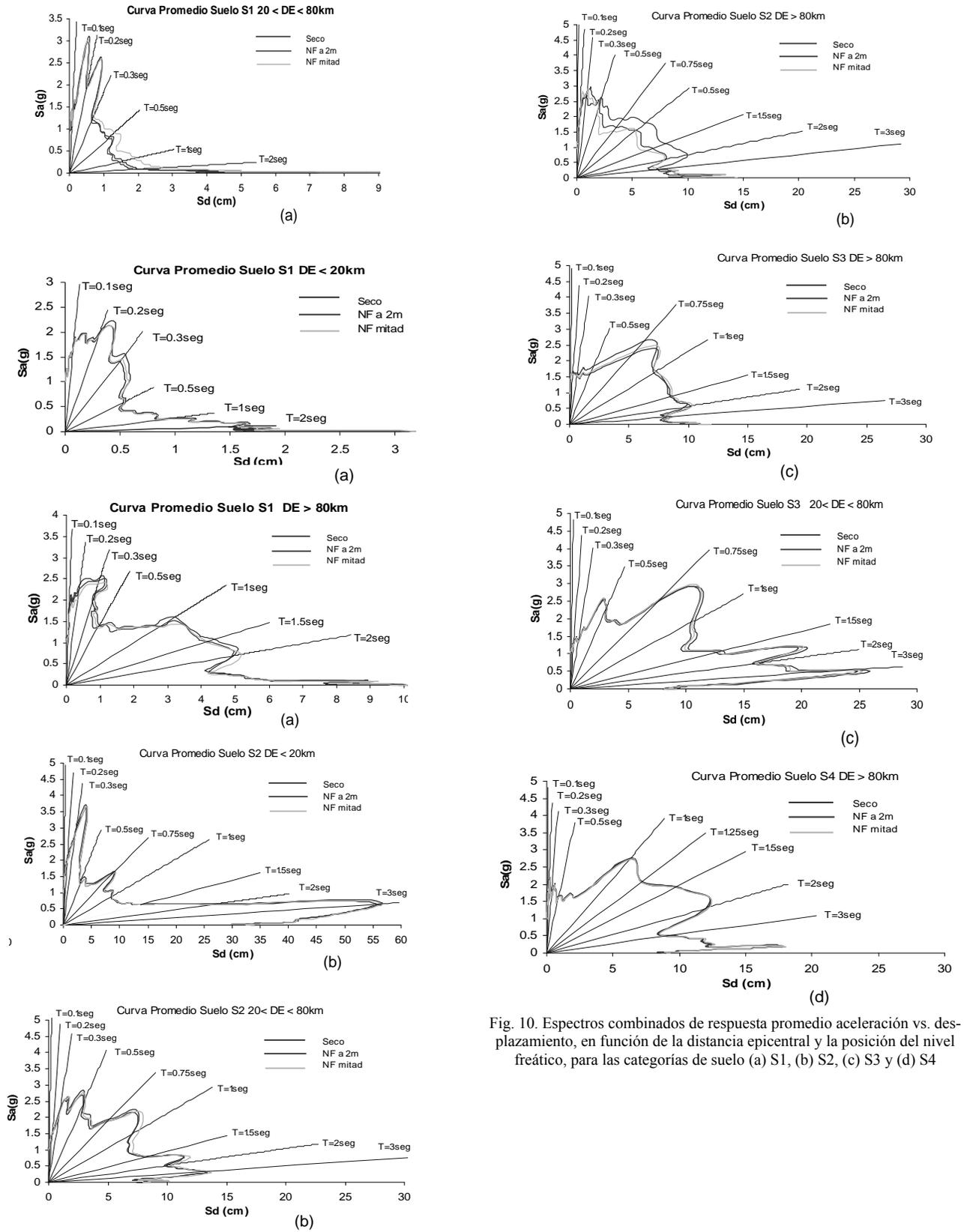


Fig. 10. Espectros combinados de respuesta promedio aceleración vs. desplazamiento, en función de la distancia epicentral y la posición del nivel freático, para las categorías de suelo (a) S1, (b) S2, (c) S3 y (d) S4

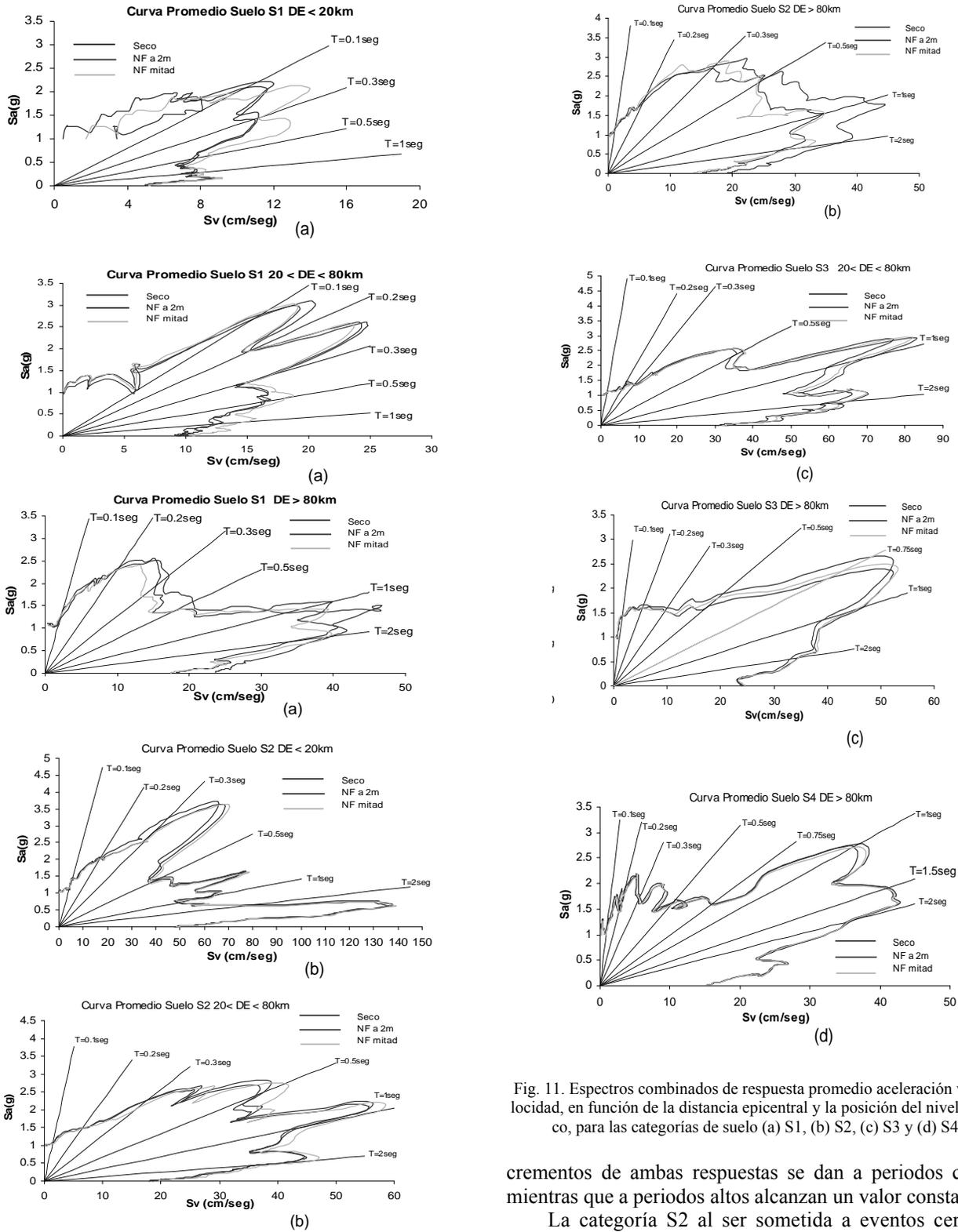


Fig. 11. Espectros combinados de respuesta promedio aceleración vs. velocidad, en función de la distancia epicentral y la posición del nivel freático, para las categorías de suelo (a) S1, (b) S2, (c) S3 y (d) S4.

crecimientos de ambas respuestas se dan a periodos cortos, mientras que a periodos altos alcanzan un valor constante.

La categoría S2 al ser sometida a eventos cercanos alcanza los mayores desplazamientos y velocidades a periodos altos, respecto a los eventos intermedios y lejanos e incluso al resto de las categorías, como lo evidencia la Fig. 12(b). Estos suelos S2 al ser demandados por eventos

intermedios y lejanos desarrollan los máximas velocidades y desplazamientos, cuando el nivel freático esta en la mitad del depósito y cuando esta a 2 m de la superficie, respectivamente, ambos incrementos ocurren para $T \geq 0.75$ seg.

La categoría S3, presenta mayores velocidades y desplazamientos que los suelos S1 para periodos comprendidos entre 0.75 seg y 3 seg, en presencia del nivel freático, cuando es demandada por eventos intermedios y lejanos, como indica la Fig 12 (c). Bajo eventos intermedios y a períodos muy altos la Sv y Sd disminuyen significativamente, mientras que al ser excitados por eventos lejanos y a períodos muy altos ambas respuestas (Sv y Sd) alcanzan un valor constante.

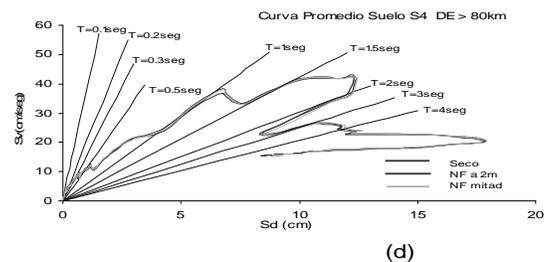
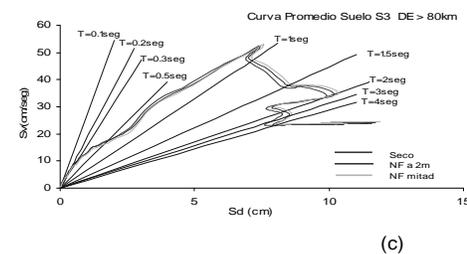
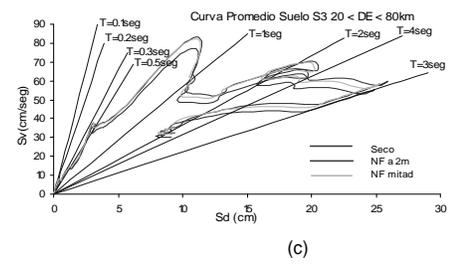
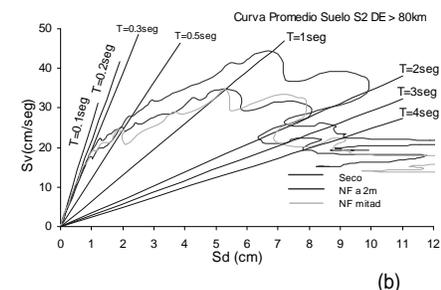
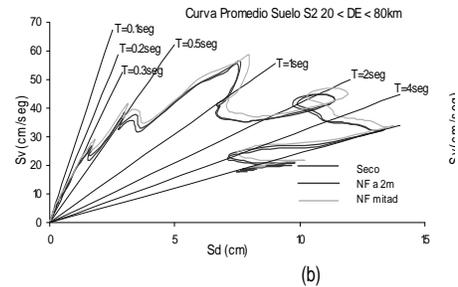
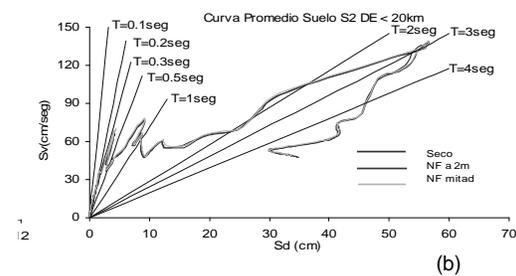
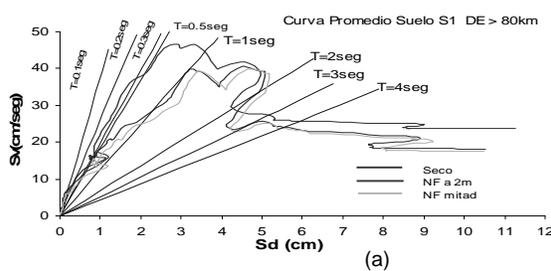
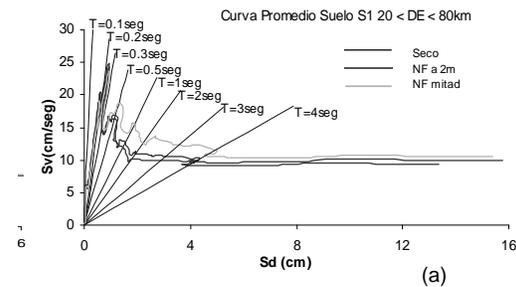
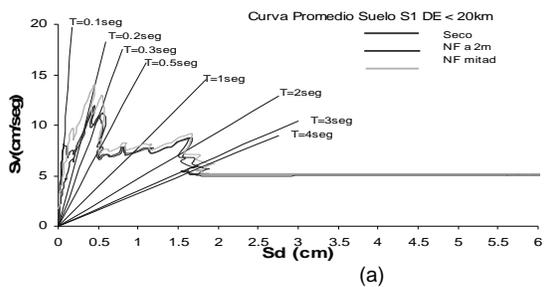


Fig. 12. Espectros combinados de respuesta promedio velocidad vs. Desplazamiento, en función de la distancia epicentral y la posición del nivel freático, para las categorías de suelo (a) S1, (b) S2, (c) S3 y (d) S4.

La categoría S4 ante eventos lejanos, alcanza las mayores velocidades para $T = 0.75$ seg, pero los mayores desplazamientos a periodos mayores de 4 seg, a periodos muy altos las velocidades se disminuyen junto a los desplazamientos. En los tres estados de saturación muestra un comportamiento similar como indica la Fig. 12(d).

5 Conclusiones

- Las respuestas en superficie de los diferentes depósitos de suelos analizados, conforme a las limitaciones que pueda tener el modelo empleado, evidencian variaciones del contenido frecuencial, amplificaciones y atenuaciones en los diferentes parámetros del movimiento del terreno, como función de las propiedades dinámicas y profundidad del depósito, la distancia epicentral e intensidad del movimiento sísmico y la presencia del nivel freático.
- Los materiales granulares evidenciaron una atenuación de la aceleración espectral en superficie, pero ocurre amplificación de los desplazamientos y velocidades. Un comportamiento inverso se observa en los suelos cohesivos, mientras que los materiales sueltos generan amplificaciones de las tres respuestas espectrales.
- Es importante analizar de manera conjunta y cruzada las respuestas espectrales pico (S_a vs S_d ; S_a vs S_v y S_v vs S_d) ya que tienen comportamientos e interpretaciones diferentes. Por lo tanto, no es suficiente caracterizar el comportamiento de los suelos solo con las aceleraciones espectrales, sin incluir los desplazamientos y las velocidades espectrales, debido a que el diseño por desplazamientos es un diseño basado en desempeño que considera espectros de desplazamiento o espectros de capacidad aceleración-desplazamiento, pero no puede omitir la influencia de la velocidad.
- Se deja claramente establecido que en una obra de importancia que esta expuesta a riesgos económicos, humanos y ambientales considerables, donde se prevean variaciones notables del nivel freático y sean fundamentales las demandas de aceleración, desplazamiento y velocidad, es necesario realizar una evaluación real, es decir determinar la respuesta en superficie, para obtener las relaciones adecuadas entre los diversos parámetros y en el diseño considerar realmente los efectos de sitio, ya que una aplicación directa de unas normativas, no asegura la confiabilidad y puede producir soluciones inseguras.

6 Agradecimiento

Este trabajo ha sido posible gracias al aporte realizado por el proyecto I-661-99-02-C financiado por el Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico de la Universidad de Los Andes.

Referencias

Bolton MD, 1986, The strength and dilatancy of sands. *Geotechnique*, Vol. 36, N° 1, pp.65-78.

Borcherdt RD, 1994, Estimates on site dependent response spectra for design. *Earthquake Spectra* 1994, 10, pp. 617-653.

Cosmos, Base de datos sismos digitalizados, Disponible: <http://db.Cosmos.eq.org>

COVENIN 1756-98 Rev. 2001, 2001, Norma venezolana para edificaciones sismorresistentes. MINDUR, FUNVISIS, Caracas, Venezuela.

Hardin BO y Drnevich, 1972, Shear modulus and damping in soils design equations and curves. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*. Vol. 98, pp 667-692.

Hilbert HM, Hughes TJ y Taylor RL, 1977, Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural mechanics. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 5 (3), pp 283-292.

Jambu J, 1963,. Soil compressibility as determined by odometer and triaxial tests, *Proc. ECSMFE Wiesbaden*, Vol. 1, pp. 19-25.

Kashima T, 2004, View Wave V. 1.39. Programa para generar espectros, compatible con Visual Basic y Visual Fortran.

Konder RL, 1963, A hyperbolic stress strain formulation for sands. *Pan. America ICOSFE Brazil*, Vol. 1, pp. 289.

PLAXIS V 7.2, 2001, Finite element code for soil and rock analyses. *Manual dynamics*, K.J. Bakker, P.G.

Bonnier PJ, Brand HJ y Burd RJ, Termaat, Editorial Balkema, Netherlands.

Rivero P. y Lobo W, 1996,. Formas espectrales para suelos con comportamiento inelástico, *Boletín Técnico del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales IMME*, Vol. 34, No. 3, pp. 39-54, Caracas, Venezuela.

Schanz T, Vermeer PA y Bonnier PG, 1999, Formulation and verification of the hardening soil model, In *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*, RBJ Brinkgreve editor, A.A Balkema, Rotterdam, pp. 281-290.

Seed B, Wang R, Idriss I y Tokimatsu K, 1984, Module and damping factors for dynamics analysis of cohesionless soils, *Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley*, EERC Report 84-14.

Seed HB, Romo MP, Sun J y Lysmer J, 1987, Relationships between soil conditions and earthquake ground motions in México City in the earthquake of Sept. 19, 1985, *Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley*, EERC, Report UCB/EERC-87/15.

Von Soos P, 1980, Properties of soil and rock. In *Grundbautaschenbuch*, Part 4, Edition 4, Ernst und Sohn, Berlin Germany.

Newmark NM, 1959, A method of computation for structural dynamics. *Journal of the Geotechnical and Environmental Engineering, ASCE* Vol. 85 (3), pp. 67-94.

Hilbert HM, Hughes TJ y Taylor RL, 1977, Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural mechanics. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 53, pp. 283-292