

Capítulo IV

Generalidades sobre amplificación de la señal sísmica en el subsuelo

4.1 Introducción

Como es de esperar la modificación de la señal sísmica desde la fuente de liberación de energía hasta la superficie durante un evento sísmico, está muy relacionada con el medio geológico por el cual los ondas sísmicas viajan. Debido a la amplia variedad geológica que se presenta en Costa Rica, el clima y el amplio rango en la edad geológica de las rocas según se mencionó en el Capítulo II, debemos esperar diferentes tipos de condiciones de suelos así también como espesores variables.

Cuando ocurre movimiento relativo en las placas, la energía de deformación elástica es acumulada en los materiales cerca del límite, así también se da el incremento de esfuerzos de cizalla en los planos de falla que separan las placas. Cuando los esfuerzos de cizalla alcanzan la resistencia a la cizalla de la roca a lo largo de la falla, la roca falla y la acumulación de energía de deformación es liberada. Los efectos de la ruptura dependen de la naturaleza de la roca a lo largo de la falla. Si esta es poco resistente y dúctil, relacionado con energía de deformación pequeña, esta puede ser acumulada y ser liberada lentamente y por lo tanto ocurrir movimiento asísmico. Si la roca es resistente y rígida (quebradiza), la ruptura es rápida. La ruptura de la roca libera la energía acumulada en forma explosiva, parcialmente en forma de calor y parcialmente en forma de ondas de esfuerzo, que son sentidas como sismos (Kramer, 1996). La teoría del rebote elástico (Reid, 1911; en Kramer, 1996) describe este proceso de acumulación sucesiva y energía de deformación liberada en la roca adyacente a las fallas.

Las fallas no son uniformes, tanto en términos geométricos como en las propiedades del material. Pueden existir zonas de resistencia y debilidad sobre la superficie de una falla. El modelo de asperezas (Kanamori & Stewart, 1978; en Kramer, 1996) en la ruptura de una falla asume que los esfuerzos de cizalla antes de un sismo no son uniformes a través de la falla debido a la liberación de esfuerzos en las zonas de debilidad por arrastre o deslizamiento. La liberación de esfuerzo remanente mantenido por las asperezas produce el sismo principal que permite la ruptura superficial en un estado de esfuerzos uniforme. El modelo de barreras (Aki, 1979; en Kramer, 1996) establece que el esfuerzo pre-sísmico en la falla es uniforme. Cuando ocurre el sismo principal el esfuerzo es liberado desde todas partes de la falla excepto para las barreras resistentes. El significado ingenieril de las asperezas y barreras radica en su influencia en las características de la sacudida del terreno cerca de la falla. Un sitio localizado cerca de una de estas zonas de resistencia puede experimentar sacudidas más fuertes que un sitio igualmente cerca de la falla pero a mayor distancia de la zona de resistencia. A distancias largas de la falla los efectos de la falla no decrecen uniformemente. Desafortunadamente los métodos para localizar estas zonas de resistencia antes de la ruptura no han sido bien establecidos.

La ruptura en la falla generalmente progresa como una serie de dislocaciones (eventos múltiples) Sismos pequeños pueden ser modelados como un proceso de puntos hasta su ruptura

en superficie usualmente en un trecho de pocos kilómetros. Los sismos grandes, sin embargo, pueden romper sobre distancias de decenas, o aún cientos de kilómetros, y la naturaleza de la sacudida del terreno es influenciada por las características del proceso de ruptura. Por ejemplo, ondas emanadas desde la falla con diferente intensidad y en direcciones diferentes; tales efectos de directividad producen diferencias azimutales en las características del movimiento del terreno (Benioff, 1955 & Ben-Menachen, 1961; en Kramer, 1996). Interferencia constructiva de ondas producidas por dislocaciones sucesivas pueden producir pulsos fuertes de desplazamiento largo llamado *fling* cerca de los sitios hacia los cuales la ruptura es progresiva (Benioff, 1995 & Singh, 1985; en Kramer, 1996).

El concepto de la teoría del rebote elástico es usado para hacer una medición útil del tamaño de un sismo. El momento sísmico de un terremoto es dado por:

$$M_0 = \mu A \bar{D} \quad (4.1)$$

dónde μ es la resistencia a la ruptura del material a lo largo de la falla, A es el área de ruptura, y \bar{D} es la cantidad de desplazamiento promedio.

El momento sísmico tiene por tanto unidades de fuerza por unidad de tiempo. Sin embargo, este es más una medición del trabajo realizado por un sismo, y por lo tanto este se correlaciona bien con la energía relacionada durante un sismo. El momento sísmico puede ser estimado a partir de registros geológicos de sismos históricos, o bien a partir de las componentes de periodo largo en un sismógrafo.

A continuación se resumen los principales parámetros y factores que influyen en la modificación y amplificación de la señal sísmica en el subsuelo, según estudios realizados por Seed & Idriss (1982) y Kramer (1996).

4.2 Características del movimiento sísmico del terreno

La información de las características del movimiento sísmico del terreno se pueden obtener mediante registros acelerográficos de sismos ocurridos. Es típico que los registros muestren la aceleración del terreno en el tiempo o la historia de las aceleraciones en dos direcciones horizontales perpendiculares y la aceleración vertical. Es posible entonces obtener algunas de las principales características del movimiento sísmico del terreno como los parámetros de amplitud, contenido de frecuencias y la duración del movimiento sísmico del terreno.

4.2.1 Parámetros de amplitud

Los siguientes parámetros que se describen a continuación se denominan de amplitud y se representan en función del tiempo como en un acelerógrafo (aceleración máxima), un sismógrafo

(velocidad máxima) y desplazamiento máximo. Únicamente uno de estos parámetros es medido directamente, los otros pueden ser obtenidos por integración.

Aceleración máxima del terreno

La medida de amplitud más comúnmente usada para un movimiento sísmico del terreno determinado es la aceleración pico horizontal (APH), al menos para propósitos ingenieriles. Esta se obtiene por medio del acelerograma mediante la componente del movimiento representado por el mayor valor absoluto de la aceleración horizontal obtenido por medio del acelerograma que mida tal componente.

La importancia de este parámetro en la ingeniería radica en su relación natural con fuerzas inerciales donde es claro que las grandes fuerzas dinámicas inducidas en ciertos tipos de estructuras (p.ej. estructuras muy rígidas) están muy relacionadas con la APH. La APH también puede ser correlacionada con la intensidad sísmica según algunos autores (Kramer, 1996), aunque esta correlación es un tanto imprecisa, puede ser muy útil para estimar la APH cuando se dispone únicamente de información de intensidad.

La aceleración vertical recibe menor atención en la ingeniería sísmica comparado con la aceleración horizontal, esto debido a que el margen de seguridad que ofrece el diseño para fuerzas estáticas inducidas por gravedad en trabajos de construcción usualmente es suficiente comparado con las fuerzas inducidas por aceleraciones horizontales durante un sismo.

Es usual tener en los movimientos sísmicos del terreno aceleraciones pico altas, pero no siempre, estas son más destructivas que los movimientos con aceleraciones pico bajas. De esta forma movimientos con aceleraciones pico muy altas en los que predominan únicamente períodos de tiempo muy pequeños pueden causar pocos daños a muchos tipos de estructuras. Así se ha observado que sismos que producen aceleraciones pico superiores a 0.5g no causan daños significativos en las estructuras porque las aceleraciones pico ocurren a frecuencias muy altas y la duración del sismo no es larga. Aunque la aceleración pico es un parámetro muy útil, este no provee información respecto al contenido de frecuencias o duración del movimiento, consecuentemente este debe ser suplementado con información adicional para caracterizar con precisión y exactitud el movimiento sísmico del terreno.

Velocidad máxima del terreno

La velocidad pico horizontal (VPH) es otro parámetro útil para caracterizar la amplitud del movimiento sísmico del terreno. Puesto que la velocidad es menos sensible a componentes de alta frecuencia en el movimiento sísmico del terreno, la (VPH) es más óptima que la (APH) para caracterizar con mayor exactitud y precisión la amplitud del movimiento a frecuencias intermedias. La (VPH) también se puede correlacionar según algunos autores (Kramer, 1996) con la intensidad sísmica.

Desplazamiento máximo del terreno

Los desplazamientos pico se asocian generalmente con las componentes de baja frecuencia de un movimiento sísmico. Estos sin embargo resultan muchas veces difíciles de determinar con exactitud y precisión según algunos autores (Kramer, 1996), debido a los errores en el proceso de filtrado de la señal y en la integración de acelerogramas, y también al ruido de período largo. Como resultado este parámetro es comúnmente menos usado en las mediciones del movimiento sísmico del terreno comparado con la aceleración pico y la velocidad pico.

Otros parámetros de amplitud

Si bien los parámetros de amplitud discutidos anteriormente pueden ser obtenidos fácilmente, ellos describen sólo las amplitudes pico para ciclos únicos dentro de la historia temporal del movimiento sísmico del terreno. En algunos casos los daños pueden estar muy relacionados con la amplitud pico, pero en otros estos pueden requerir algunos ciclos repetidos de amplitudes altas para desarrollarse. Autores como Newmark & Hall (1982; cit. en Kramer, 1996) describen el concepto de *aceleración efectiva* como la aceleración que está más cercanamente relacionada con la respuesta estructural y por lo tanto al daño potencial de un sismo. Esta es diferente y es menor que la aceleración pico del terreno en campo libre, y es función del área cargada, el contenido de frecuencias de la perturbación, que depende de la sacudida en la cercanía de la fuente del sismo, y del peso, empotramiento, características del amortiguamiento y firmeza de la estructura y su fundación.

Velocidad y aceleración máxima probada

Para este parámetro en Kramer (1996) se menciona una metodología que consiste en usar los picos inferiores del acelerograma para caracterizar la intensidad del movimiento sísmico del terreno, para los tres (o cinco) ciclos como el tercero (o quinto) valor absoluto mayor de aceleración en la historia del tiempo, y así definir la aceleración máxima probada. La velocidad máxima probada se define de forma similar.

Acercación efectiva para diseño

En este caso se propone que este parámetro es la aceleración pico que se obtiene del resultado de filtrar las aceleraciones fuera de las frecuencias entre 8-9 Hertz. Se propone también que esta es 25% mayor que el tercer valor absoluto mayor de aceleración pico obtenido a partir del filtrado de la historia del tiempo.

4.2.2 Parámetros de contenido de frecuencias

Los depósitos de suelos y algunas estructuras ingenieriles como edificios, puentes, etc., son muy sensibles al contenido de frecuencias de la señal sísmica excitadora. Un sismo produce complicadas cargas con componentes de movimiento que se extienden en un amplio rango de frecuencias. El contenido de frecuencias describe como la amplitud del movimiento del terreno

es distribuido a lo largo de diferentes frecuencias. Por lo tanto la caracterización del movimiento sísmico no puede ser completa sin la consideración del contenido de frecuencias.

4.2.2.1 Espectro del movimiento sísmico del terreno

Cualquier función periódica puede ser expresada usando análisis de Fourier como la suma de series de términos armónicos simples de diferente frecuencia, amplitud, y fase. Usando series de Fourier, una función periódica, $x(t)$, se puede escribir como:

$$x(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \text{sen}(\omega_n t + \phi_n) \quad (4.2)$$

donde:

$$\begin{aligned} c_n &= \text{amplitud} \\ \phi_n &= \text{ángulo de fase} \\ \omega_n &= \text{frecuencia} \end{aligned}$$

de la n -ésima serie armónica de Fourier. Las series de Fourier proveen una descripción completa del movimiento del terreno ya que el movimiento puede ser completamente recobrado por la transformada inversa de Fourier.

Espectro de Fourier

Se conoce como espectro de amplitud de Fourier al gráfico de la amplitud de Fourier versus frecuencia (c_n versus ω_n). Se conoce como espectro de fase de Fourier al gráfico del ángulo de fase de Fourier versus frecuencia (ϕ_n versus ω_n).

El espectro de amplitud de Fourier muestra como la amplitud del movimiento sísmico es distribuido con respecto a la frecuencia (o período). Este expresa muy claramente el contenido de frecuencias de un movimiento sísmico. El espectro de amplitud de Fourier puede ser reducido o amplio. Un espectro reducido implica que el movimiento sísmico tiene una frecuencia dominante (o período), el cual produce un suavizamiento, casi una historia del tiempo sinusoidal. Un espectro amplio corresponde con un movimiento sísmico que contiene una variedad de frecuencias, que produce mayor cantidad de picos o puntos de quiebre (forma dentada) y por lo tanto una historia del tiempo irregular.

Cuando el espectro de amplitud de un movimiento sísmico es suavizado y ploteado en escala logarítmica, sus características de forma se pueden observar más fácilmente. Las amplitudes de aceleraciones de Fourier tienden a ser mayores sobre un rango intermedio de frecuencias limitadas por la **frecuencia de esquina** (f_c) en el lado inferior y la **frecuencia crítica** ($f_{máx}$) en el

lado superior. Se ha mostrado teóricamente que la (f_c) es inversamente proporcional a la raíz cúbica del momento sísmico. Este resultado indica que los sismos grandes producen mayor cantidad de movimientos de baja frecuencia que los sismos pequeños.

Espectro de potencia

El contenido de frecuencias de un movimiento sísmico del terreno es descrito también por un espectro de potencia o una función de densidad de potencia espectral. La densidad de potencia espectral, $G(\omega)$, es definida por:

$$G(\omega) = \frac{1}{\pi T_d} c_n^2 \quad (4.3)$$

donde:

T_d = duración del movimiento sísmico

La intensidad promedio, λ_0 (que es igual a la aceleración media cuadrática), se obtiene:

$$\lambda_0 = \int_0^{\omega_N} G(\omega) d\omega \quad (4.4)$$

donde:

$\omega_N = \pi / \Delta t$ es la frecuencia "Nyquist" (la frecuencia más alta en la serie de Fourier).

La función de densidad de potencia espectral es útil para caracterizar el sismo como un proceso aleatorio. Esta por sí misma describe un proceso aleatorio estacionario (p.ej., uno cuyo parámetro estadístico no varíe con el tiempo).

Espectro de respuesta

Este tipo de espectro es muy usado en la ingeniería sísmica. El espectro de respuesta describe la máxima respuesta de un sistema de un grado de libertad para un movimiento sísmico de entrada, como una función de la frecuencia natural (o período natural) para una razón de amortiguamiento dada.

Este tipo de espectro puede plotarse individualmente a escala aritmética, o como un ploteo tripartita donde se representa la pseudovelocidad espectral en el eje vertical, la frecuencia natural

en el eje horizontal, y la pseudoaceleración y desplazamiento en los ejes inclinados. La forma de un espectro de respuesta típico indica que los valores pico de aceleración, velocidad y desplazamiento espectral están asociados con frecuencias diferentes (o períodos). A bajas frecuencias el desplazamiento promedio espectral es casi constante; a frecuencias altas la aceleración promedio espectral es constante. En medio se encuentra un rango de velocidad espectral casi constante. Debido a este comportamiento el espectro de respuesta es dividido muchas veces en tres partes: control de la aceleración para altas frecuencias; control de la velocidad para bajas frecuencias; y control de los desplazamientos para frecuencias intermedias.

El espectro de respuesta refleja indirectamente las características de la intensidad del movimiento sísmico del terreno, ya que este es filtrado por la respuesta de una estructura de un grado de libertad, sin embargo el espectro de respuesta es una importante y útil herramienta para caracterizar la intensidad del movimiento sísmico del terreno.

4.2.2.2 Parámetros espectrales

Los tres tipos de parámetros descritos anteriormente se usan para caracterizar la intensidad del movimiento sísmico del terreno. El espectro de amplitud de Fourier relacionado con la densidad de potencia espectral y combinado con el espectro de fase describen completamente el movimiento del terreno. El espectro de respuesta no describe el movimiento real del terreno, pero este provee información adicional muy importante de los efectos potenciales en las estructuras. Cada uno de estos espectros representan una función complicada, que junto con la historia del tiempo, se requieren muchos datos para describirlos completamente. Se han propuesto varios parámetros espectrales para extraer importantes piezas de información de cada espectro.

Período dominante

Se define como el período de vibración correspondiente con el máximo valor del espectro de amplitud de Fourier. También provee alguna información respecto al contenido de frecuencias.

Ancho de Banda

Este parámetro del espectro de amplitud de Fourier es el rango de frecuencia sobre el cual algún nivel de la amplitud de Fourier es excedida. Este provee información de la dispersión de la amplitud espectral cerca del período predominante.

Este parámetro se mide en el nivel donde el espectro de potencia es la mitad de su valor máximo; este corresponde con el nivel de $1/\sqrt{2}$ veces la máxima amplitud de Fourier.

Frecuencia central

La función de densidad de potencia espectral se usa para estimar propiedades estadísticas del movimiento sísmico del terreno. La frecuencia central es una medición de la frecuencia donde se

concentra la densidad de potencia espectral. Esta se puede usar junto con la intensidad promedio y la duración del evento para calcular la aceleración pico media teórica.

Factor de forma

Este parámetro indica la dispersión en la función de densidad de potencia espectral cerca de la frecuencia central. Toma un valor siempre entre 0 y 1. Un valor alto corresponde con ancho de banda amplio.

4.2.2.3 Razón $v_{m\acute{a}x} / a_{m\acute{a}x}$

Debido a que los valores pico de velocidad y aceleración se asocian normalmente con movimientos de frecuencia diferente, la razón $v_{m\acute{a}x}/a_{m\acute{a}x}$ a criterio de algunos autores (Newmark, 1973; Seed et al., 1976; McGuire, 1978; cit. en Kramer, 1996) se puede relacionar con el contenido de frecuencias del movimiento sísmico. Se sugiere que para un movimiento armónico simple de período "T", la razón $v_{m\acute{a}x}/a_{m\acute{a}x} = T/2\pi$. Para movimientos sísmicos que incluye muchas frecuencias, la cantidad $2\pi (v_{m\acute{a}x}/a_{m\acute{a}x}) = T$, es interpretada como el período de vibración de una onda armónica equivalente, también indica cuales períodos del movimiento sísmico del terreno son más significativos.

4.2.3 Duración

La duración de un evento sísmico es otro parámetro de importancia que tiene una significativa influencia en el daño sísmico de las estructuras. Muchas estructuras, sobre todo cuando han tenido degradación, son sensibles al número de cargas o reversión de esfuerzos que ocurren durante un sismo. Un movimiento de pequeña duración puede que no tenga efectos en las estructuras incluso si la amplitud del movimiento es alta. Un movimiento con moderada amplitud pero de larga duración puede producir daños considerables (p. ej. terremoto de México, 1985).

La duración de la intensidad de un movimiento sísmico del terreno está relacionado con el tiempo requerido para que se relaje la energía de deformación mediante la ruptura a lo largo de la falla. Si la longitud o el área de ruptura de la falla se incrementa, el tiempo requerido para la ruptura crece. Como resultado, la duración de la intensidad del movimiento sísmico crece con el incremento de la magnitud sísmica. Estudios recientes proveen un soporte teórico que indican que la duración de un evento sísmico puede ser proporcional a la raíz cúbica del momento sísmico. Por ejemplo, si tenemos una ruptura bilateral donde la ruptura se propaga en direcciones opuestas a partir del foco (como en el caso del sismo de Loma Prieta de 1989) la duración de la intensidad del movimiento sísmico puede ser considerablemente baja (Kramer, 1996).

Un acelerograma generalmente contiene todas las aceleraciones desde el tiempo del comienzo del sismo hasta el tiempo en que el movimiento retorna al nivel del ruido de fondo. Para propósitos ingenieriles, únicamente la porción del acelerograma que muestra el movimiento intenso es de interés.

Se han propuesto varios métodos para estimar la duración de un evento sísmico mediante el uso de los parámetros de aceleración, energía, frecuencia, aceleración (rms), la densidad de potencia espectral y la magnitud sísmica.

4.2.4 Discusión

Los anteriores parámetros no sólo permiten obtener las características del movimiento sísmico del terreno sino también los efectos de la perturbación del movimiento, que dependen a su vez de la frecuencia del movimiento. La caracterización del movimiento sísmico del terreno por un sólo parámetro es inapropiado, por lo que el uso de algunos de los parámetros anteriormente descritos son usualmente requeridos para describir adecuadamente las características particulares de un movimiento sísmico del terreno. Puesto que los diferentes problemas en ingeniería son influenciados por las diferentes características del movimiento sísmico del terreno, el significado de los diferentes parámetros dependen de los tipos de problemas para los cuales ellos son usados.

La influencia combinada de la amplitud de la aceleración del terreno, sus frecuencias y la duración de la perturbación del terreno en diferentes estructuras es representado por medio de un espectro de respuesta máxima inducida por el movimiento sísmico del terreno, en un oscilador con un grado de libertad y con diferentes períodos fundamentales de vibración y que tiene algún grado de amortiguamiento interno. Se dice entonces que la duración del movimiento sísmico del terreno en un lugar dado está caracterizado por el correspondiente espectro de respuesta. De esta forma la historia del movimiento o las diferencias en la duración del movimiento en diferentes sitios se pueden evaluar por comparación de sus espectros de respuesta. Más importante sin embargo, el espectro de respuesta provee un medio conveniente para evaluar las fuerzas laterales máximas desarrolladas en una estructura sujeta a un movimiento dado en la base (Seed & Idriss, 1982).

Se han realizado estudios que relacionan registros de los movimientos del terreno con la distancia epicentral y se ha mostrado que las frecuencias características de los movimientos sísmicos cambian con el incremento de la distancia del epicentro a la zona de liberación de energía. Como las ondas viajan hacia la superficie del terreno, los movimientos sísmicos de período corto tienden a ser filtrados hacia la superficie del terreno, resultando que la ordenada máxima del espectro de respuesta se mueva hacia períodos largos. Se debe tener en consideración que en sitios llanos generalizados a una área determinada, la frecuencia característica del movimiento sísmico del terreno, y por lo tanto la forma del espectro de respuesta, puede ser influenciado significativamente por las condiciones locales del suelo (Seed & Idriss, 1982).

4.3 Factores que afectan el movimiento sísmico del terreno

Las características del movimiento sísmico de un terreno en cualquier lugar están influenciadas principalmente por los siguientes factores:

1. Magnitud del sismo
2. Distancia del sitio a la fuente de liberación de energía
3. Características geológicas de las rocas a lo largo de la trayectoria de las ondas sísmicas desde la fuente hasta el sitio
4. Mecanismo de la fuente sísmica
5. Los efectos de la interferencia de ondas relacionado con la dirección y rapidez de la ruptura de la falla
6. Condiciones locales del suelo en el sitio

Como es de esperar la influencia de algunos de estos factores es mejor conocida que otras, y de hecho la influencia detallada de algún factor, como por ejemplo el mecanismo de la fuente y la trayectoria de transmisión geológica puede que no sea muy bien conocida, excepto por algún método general.

La intensidad es una medida de la fuerza del movimiento del terreno debido a un sismo y del grado en que la vibración es sentida y registrada en una determinada región. La intensidad es una variable que depende del sitio de observación, generalmente es mayor en el área epicentral y disminuye en función de la distancia a la fuente sísmica. La variación de la intensidad del movimiento del terreno con la distancia de la fuente de energía liberada (ploteado como curvas de atenuación) ha sido estudiado por muchos años. El ploteo de la aceleración pico como función de la distancia ha sido presentado en numerosos trabajos de sismología e ingeniería sísmica. Un ploteo de la variación en la aceleración pico contra distancia más cercana desde la fuente de liberación de energía se muestra en la fig.4.1, junto con los análisis de regresión para determinar la media y la media \pm una desviación estándar. Se puede observar que hay una considerable dispersión en los datos, pero se puede definir un patrón claramente reconocible, que indica una marcada nivelación de la pendiente de las curvas dentro de pocos kilómetros de la fuente. Es importante mencionar que virtualmente todas las estaciones de registros para este sismo están localizadas en depósitos de aluvión sobre algunos cientos de metros de profundidad (Seed & Idriss, 1982).

Una relación de atenuación similar basada en registros de aceleración pico registrado únicamente en roca es mostrado para un sismo de magnitud similar en la fig.4.2. Curvas de atenuación de este tipo para movimientos sísmicos en roca a diferentes magnitudes sísmicas se muestra en la fig.4.3. Este tipo de curvas pueden ser usadas para estimar la aceleración pico a diferentes distancias y magnitudes sísmicas, por ejemplo en la fig.4.3 se puede observar que a muy pequeñas distancias de la fuente, la aceleración pico es casi independiente de la magnitud sísmica para magnitudes mayores a $M_s = 6.5$. Este resultado es indicado por registros de datos del movimiento sísmico horizontal del terreno, y reflejan la opinión prevaleciente de la mayor parte de sismólogos e ingenieros concerniente a los movimientos cerca de la fuente.

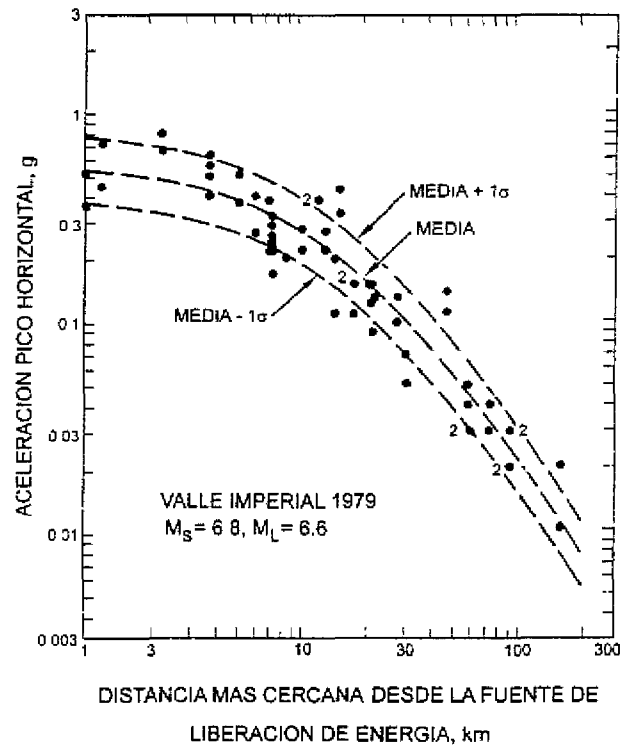


Figura 4.1: Análisis de regresión para aceleraciones pico registradas durante el sismo en el Valle Imperial del 15 de octubre, 1979 (Tomado de Seed & Idriss, 1982).

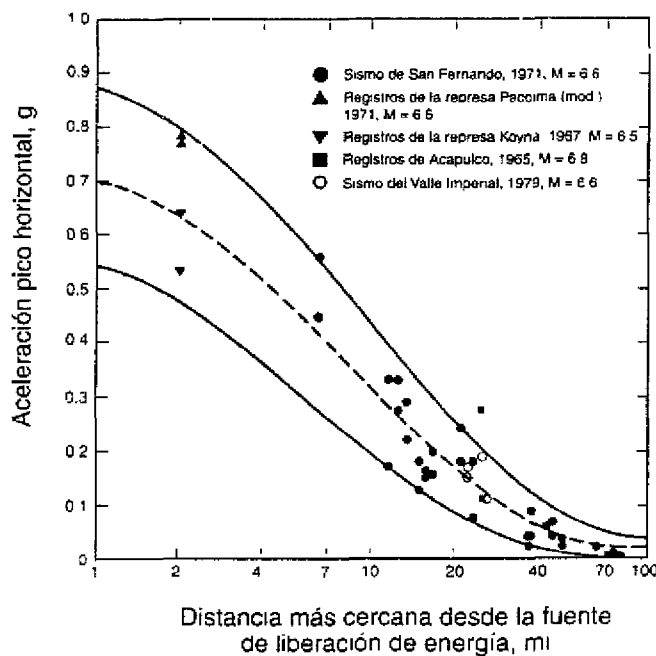


Figura 4.2: Aceleraciones maximas en roca para sismos con magnitud ≈ 6.6 (Tomado de Seed & Idriss, 1982)

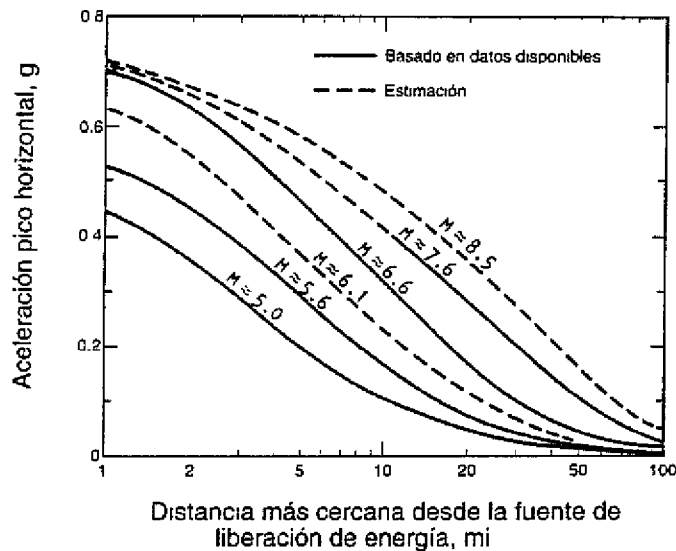


Figura 4.3: Valores promedio de aceleraciones máximas en roca (Tomado de Seed & Idriss, 1982).

4.4 Influencia de las condiciones del suelo en las características del movimiento sísmico del terreno

Aceleración pico

La influencia de las condiciones del suelo en las aceleraciones del terreno pueden ser determinadas por comparación de las curvas de atenuación (aceleración pico media) para depósitos de suelo profundos (fig.4.1), con los registros de aceleraciones en sitios de roca (fig.4.2). Esta comparación (fig.4.4) indica que a una distancia comparable desde la fuente, el registro de aceleración pico en roca es un tanto alto respecto al registro en aluvión profundo. Estudios más detallados indican que otros registros sísmicos muestran este caso típico para aceleraciones mayores de 0.1g. A niveles inferiores de aceleración, las aceleraciones en depósitos de suelo profundo parecen ser superiores respecto aquellos en roca (Seed & Idriss, 1982).

La fig.4.5 muestra los resultados de los valores relativos de aceleraciones pico desarrollados en cuatro tipos diferentes de depósitos de suelo:

- Roca
- Suelo firme que involucra suelos no cohesivos (arenas) y arcillas firmes (60 metros de profundidad)
- Depósitos de suelos no cohesivos profundos (> 75 metros de profundidad)
- Depósitos de arenas y arcillas blandas a medianamente firmes

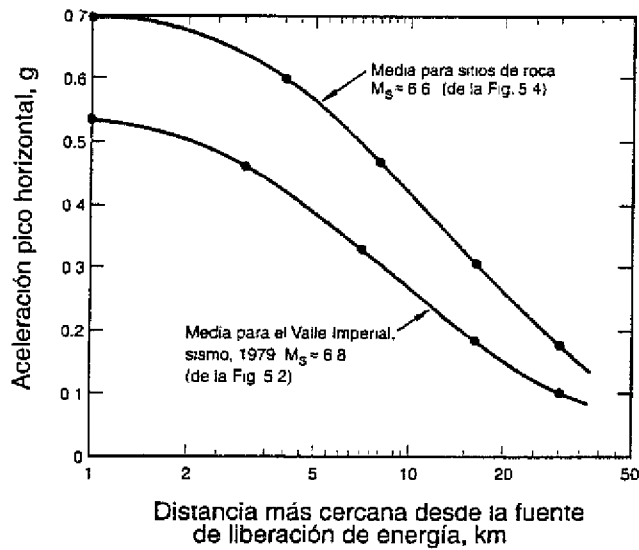


Figura 4.4: Comparación de curvas de atenuación para sitios de roca y el sismo del Valle Imperial (1979) (Tomado de Seed & Idriss, 1982).

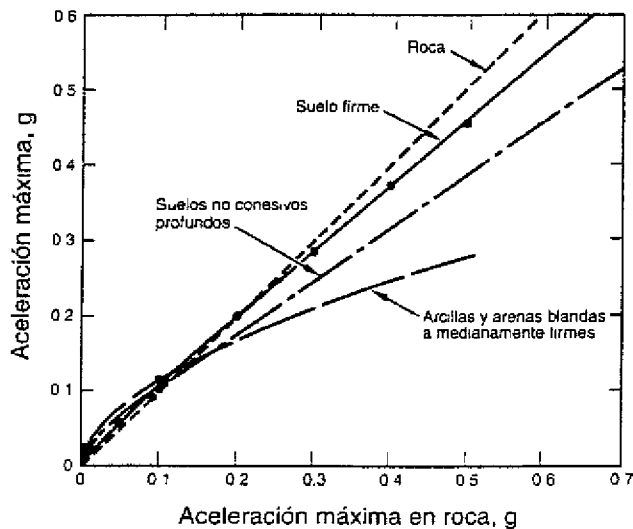


Figura 4.5: Relaciones aproximadas entre aceleraciones máximas en roca y otras condiciones locales (Tomado de Seed & Idriss, 1982).

Se puede afirmar que aparte de los depósitos que involucran arcillas blandas a medianamente firmes, los valores de aceleración pico desarrollados en diferentes tipos de suelos no difieren apreciablemente, particularmente a niveles de aceleraciones inferiores entre 0.3 – 0.4g. Incluso para aceleraciones mayores, en roca por ejemplo, del orden de 0.7g, las aceleraciones para cualquier espesor que no involucra arcillas firmes y blandas son probablemente 25% menor que aquellas en roca. Variaciones de esta magnitud puede que no sean significativas en la ingeniería práctica y para propósitos prácticos se puede considerar que los valores de aceleraciones pico en roca y suelo firme de cualquier espesor son iguales.

Al parecer, según la fig.4.5 no hay una diferencia significativa al plotear los valores juntos entre los niveles de aceleraciones para roca y diferentes condiciones de sitios, a excepción de sitios formados por suelos de arcillas blandas y medianamente firmes. Esto parece indicar que no hay una influencia significativa de las condiciones del suelo en los valores de aceleraciones pico.

Actualmente existe una mejor concordancia entre las curvas de atenuación para aceleraciones propuestas por diferentes autores. La fig.4.6 muestra las aceleraciones medias pico en depósitos de suelo firme originadas por un sismo de magnitud $M_s = 7.5$. Los autores sugieren que es interesante comparar estas curvas de atenuación, las cuales son basadas principalmente con datos de sismos con focos someros y registros obtenidos en la parte oeste de los Estados Unidos, con las curvas de atenuación propuestas por Nutti & Hermann (1981; en Seed & Idriss, 1982.) para aceleraciones probables desarrolladas en la parte este de los Estados Unidos, donde los sismos tienen profundidades focales grandes y las razones de atenuación para movimientos del terreno son significativamente menores que en la parte oeste del país. Esta comparación se observa en la fig.4.7, donde se observa que las posiciones relativas de las curvas son completamente consistentes. Para eventos de foco más profundo se producen aceleraciones menores a distancias cercanas provocando aceleraciones mayores a distancias mayores, debido a la baja razón de atenuación que representa las condiciones geológicas del este de los Estados Unidos al paso de las ondas sísmicas.

Se puede decir que cada una de las curvas de atenuación mostradas en las figs.4.3, 4.4 y 4.6 muestran el valor medio de aceleración que en realidad representan una banda de datos a escala considerable, similar a los resultados mostrados en las figs.4.1 y 4.2. Para estructuras críticas esto es muchas veces conveniente para determinar valores de aceleración cerca del límite superior, es decir el 84.1% valor percentil, representado por la media más una desviación estándar como la curva en análisis estadísticos de puntos dispersos en los datos. De estudios como el sismo del Valle Imperial (1979) se obtiene que:

$$\frac{(a_{\max})_{\text{media} + 1}}{(a_{\max})_{\text{media}}} \approx 1.4 \text{ a } 1.5$$

Esta relación provee una medición simple de estimar la dispersión puntual de los datos en los dos lados de la curva media, y así asignar los niveles convenientes de aceleración pico para los cuales diferentes tipos de estructuras pueden ser diseñadas.

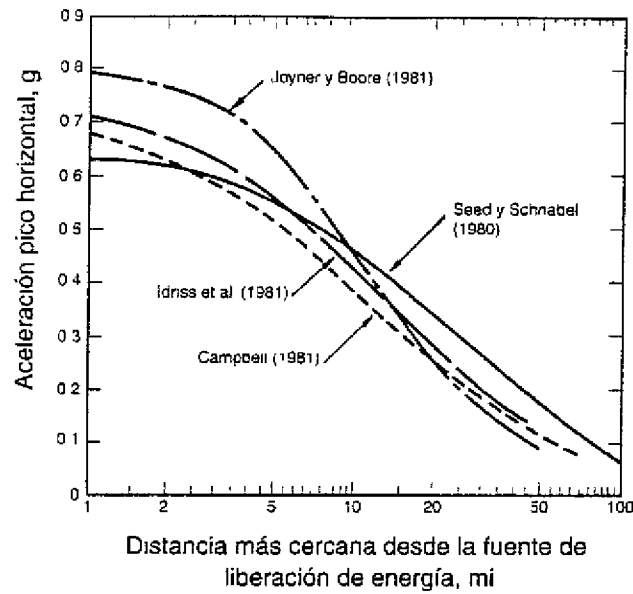


Figura 4.6. Curvas de aceleraciones pico en terrenos de suelo firme ($M_s = 7.5$) (Tomado de Seed & Idriss, 1982).

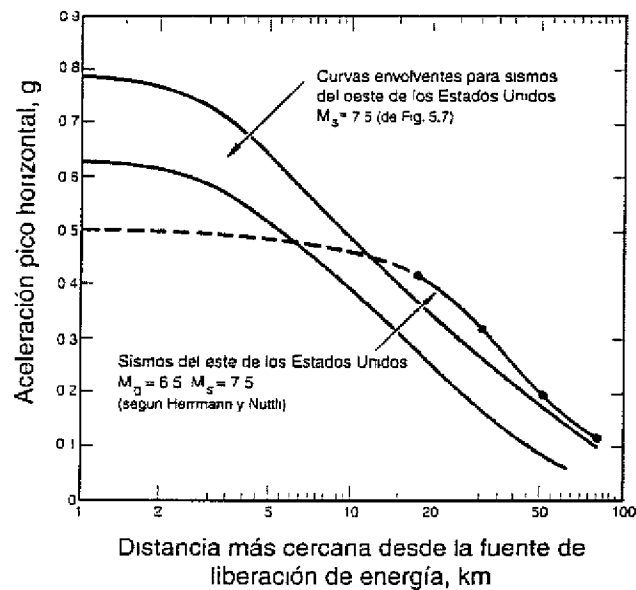


Figura 4.7. Comparación de curvas de atenuación para los sismos del oeste y este de los Estados Unidos (Tomado de Seed & Idriss, 1982).

Velocidad máxima del terreno

Al igual que los datos de aceleración pico pueden ser ploteados para determinar las curvas de atenuación de aceleración, los valores de velocidad pico determinados a partir de registros acelerográficos pueden ser ploteados para determinar las curvas de atenuación de velocidad. Se ha observado que las condiciones locales del suelo pueden tener un efecto pronunciado en la velocidad pico desarrollada, con respecto a los valores de velocidad en depósitos de suelo típicos, estos son cerca de dos veces mayores que aquellos registrados en sitios de roca.

Por medio de valores medios de aceleración pico (a_{\max}) y velocidad máxima (v_{\max}) a distancias iguales a partir de curvas de atenuación apropiadas, es posible determinar valores representativos para la razón v_{\max} / a_{\max} para diferentes sitios geológicos. Estudios que relacionan la distancia de la fuente muestran que a distancias menores de cerca de 50 km desde la zona de liberación de energía, los valores promedios de esta razón son aproximadamente:

Condición geológica	v_{\max} / a_{\max}
Roca	55 cm/s/g = 0.056 s
Suelo firme (< 60 m)	110 cm/s/g = 0.112 s
Suelo firme profundo (> 60 m)	135 cm/s/g = 0.138 s

Según lo explicado en el apartado 4.2.2.3 los períodos correspondientes a ondas armónicas equivalentes para roca, suelo firme y suelo firme profundo son 0.35s, 0.70s y 0.87s, respectivamente, los cuales indican un cambio hacia períodos largos (baja frecuencia) del movimiento sísmico del terreno en depósitos de suelo blando.

Espectro de respuesta

Los métodos espectrales se basan en el cálculo del "Espectro de Respuesta". Existen varios aspectos que tienen influencia en las características del espectro, entre las cuales la magnitud, el mecanismo de ruptura y la distancia entre la estación y el epicentro, parecen ser los más importantes.

Los depósitos de suelos se comportan como un filtro que atenúa las diferentes frecuencias de las ondas que forman la señal base. Este proceso de filtrado o transformación del terreno y su importancia en el comportamiento de las estructuras se logra visualizar en forma más clara, cuando se utiliza el espectro de respuesta del registro obtenido de la superficie.

Dicho filtro es una función de tipo espectral (función que depende de la frecuencia o el período), que denominamos generalmente como espectro de amplificación del depósito de suelo en particular, o función de transferencia, que toma la señal base y la transforma a medida que esta viaja hacia la superficie. Como se dijo anteriormente la señal en suelo se amplifica para los períodos largos con respecto a la respuesta en roca.

De las varias características del movimiento sísmico del terreno, ninguna es tan influenciada por las condiciones locales del suelo como la forma del espectro de respuesta. Esta es la característica más significativa de un movimiento sísmico desde el punto de vista de la ingeniería sísmica, esto principalmente por la influencia que ejercen las condiciones locales del terreno en el movimiento sísmico del terreno y por lo tanto en el potencial destructivo de las edificaciones.

La forma espectral representativa de cualquier grupo de registros del movimiento sísmico del terreno es obtenido primero determinando el espectro de respuesta de aceleración normalizado para cada movimiento en el grupo del registro. Dicho espectro se obtiene expresando las ordenadas de un espectro convencional como una proporción de la máxima aceleración del terreno para el movimiento sísmico por el cual el espectro es derivado o el valor de la ordenada a período cero, como se muestra en la fig.4.8.

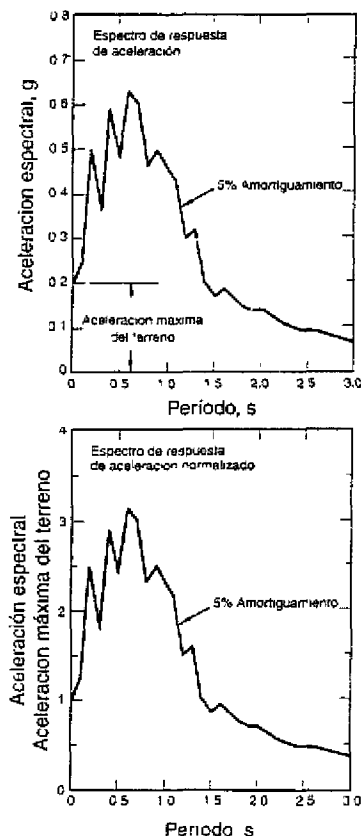


Figura 4.8: Determinación del espectro de respuesta aceleración normalizado (Tomado de Seed & Idriss, 1982).

Para todo espectro normalizado la ordenada al periodo cero es por lo tanto la unidad, y la forma espectral de la media o la media más una desviación estándar puede ser fácilmente determinada.

Estudios de este tipo se han hecho para grupos de registros acelerográficos obtenidos para cuatro diferentes condiciones suelo:

- Roca
- Suelo firme (menor a 60 metros de profundidad)
- Suelos no cohesivos (mayor a 75 metros de profundidad)
- Sitios dominados por depósitos de arcillas blandas a medianamente firmes

Los resultados del estudio de la forma espectral de la media y el 84.1% valor percentil para un amortiguamiento de 5% y para los cuatro tipos de suelo anteriormente dichos se muestran en las figs.4.9 y 4.10 respectivamente. Tales espectros señalan que hay una amplia diferencia en la forma o modelo espectral dependiendo del tipo de suelo o la condición geológica, particularmente a periodos mayores a 0.5 segundos (figs 4.9 y 4.10). A partir de este valor la amplificación espectral es mucho mayor para depósitos de suelos no cohesivos profundos (arenas) y para depósitos de arcillas blandas a medianamente firmes que para condiciones de suelo firme o roca. Lo anterior se puede resumir diciendo que depósitos de suelos blandos y profundos introducen una proporción significativamente mayor de componentes de período largo en los movimientos de la superficie del terreno, los efectos aparentemente se incrementan con el aumento del espesor o blandura del suelo. La falla en considerar tales efectos para periodos mayores que 0.5 segundos puede llevar a mayores discrepancias en la evaluación de aceleraciones espectrales o en el establecimiento de criterios de diseño.

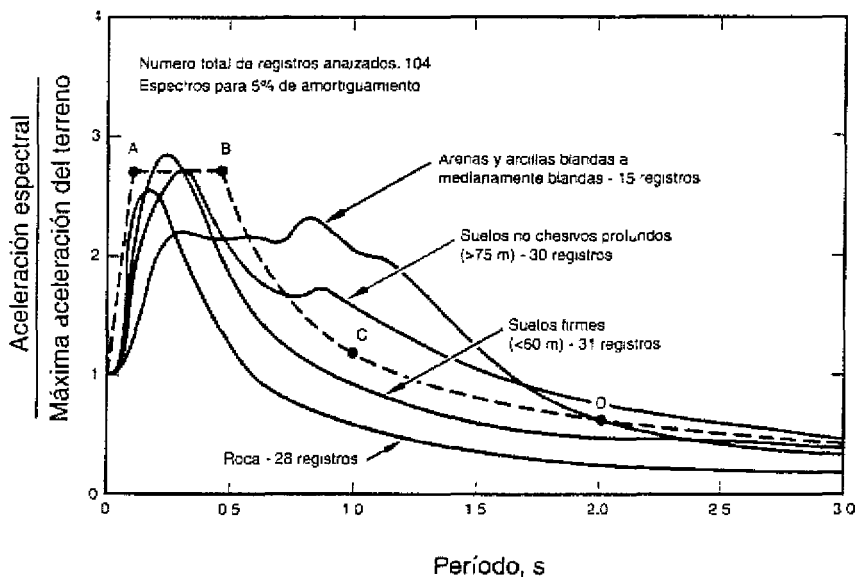


Figura 4.9: Espectros de aceleración promedio para diferentes condiciones locales (Tomado de Seed & Idriss, 1982)

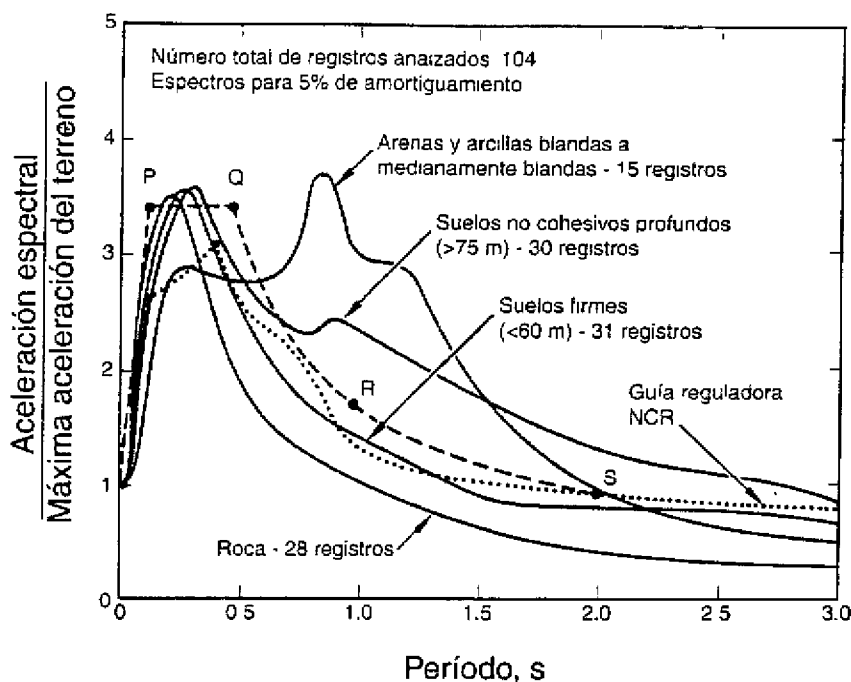


Figura 4.10. Espectros para el 84.1% valor percentil para diferentes condiciones locales (Tomado de Seed & Idriss, 1982).

Para propósitos ingenieriles esto es muchas veces conveniente y conservador para simplificar el modelo espectral mostrado en las figs.4.9 y 4.10. Por ejemplo en sitios relacionados con suelo firme o roca es conservador pero adecuado representar la media del modelo espectral, mostrado en la fig.4.9 por la línea de trazo discontinuo definida por los puntos A, B, C, y D, y para un 5% de amortiguamiento. Las coordenadas de estos puntos son:

Punto	Período (s)	$(S_a) / a_{m\acute{a}x}$
A	0.1	2.7
B	0.5	2.7
C	1.0	1.2
D	2.0	0.6

El uso de un modelo espectral de este tipo puede proveer una representación conservadora del espectro real. Esto puede ser notado con la aceleración máxima espectral $(S_a)_{m\acute{a}x}$, que en este caso es 2.7 veces la aceleración máxima.

De la misma forma para sitios de suelo firme y roca es conservador pero adecuado representar la media más una desviación estándar del modelo espectral (fig.4.10) que se muestra con la línea de trazo discontinuo definida por los puntos P, Q, R, y S. Las coordenadas de estos puntos son:

Punto	Período (s)	$(S_a) / a_{m\acute{a}x}$
P	0.1	3.4
Q	0.5	3.4
R	1.0	1.7
S	2.0	0.85

De nuevo para un amortiguamiento de 5% una curva de este tipo puede proveer una representación conservadora del espectro real. Para tal caso la aceleración máxima espectral $(S_a)_{max}$ es igual a 3.4 veces la aceleración máxima a_{max} , para el movimiento del terreno.

Finalmente esto puede ser muy conveniente o deseable para propósitos de diseño para simplificar el modelo o la forma del espectro de respuesta. Así en la fig.4.9 se muestra para cuatro tipos diferentes de condiciones de suelo. En la fig.4.11 involucra únicamente tres tipos de categorías diferentes de suelos: roca y suelo firme; suelos no cohesivos profundos; y arenas y arcillas blandas a medianamente blandas. Las curvas se muestran en la fig.4.11 con valores representativos de aceleraciones pico del terreno para diferentes tipos de suelo y para un área donde la aceleración máxima del terreno en roca puede ser de 0.2 g o mayor, pudiendo llevar a curvas espectrales relativas como las mostradas en la fig.4.12.

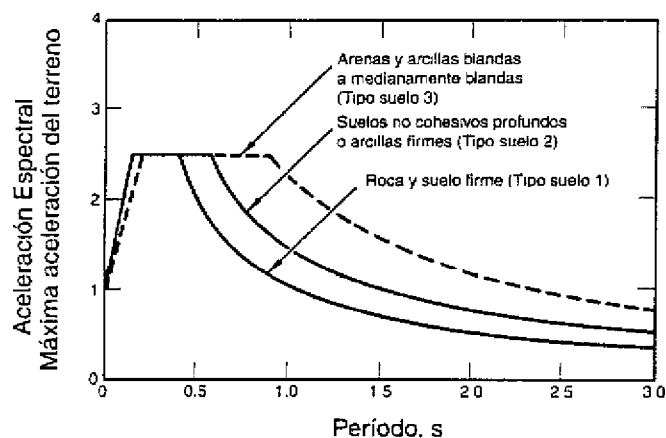


Figura 4 11: Curvas espectrales normalizadas recomendadas para usarse en código de construcción (Tomado de Seed & Idriss, 1982).

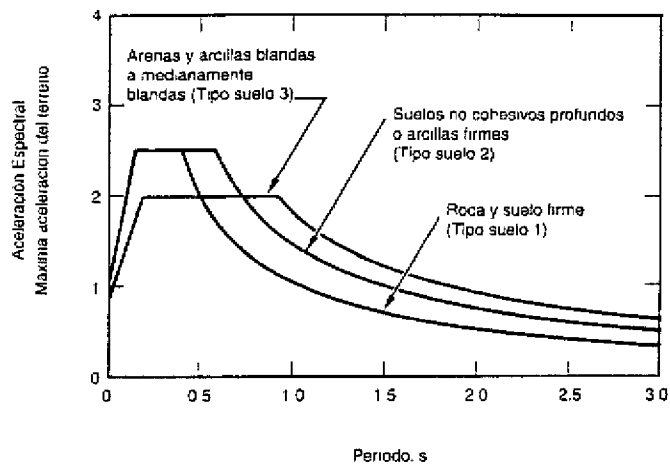


Figura 4.12 Curvas espectrales para usarse en código de construcción normalizado por la EPA para sitios de condiciones firmes (Tomado de Seed & Idriss, 1982).