

01161



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

8

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA**

TESIS

**“ANÁLISIS DE LA ENERGÍA SÍSMICA DURANTE
MOVIMIENTOS FUERTES Y SUS CARACTERÍSTICAS
EN EL VALLE DE MÉXICO”**

PRESENTADA POR:
BENJAMÍN HUERTA GARNICA

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA
(ESTRUCTURAS)**

DIRIGIDA POR:
DR. EDUARDO REINOSO ANGULO

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



CIUDAD UNIVERSITARIA, ENERO DE 2002



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Les dedico este trabajo a mis padres y hermanos, por los grandes momentos de dicha y dolor compartidos y por los tiempos venideros

Agradezco al **Dr. Eduardo Reinoso Angulo** la dedicación en la dirección de esta tesis y el apoyo brindado durante su desarrollo. Así como la confianza puesta en mi.

Agradezco al **Dr. Amador Terán-Gilmore**, al **Dr. Mario Ordaz Schroeder**, a la **Dra. Sonia Ruiz Gómez** y al **Dr. Carlos Reyes Salinas** por haber realizado la revisión y asentar sus valiosos comentarios, los cuales ayudaron a enriquecer esta tesis.

Agradezco a la **DEPFI** por la educación de excelencia que he recibido y al **Instituto de Ingeniería** por el apoyo económico y por facilitarme sus instalaciones.

RESUMEN

Se realiza un análisis de los espectros de respuesta de energía sísmica obtenidos a partir de registros de aceleración del suelo de algunos sismos fuertes para la zona epicentral y más detalladamente en el valle de México. Se comparan los espectros de energía de entrada de algunos registros cercanos al epicentro con los espectros de respuesta de aceleración y de velocidad y se correlacionan cualitativamente con el daño.

Se analiza la ecuación de energía, las definiciones de energía absoluta y relativa y la variación de éstas en el tiempo. Para sitios instrumentados en zona de Lago del valle de México se comentan brevemente las características de atenuación y la variación de energía con la magnitud y dirección del movimiento, así como los fenómenos de amplificación regional y los debidos a efectos de sitio en el valle. Además, se comenta la variación de los espectros de energía de entrada y de histerénesis con la resistencia y con la demanda de ductilidad.

Se presentan los espectros elásticos e inelásticos de energía de entrada, histéretica e histerética normalizada para algunos sismos y los correspondientes mapas con curvas de igual energía para cuatro diferentes períodos estructurales. También se presentan curvas de igual energía y período estructural de 2 segundos para cuatro sismos que tuvieron una intensidad importante en el valle de México. Para estas curvas se hace una correlación con los daños ocasionados por los sismos de 1957, 1979 y 1985. Se propone un modelo de acelerogramas sintéticos basado en espectros de energía.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
Principales contribuciones de este trabajo	3
1. CONCEPTOS DE ENERGÍA SÍSMICA EN ESTRUCTURAS	5
1.1 ALGUNOS ESTUDIOS PREVIOS	5
1.2 ENERGÍA SÍSMICA DE MOVIMIENTO FUERTE DEL TERRENO	7
Definiciones	7
Ecuación de balance de energía y definición de sus componentes	8
Energía de energía absoluta	11
1.3 ENERGÍA EN ESTRUCTURAS	13
1.4 ESPECTROS DE ENERGÍA	16
1.5 MÉTODOS DE DISEÑO QUE UTILIZAN CONCEPTOS DE ENERGÍA	17
Breve descripción de los métodos propuestos en al literatura	18
1.6 PREDICCIÓN DE ENERGÍA	19
1.6.1 Fórmulas para periodo estructural constante	19
1.6.2 Predicción espectral	21
Expresiones para determinar espectros de histéresis, E_H	22
Comparación de las expresiones anteriores	23
Expresiones para determinar la energía de entrada, E_I	26
Energía de entrada en términos del espectro de amplitudes de Fourier	28
2. ENERGÍA SÍSMICA DE MOVIMIENTO FUERTE EN MÉXICO	30
2.1 MOVIMIENTO FUERTE DEL TERRENO EN LA ZONA EPICENTRAL	32
Espectros de aceleración y de velocidad	32
Espectros de energía	35
2.2 ATENUACIÓN DE LA ENERGÍA CON LA DISTANCIA AL ÁREA DE RUPTURA	36
2.3 ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE LA ENERGÍA EN EL VALLE DE MÉXICO	40
2.3.1 Movimiento observado en la zona de Lomas y de Transición	43
2.3.2 Movimiento observado en la zona de Lago	45

3. ENERGÍA EN LA ZONA DE LAGO DEL VALLE DE MÉXICO	47
3.1 DIRECCIONES PRINCIPALES DE ENERGÍA	47
3.2 INFLUENCIA DE LA MAGNITUD DEL SISMO	48
3.3 ESPECTROS INELÁSTICOS DE ENERGÍA	50
Energía histerética normalizada	53
3.3.1 Relaciones propuestas entre la energía de histéresis y la de entrada	54
3.3.2 Factores de reducción	58
3.4 ANÁLISIS DEL FACTOR DE MODIFICACIÓN DE RESPUESTA Y DE LA RELACIÓN E_H/E_i EN EL VALLE DE MÉXICO	60
3.5 ESPECTROS DE ENERGÍA EN EL VALLE DE MÉXICO	63
4. MAPAS DE ENERGÍA EN EL VALLE DE MÉXICO	69
4.1 ANTECEDENTES	70
Estudios de daño	70
4.2 CURVAS DE IGUAL ENERGÍA Y CORRELACIÓN CON EL DAÑO	72
Implicaciones estructurales	80
5. ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS Y ENERGÍA	81
5.1 PREDICCIÓN DE ENERGÍA CON EL USO DE ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS	81
Propuesta de un nuevo modelo de acelerograma sintético	84
6. CONCLUSIONES	90
ANEXO: MÉTODOS DE DISEÑO BASADOS EN ENERGÍA	94
Método basado en el factor de ductilidad equivalente, μ_e (Fajfar, 1992)	94
Método basado en la evaluación de la energía sísmica en estructuras mediante la suposición del mecanismo de falla (Leelataviwat <i>et al.</i> , 1999)	96
REFERENCIAS	100

INTRODUCCIÓN

Los terremotos son fenómenos en que enormes cantidades de energía mecánica acumulada en las zonas de interacción entre placas tectónicas durante décadas o incluso siglos son liberadas en periodos muy cortos de tiempo. Gracias a las aportaciones de la ciencia moderna hoy sabemos en qué consiste un terremoto y cuáles son los mecanismos que lo producen. No obstante, la ingeniería sísmica sigue utilizando las fuerzas y desplazamientos en la estructura como parámetros de diseño y reconoce que éstos son sólo una manifestación del evento sísmico y no representan al fenómeno en su totalidad al no tomar en cuenta la historia completa de la respuesta estructural. El caso de la ciudad de México es particularmente importante considerar toda esta historia por la gran duración de los sismos que provoca que las estructuras tengan varios ciclos de carga ocasionando degradación de los materiales.

Los reglamentos de construcción en zonas sísmicas indican que las construcciones deben ser capaces de resistir determinadas fuerzas sísmicas y no exceder las condiciones de servicio para las que están destinadas. La mayoría de las estructuras se diseñan para que durante temblores moderados y severos sus materiales incurrieren al intervalo de comportamiento inelástico para disipar parte de la energía introducida por el sismo. Este comportamiento inelástico provoca daño a los elementos estructurales el cual debe ser tomado en cuenta en el análisis y diseño de la estructura. Recientemente se ha utilizado la distorsión de entrepiso o el máximo desplazamiento relativo entre niveles consecutivos de la estructura para determinar el daño que ésta sufrirá. Sin embargo, en ocasiones esto resulta insuficiente.

Los reglamentos actuales están elaborados para garantizar que las construcciones puedan resistir sismos severos que ocurren en un determinado periodo de retorno sin que colapsen. Sin embargo, no garantizan que las construcciones presenten un buen comportamiento sísmico ante diferentes niveles de movimiento del terreno, es decir, que los daños puedan controlarse.

Las pérdidas económicas en sismos recientes han sido cuantiosas. El sismo de Northridge en 1994 impuso elevados costos por el mal desempeño sísmico de la soldadura en algunas estructuras de acero y de las conexiones de estructuras prefabricadas. Después del sismo de Kobe en 1995 se comprobó que los marcos de construcciones diseñadas de acuerdo con la filosofía de "viga débil-columna fuerte" tuvieron el comportamiento esperado ya que sobrevivieron al sismo sin colapsar. Sin embargo, en las construcciones en las que varios de sus elementos incurrieron al rango de comportamiento inelástico y que sufrieron daño, el costo de reparación y de interrupción de los servicios fue muy grande.

Esto ha dado lugar a intensas discusiones sobre la necesidad de revisar estos códigos y modificar la metodología de diseño empleada. Así han aparecido diversos métodos de diseño basados en desempeño que consideran el control de daño. Los conceptos de energía que se expondrán posteriormente pueden ser aplicados a estos métodos y a los existentes. Una de las condiciones que establecen los métodos de diseño basados en conceptos de energía es que la capacidad de admitir y disipar energía de la estructura debe ser mayor que la demanda de energía que puede producir el sismo de diseño, considerando distintos niveles de movimiento del terreno. Sin embargo, esto no es suficiente y debe complementarse con controles de daño tales como la demanda de desplazamientos y de ductilidades garantizando también que las fuerzas y momentos actuantes sean menores que los resistentes.

La energía de entrada elástica es un parámetro que captura las características de la historia de amplitudes en el tiempo y la duración del movimiento del terreno, además de considerar la historia completa de la respuesta estructural. Su uso en análisis probabilísticos de peligro sísmico puede proveer un mejoramiento en las bases de selección de escenarios sísmicos (Chapman, 1999). La energía que realmente se relaciona con el daño de la estructura es la energía histerética la cual aparece cuando la estructura presenta deformación plástica, es decir, con comportamiento inelástico.

La tendencia para crear un método de diseño basado en energía involucra, como los otros métodos, la consideración de dos aspectos: el primero se relaciona con el establecimiento de los niveles de peligro sísmico en función de la energía correspondiente y el segundo con la evaluación de la absorción y la capacidad de disipación de energía en la estructura (Decanini y Mollaioli, 1998). El objetivo de este trabajo es introducir una propuesta que podría contribuir a la solución del primero de los aspectos antes mencionados. Para ello se hace una breve introducción a los conceptos de energía y se analiza la energía de varios registros de movimiento obtenidos en México y en particular en el valle de México, correlacionando ésta con el daño que registraron las estructuras en sismos pasados.

El contenido de este trabajo se resume de la manera siguiente: dentro del capítulo I se introducen los conceptos básicos de energía. Se da una breve explicación de los trabajos más sobresalientes presentados por diversos autores sobre el tema; se deducen las expresiones de energía cinética y potencial a partir de dos modelos y se desarrolla la ecuación de balance de energía definiendo cada uno de sus componentes; se explica también qué relación tienen estos componentes de energía con el comportamiento estructural. Además, se habla de las diferencias entre las definiciones de energía relativa y absoluta. Por último se presentan las principales bases de los métodos de diseño que utilizan conceptos de energía y se exponen las fórmulas de predicción de energía de entrada e histerética que han sido propuestas en la literatura.

En el capítulo II se observa que la energía elástica de entrada tiene una mejor correlación con la magnitud del sismo que los espectros de respuesta de aceleración y velocidad calculados en la zona epicentral. Se hace un breve análisis de la energía sísmica observada en México. Se analiza la atenuación de la energía con la distancia al área de ruptura y los fenómenos de amplificación regional en la zona de Lomas del valle de México y de la amplificación debida a los efectos de sitio en la zona de Transición y de Lago.

En el capítulo III se comentan las principales características de la energía en la zona de Lago del valle de México, entre éstas, la variación con la dirección de análisis y con la magnitud del sismo para algunas estaciones. También se muestra cómo varían los espectros de energía de entrada e histerética con el comportamiento inelástico; se presentan las fórmulas propuestas de la relación entre los espectros inelásticos de histéresis con los de entrada ($E_H/E_{I\mu}$); se hace un breve estudio de los factores de modificación de respuesta inelástica (R_E) y de la relación $E_H/E_{I\mu}$ para los diferentes tipos de suelo del valle de México. Por último se muestran los espectros de energía elástica de entrada para las estaciones del valle de México de cinco sismos importantes y para el sismo del 25 de abril de 1989 se comparan los espectros de energía de entrada con los de histéresis y los de energía histerética normalizada.

En el capítulo IV se inicia haciendo una breve recapitulación de la evolución de la microzonificación en el valle de México y se mencionan las principales zonas en el valle de México en que las construcciones han sufrido daño severo en sismos pasados. Se obtienen las curvas de igual energía de entrada, histéresis e histerética normalizada para los períodos estructurales de 1.5, 2, 3 y 4 segundos así como también las curvas de igual energía elástica de entrada para período de 2 segundos de otros cuatro sismos importantes, además se hace una correlación de estas curvas con las zonas de daños de los sismos de 1957, 1979 y 1985. Al final se mencionan las implicaciones estructurales para las construcciones localizadas en zonas de alta demanda de energía. Se propone utilizar estos mapas para considerar aspectos de energía en la actual zonificación del valle de México.

Por último en el capítulo V se presenta un modelo para generar acelerogramas sintéticos que pudieran ser utilizados en la práctica ya que la determinación de estos es muy sencilla comparada con otras metodologías de simulación. Este modelo se calibra con espectros elásticos de energía de entrada.

Principales contribuciones de este trabajo

En este trabajo se hizo una introducción de los conceptos de energía aplicados al diseño de estructuras que últimamente han llamado la atención de numerosos investigadores, se hace un compendio de varios trabajos relevantes dentro de este ámbito.

En el capítulo I se reconocen las expresiones que dan buenos resultados para la estimación de energía en el valle de México. En el capítulo II se calcularon algunos espectros elásticos de energía de entrada para varios registros de movimiento obtenidos en México y se identificaron algunas características de atenuación, de efectos regionales y de efectos de sitio para estos espectros. De igual forma, en el capítulo III se identificaron las características más importantes de la energía en la zona de Lago del valle de México. Se obtuvieron expresiones para determinar la energía máxima, en las estaciones CD y SCT, en función de la magnitud y para una distancia al área de ruptura de 300 km. Se hace un análisis de los factores de reducción de la relación entre la energía histerética y la de entrada. También se calcularon los espectros de energía en las estaciones del valle del México para algunos sismos de importancia.

En el capítulo IV se obtuvieron curvas de igual energía en el valle de México y con ellas se detectaron zonas con altas demandas de energía para distintos periodos estructurales. Ya que existen zonas que para los mismos periodos y para varios sismos presentan demandas altas de energía se propone utilizar estos mapas para mejorar la zonificación sísmica del valle, que hasta la fecha no considera efectos de duración de movimiento o de energía que produce degradación en los materiales por el número elevado de ciclos en el rango plástico. Por último en el capítulo V se comprueba, mediante espectros de energía, que los acelerogramas sintéticos dan estimaciones razonables de las características de movimiento del terreno.

Capítulo 1

CONCEPTOS DE ENERGÍA SÍSMICA EN ESTRUCTURAS

Un sismo es un evento físico complejo producido por un proceso de ruptura en la corteza de la tierra en donde la energía liberada se propaga desde la zona de ruptura mediante diversos tipos de ondas sísmicas. Desde los inicios de los estudios sísmicos se ha presentado la necesidad de proponer un método que describa la severidad e historia en el tiempo del evento. En la actualidad muchos de los métodos que se emplean en la práctica utilizan simplificaciones, a veces muy burdas, que en ciertos casos ocasionan que los resultados de diseño difieran del comportamiento real de la estructura.

Así, uno de los principales problemas que se presentan en el diseño sismorresistente es el de comprender los efectos de la excitación sísmica en las construcciones, sobre todo en sismos de gran intensidad que producen movimientos de terreno de gran amplitud y duración. En años recientes han aparecido una gran cantidad de métodos de diseño que tratan de considerar estos efectos al tomar en cuenta el daño acumulado ocasionado por el número de ciclos de movimiento a los que se somete la estructura durante un sismo. Algunos investigadores han dedicado gran parte de su trabajo al estudio de la energía aplicada a diseño sismorresistente y plantean que estos conceptos pueden ayudar a mejorar y establecer de una manera más clara los actuales métodos de diseño.

1.1 ALGUNOS ESTUDIOS PREVIOS

Los estudios sobre conceptos de energía aplicados al diseño sismorresistente de las estructuras inician con los trabajos de Housner (1956) y algunos trabajos posteriores (Galambos, 1968 y Kato y Akiyama, 1975). A partir de los años ochenta aparecieron varias publicaciones relevantes que discuten diferentes problemas concernientes con los conceptos de energía (Zahrah y Hall, 1985, Hirao *et al.*, 1988, Kuwamura y Galambos, 1989, Uang y Bertero, 1990).

Bertero (1992) promueve el uso de la energía en una conferencia dictada en el congreso mundial de ingeniería sísmica en Madrid. Como resultado de investigaciones más recientes se ha presentado un importante avance en la estimación de las demandas de energía de entrada e hysterética. Algunos investigadores han calculado los espectros de energía elásticos e inelásticos y han establecido relaciones entre la energía de entrada inelástica y la energía hysterética (Akiyama 1985, Kuwamura y Galambos, 1989, Fajfar y Vidic, 1994 y Lawson y Krawinkler, 1995). Estos autores han propuesto expresiones sencillas que relacionan estas dos cantidades. Así, conociendo el espectro de energía de entrada inelástico se puede determinar el espectro de energía hysterética. En un trabajo reciente, Decanini y Mollaioli (2001) realizan un estudio detallado de esta relación y

proponen una expresión que comparan con las propuestas de los autores anteriormente mencionados.

Existen varios trabajos que plantean el uso de la energía para diseño sísmico y proponen determinar la demanda de energía para las diferentes zonas de peligro en las que se pretende construir estructuras. Algunos de los trabajos más recientes que han dirigido sus investigaciones a la determinación de espectros de energía elásticos e inelásticos, tanto de respuesta como de diseño se mencionan a continuación.

Fajfar y Vidic (1994) proponen expresiones aproximadas para obtener espectros inelásticos de energía de entrada ($E_{I\mu}$) y de histéresis (E_H) a partir de los espectros de respuesta elásticos de pseudoaceleración, de factores de reducción de resistencia y de los parámetros γ y $E_H/E_{I\mu}$.

Nurtug y Sucuoglu (1995) proponen un procedimiento analítico simple para calcular la energía sísmica disipada de un sistema de IGDJ bajo una excitación sísmica especificada por el espectro de pseudovelocidades y la duración efectiva.

Chai, Fajfar y Romstad (1998) proponen un procedimiento para determinar espectros de diseño inelásticos de respuesta dependientes de la duración. La energía de entrada es considerada como una parte de la demanda de la estructura. Se realiza una predicción empírica de ésta en términos de la duración del movimiento del terreno.

Decanini y Mollaioli (1998) desarrollaron un procedimiento para obtener espectros de diseño elásticos de energía de entrada (E_I) tomando en consideración la influencia de la magnitud, tipo de suelo y distancia al área de ruptura.

Chou y Uang (2000) propusieron determinar espectros de respuesta inelásticos de demanda de energía mediante funciones de atenuación. Estas funciones fueron establecidas para una magnitud del sismo, distancia de la fuente al sitio, tipo de suelo y factor de ductilidad.

Chai y Fajfar (2000) propusieron un procedimiento para estimar espectros de energía de entrada (E_I) para diseño sísmico mediante el factor de amplificación del valor máximo del espectro de velocidad equivalente de energía de entrada. Este factor se obtiene mediante el uso del teorema de Parseval.

Manfredi (2001) propone un método para obtener una representación simplificada de los espectros inelásticos de energía de entrada ($E_{I\mu}$) y de histéresis (E_H). El método está basado en la evaluación del número de ciclos equivalentes correlacionado con las características del sismo.

Decanini y Mollaioli (2001) plantean una derivación de la metodología de diseño sísmico basada en conceptos de energía inicialmente propuesta por Terán-Gilmore (1996). Desarrollaron un método para obtener espectros de diseño inelásticos de energía de entrada ($E_{I\mu}$) para sistemas con una ductilidad establecida. Para ello proponen un factor de modificación de respuesta de energía sísmica de entrada y un factor α que representa la relación del área bajo el espectro inelástico con respecto a la del elástico. También proponen una expresión para determinar la relación entre los espectros de energía histéretica (E_H) con los espectros de energía de entrada inelásticos ($E_{I\mu}$).

Para comprender los las definiciones de energía en las siguientes secciones se hace una descripción de la ecuación de balance de energía y de cada uno de sus elementos.

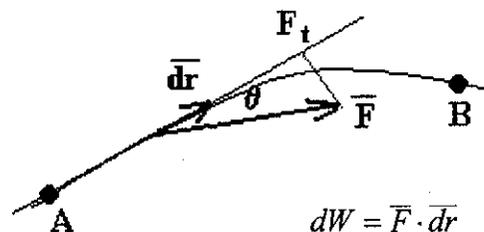
1.2 ENERGÍA SÍSMICA DE MOVIMIENTO FUERTE DEL TERRENO

Una forma clara y sencilla de estudiar el movimiento de los cuerpos es mediante la energía ya que constituye un elemento clave en la descripción de los sistemas físicos por estar relacionada con los cambios o procesos de transformación en la naturaleza.

Para poder introducir estos conceptos primero se revisarán las definiciones clásicas de energía que posteriormente serán utilizadas en la ecuación de balance de energía de un oscilador de un grado de libertad.

Definiciones

La definición clásica de energía de un cuerpo es la capacidad del mismo para realizar trabajo. La cantidad de trabajo realizada por una fuerza aplicada sobre un cuerpo o sobre una partícula es igual al producto de la componente de la fuerza en la dirección del desplazamiento por la distancia desplazada. Se denomina trabajo infinitesimal al producto escalar del vector fuerza (\vec{F}) por el vector desplazamiento ($d\vec{r}$). Esto se ilustra con la Figura 1.1.



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 1.1 Definición de trabajo infinitesimal

Según la Figura 1.1, cuando una partícula se desplaza del punto A al punto B al aplicarle una fuerza \vec{F} se produce energía cinética. De la definición anterior se obtiene que el diferencial de trabajo dW es igual al vector de fuerza \vec{F} , por el vector de distancia $d\vec{r}$, donde r es el vector de posición de la partícula con respecto al marco de referencia. El trabajo total a lo largo de la trayectoria entre los puntos A y B es la suma de todos los trabajos infinitesimales,

$$W = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r} = \int_A^B F_t \cdot ds \quad (1.1)$$

El término de la derecha de la ecuación (1.1) se obtiene proyectando al vector de fuerza \vec{F} en la dirección del vector $d\vec{r}$, donde F_t es el componente de la fuerza a lo largo del desplazamiento y ds es el módulo del vector desplazamiento. Es decir, el trabajo se obtiene integrando la fuerza F_t en el

desplazamiento. En el caso de una masa concentrada en la partícula se reconoce que la fuerza de inercia está relacionada con la masa (m) y la aceleración (a), así la energía cinética de un cuerpo es igual a:

$$E_C = \int_A^B m \cdot a \, ds = m \cdot \int_A^B a \, ds \quad (1.2)$$

La aceleración se define como la variación de la velocidad en el tiempo ($a=dv/dt$) y la velocidad es igual a la variación del desplazamiento en el tiempo ($v=ds/dt$, donde $ds=vdt$). Al sustituir estos valores en la ecuación (1.2) se deduce la definición clásica de energía cinética que depende de la masa y de la velocidad al cuadrado,

$$E_C = m \cdot \int_A^B v \, dv = \left. \frac{m \cdot v^2}{2} \right]_A^B \quad (1.3)$$

De igual forma al analizar una partícula ligada a un resorte se sabe que la fuerza de deformación elástica del mismo es igual a su rigidez, k , por el desplazamiento de la partícula, x , como lo muestra la Figura 1.2.

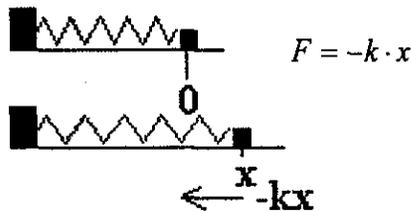


Figura 1.2 Fuerza en un resorte

Al sustituir $F_r=-k \cdot x$ y $ds=dx$ en la ecuación (1.1) se deduce la definición clásica de energía potencial que depende de la rigidez y del desplazamiento al cuadrado,

$$E_D = -k \cdot \int_A^B x \, dx = \left. \frac{-k \cdot x^2}{2} \right]_A^B \quad (1.4)$$

Ecuación de balance de energía y definición de sus componentes

Para determinar la demanda o energía de entrada se considera un sistema de un oscilador de masa concentrada con un grado de libertad como el mostrado en la Figura 1.3.

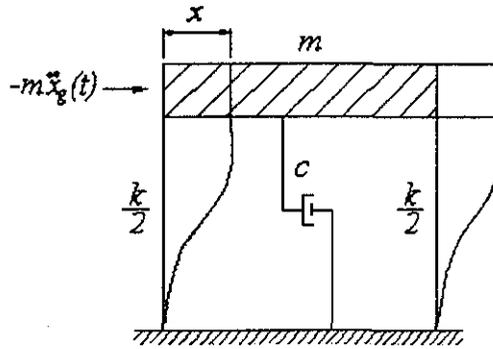


Figura 1.3 Modelo de oscilador de un grado de libertad (1GDL)

Al suponer que el sistema tiene un comportamiento inelástico la ecuación de movimiento es la siguiente:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + f_S(x, \dot{x}) = -m\ddot{x}_g(t) \quad (1.5)$$

donde x representa el desplazamiento relativo de la masa m con respecto a la base del sistema, x_g es el desplazamiento del terreno, c es el coeficiente de amortiguamiento viscoso de la estructura y f_S representa la fuerza de deformación (elástica y plástica); el punto sobre la literal indica derivada con respecto al tiempo. Para un sistema elástico lineal f_S es igual a kx , donde k es la rigidez del sistema. El término del lado derecho de la ecuación (1.5) representa la fuerza lateral a la que está sometida la masa, los términos del lado izquierdo de la ecuación (1.5) representan las fuerzas de inercia, amortiguamiento viscoso y de deformación. Para obtener la energía que producen estas fuerzas se integra la ecuación anterior con respecto al desplazamiento relativo de la masa, x . Así se obtiene lo siguiente (Uang y Bertero, 1990):

$$\int m\ddot{x} dx + \int c\dot{x} dx + \int f_S dx = -\int m\ddot{x}_g dx \quad (1.6)$$

La suma de estas energías debe equilibrar la demanda de energía de entrada impuesta a la estructura por el sismo. La energía de entrada "relativa" está dada por el término de la derecha de la ecuación anterior:

$$E_I = -\int m\ddot{x}_g dx \quad (1.7)$$

La energía de entrada "relativa" es el trabajo efectuado por una fuerza lateral equivalente en un sistema de base fija (Figura 1.3).

Las contribuciones individuales del lado izquierdo de la ecuación (1.6) representan la energía cinética relativa (E_C), de amortiguamiento viscoso (E_A) y de deformación ($E_D + E_H$). La energía cinética relativa (E_C), que se analizó en la ecuación (1.3), es producida por la fuerza de inercia de la masa y está asociada a la velocidad relativa de la masa, como se muestra a continuación:

$$E_C = \int mx \, dx = \int mx \, dx = \frac{mx^2}{2} \quad (1.8)$$

La energía disipada causada por el amortiguamiento viscoso (E_A) se puede expresar como:

$$E_A = \int c\dot{x} \, dx = \int c\dot{x}^2 \, dt \quad (1.9)$$

Cuando el sistema presenta comportamiento inelástico la energía de deformación se puede descomponer en energía de deformación elástica (E_D) más energía de histerésis (E_H). La energía de deformación elástica (E_D), que se analizó en la ecuación (1.4), es la fuerza de la rigidez del sistema que desarrolla energía potencial asociada al desplazamiento,

$$E_D = \int kx \, dx = \frac{kx^2}{2} \quad (1.10)$$

La energía que es disipada por deformación plástica denominada también energía de histerésis (E_H) se obtiene restando la energía de deformación elástica (E_D) a la energía de deformación ($E_D + E_H$):

$$E_H = \int f_s(x, \dot{x}) \, dx - E_D \quad (1.11)$$

Escrita de la siguiente forma, la ecuación (1.6) representa el balance de energía en una estructura (Uang y Bertero, 1990),

$$E_I = E_C + E_A + E_D + E_H \quad (1.12)$$

En esta ecuación puede considerarse que el término de la izquierda (E_I) representa la demanda o entrada de energía que el sismo introduce a la estructura y el término de la derecha representa el suministro sísmico de la misma. Esta ecuación se puede representar esquemáticamente por el estanque de agua con dos orificios mostrado en la Figura 1.4 (Popov *et al.*, 1993).

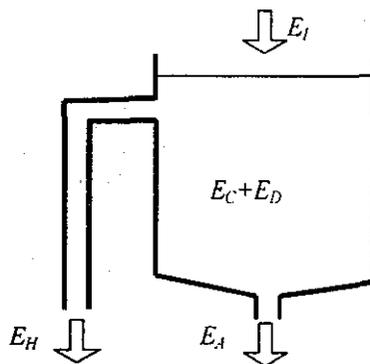


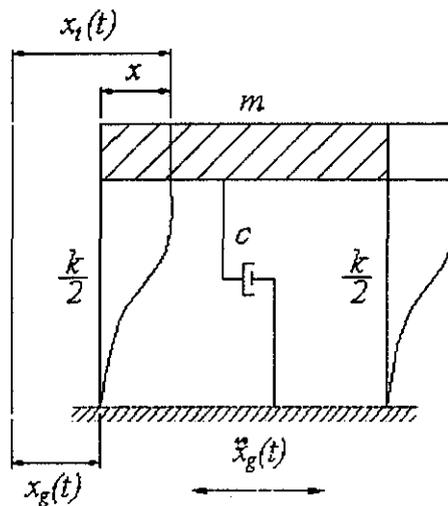
Figura 1.4 Representación esquemática con ayuda de un tanque de almacenamiento de agua de la ecuación de energía (Popov *et al.*, 1993)

Para que el tanque opere eficientemente, su capacidad total dada por la suma de su volumen y las salidas de agua, debe ser mayor que la entrada de agua (E_I). Es decir, la capacidad de admitir energía depende del volumen del tanque (E_C+E_D) y del tamaño de los orificios por donde escapa el agua (E_H y E_A).

Como puede observarse en la Figura 1.4 la energía de amortiguamiento viscoso (E_A) siempre está presente mientras que la energía de histerésis (E_H) sólo aparece cuando la energía de entrada (E_I) es mayor que las energías almacenadas (E_C+E_D) más la disipada por amortiguamiento (E_A). En el caso que el tanque opere sin que el agua llegue al orificio superior éste es equivalente con un sistema elástico en que la energía disipada es sólo de amortiguamiento (E_A).

Energía de entrada absoluta

Por algún tiempo varios investigadores utilizaban diferentes definiciones de energía (relativa y absoluta). La formulación de energía "relativa" fue utilizada en la mayoría de los primeros estudios sobre energía. Uang y Bertero (1990) indicaron que la definición de energía "absoluta" representa mejor el fenómeno físico que la relativa.



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 1.5 Modelos de base móvil para la definición de energía absoluta

Como se mencionó antes, la energía de entrada relativa es el trabajo efectuado por una fuerza lateral equivalente en un sistema de base fija como el que se muestra en la Figura 1.3. De igual forma, para un sistema dinámico de base móvil (Figura 1.5) se puede definir la energía de entrada "absoluta" como el trabajo realizado por la fuerza total aplicada en la base de la estructura. Para este sistema la ecuación de movimiento es la siguiente:

$$m\ddot{x}_t(t) + c\dot{x}(t) + f_s(x, \dot{x}) = 0 \quad (1.13)$$

donde $x_t = x_g + x$, es el desplazamiento total de la masa. Sustituyendo x_t e integrando la ecuación anterior con respecto al desplazamiento relativo de la masa, x , se tiene lo siguiente (Uang y Bertero, 1990):

$$\int m\dot{x}_i(dx_i - dx_g) + \int cx dx + \int f_s dx = 0 \quad (1.14)$$

Separando la integral del primer término y ordenando la ecuación se tiene:

$$\frac{m\dot{x}_i^2}{2} + \int cx dx + \int f_s dx = \int m\dot{x}_i dx_g \quad (1.15)$$

El término de la derecha de la ecuación (1.15) se conoce como energía de entrada "absoluta". Se observa que en los términos de la izquierda de ambas definiciones de energía relativa y absoluta, ecuaciones 1.6 y 1.15 respectivamente, la energía de amortiguamiento (E_A) y de deformación ($E_D + E_H$) son las mismas y el único término que cambia es el de energía cinética (E_C).

Ambas definiciones de energía están en función del tiempo, del movimiento del terreno y de la respuesta del oscilador en la cual están implícitos los parámetros de la estructura, rigidez (k) resistencia (f_y) y modelo de comportamiento histerético. Al considerar comportamiento inelástico en este trabajo se utilizó en todos los casos un modelo de comportamiento elastoplástico perfecto como el mostrado en la Figura 1.6. Se observa como la fuerza de deformación (f_s) depende de la deformación (x), de la historia previa de x y de la velocidad de la masa (\dot{x}) ya que para un determinado desplazamiento (x_i) se tienen dos valores de f_s y es necesario conocer el signo de la velocidad para poder determinar el valor correcto de f_s .

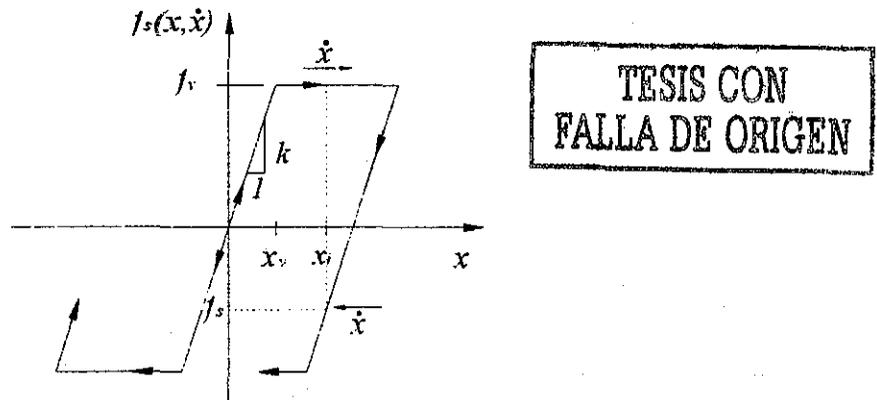


Figura 1.6 Modelo de comportamiento elastoplástico perfecto

En la Figura 1.7 se muestran las historias de energía absoluta y relativa para dos osciladores con periodos $T=0.3$ y $T=3.5$ segundos, fracción de amortiguamiento crítico $\xi=5\%$ y coeficiente sísmico de fluencia $C_y=0.15$. Estas historias corresponden al registro de la estación localizada en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes componente este-oeste (SCT-EO), del sismo del 19 de septiembre de 1985. En estas gráficas se pueden observar diferencias significativas en las magnitudes de energía de entrada (E_I) relativa y absoluta, es decir, de la envolvente de las funciones mostradas en la Figura 1.7. Esto se debe a que a pesar de que las energías de amortiguamiento, de histéresis y de deformación (E_A , E_H y E_D) son las mismas para ambas definiciones, la energía cinética (E_C) es diferente.

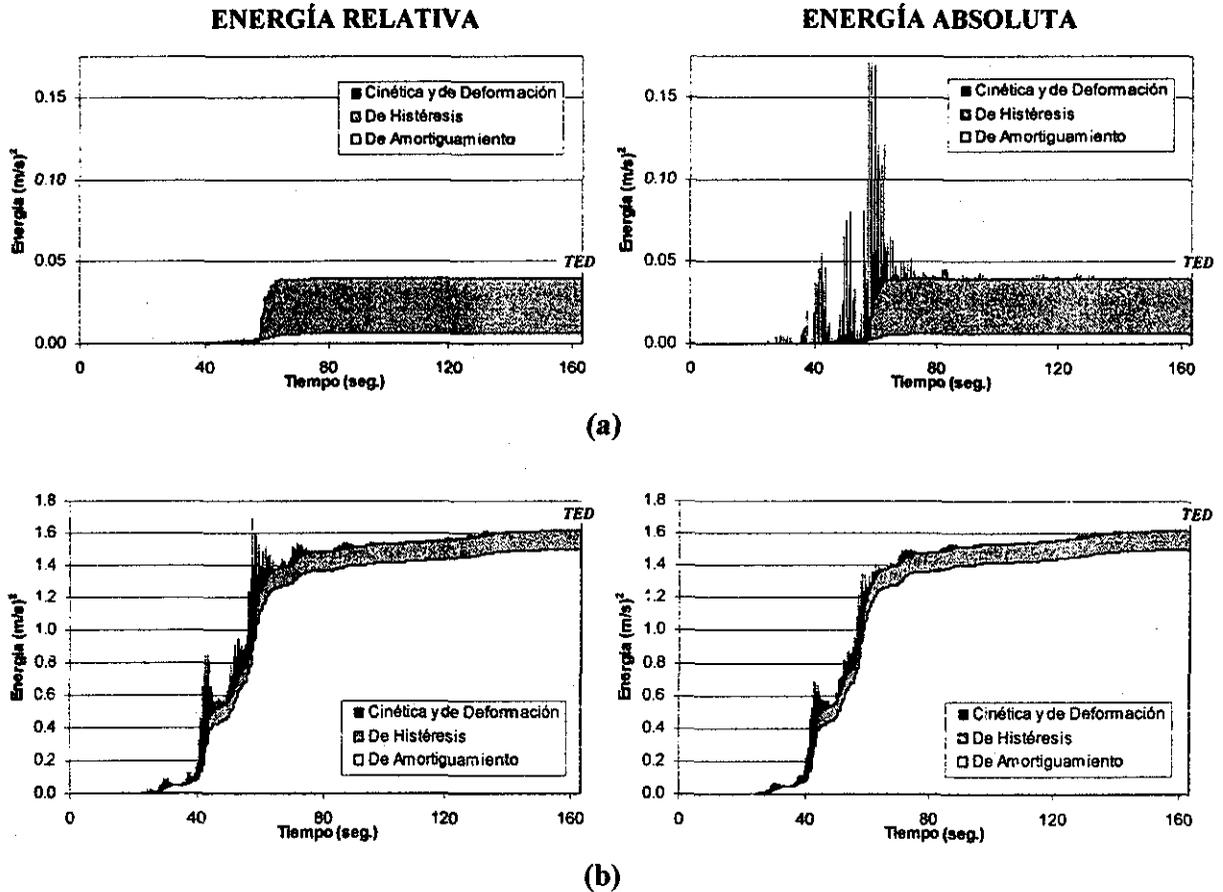


Figura 1.7 Variación de las componentes de energía de entrada en el tiempo para el registro SCT-EO del sismo del 19 de septiembre de 1985, $C_y=0.15$, $\xi=5\%$

(a) $T=0.3$ seg

(b) $T=3.5$ seg

Ya que la energía de entrada absoluta considera el desplazamiento de cuerpo rígido, cuando el periodo de la estructura es significativamente mayor que el periodo predominante del terreno (Figura 1.7b en que $T=3.5s > T_s=2s$) la masa de la estructura prácticamente no se mueve, por ello la energía de entrada absoluta es menor que la relativa para periodos largos. En periodos cortos sucede lo contrario (Uang y Bertero, 1990). Las magnitudes de energía absoluta aparentemente muy elevadas en periodos cortos (Figura 1.7a, derecha) no tendrían implicaciones estructurales de consecuencia con respecto a la relativa ya que el daño que puede ocurrir en la estructura se calcula con la respuesta relativa del sistema, como por ejemplo con la distorsión de entrepiso.

El total de la energía disipada que se presenta al final del movimiento (TED) es igual a la suma de la energía de amortiguamiento más la de histéresis (E_A+E_H) en ese instante. Las otras energías (E_D+E_C) no contribuyen a TED porque, a pesar de tener grandes variaciones durante la etapa intensa, no están presentes al final del movimiento. Este parámetro ha sido utilizado con anterioridad por algunos autores (Riddell, 1989, Fajfar *et al.*, 1991, Chai y Fajfar, 1998, entre otros).

Las diferencias mostradas anteriormente entre ambas definiciones son relativamente pequeñas cuando se comparan, como se verá más adelante, con las ordenadas máximas de los espectros de energía. Las diferencias de energía relativa y absoluta son mayores cuando el periodo de la estructura presenta valores extremos, es decir, las diferencias se incrementan para periodos muy largos ($T \rightarrow \infty$) y para periodos muy cortos ($T \rightarrow 0$). En un intervalo de periodos cercanos al dominante del terreno la energía relativa y absoluta es idéntica. Esto se ilustrará posteriormente con los espectros de energía calculados en este trabajo.

1.3 ENERGÍA EN ESTRUCTURAS

Puede decirse que el manejo juicioso de la energía de entrada (E_I) permite representar el daño potencial total del movimiento del terreno provocado por el sismo. Desafortunadamente, no se tiene control ni conocimiento exacto de la cantidad de energía de entrada impuesta a la estructura que se localiza en un sitio determinado ante un sismo futuro, esta energía varía con la magnitud del sismo, la distancia al epicentro, las características del suelo y características de la estructura.

El suministro de energía para una estructura con comportamiento inelástico sujeta a movimientos fuertes del terreno es disipado en parte por deformación inelástica (energía histerética, E_H) y en parte por amortiguamiento viscoso (energía de amortiguamiento, E_A) que en la Figura 1.4 se representan como el agua que sale del tanque. La energía de histéresis disipada (E_H) es el parámetro de respuesta estructural que está asociado con el daño acumulado de la estructura (Fajfar, 1994). Como se verá más adelante, E_H normalizada por la máxima energía elástica de deformación está bien correlacionada con el daño estructural.

El diseñador debe analizar si es técnica y económicamente posible equilibrar la energía de entrada sólo con comportamiento elástico de la estructura, es decir, sólo con movimiento, deformación elástica y amortiguamiento (E_C , E_D y E_A), o qué tanto es conveniente disipar parte de la energía de entrada con comportamiento histerético (E_H). La energía de amortiguamiento (E_A) es un parámetro sobre el que el diseñador no tiene mucho control. Para una estructura el amortiguamiento viscoso puede variar de 2 a 10 por ciento dependiendo del estado de degradación del material, de la fricción interna, fricción en los apoyos, elementos no estructurales y de otros mecanismos. Un amortiguamiento promedio puede ser del orden de 5 por ciento, por eso este amortiguamiento es el que se considera para calcular los espectros de respuesta contenidos en los reglamentos y es el que se utilizó para calcular los espectros de energía presentados en este trabajo. En la práctica es más factible aumentar E_H . Los elementos estructurales disipan parte de la energía mediante deformación plástica, es decir, mediante la proporción de demanda de ductilidad, μ . Con esto se logra incrementar la energía de histéresis (E_H) a través de comportamiento inelástico en la estructura aunque implique daño a los miembros estructurales. En un diseño óptimo se debe buscar un balance entre la resistencia y la ductilidad necesaria en la estructura para que ésta pueda cumplir satisfactoriamente con los objetivos de diseño.

Recientemente se ha reconocido que es posible aumentar E_A y E_H significativamente y controlar el daño de la estructura a través del uso de dispositivos disipadores de energía (Bertero, 2000). La función básica de estos dispositivos es proporcionar amortiguamiento adicional a la estructura y

reducir el comportamiento no lineal de las construcciones y por lo tanto los problemas de daño acumulado. Estos dispositivos son poco sensibles a la acumulación de daño y su degradación es más lenta que la de los materiales que se utilizan en los sistemas estructurales. Se clasifican en: amortiguadores viscosos y viscoelásticos, cuyo comportamiento depende de la frecuencia de la excitación, y disipadores histeréticos (bi-lineales y de fricción) que dependen de la fluencia del material, algunos disipadores histeréticos que han sido estudiados para ser utilizados en el valle de México son: TADAS, ADAS y SOLERA TIPO U (Ruiz y Badillo, 2000).

También el diseñador tiene la opción de intentar disminuir E_I haciendo uso de las técnicas de aislamiento de base sísmica (Bertero, 2000), aunque esto no es recomendable para suelos blandos como los del Distrito Federal. La principal función de los sistemas aisladores de base es soportar una estructura mientras provee un alto grado de flexibilidad horizontal, con lo cual se alarga el periodo de la estructura.

Para poder predecir el comportamiento de las estructuras que utilizan estos tipos de dispositivos se requiere de una comprensión clara de los conceptos de energía anteriores y del uso de la ecuación de balance de energía (ecuación 1.12). Para ello también es importante conocer los espectros elásticos e inelásticos para E_I (Akiyama, 1985; Kuwamura y Galambos, 1989; Fajfar y Vidic, 1994) y otros tipos de energía involucrados en la ecuación de balance de energía.

La energía histerética (E_H) proporciona una idea del número y magnitud promedio de los ciclos en que la estructura incursiona en su rango plástico. El uso exclusivo de la energía histerética (E_H) puede no aportar información suficiente acerca de la importancia que las demandas acumuladas de deformación plástica tienen en el desempeño sísmico de la estructura (Ávila y Terán-Gilmore, 2000). Un parámetro que se correlaciona bien con estas demandas y por lo tanto con el daño que ésta puede tener, es el de la energía histerética normalizada, NE_H (Terán-Gilmore, 1996a):

$$NE_H = \frac{E_H}{x_y F_y} \quad (1.15)$$

donde x_y es el desplazamiento lateral de fluencia y F_y es la resistencia de fluencia. El producto $x_y F_y$ representa una proporción de la energía elástica de deformación almacenada cuando los elementos estructurales son llevados hasta el nivel de fluencia. Este factor es muy importante en diseño sísmico ya que la energía histerética (E_H) no es un completo indicador de la amplitud y número de ciclos como lo muestra la Figura 1.8. Como lo indicó Terán-Gilmore (1996a), valores similares de E_H pueden ser asociados a sistemas que tienen gran resistencia y pocos ciclos de carga (Figura 1.8a) con sistemas que tienen poca resistencia y muchos ciclos de carga (Figura 1.8b). Sin embargo, el daño que pueden presentar es muy diferente.

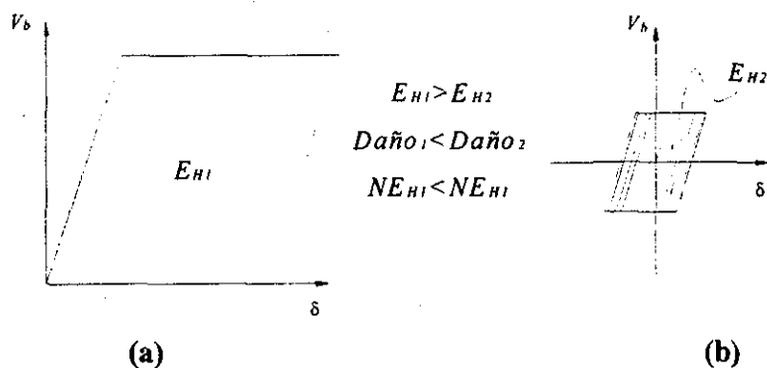


Figura 1.8 Comparación de las demandas de energía hysterética en dos sistemas diferentes

- (a) Con mucha resistencia y un ciclo de carga
- (b) Con poca resistencia y varios ciclos de carga

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

1.4 ESPECTROS DE ENERGÍA

Al igual que los espectros de respuesta, los espectros de energía están basados en la respuesta de un oscilador de un grado de libertad sometido a una excitación sísmica en su base. Éstos capturan las respuestas máximas (que son respuestas acumuladas en el tiempo) como una función del período estructural (T) y para un determinado amortiguamiento. Así se pueden conocer las características de la demanda máxima de energía para los sitios en que se pretenden construir nuevas estructuras.

Hay varias formas de expresar la energía de estos espectros, las dos maneras más utilizadas por la comunidad científica consisten en presentar las ordenadas de energía por unidad de masa (E/m) o de velocidad equivalente de energía, que es proporcional a la raíz cuadrada de la energía entre la masa, $v_e = \sqrt{2E/m}$.

La unidad de energía comúnmente empleada en la medición de trabajo efectuado por cuerpos en movimiento es el Joule (Newton por metro). Un Joule tiene la siguiente equivalencia:

$$J = 1kg \frac{m^2}{s^2} \text{ ó } \frac{1}{9.81} kg_f \cdot m$$

Es decir, un Joule es la capacidad de desplazar un peso de aproximadamente 100 g_f ($1/9.81 \approx 0.1kg_f$) un metro de distancia. En este trabajo se presentan las ordenadas de energía entre la masa (E/m) las cuales tienen unidades de velocidad al cuadrado [$(cm/s)^2$ o $(m/s)^2$]. Para presentar estas unidades en Joules habría que multiplicarlas por la masa en kilogramos.

En la Figura 1.9 se muestran los espectros de energía de entrada relativa y absoluta, divididos entre la masa, para el registro de la estación SCT-EO del sismo del 19 de septiembre de 1985, considerando un coeficiente sísmico de fluencia $C_y=0.15$. En la Figura 1.9a se observa que los espectros son casi idénticos a excepción de periodos muy cortos ($T < 1$) en que la energía de entrada absoluta es ligeramente mayor a la relativa, y para periodos largos ($T > 4$). En la Figura

1.9b se muestran los mismos espectros modificando la escala de las ordenadas a una escala logarítmica, así se pueden observar más claramente las diferencias.

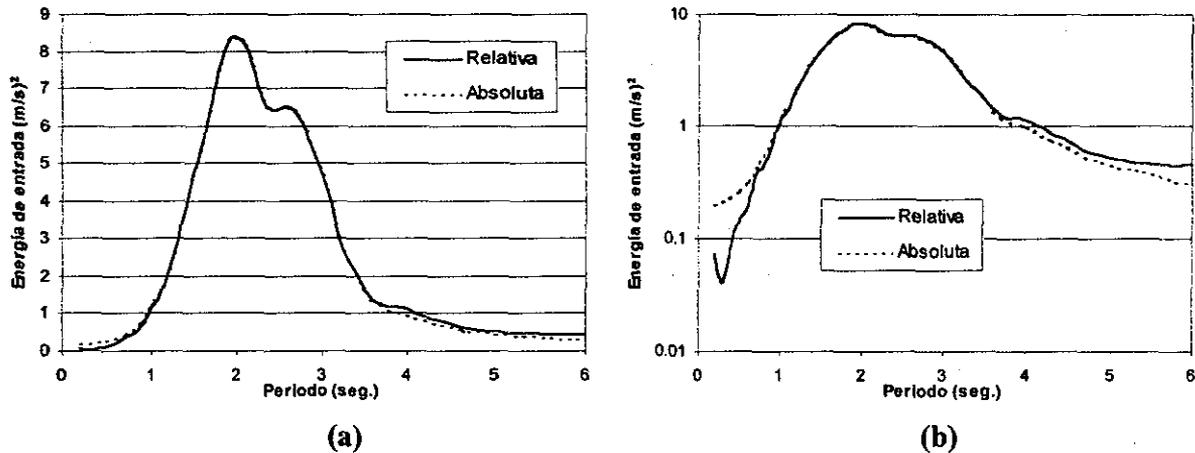


Figura 1.9 Espectros de energía de entrada relativa y absoluta para el registro SCT-EO del sismo del 19 de septiembre de 1985, $C_y=0.15$, $\xi=5\%$

(a) Escala aritmética

(b) Escala logarítmica

Para los espectros de energía de los registros de movimientos analizados en México se observó poca diferencia en la energía de entrada relativa y absoluta. Decanini y Mollaioli (2001) afirman que incluso la energía que se presenta al final de la historia en el tiempo, *TED*, es una cantidad muy similar a las máximas de cada definición ya que es una cantidad muy parecida a la energía de entrada absoluta máxima. Debido a que las diferencias entre ambas definiciones de energía son despreciables para propósitos de diseño, por conveniencia, en este trabajo se ha utilizado la definición de energía relativa y puede considerarse que los resultados correspondientes a la energía absoluta son similares. En lo sucesivo solo se llamará energía, omitiendo la palabra “relativa”.

1.5 MÉTODOS DE DISEÑO QUE UTILIZAN CONCEPTOS DE ENERGÍA

Como ya se ha mencionado, los códigos actuales de diseño sísmico tienen como objetivo principal evitar el colapso de las construcciones comunes y mantener funcionando aquellas construcciones en que las consecuencias de su falla son particularmente graves o aquellas en que es vital que no interrumpan sus actividades cuando se presente un evento sísmico excepcional (plantas nucleares, hospitales, estaciones de bomberos, subestaciones eléctricas, puentes, entre otras). Las estructuras actuales durante eventos sísmicos grandes pueden sufrir daños irreparables o muy costosos.

Para cuantificar la capacidad de deformación inelástica los códigos actuales recurren a la capacidad de desplazamiento dúctil, μ , y también lo usan como indicador del factor de reducción de fuerzas cuando se considera comportamiento inelástico. Este comportamiento inelástico provoca daño a los elementos estructurales que debe ser tomado en cuenta en el análisis y diseño de la estructura. Actualmente se utiliza la distorsión de entrepiso o el máximo desplazamiento

relativo entre niveles consecutivos de la estructura para determinar el daño que ésta sufrirá, siempre y cuando no exista falla por cortante. Recientemente se ha reconocido que se deben considerar otros parámetros como la deformación plástica acumulada y la degradación de los materiales para definir los niveles de daño en una estructura (Fajfar, 1992). También han aparecido un gran número de procedimientos y métodos de diseño basados en desempeño que permitirán que los diseño de los bienes inmuebles y negocios se realicen considerando el daño que puede ser aceptados por los propietarios y así evitar las costosas interrupciones cuando se presente un sismo intenso.

Breve descripción de los métodos propuestos en la literatura

En esta sección se plantea dar una breve descripción de los métodos de diseño basados en desempeño que utilizan conceptos de energía. Sólo se presentan sus principales formulaciones ya que su evaluación se escapa de los objetivos de esta tesis.

Housner (1956) propuso por primera vez una metodología de diseño basada en energía para estructuras simples como tanques elevados o plataformas costeras petroleras. En su trabajo Housner define la energía de entrada como la suma de energía almacenada y disipada por una estructura y reconoce la importancia de la disipación de energía en las estructuras y la implicación que tiene la energía plástica en el daño estructural. Sin embargo, estos conceptos fueron ignorados en diseño sismorresistente alrededor de un cuarto de siglo por la aparente complejidad en la cuantificación de las demandas y capacidades de energía y de su implementación en los procesos de diseño (Fajfar y Vidic, 1994).

En años recientes estos conceptos han llamado la atención de numerosos autores (Akiyama, 1985; Uang y Bertero, 1988 y Fajfar y Krawinkler, 1992) que han retomado la idea principal de Housner y han realizado estudios más detallados sobre estos conceptos. Todos estos métodos utilizan el siguiente enfoque de demanda-suministro de energía

$$\text{Demanda Sísmica de Energía} \leq \text{Suministro Sísmico de Energía} \quad (1.16)$$

La ecuación (1.16) plantea que la entrada o demanda de energía (la energía que el sismo introduce a la estructura) no debe ser mayor que el suministro de energía (mecanismos de almacenamiento y disipación de energía). Por lo tanto, parece razonable estudiar el peligro sísmico desde el punto de vista de demanda de energía y después compararlo con la vulnerabilidad estructural dada por el suministro de la misma. Para que el diseño de una estructura resulte adecuado se debe satisfacer la ecuación (1.16) para todos los niveles sísmicos de diseño considerados, además de complementarse con recomendaciones para el control de daño tales como limitaciones en las demandas de desplazamientos y de ductilidades (Terán-Gilmore, 1996a y Terán-Gilmore, 1996b). Estos métodos también deben garantizar que las fuerzas y momentos actuantes sean menores que los resistentes.

Existe gran discusión sobre la incertidumbre en la estimación de los suministros de energía en estructuras, por lo que la mayoría de los métodos son muy simplificados. En el Anexo de este trabajo se hace una descripción detallada de dos de estos métodos.

1.6 PREDICCIÓN DE ENERGÍA

Como se ha planteado anteriormente la energía puede ser considerada como un parámetro de diseño ya que puede relacionarse con el peligro sísmico y con el daño estructural. Para poder aplicar los métodos de diseño basados en energía es necesario estimar la energía mediante fórmulas sencillas que el diseñador pueda emplear en la práctica profesional sin requerir un análisis completo de registros de aceleraciones. En esta sección se hace una breve revisión de algunas de las fórmulas que han sido propuestas en la literatura para estimar la energía elástica e inelástica de entrada y de histéresis.

1.6.1 Fórmulas para periodo estructural constante

A partir de que se implementaron parámetros de energía en los métodos de diseño varios autores propusieron fórmulas simples para estimar la energía de entrada por unidad de masa (E_I/m). Las primeras ecuaciones fueron obtenidas de forma empírica basadas en los espectros de energía obtenidos en varios sitios. Estas fórmulas no dependen del periodo estructural por lo que están lejos de representar las características de un espectro. A manera de comparación se presentan en este trabajo algunas de estas fórmulas.

Kuwamura y Galambos (1989) proponen la siguiente fórmula:

$$\frac{E_I}{m} = 0.85 \frac{v_g}{a_g} \int a_g^2(t) dt \quad (1.17)$$

donde $a_g(t)$ es la aceleración del terreno como función del tiempo, v_g y a_g son la velocidad y la aceleración pico del movimiento del suelo, respectivamente.

Fajfar y otros (1991) proponen las dos ecuaciones siguientes:

$$\frac{E_I}{m} = 2.2 v_g^2 t_D^{0.5} \quad (1.18)$$

$$\frac{E_I}{m} = 0.24 a_g^{0.75} v_g^{1.25} t_D^{0.75} \quad (1.19)$$

donde t_D es la duración del movimiento fuerte del terreno y los otros parámetros fueron definidos anteriormente.

Uang y Bertero (1990) proponen la siguiente expresión en función de los parámetros previamente definidos:

$$\frac{E_I}{m} = \frac{1}{2} ((1.0 + 0.12 t_D) v_g)^2 \quad (1.20)$$

Como puede observarse, estas expresiones dependen solo de las características del movimiento del suelo. Sin embargo, la cantidad de energía impuesta a una estructura durante un terremoto depende de las características del movimiento y de la estructura misma.

En la Figura 1.10 se muestran los espectros de energía de entrada para algunas estaciones localizadas a diferentes distancias al área de ruptura y sobre diferentes tipos de suelo para el sismo del 19 de septiembre de 1985 en el componente este-oeste.

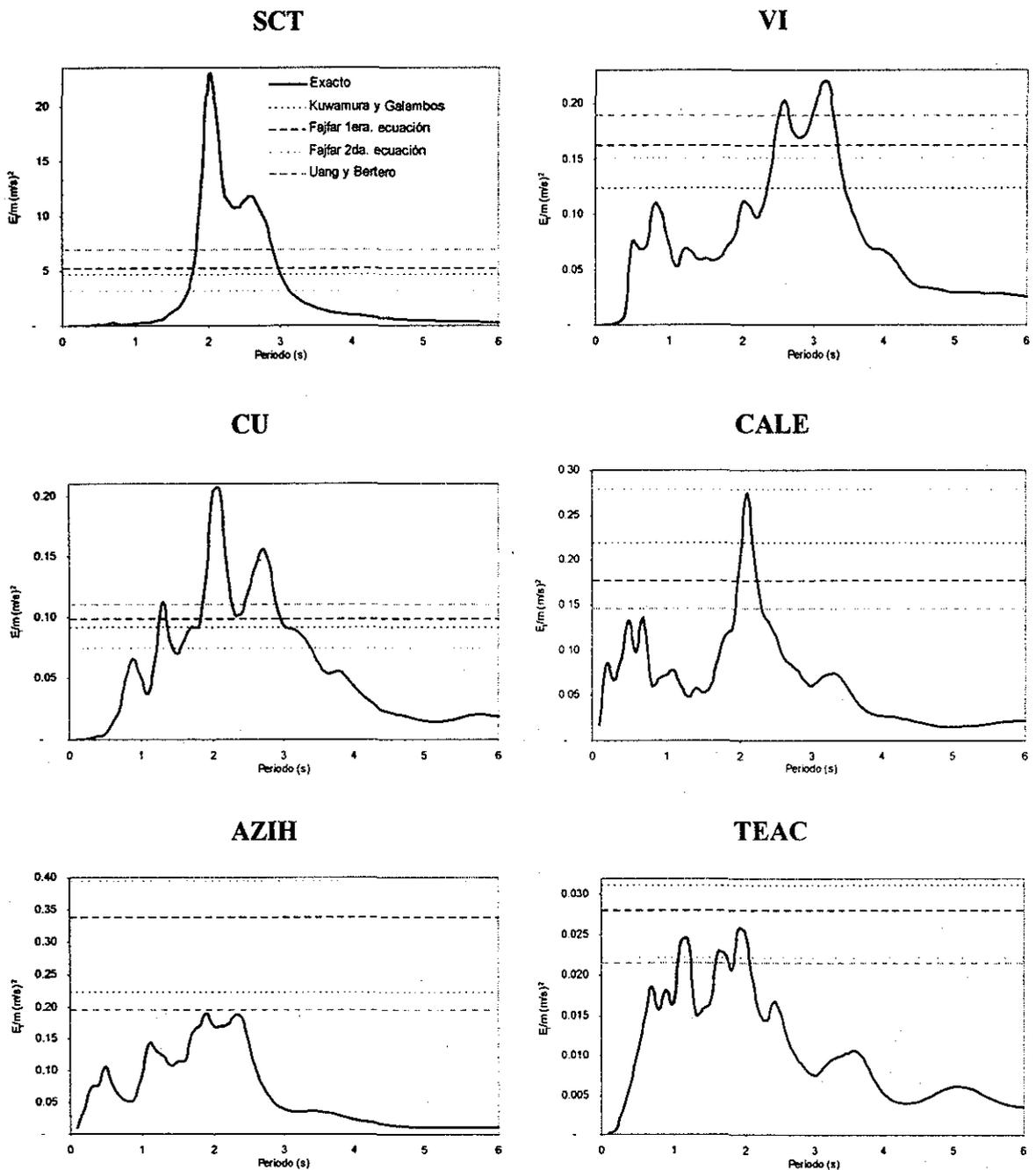


Figura 1.10 Comparación del espectro elástico de energía de varias estaciones que registraron el sismo del 19 de septiembre de 1985 con las fórmulas propuestas por algunos autores

Los parámetros utilizados para la aplicación de las ecuaciones anteriores están resumidos en la Tabla 1.1. Los valores de estos parámetros fueron obtenidos con los registros de movimiento procesados en el Degtra 2000 (Ordaz y Montoya, 2000). Este programa define la fase intensa (t_D) como el tiempo de la señal en que se desarrolla el 5% y el 95% de la intensidad de Arias.

Tabla 1.1 Parámetros utilizados para la aplicación de las fórmulas (1.17) a (1.20)

Est.	Características	t_D (s)	a_g (m/s ²)	v_g (m/s)	$\int \dot{p}_g^2(t) dt$ (m/s ²) ²
SCT	DF, Lago	43.1	1.680	0.607	15.30
VI	DF, Transición	38.8	0.559	0.109	0.75
CU	DF, Lomas	37.4	0.339	0.086	0.43
CALE	Área de ruptura, Firme	28.4	1.420	0.123	2.99
AZIH	Cerca del epicentro, Firme	19.7	1.630	0.186	2.30
TEAC	Lejos del epicentro, Firme	26.4	0.234	0.050	0.17

Las ecuaciones propuestas dan una idea de la demanda máxima de energía elástica de entrada (E_i) para diferentes sitios. Sin embargo, en algunas estaciones sobretodo en terreno blando (SCT) y cercanas a la fuente (AZIH) no proporcionan una buena estimación. Además, estas ecuaciones proporcionan resultados independientes del período lo cual puede arrojar graves errores cuando se pretende estimar la demanda de energía de una estructura en particular. Es evidente que para proponer un valor de energía de entrada confiable se requieren de ecuaciones que involucren más parámetros que los incluidos en las ecuaciones (1.17) a (1.20). Por ello, se requiere de análisis más completos en los que se obtengan estimaciones de la energía en función del periodo de la estructura, de la respuesta del sistema, de las características del sitio que se analiza, de la magnitud del sismo y de la distancia epicentral.

1.6.2 Predicción espectral

Varios autores han observado una relación de la energía elástica de entrada con el espectro de velocidad al cuadrado. Recientemente se ha comprobado que existe mejor correlación de las ordenadas del espectro de energía con el espectro de amplitudes de Fourier. En esta sección se presentan algunas fórmulas para predecir la energía basadas en estas similitudes. Estas fórmulas consideran indirectamente las características de la estructura y son dependientes del periodo estructural.

En la Figura 1.11 se muestra la comparación del espectro de energía de entrada de la estación VILE con dos espectros: el de velocidad al cuadrado, Sv^2 (Figura 1.11a), y el de Fourier al cuadrado, Fs^2 (Figura 1.11b). También se muestra la comparación del espectro de velocidad equivalente de energía de entrada (definido como: $v_e = \sqrt{2E_i/m}$) con los espectros de velocidad, Sv (Figura 1.11c) y de amplitudes de Fourier suavizado, Fs (Figura 1.11d). Estas comparaciones tienen una mejor correlación que la obtenida con las expresiones (1.17) a (1.20) (Hirao, *et al.*, 1988) aunque tienen la gran desventaja de que no dependen de parámetros sencillos y que no es fácil predecir espectros de Fourier o de velocidad. De estas comparaciones la que más se asemeja al espectro del registro original es la que muestra el espectro de velocidad basado en energía con el espectro de amplitudes de Fourier suavizado (Figura 1.11d) siendo casi idénticos como lo demostraron con un planteamiento matemático Kuwamura y otros (1994).

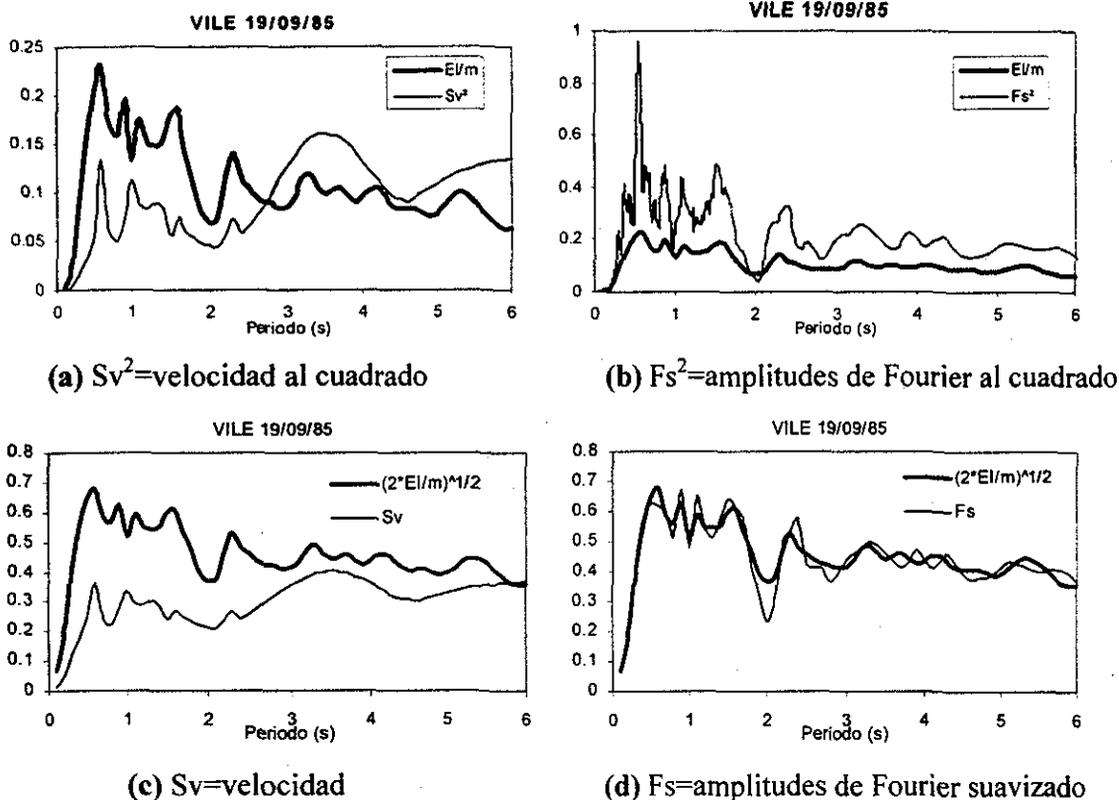


Figura 1.11 Comparación del espectro de energía para la estación VILE del sismo del 19 de septiembre de 1985 con otros espectros

A partir de estas comparaciones algunos investigadores han propuesto fórmulas para determinar la energía dependientes de estos parámetros. Éstas consideran indirectamente las características del suelo y de la estructura.

Expresiones para determinar espectros de histéresis, E_H

Fajfar y Vidic (1994) proponen determinar los espectros inelásticos de energía de entrada mediante los espectros de energía histerética y una expresión que relaciona ambas. Así, proponen que el espectro histerético se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{E_H}{m} = \left(\frac{\gamma \mu Sa(T)}{R \omega} \right)^2$$

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

(1.21)

donde $Sa(T)$ es el espectro elástico de pseudoaceleración en función del periodo de la estructura, ω es la frecuencia natural de vibración, μ el factor de ductilidad, R el factor de reducción de resistencia γ es un factor que fue introducido por los autores y se describe más adelante. Se observa la dependencia directa de esta fórmula con el espectro de pseudovelocidad ($Sa(T)/\omega$). Existen varias fórmulas para determinar el factor de reducción de resistencia (R) en los diferentes

tipos de suelo del valle de México, entre éstas se pueden citar las propuestas de Miranda (1993) y de Ordaz y Pérez-Rocha (1998).

Basados en estudios paramétricos Fajfar y Vidic (1994) propusieron una fórmula aproximada y simple para determinar el factor γ . Sus estudios muestran que este factor depende principalmente de las características del movimiento del terreno. Adicionalmente influyen algunos parámetros estructurales como son: el período de la estructura, la ductilidad y el modelo de comportamiento histerético. Este factor puede considerarse prácticamente independiente del coeficiente de amortiguamiento crítico y ligeramente dependiente del modelo de comportamiento inelástico y de la demanda de ductilidad. Ellos propusieron la siguiente fórmula:

$$\gamma = z_T z_\mu z_g \tag{1.22}$$

donde z_T , z_μ y z_g son funciones del período natural, de la ductilidad y del movimiento del terreno, respectivamente.

Para considerar la influencia del período de la estructura ellos consideran tres regiones en el intervalo de periodos que corresponden a periodos cortos, medianos y largos del tipo de espectro elástico de Newmark-Hall. El valor de z_T para dos modelos de comportamiento histerético está dado en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Valores de z_T para dos modelos de comportamiento inelástico

Modelo	$T < T_1$	$T_1 < T < T_2$	$T > T_2$
Bilineal	0.90	$0.90 - 0.25 \frac{T - T_1}{T_2 - T_1}$	0.65
Q	$1.05 - 0.30 \frac{T}{T_1}$	$0.75 - 0.25 \frac{T - T_1}{T_2 - T_1}$	0.50

T_1 y T_2 son los periodos de transición límite entre las regiones de periodos cortos, medios y largos del espectro elástico de Newmark-Hall. El periodo T_1 representa el predominante del terreno.

La función que determina la influencia de la ductilidad está definida como:

$$z_\mu = \frac{(\mu - 1)^{c_\mu}}{\mu} \tag{1.23}$$

donde $c_\mu = 0.7$ en caso de modelo bilineal y masa proporcional al amortiguamiento, $c_\mu = 0.67$ en caso de modelo bilineal y rigidez instantánea proporcional al amortiguamiento y $c_\mu = 0.58$ en el caso de modelo de histeresis tipo Q (Fajfar y Vidic, 1994).

La influencia relativa del movimiento del terreno la determinaron usando los resultados de investigaciones previas. Consideraron que la máxima energía de entrada que es impartida a estructuras de períodos fundamentales cercanos al predominante del terreno depende principalmente de las características del movimiento. También consideraron que el máximo

desplazamiento relativo en el período T_1 es más o menos proporcional al producto de la velocidad máxima del terreno por T_1 , y que la relación E_H/E_I es prácticamente independiente del movimiento del terreno. Tomando en cuenta todo lo anterior determinaron la siguiente función:

$$z_g = \left(\frac{\int a^2(t) dt}{a_g v_g} \right)^{c_g} \quad (1.24)$$

donde c_g es un factor que se determina basado en la relación de la vecindad del período T_1 . Se recomienda utilizar $c_g = 0.4$.

Manfredi (2001) propone obtener la energía histerética con una expresión basada en el número de ciclos equivalentes, n_{eq} , en el espectro de pseudovelocidad, $Sa(T)/\omega$, en la definición del factor de reducción de resistencia, R y en la ductilidad cíclica μ_c . Él propone la siguiente expresión:

$$\frac{E_H}{m} = (\mu_c - 1) n_{eq} \left(\frac{Sa(T)}{\omega} \right)^2 \left(\frac{1}{R} \right)^2 \quad (1.25)$$

donde define a la ductilidad cíclica como $\mu_c = 1 + \Delta x_{max}/x_y$, en que Δx_{max} es la máxima amplitud de deformación plástica y x_y es el desplazamiento de fluencia.

El valor del número de ciclos equivalentes, n_{eq} , representa el número de ciclos de igual amplitud y de desplazamiento plástico máximo que la estructura debe desarrollar para disipar el total de la energía histerética. Basado en un análisis estadísticos él propone la siguiente expresión:

$$n_{eq} = 1 + 0.18(R - 1)^{3.5} I_D \delta^{-1.6} \tau^{-1.2} \quad (1.26)$$

donde $\tau = T/T_1$ $T \leq T_1$, $\tau = 1$ $T > T_1$
 $\delta = \xi/\xi_0$ $\xi \geq \xi_0$, $\delta = 1$ $\xi < \xi_0$

ξ es la fracción de amortiguamiento crítico, $\xi_0 = 5\%$, T_1 es el período predominante del terreno y I_D es un índice sísmico.

El valor del índice sísmico, I_D , es igual a:

$$I_D = \frac{\int a_g^2(t) dt}{a_g v_g} \quad (1.27)$$

donde cada uno de los factores empleados ha sido definido anteriormente

Comparación de las expresiones para espectros de histéresis, E_H

Para poder utilizar las fórmulas anteriores se obtuvieron los períodos de transición con base a la definición de Newmark-Hall para lo cual se seleccionaron factores de amplificación de

aceleración, velocidad y desplazamiento para el grupo estándar, $c_a=2.5$, $c_v=2.0$ y $c_d=1.8$, respectivamente, y se utilizaron los datos de la Tabla 1.1 en las expresiones siguientes:

$$T_1 = 2\pi \frac{c_v v_g}{c_a a_g} \quad (1.28)$$

$$T_2 = 2\pi \frac{c_d d_g}{c_v v_g} \quad (1.29)$$

Para los valores de z_μ y z_T se consideró un modelo bilineal y se empleó el factor de reducción de resistencia R_μ , propuesto por Miranda (1993) que se muestra a continuación:

$$R_\mu = \frac{\mu - 1}{\Phi} + 1 \geq 1 \quad (1.30)$$

donde Φ es una función que depende del tipo de suelo definida con las siguientes ecuaciones:

$$\Phi = 1 + \frac{T_g}{3T} - \frac{3T_g}{4T} \exp \left[-3 \left(\ln \frac{T}{T_g} - \frac{1}{4} \right)^2 \right] \quad (\text{suelo blando}) \quad (1.31a)$$

$$\Phi = 1 + \frac{1}{12T - \mu T} - \frac{2}{5T} \exp \left[-2 \left(\ln T - \frac{1}{5} \right)^2 \right] \quad (\text{transición}) \quad (1.31b)$$

$$\Phi = 1 + \frac{1}{10T - \mu T} - \frac{1}{2T} \exp \left[-\frac{3}{2} \left(\ln T - \frac{3}{5} \right)^2 \right] \quad (\text{terreno firme}) \quad (1.31c)$$

También se consideró un factor de amortiguamiento crítico, $\xi=5\%$, una demanda de ductilidad, $\mu=4$, y se propuso un valor de ductilidad cíclica $\mu_c=4.5$. Al sustituir todos los valores anteriores en las expresiones (1.21) y (1.25) se obtuvieron los espectros de histéresis a partir de las expresiones propuestas por Fajfar y Vidic (1994) y por Manfredi (2001), respectivamente. Adicionalmente para la estación SCT se empleó la expresión de Manfredi con el factor de reducción de resistencia real (Manfredi_Real). Estas predicciones se compararon con el espectro de histéresis exacto como lo muestra la Figura 1.12 para algunas estaciones que registraron el sismo del 19 de septiembre de 1985 en el componente este-oeste.

Se observa que ambas propuestas tienen una buena aproximación al espectro exacto en la mayoría de las estaciones analizadas, aunque en ambas se observa una sobreestimación de la energía en periodos largos ($T>2s$). En la estación SCT la expresión propuesta por Manfredi sobreestima mayormente al espectro de energía y al emplear el factor de reducción de resistencia real (R_{real}), la predicción se mejora para periodos largos. Esto se debe a que en esta estación el factor de reducción propuesto por Miranda subestima al real.

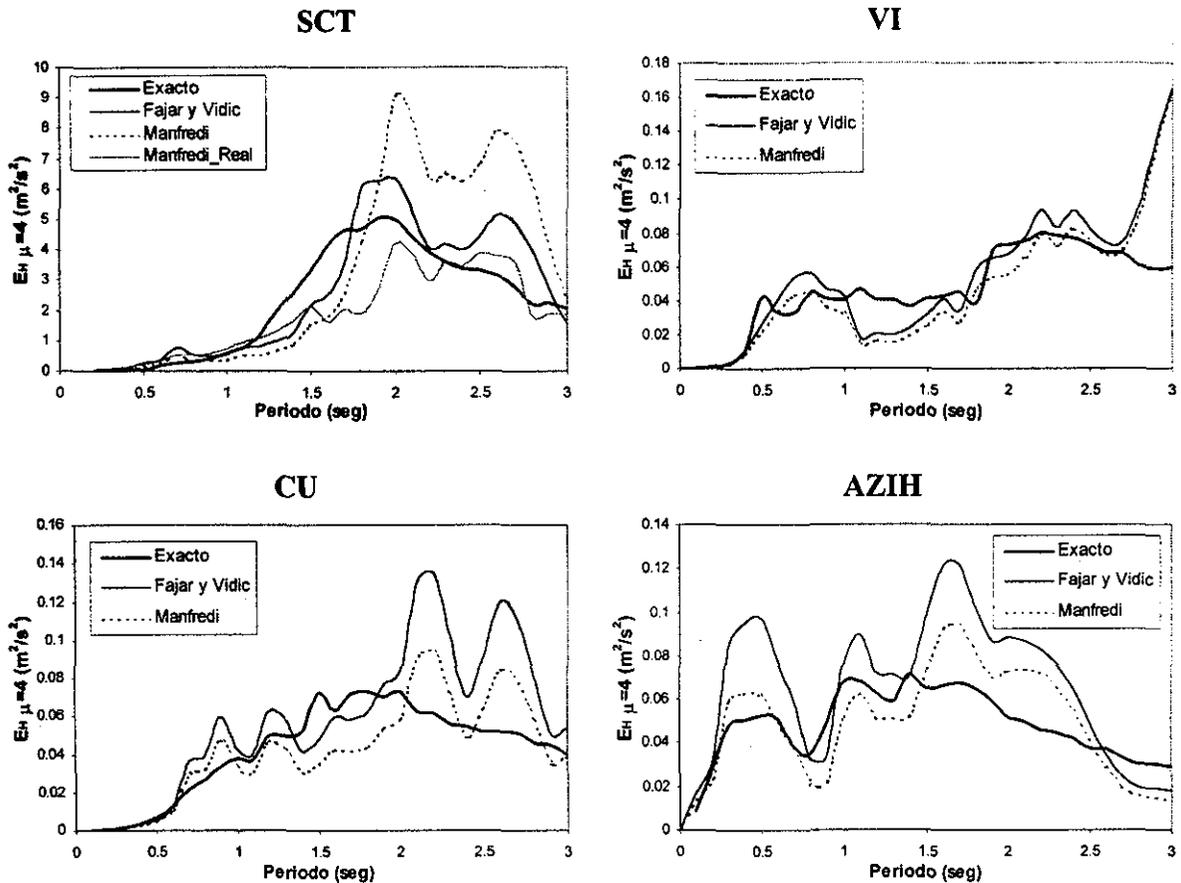


Figura 1.12 Comparación del espectro de energía de histerésis con las fórmulas propuestas

Una desventaja del uso de estas expresiones es que se debe conocer el espectro de pseudoaceleración y éste no es sencillo predecir.

Expresión para determinar la energía de entrada, E_I

Otra propuesta para aproximar el espectro elástico de energía de entrada (E_I) es la presentada por Chai y Fajfar (2000). Esta expresión está basada en la similitud de la velocidad equivalente de energía (v_e) con el espectro de Fourier ($F(\omega)$), por lo que ellos proponen estimar el espectro de Fourier mediante una función que depende de un factor de amplificación Ω_v y de la velocidad máxima del terreno, v_g . Estos se muestran en la siguiente ecuación:

$$|F(\omega)| \approx v_e = \sqrt{\frac{2E_I}{m}} = \Omega_v v_g \tag{1.32}$$

El factor de amplificación Ω_v está dado por:



$$\Omega_v = \begin{cases} \Omega_v^* \left[\frac{T}{T_c} \right] & 0 \leq T \leq T_c \\ \Omega_v^* \left[\frac{T}{T_c} \right]^{-\lambda} & T_c < T < \infty \end{cases} \quad (1.33)$$

donde Ω_v^* es igual al factor de amplificación de velocidad equivalente de la energía de entrada y λ es un parámetro que define la forma del espectro y es mayor o igual a cero ($\lambda \geq 0$). Un valor de $\lambda=0$ corresponde a un espectro bilineal. El factor Ω_v^* puede determinarse mediante la siguiente expresión (Chai y Fajfar, 2000):

$$\Omega_v^* = \frac{a_g}{Zv_g} \sqrt{t_D T_s} \sqrt{\frac{\lambda + 1/2}{2\lambda + 2}} \quad (1.34)$$

donde T_s es el periodo dominante del terreno. Como se observa la expresión (1.34) es función de parámetros del movimiento del terreno y del factor Z definido a continuación:

$$Z = \sqrt{\frac{v_g^2 t_D}{\int a_g^2(t) dt}} \quad (1.35)$$

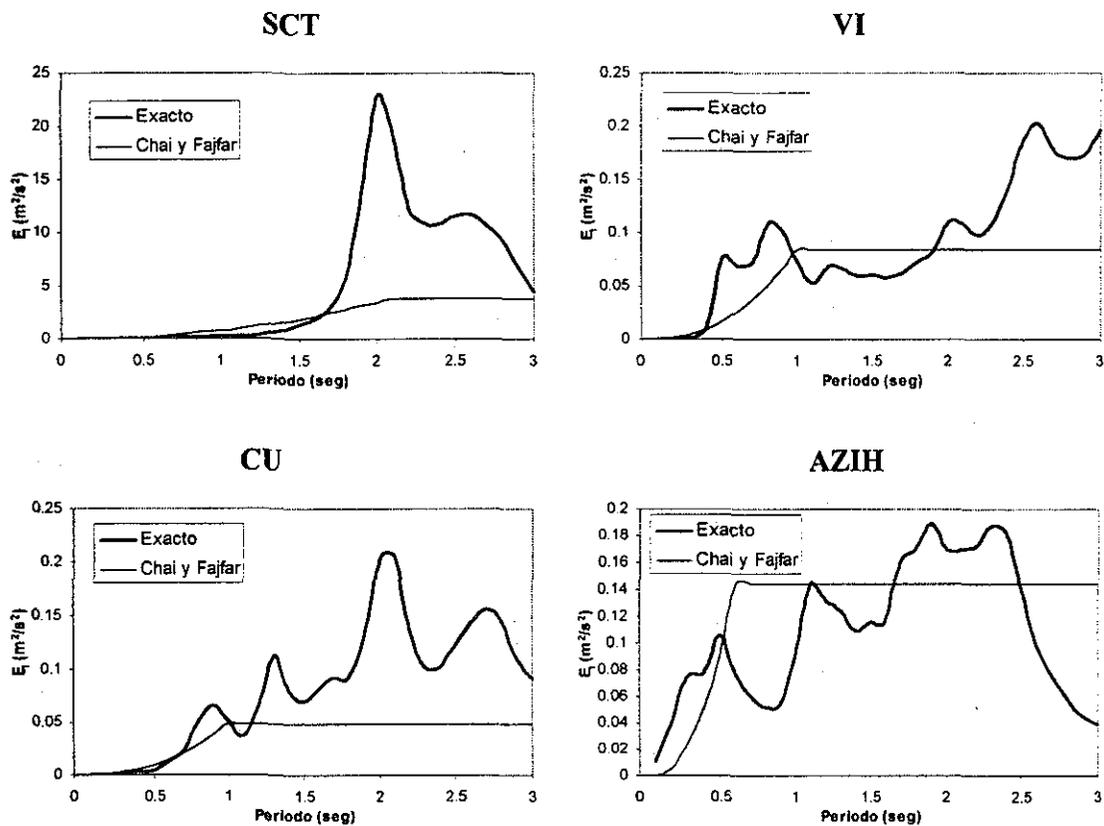


Figura 1.13 Espectros de energía de entrada propuestos por Chai y Fajfar (2000)

Al aplicar estas fórmulas con los valores de la Tabla 1.1 para algunas estaciones que registraron el sismo del 19 de Septiembre de 1985 en el componente este-oeste y proponiendo un valor de $\lambda=0$ (espectro bilineal) se obtiene la comparación mostrada en la Figura 1.13. En esta comparación se muestra que la expresión propuesta por Chai y Fajfar (2000) sólo tiene una aproximación razonable con el espectro elástico de energía de entrada de las estaciones VI y AZIH. En las otras estaciones la estimación no es buena ya que la aproximación al espectro de Fourier que hace es muy simplificada.

Energía de entrada en términos del espectro de amplitudes de Fourier

La energía de entrada relativa (ecuación 1.7) puede también expresarse en términos del espectro de amplitudes de Fourier utilizando las propiedades de su transformada (Ordaz, 2001). Al hacer el cambio de variable $dx = \dot{x} dt$ en la ecuación (1.7) se obtiene la siguiente integral en el tiempo:

$$E_I = - \int m \dot{x}_g \dot{x} dt \quad (1.36)$$

La velocidad de la masa (\dot{x}) se puede escribir en términos de la transformada de Fourier de la velocidad, $\dot{x}(\omega)$, de la siguiente forma:

$$\dot{x}(t) = \frac{1}{2\pi} \int \dot{x}(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (1.37)$$

Sustituyendo la expresión (1.37) en (1.36) se tiene:

$$E_I = - \frac{m}{2\pi} \int \dot{x}_g(t) \int \dot{x}(\omega) e^{i\omega t} d\omega dt \quad (1.38)$$

Reacomodado términos la expresión anterior se puede presentar de la siguiente manera:

$$E_I = - \frac{m}{2\pi} \int \dot{x}(\omega) \int \dot{x}_g(t) e^{i\omega t} dt d\omega \quad (1.39)$$

La transformada inversa de Fourier de la aceleración del terreno, $\dot{x}_g(\omega)$, es de la siguiente forma,

$$\dot{x}_g(\omega) = \int \dot{x}_g(t) e^{-i\omega t} dt \quad (1.40)$$

así, la integral central de la expresión (1.39) se puede sustituir por $\dot{x}_g(\omega)$ resultando la ecuación siguiente:

$$E_I = - \frac{m}{2\pi} \int \dot{x}(\omega) \dot{x}_g(-\omega) d\omega \quad (1.41)$$

De acuerdo a las propiedades de la transformada de Fourier, $\dot{x}_g(-\omega) = \dot{x}_g^*(\omega)$, además, la transformada de la velocidad se puede obtener con, $\dot{x}(\omega) = x_g(\omega) H_V(\omega)$ donde H_V es la función de transferencia de la velocidad, sustituyendo estas expresiones en la ecuación anterior:

$$E_I = -\frac{m}{2\pi} \int |x_g(\omega)|^2 H\nu(\omega) d\omega \quad (1.42)$$

Para simplificar los cálculos, esta integral se expresa como 2 veces la integral definida en el área positiva, es decir valuada de cero a infinito y la función de transferencia se sustituye por su parte real. Así se obtienen la siguiente expresión exacta del espectro de energía elástica de entrada.

$$E_I = -\frac{m}{\pi} \int_0^{\infty} |x_g(\omega)|^2 \text{Re}\{H\nu(\omega)\} d\omega \quad (1.43)$$

Con una buena estimación del espectro de amplitudes de Fourier se puede obtener fácilmente el espectro de energía. Ya que se considera un sistema de un grado de libertad con amortiguamiento y con comportamiento elástico, la parte real de la función de transferencia es la siguiente:

$$\text{Re}\{H\nu(\omega)\} = -\frac{2\xi\omega^2\omega_0}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\xi\omega\omega_0)^2} \quad (1.44)$$

Esta expresión es exacta, por lo que al utilizar datos de un registro real los espectros deben ser idénticos. Lo anterior se ejemplifica con los espectros mostrados en la Figura 1.14

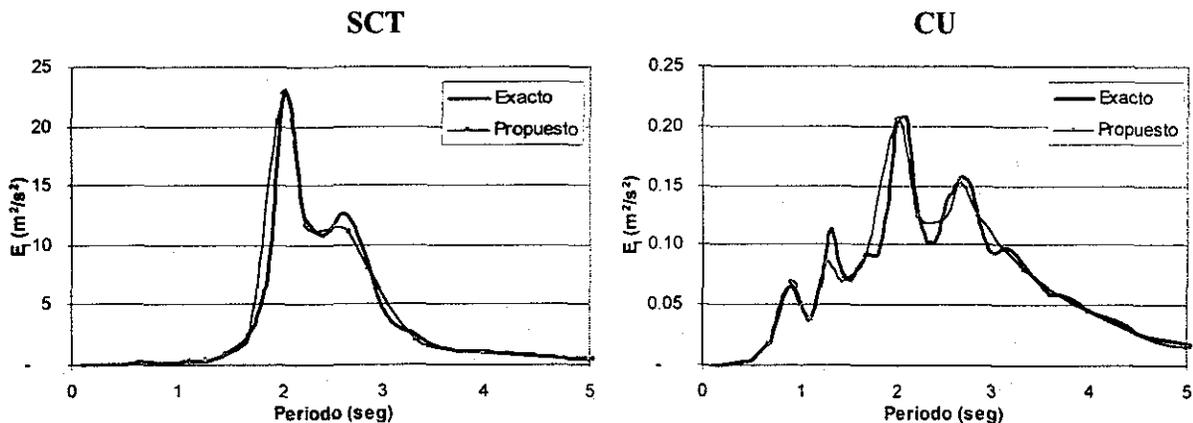


Figura 1.14 Comparación de los espectros de energía de entrada con la expresión propuesta

En resumen, se recomienda emplear las expresiones de Fajfar y Vidic (1994) y de Manfredi (2001) para la estimación de la energía de histéresis en el valle de México. Debido a la mala aproximación de la expresión propuesta por Chai y Fajfar (2000) no se recomienda su uso en suelos blandos como el del valle. La última expresión obtenida en función del espectro de amplitudes de Fourier y de la función de transferencia es una herramienta que puede ser empleada con relativa facilidad y con excelente aproximación.

En este capítulo se han presentado las expresiones para predecir los espectros de energía histerética y de entrada, en el siguiente capítulo se presentaran las expresiones que relacionan ambos espectros de energía.

ENERGÍA SÍSMICA DE MOVIMIENTO FUERTE EN MEXICO

En el capítulo anterior se planteó la necesidad de mejorar los procedimientos actuales de diseño sismorresistente y se indicó que las metodologías basadas en energía pueden dar una mejor representación del comportamiento de las estructuras que son sometidas a movimientos del terreno de gran amplitud y duración. En este capítulo se comprueba la poca correlación que existe entre los espectros de respuesta de aceleración y velocidad calculados en la zona epicentral con la magnitud del sismo. También se hace un breve análisis de la energía sísmica observada en México utilizando para ello los espectros elásticos de energía de entrada calculados conforme a la definición de energía relativa presentada en el capítulo anterior y se recalcan sus principales características.

Para los análisis realizados en este trabajo se han seleccionado algunos sismos de magnitud moderada a intensa que han producido daños a las estructuras. Los epicentros de estos sismos se localizan en la costa del Océano Pacífico mexicano (sismos de subducción) a excepción de dos sismos de falla normal localizados en los límites de los estados de Puebla y Oaxaca (15 de junio de 1999) y de Puebla y Guerrero (21 de julio de 2000). En la Figura 2.1 se muestran las áreas de ruptura de estos sismos, en algunos el área de ruptura es tan pequeña que corresponde a un solo punto y coincide con el epicentro, es esta figura también se muestra entre paréntesis la magnitud de cada sismo.

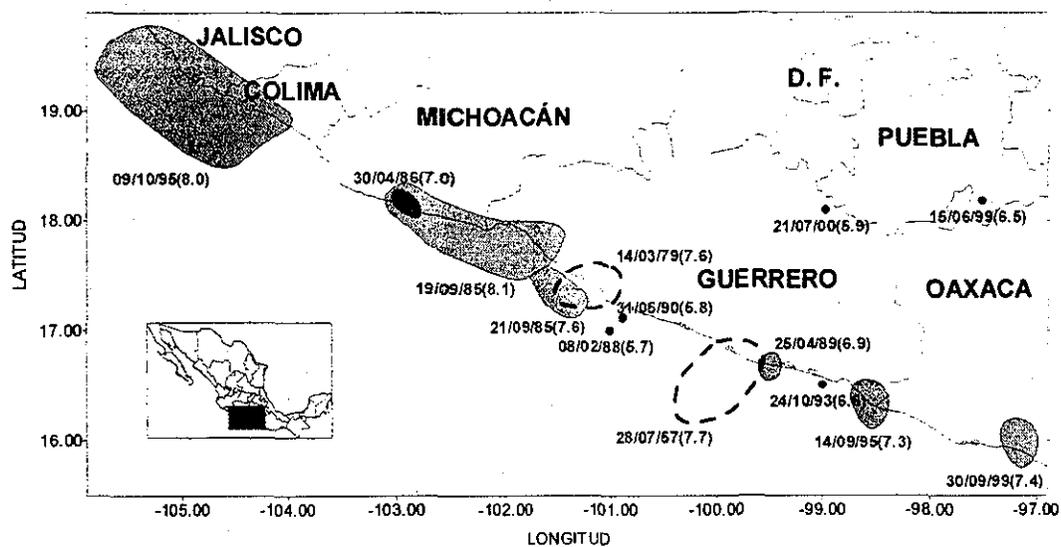


Figura 2.1 Localización de algunas áreas de ruptura y epicentros de sismos de magnitud mediana y grande

En la mayoría de estos sismos se han reportado daños en las construcciones localizadas en un radio cercano a las áreas de ruptura de los mismos y también han provocado movimiento de gran intensidad en el suelo blando del valle de México. En los sismos de mayor magnitud se han reportado considerables daños en las construcciones de la ciudad de México ya que ésta es especialmente vulnerable a los sismos de subducción que se originan en esta zona. En la Tabla 2.1 se presenta una relación de los sismos que fueron empleados y algunas de sus principales características.

Tabla 2.1 Características de los sismos utilizados en este trabajo

FECHA	ORIGEN	MAGNITUD	LATITUD	LONGITUD	DISTANCIA
19/09/85	Subducción	8.1	18.08	102.94	280
21/09/85	Subducción	7.6	18.02	101.48	310
30/04/86	Subducción	7.0	18.14	102.94	400
08/02/88	Subducción	5.7	17.49	101.16	300
25/04/89	Subducción	6.9	16.60	99.40	250
31/05/90	Subducción	5.9	17.17	100.89	290
24/10/93	Subducción	6.6	16.54	98.98	280
14/09/95	Subducción	7.3	17.00	99.00	280
09/10/95	Subducción	8.0	18.85	104.53	515
15/06/99	F Normal	6.5	18.18	97.51	230
30/09/99	Subducción	7.4	15.95	97.03	420
21/07/00	F Normal	5.9	18.09	98.97	145

Para esta primera parte del estudio se utilizaron varios registros de las estaciones de la Red Acelerométrica de Guerrero, la mayoría de estas estaciones se localizan sobre terreno firme a excepción de ACAD, ACAZ y CAYA. Para observar los efectos de amplificación regional en la zona de lomas del valle de México se utilizó el registro de la estación localizada en Ciudad Universitaria (CU). En la Figura 2.2 se muestran estas estaciones.

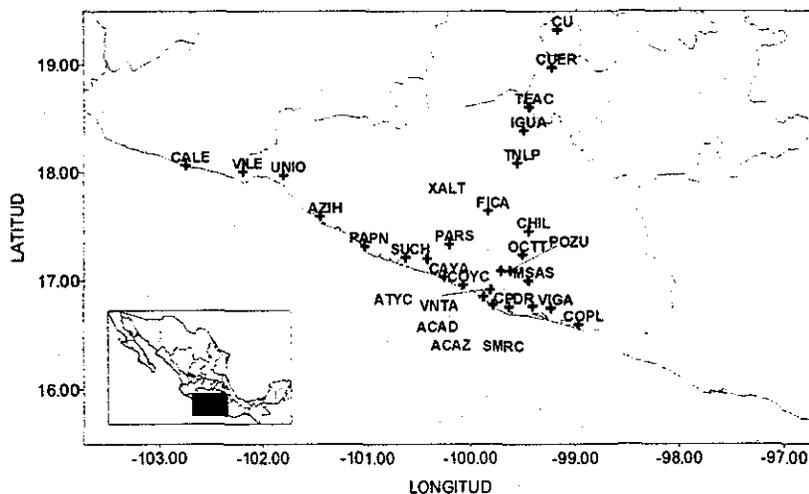


Figura 2.2 Localización de algunas estaciones de la Red Acelerométrica de Guerrero y de la estación CU

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.1 MOVIMIENTO FUERTE DEL TERRENO EN LA ZONA EPICENTRAL

Hasta ahora se ha mencionado que los métodos de diseño actuales basados en los espectros de diseño de aceleración no siempre son una herramienta suficiente para un diseño adecuado, ya que en ocasiones no representan el comportamiento real de las estructuras. Para comprobar parte de esta afirmación se estudiaron las características del movimiento en la zona epicentral comparando los espectros elásticos de respuesta de aceleración, de velocidad y de energía de entrada para los registros correspondientes a varios eventos sísmicos.

Espectros de aceleración y de velocidad

Los espectros de diseño que contienen los reglamentos generalmente se obtienen trazando una envolvente de varios espectros de respuesta de un oscilador de un grado de libertad derivados de un estudio de peligro sísmico. Los espectros de respuesta representan los valores de respuesta máxima de varios osciladores caracterizados por su periodo natural de vibración y por un amortiguamiento dado, usualmente 5 por ciento. Por definición, estos espectros no consideran la contribución del movimiento del acelerograma completo sino solamente de los valores máximos. Se pueden obtener espectros de respuesta muy parecidos para dos acelerogramas con diferente forma, duración y contenido de frecuencias pero que produjeron la misma respuesta máxima del oscilador. Sin embargo, estos acelerogramas pueden introducir energía a la estructura con diferentes características e intensidades.

Recientemente se ha reconocido que las ordenadas de un espectro de respuesta no están siempre correlacionadas con el daño en los distintos sistemas estructurales. Como ejemplo se muestran en la Figura 2.3 los registros obtenidos en estaciones sobre roca localizadas a la misma distancia de la superficie de ruptura (alrededor de 19 km) durante cuatro sismos de diferentes magnitudes (5.7, 6.9, 7.6 y 8.1 correspondientes a los sismos del 8 de febrero de 1988, 25 de abril de 1989, 21 y 19 de septiembre de 1985, respectivamente) originados en la zona de subducción de las costas del Océano Pacífico mexicano.

Debido a que estos registros están todos sobre roca y que tienen la misma distancia a la superficie de ruptura, es de esperarse que sus diferencias sean atribuidas solo a la magnitud ya que la secuencia de ruptura es un efecto que generalmente se desprecia con fines de predicción de movimiento fuerte. Cabe destacar que de estos sismos el único en el que se registraron daños importantes en las construcciones de su zona epicentral fue durante el sismo del 19 de septiembre de 1985, por lo que se puede pensar que este registro debería tener mayor amplitud en la aceleración del terreno y mayores ordenadas espectrales. Sin embargo, los registros provenientes del sismo de menor magnitud presentan mayor aceleración del terreno que la de los registros de mayor magnitud. Por ejemplo: para el registro PAPH correspondiente al sismo de magnitud 5.7 se tiene una aceleración máxima del terreno de 434 cm/s^2 , que es cuatro veces mayor que la aceleración del registro VILE (104 cm/s^2) obtenida de un sismo con magnitud de 8.1. A pesar de que Nau y Hall (1984) mostraron que la aceleración máxima de terreno solo está bien correlacionada con la respuesta de estructuras de periodo corto, durante los sismos mencionados para la Figura 2.3 sólo existieron daños para el sismo del 19 de septiembre, y no para los otros que tienen mayores aceleraciones del terreno.

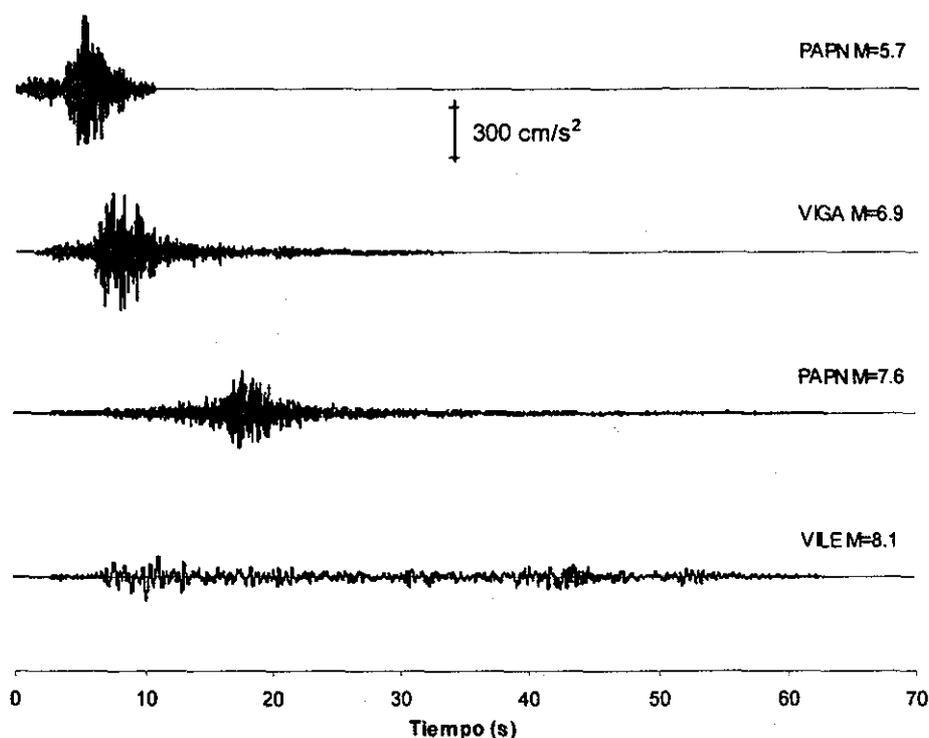


Figura 2.3 Registros de aceleración del terreno para cuatro sismos de diferentes magnitudes. Los registros se encuentran sobre roca a la misma distancia de la superficie de ruptura (19 km)

Esta observación confirma el hecho de que la aceleración del terreno no está correlacionada con la magnitud del sismo y por lo tanto tampoco está correlacionada con el daño ocasionado por éste. En la Figura 2.4 se muestra cómo varían los espectros elásticos de respuesta de aceleración con la magnitud. Para estas gráficas se utilizaron varios registros con la misma distancia a la superficie de ruptura de ocho sismos con diferentes magnitudes (5.2, 5.3, 5.7, 5.8, 6.9, 7.3, 7.6 y 8.1). Estas gráficas se calcularon obteniendo la envolvente de los espectros de respuesta de las estaciones seleccionadas en ambas direcciones y suavizando las variaciones de las ordenadas en la magnitud y periodo mediante una regresión matemática. A pesar de este suavizado, la tendencia de cada espectro (no se muestra en este trabajo) se refleja razonablemente bien en la Figura 2.4. Se observa que en los espectros de aceleración las ordenadas son menores tanto para los sismos pequeños ($M < 5.5$) como para los grandes ($M > 7.0$), mientras que son máximas para sismos de mediana magnitud ($M \approx 6.0$).

Esto no es congruente con el daño que han producido los sismos de gran magnitud en la zona epicentral, por lo que se puede confirmar que los espectros de aceleración, que incluyen la aceleración máxima del terreno (para $T=0s$), no están correlacionados con el daño que pueden sufrir las estructuras.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

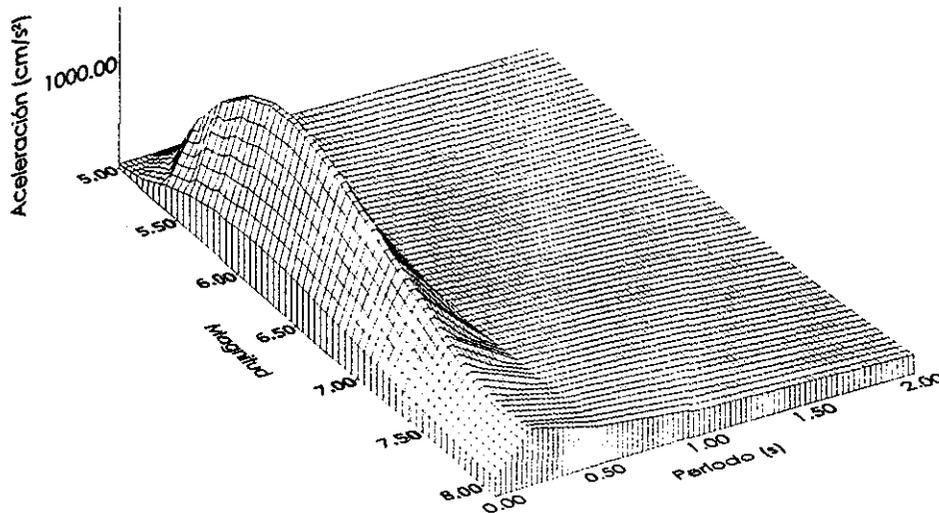


Figura 2.4 Representación espacial de los espectros elásticos de respuesta de aceleración para sismos con diferente magnitud; los registros corresponden a sitios sobre el área epicentral en la zona de subducción del Océano Pacífico mexicano

Al comparar los espectros elásticos de respuesta de velocidad (Figura 2.5) obtenidos de la misma forma y para los mismos registros utilizados en los espectros de aceleración, se observa que para periodos cortos ($T < 0.5s$) estas ordenadas espectrales siguen la misma tendencia que las de aceleración; es decir, que las ordenadas disminuyen para sismos de mayor magnitud. Sin embargo, para periodos largos las ordenadas espectrales se incrementan, aunque no de manera importante, con la magnitud. Esto indica que la velocidad espectral está mejor correlacionada con la magnitud del sismo y con el daño provocado por éste. Sin embargo, el daño observado en todas las estructuras, incluyendo las de periodo corto, no puede atribuirse a estas pequeñas diferencias. Housner (1975) reconoció que la velocidad espectral está mejor correlacionada con el daño que la aceleración y varios investigadores han observado que existe una correlación todavía mejor con el daño de la velocidad al cuadrado que es una medida de energía.

Como se aprecia en la Figura 2.3, los registros obtenidos de sismos severos tienen mayor duración, diferente contenido de frecuencias y, como se mostrará en adelante, mayor energía que los registros provenientes de sismos pequeños y moderados. La duración del movimiento es directamente proporcional a la magnitud del sismo; por lo tanto, esta duración también puede ser un parámetro que se podría utilizar para estimar el daño en estructuras. Una análisis más detallado sobre la duración y sus efectos se encuentra en el trabajo de Reinoso y Ordaz (2001). El hecho de que la energía elástica de entrada sea un resultado que toma en cuenta la amplitud y duración del movimiento ha promovido su uso en análisis de riesgo sísmico.

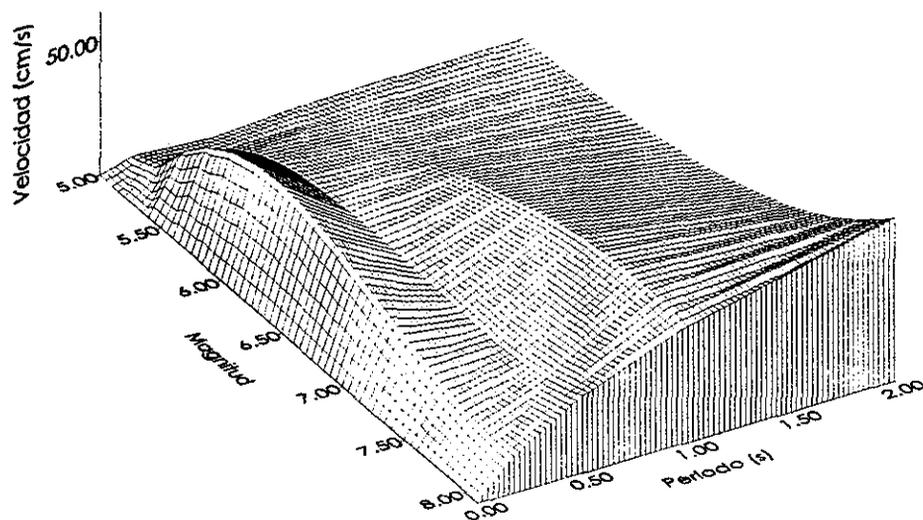


Figura 2.5 Representación espacial de los espectros elásticos de respuesta de velocidad para sismos con diferente magnitud; los registros corresponden a sitios sobre el área epicentral en la zona de subducción del Océano Pacífico mexicano

Espectros de energía

Como en los espectros de respuesta de aceleración y velocidad, los espectros de respuesta de energía se obtienen graficando la energía máxima de varios osciladores definidos por su periodo y amortiguamiento. Debido a la definición de energía de entrada (ecuación 1.17) estas respuestas se acumulan en el tiempo así que consideran las características completas del movimiento. Los espectros elásticos de energía de entrada muestran claramente que existe una relación estrecha de las ordenadas espectrales de energía con la magnitud del sismo y por lo tanto con el daño. Esto se aprecia en la representación espacial de la Figura 2.6 obtenida de la misma forma que las Figuras 2.4 y 2.5. Se observa un comportamiento muy similar al de los anteriores espectros para periodos cortos ($T < 0.5s$); para periodos mayores la energía permanece baja y constante para magnitudes menores a 7.5 grados pero se incrementa considerablemente cuando el sismo tiene una magnitud mayor o igual a ésta. Para estas gráficas se observa que existe una mejor correlación de la energía de entrada con el daño que los otros espectros ya que los sismos que produjeron daños importantes a las estructuras (y que pueden ocasionarlos en sismos futuros) son los que tienen magnitudes mayores de 7.0 grados. Sin embargo, existen otras formas de energía como la energía histerética normalizada (Terán-Gilmore, 1996a) que sí tienen una correlación directa con el daño de las estructuras.

La correlación directa con la magnitud del sismo se debe a que ésta produce incremento en la duración del movimiento el cual es un parámetro que tiene gran influencia en la cantidad de energía. A pesar de que se observa una disminución en la amplitud del movimiento con la magnitud como lo muestra la Figura 2.3 se concluye que ésta no es tan significativa en los

espectros de energía. Para poder entender las características del comportamiento de la energía de entrada es necesario analizar la variación de los espectros con diferentes parámetros. La magnitud del sismo tiene gran influencia en la cantidad de energía de entrada, pero como es de suponerse existen otros factores externos que afectan las ordenadas de energía como la distancia al área de ruptura, el mecanismo focal y las condiciones locales del suelo. El mecanismo focal no se estudiará en este trabajo por quedar fuera de los alcances, los otros dos factores se analizarán a continuación.

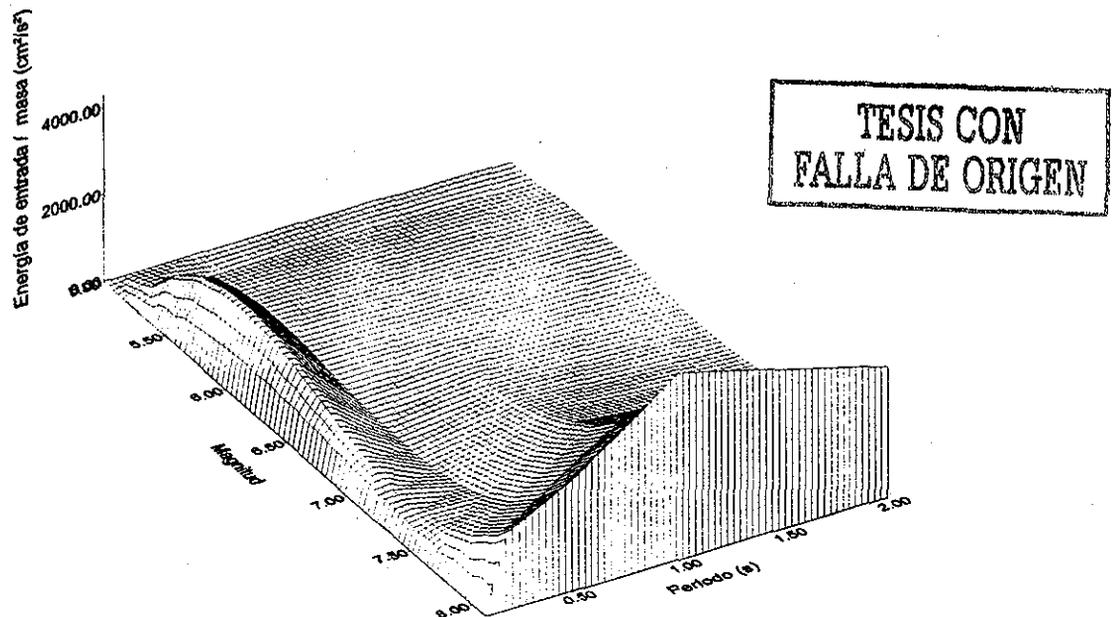


Figura 2.6 Representación espacial de los espectros elásticos de respuesta de energía de entrada para sismos con diferente magnitud; los registros corresponden a sitios sobre el área epicentral en la zona de subducción del Océano Pacífico mexicano

2.2 ATENUACIÓN DE LA ENERGÍA CON LA DISTANCIA AL ÁREA DE RUPTURA

Algunos investigadores han estudiado la atenuación de energía mediante modelos utilizados para otros parámetros del movimiento del terreno, observando que la energía es subestimada por las funciones de atenuación en sitios muy cercanos a la falla debido a que estos movimientos provocan generalmente altas demandas de energía a la estructura (Chou y Uang, 2000). El propósito de este trabajo no es el de desarrollar leyes de atenuación de energía sino ilustrar algunas de las características de su comportamiento.

En la Figura 2.7 se muestran los espectros elásticos de energía de entrada (E_I) para algunos registros del componente este-oeste de las estaciones de la Red Acelerométrica de Guerrero para los sismos el 19 de septiembre de 1985, del 25 de abril de 1989 y del 14 de septiembre de 1995. La localización de estas estaciones se muestra en el mapa de la Figura 2.2. En la Figura 2.7a (izquierda) se observa, para las estaciones que se encuentran sobre en el área de ruptura, CALE, VILE y UNIO, la existencia de importantes variaciones tanto en el periodo en que se presenta la

máxima ordenada de energía como en la amplitud, lo que dificulta cualquier esfuerzo por predecir estos espectros. Fuera del área de ruptura la estación AZIH presenta niveles de energía similares a las otras tres estaciones. Esto es debido a que está muy cerca de esta área y el efecto de atenuación aún no es visible como si lo es para la estación PARN localizada a varias decenas de kilómetros del área de ruptura. La Figura 2.7a (derecha) muestra otras estaciones fuera del área de ruptura. Se observa claramente una disminución de la energía con la distancia para todos los periodos inclusive para la estación SUCH que se localiza a 100 kilómetros del área de ruptura.

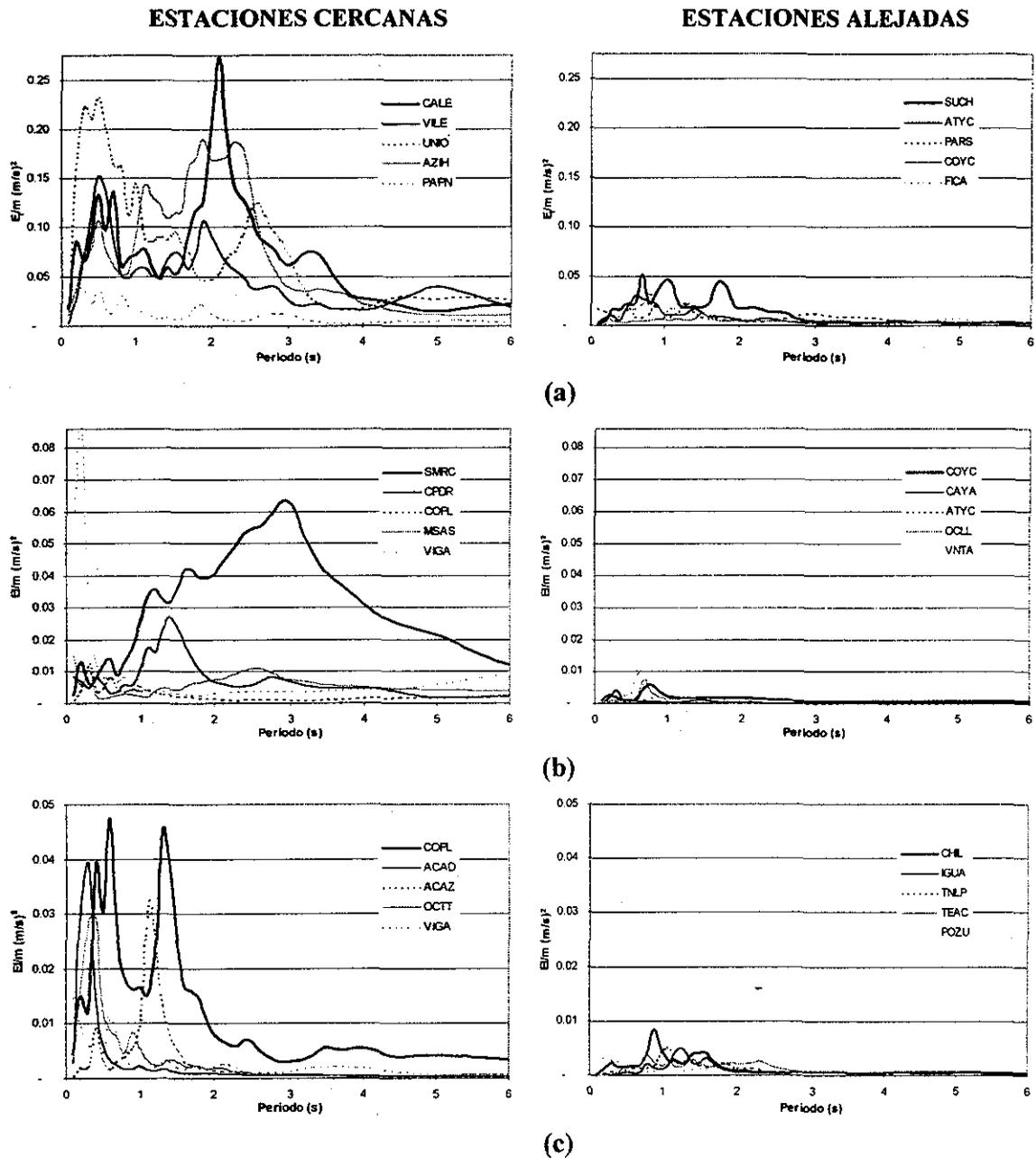


Figura 2.7 Espectros de energía para algunas estaciones de la Red Acelerométrica de Guerrero

(a) sismo del 19/09/85

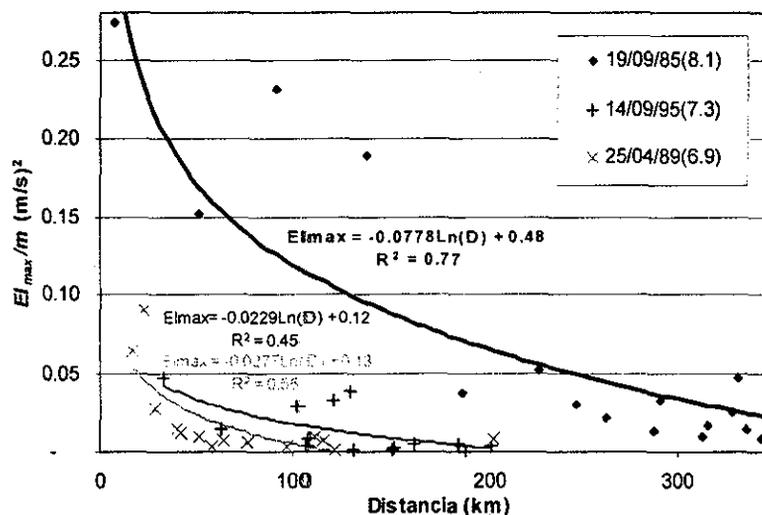
(b) sismo del 25/04/89

(c) sismo del 14/09/95

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Algo similar sucede para los sismos del 25 de abril de 1989 y del 14 de septiembre de 1995 (Figuras 2.7b y 2.7c). Las estaciones SMRC y CPDR se localizan sobre el área de ruptura del sismo del 25 de abril y la estación COPL para el sismo del 14 de septiembre; las demás estaciones se encuentran fuera del área de ruptura del sismo correspondiente (Figuras 2.1 y 2.2). En las gráficas del lado derecho de la Figura 2.7 se observa que a mayores distancias la atenuación es menor debido a que los espectros de estos registros presentan menos variación en sus ordenadas que en los espectros de las estaciones más cercanas al epicentro donde se presenta una gran disminución de las ordenas de energía a partir de las estaciones que se encuentran fuera del área de ruptura a una cierta distancia (Figuras 2.7 gráficas del lado izquierdo). Por ejemplo se observa una gran disminución de energía de las estaciones COPL, MSAS y VIGA con respecto a SMRC (Figura 2.7b) y de las estaciones OCTT y VIGA con respecto a COPL (Figura 2.7c).

La Figura 2.8 muestran las gráficas de la variación de la energía de entrada máxima (E_{Imax}) con la distancia al área epicentral para la componente este-oeste de los sismos del 19 de septiembre de 1985, del 25 de abril de 1989 y del 14 de septiembre de 1995. Se observa claramente la disminución de la energía máxima con la distancia sobretodo en un determinado radio: 200 km para el sismo del 19 de septiembre de 1985 y aproximadamente de 50 km para los otros sismos. Fuera de este radio este valor cambia poco con la distancia observándose una disminución menos evidente. Por ejemplo para el sismo del 19 de septiembre de 1985 para distancias mayores a 200 km los valores máximos varían de 0.01 a 0.048 m^2/s^2 con un valor promedio de 0.025 m^2/s^2 . En estas gráficas también se muestran las curvas de ajuste a una función logarítmica, así como las ecuaciones que corresponden a este ajuste y su coeficiente de correlación (R^2). Cuando $R^2=1$ el ajuste es perfecto. Se observa como la magnitud tiene gran influencia en los valores máximos de energía de entrada (E_{Imax}).



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 2.8 Variación de la energía de entrada máxima con la distancia para tres sismos

Contrariamente a lo que podría esperarse existe amplificación espectral importante en sitios de terreno firme dentro del valle de México con respecto a sitios más cercano a la fuente (Reinoso, 1996). Ordaz y Singh (1992) muestran con espectros de Fourier que esta amplitud es de hasta diez veces mayor que la esperada para un intervalo de periodos particularmente peligroso para la

ciudad. Sánchez-Sesma y otros (1993) calcularon para el sismo del 25 de abril de 1989 una amplificación promedio de 8 a 10 veces para periodos de entre 2 y 3 segundos con respecto a la estación TEAC localizada fuera de la cuenca.

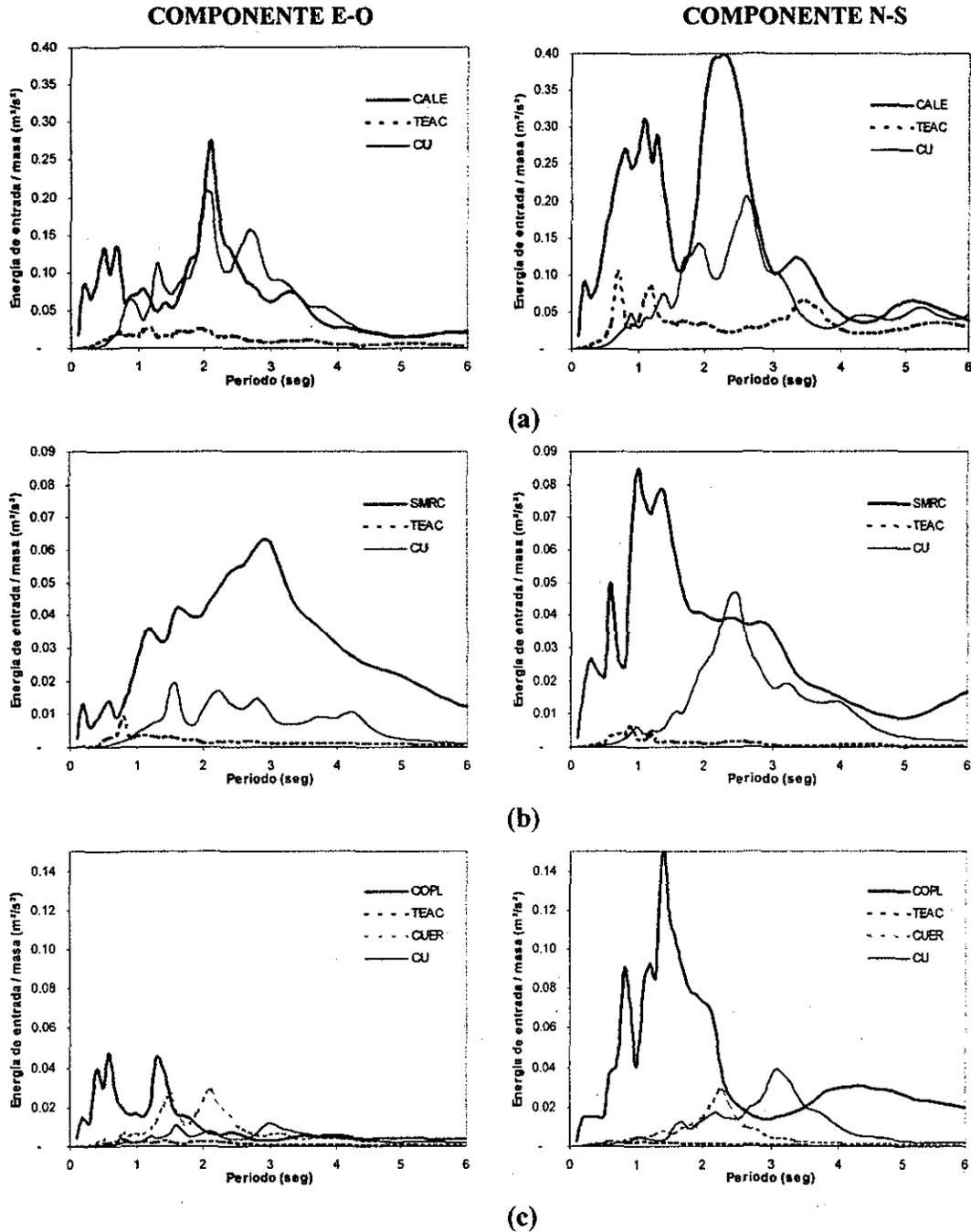


Figura 2.9 Espectros de energía para las estaciones CALE, SMRC y COPL localizadas sobre el área de ruptura y para TEAC, CUER y CU localizadas fuera de ésta

(a) sismo del 19/09/85

(b) sismo del 25/04/86

(c) sismo del 14/09/95

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Esta amplificación también se observa en los espectros elásticos de energía de entrada (E_I) mostrados en las gráficas de la Figura 2.9 para los sismos del 19 de septiembre de 1985, del 25 de abril de 1989 y del 14 de septiembre de 1995 en el componente este-oeste y norte-sur. Las estaciones CALE, SMRC y COPL se localizan sobre el área de ruptura y las estaciones TEAC, CUER y CU se localizan aproximadamente a 200, 280 y 300 km de distancia del área de ruptura, respectivamente. Las estaciones TEAC y CUER se localizan fuera del valle de México y la estación CU se localiza dentro de éste (Figura 2.2). Se observa que las ordenadas espectrales de energía en la estación CU sufren amplificación sobre todo en periodos de 1 a 3 segundos, obteniéndose en algunos casos ordenadas de energía similares a las observadas en las estaciones del área epicentral (Figura 2.9a lado izquierdo).

En las gráficas de la Figura 2.9c se observa cómo esta amplificación también se presenta en la estación CUER localizada a unos 20 kilómetros de CU fuera del valle (Figura 2.2) debido a que ésta se localiza sobre la misma formación geológica. Este efecto de amplificación aún en sitios de la zona de Lomas del valle de México contribuye a que en este lugar la energía sísmica sea tan grande, como se verá a continuación.

2.3 ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE LA ENERGÍA EN EL VALLE DE MEXICO

Contrario a lo que se mencionó en la primera parte de este capítulo (sección 2.1) al referirnos al movimiento sísmico en la zona epicentral, en cada estación acelerométrica del valle de México la mayoría de los parámetros sísmicos se correlacionan con el daño. Aunque existen grandes diferencias entre las estaciones debidas a los efectos de sitio, la aceleración del terreno y espectral, la velocidad, los desplazamientos, el contenido de frecuencias y la duración, para cada una de ellas, están directamente correlacionados con la magnitud e inversamente correlacionados con la distancia al área de ruptura y, por lo tanto, con el daño.

Los espectros de energía son especialmente sensibles a la amplificación del movimiento sufrida en depósitos lacustres. Para ilustrar estos efectos en la Figura 2.10 se muestran los espectros elásticos de energía de entrada (E_I) del sismo del 19 de septiembre de 1985 componente este-oeste para algunas estaciones localizadas en los diferentes tipos de suelo del valle de México. Las estaciones SCT y Central de Abastos (CD) se localizan en terreno blando, las estaciones de Viveros (VI) y CU se localizan en zona de transición y suelo firme, respectivamente. Se observa que los efectos de amplificación son bastante evidentes para las estaciones SCT y CD. Por ejemplo, los valores máximos de cada espectro son los siguientes: la estación SCT tiene $E_{I_{max}}=22.7 \text{ m}^2/\text{s}^2$, la estación CD tiene $E_{I_{max}}=13.7 \text{ m}^2/\text{s}^2$ y en las estaciones VI y CU tienen un valor aproximado de $0.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Se observa que los valores máximos en terreno blando son muy superiores a las zonas de terreno firme y transición ya que en las estaciones SCT y CD se registraron valores máximos de 113 y 68 veces, respectivamente, el valor obtenido en las estaciones VI y CU.

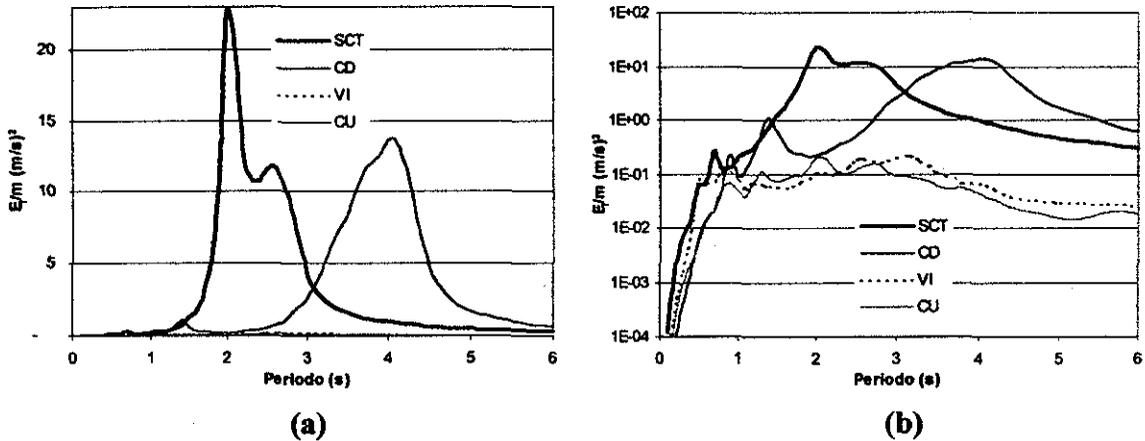


Figura 2.10 Espectros de energía en estaciones localizadas en los diferentes tipos de suelo para el sismo del 19 de septiembre de 1985

(a) Escala aritmética

(b) Escala logarítmica

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A raíz de los daños ocasionados por el sismo de 1957, surge la necesidad de conocer las características del movimiento en diferentes sitios del valle de México, por ello se instalaron dos acelerómetros, uno en zona de lago en el centro de la ciudad y otro en terreno firme (Ciudad Universitaria, CU). A partir de 1965 se obtienen de manera confiable y consistente y para una gran variedad de terremotos datos de aceleración en CU. Durante los sismos de 1985, la red de acelerógrafos manejada por el Instituto de Ingeniería contaba ya con 11 estaciones incluyendo sitios en zonas de transición y lago.

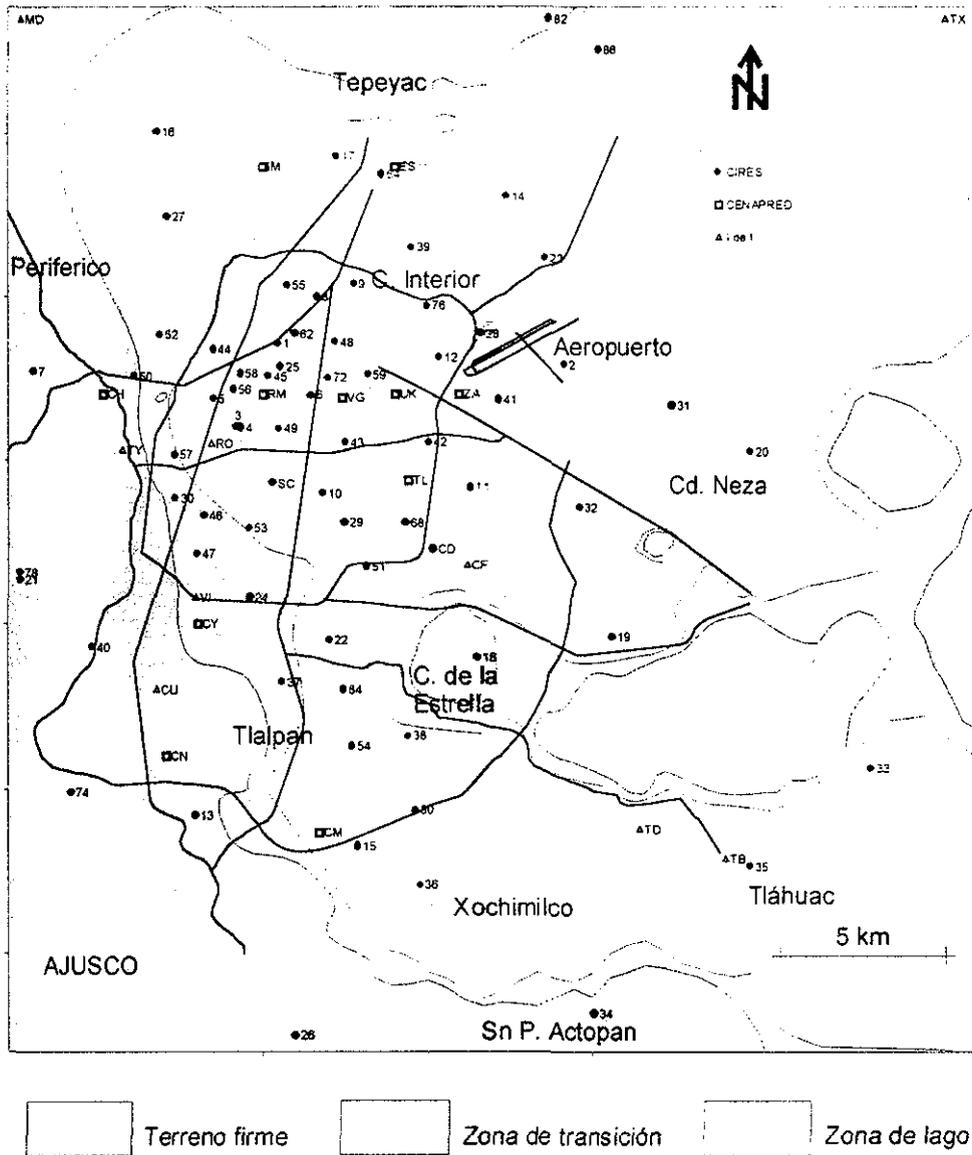
A partir de 1985 la red acelerométrica de la ciudad de México creció considerablemente instrumentándose gran parte del valle. La Figura 2.11 muestra la zonificación geotécnica así como la ubicación de las estaciones y las principales avenidas de la ciudad, en donde se observa una mayor concentración de éstas en las zonas donde históricamente se han presentado mayores daños durante sismos intensos.

Una gran cantidad de datos se han obtenido desde 1986 (Figura 2.1 y Tabla 2.1). Los sismos más relevantes han sido los ocurridos el 25 de abril de 1989 y el 14 de septiembre de 1995 ya que tuvieron una intensidad severa y fueron registrados por un gran número de estaciones; el sismo del 9 de octubre de 1985 es importante por su gran magnitud ($M=8.0$) aunque debido a su lejanía con la ciudad no fue intenso. El sismo del 15 de junio 1999 tiene particular importancia debido a que es uno de los pocos sismos de falla normal e intensidad moderada de los cuales se han obtenido registros en el valle de México. En este trabajo se utilizaron los registros de las estaciones señaladas en la Tabla 2.2 donde se indica el valor del periodo dominante del sitio (T_s) en que se localiza cada estación.

Tabla 2.2 Registros utilizados en este trabajo y periodos dominantes en cada estación

ESTACIÓN	TIPO DE SUELO	T _s	25/04/89	14/09/95	09/10/95	15/06/99	30/09/99
01	Lago	2.1	✓	✓		✓	
02	Lago	5.1		✓		✓	✓
03	Lago	1.9	✓	✓	✓	✓	
04	Lago	1.9		✓			✓
05	Lago	1.9	✓		✓	✓	
06	Lago	2.8	✓		✓	✓	✓
07	Lomas	0.5	✓	✓		✓	
08	Lago	2.2	✓	✓	✓	✓	✓
09	Lago	2.5	✓		✓	✓	✓
10	Lago	2.3	✓	✓	✓	✓	✓
11	Lago	4.5	✓	✓	✓	✓	
12	Lago	3.8	✓	✓	✓	✓	✓
13	Lomas	0.5	✓	✓	✓	✓	
14	Lago	3.8	✓	✓	✓	✓	✓
15	Lago	1.4	✓	✓	✓	✓	
16	Transición	0.6	✓		✓	✓	✓
17	Lago	1.2	✓	✓	✓	✓	
18	Lomas	0.5	✓	✓	✓	✓	✓
19	Lago	2.7	✓	✓	✓	✓	
20	Lago	4.9	✓		✓	✓	✓
21	Lomas	0.5		✓			
22	Lago	1.5	✓	✓	✓		
23	Lago	4.9	✓		✓		
24	Transición	1.1		✓	✓		
25	Lago	2.3	✓		✓		
27	Transición	0.8			✓	✓	
28	Lomas	0.5	✓	✓	✓	✓	✓
29	Lago	2.7	✓		✓	✓	
30	Transición	0.5	✓	✓	✓	✓	✓
31	Lago	5.2	✓	✓	✓	✓	
32	Lago	4.4	✓	✓	✓	✓	✓
33	Lago	2.6	✓	✓	✓	✓	
34	Lomas	0.5	✓	✓	✓	✓	✓
35	Lago	5.0	✓	✓	✓	✓	
36	Lago	3.5	✓	✓	✓	✓	✓
37	Transición	1.1	✓	✓	✓	✓	
38	Lago	1.8	✓	✓	✓	✓	✓
39	Lago	2.7	✓	✓	✓	✓	
40	Lomas	0.5	✓	✓	✓	✓	✓
41	Lago	4.7	✓	✓	✓	✓	
42	Lago	4.4	✓	✓	✓	✓	✓
43	Lago	3.1	✓	✓	✓	✓	
44	Lago	1.3	✓	✓	✓	✓	✓
45	Lago	2.5	✓	✓	✓	✓	
46	Transición	0.9	✓	✓	✓	✓	
47	Transición	0.5	✓	✓	✓	✓	
48	Lago	2.4	✓	✓	✓	✓	✓
49	Lago	2.8	✓	✓	✓	✓	
50	Lomas	0.6	✓	✓	✓	✓	✓
51	Lago	2.2	✓	✓	✓	✓	
52	Transición	0.9	✓	✓	✓	✓	✓
53	Lago	1.5	✓	✓	✓	✓	
54	Lago	1.1	✓	✓	✓	✓	✓
55	Lago	1.9	✓	✓	✓	✓	
56	Lago	2.4	✓	✓	✓	✓	✓
57	Transición	0.9	✓	✓	✓	✓	
58	Lago	2.3	✓	✓	✓	✓	✓
59	Lago	3.1	✓	✓	✓	✓	
62	Lago	2.1	✓	✓	✓	✓	✓
64	Lomas	0.5	✓	✓	✓	✓	✓
68	Lago	3.3	✓	✓	✓	✓	✓
72	Lago	2.5	✓	✓	✓	✓	✓
74	Lomas	0.5	✓	✓	✓	✓	
78	Lomas	0.5	✓	✓	✓	✓	✓
80	Lago	2.8	✓	✓	✓	✓	✓
84	Lago	1.4	✓	✓	✓	✓	✓
CD	Lago	3.2	✓	✓	✓	✓	✓
MI	Lomas	0.5		✓			
MR	Lomas	0.5		✓			
PE	Lago	?		✓			
RO	Lago	1.3	✓	✓			✓
SC	Lago	1.9	✓	✓			✓
TB	Lago	5.0	✓				
TX	Transición	0.5		✓			✓
TY	Lomas	0.5		✓	✓		✓
VG	Lago	3.0	✓	✓			✓
CU	Lomas	0.5	✓	✓	✓		✓
CH	Lomas	0.5	✓	✓			
CY	Transición	0.7		✓	✓		
ES	Lomas	0.5		✓	✓		
IM	Transición	0.8		✓	✓		✓
RM	Lago	2.4		✓	✓		
ZA	Lago	4.3		✓	✓		

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 2.11 Zonificación geotécnica, algunos sitios de referencia y estaciones de la red acelerométrica de la ciudad de México

Debido a las grandes diferencias de amplificación de energía de entrada en los diferentes tipos de suelo del valle de México, en esta sección se estudiará por separado los resultados de los cálculos de los espectros en los diferentes tipos de suelo.

2.3.1 Movimiento observado en la zona de Lomas y de Transición

Como se mencionó en la sección 2.2 de este capítulo, en la zona de Lomas del valle de México existe amplificación regional de los espectros de energía. Por ello, los espectros presentan ordenadas de energía tan grandes como las observadas en la zona epicentral.

En la Figura 2.12 se muestran los espectros elásticos de energía de entrada (E_I) para los sismos del 25 de abril de 1989 y del 14 de septiembre de 1995, componente norte-sur. En las gráficas de la izquierda se muestran los espectros en zona de Lomas. Como ya se había observado, para la estación CU existe amplificación principalmente en periodos de 1 a 3 segundos. Los espectros que más amplificación presentan son los que se localizan al sur del valle (estaciones 34, 13, CU y 78) y los espectros de menores ordenadas se localizan en el norte del valle (estaciones 64 y 28). En las gráficas de la derecha se muestran los espectros en zona de transición. En esta zona se presenta amplificación de energía entre periodos de 1 y 2 segundos, además de la amplificación observada en la zona de Lomas, es donde se tienen las mayores ordenadas de energía. Las estaciones con mayor energía corresponden a las estaciones 37, 24 y 52 que se localizan cerca de los límites de la zona de Lago, las estaciones con menores ordenadas son: 30, 47, VI y TX que se localizan en la parte central de los límites entre la zona de Lomas y de Lago. En la zona de transición estos espectros presentan un pico de gran energía en el periodo dominante del suelo.

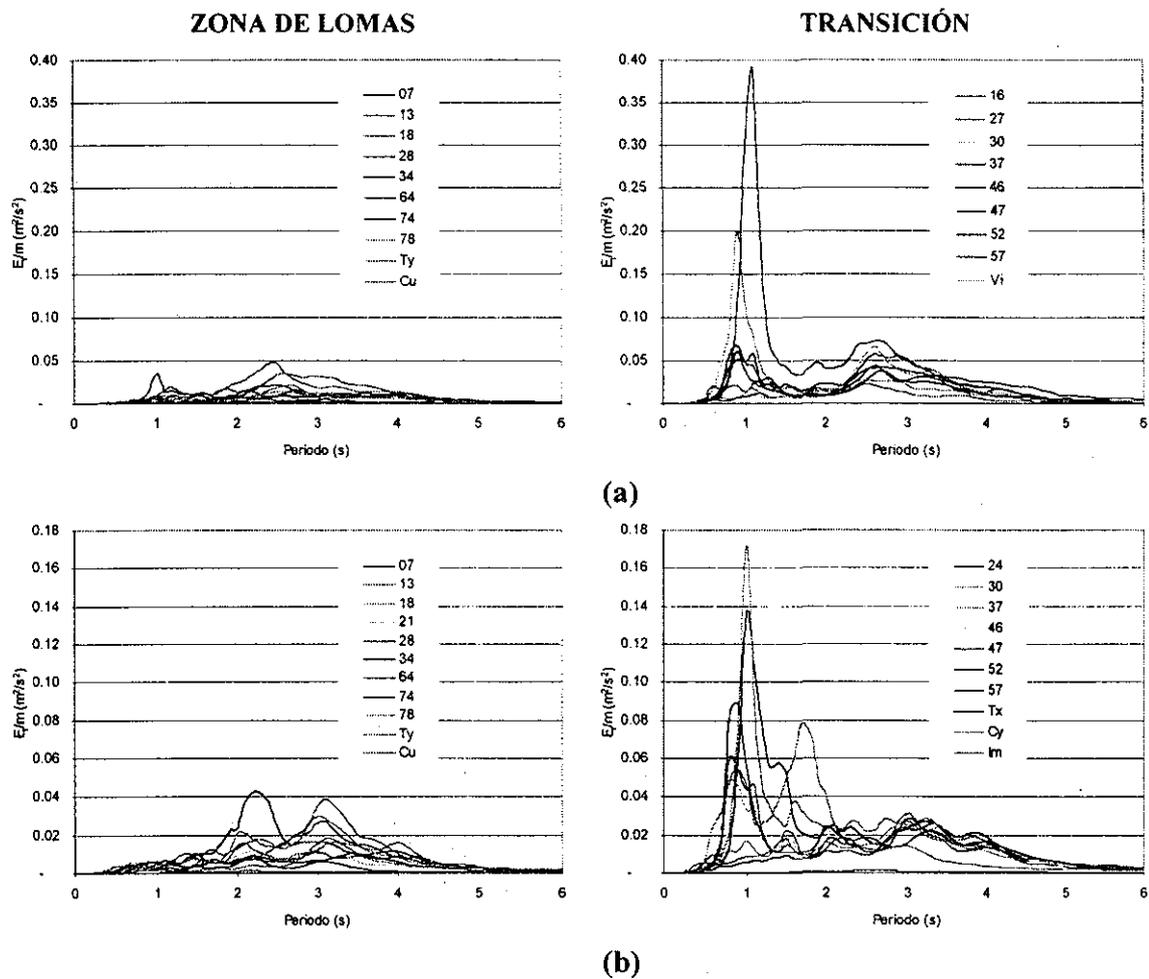


Figura 2.12 Espectros elásticos de energía de entrada
 (a) sismo del 25/04/89
 (b) sismo del 14/09/95

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

2.3.2 Movimiento observado en la zona de Lago

Como ya se ha mencionado, en el valle de México se manifiestan de forma dramática los efectos de amplificación dinámica en depósitos lacustres. Éste es particularmente vulnerable a sismos de subducción ocurridos en las costas del Pacífico. Las ondas sísmicas provenientes de esa región se atenúan en el trayecto hacia la ciudad de México localizada a más de 250 km de distancia; sin embargo, al internarse en el valle y en particular en los estratos blandos originados por la desecación artificial de los antiguos lagos de Xochimilco, Texcoco, Xaltocan, Zumpango y Chalco, se presenta una importante amplificación de las ondas y un significativo incremento en la duración del movimiento dominada por el arribo de ondas de periodo largo que sufren menos atenuación que las de periodo corto.

En la Figura 2.13 se muestran las envolventes de los espectros elásticos de energía de entrada (E_I) para los sismos del 25 de abril de 1989 y de 14 de septiembre de 1995 en el componente norte-sur para los tres tipos de suelo del valle (Figura 2.11). Se observa que de 0.5 a 2 segundos la envolvente de la zona de transición sufre amplificación y presenta un pico en 1 segundo, que es un periodo dominante característico de esta zona. En la zona de Lago esta amplificación se da para periodos mayores a 1 segundo y presenta picos de energía en diferentes periodos que sugiere una probable concentración de energía en varias regiones de la zona de Lago del valle de México. Por ello, en esta zona, es conveniente presentar los espectros de energía en función de T/T_s .

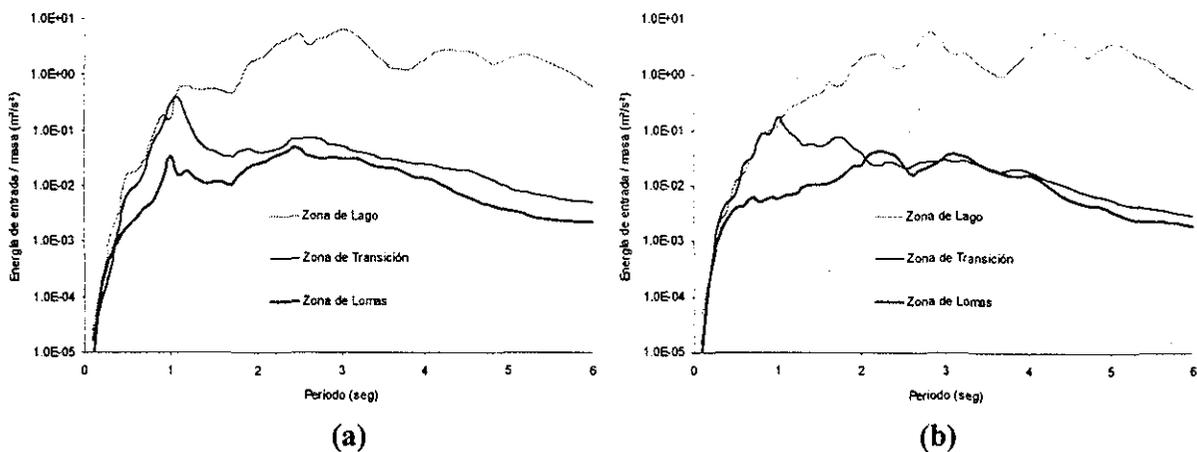


Figura 2.13 Envolventes de los espectros elásticos de energía de entrada para los tres tipos de suelo del valle de México

(a) para el sismo del 25/04/89

(b) para el sismo del 14/09/95

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En la Figura 2.14 se muestra la envolvente de los espectros del sismo del 25 de abril de 1989 en la zona de Lago, en estas gráficas el eje horizontal esta normalizado entre el período dominante del terreno T_s tomado como el valor del período en que la energía es máxima. En la Figura 2.14b se observa como estos espectros tienen una gran dependencia del periodo dominante del terreno (T_s) al presentar un pico en $T/T_s=1$.

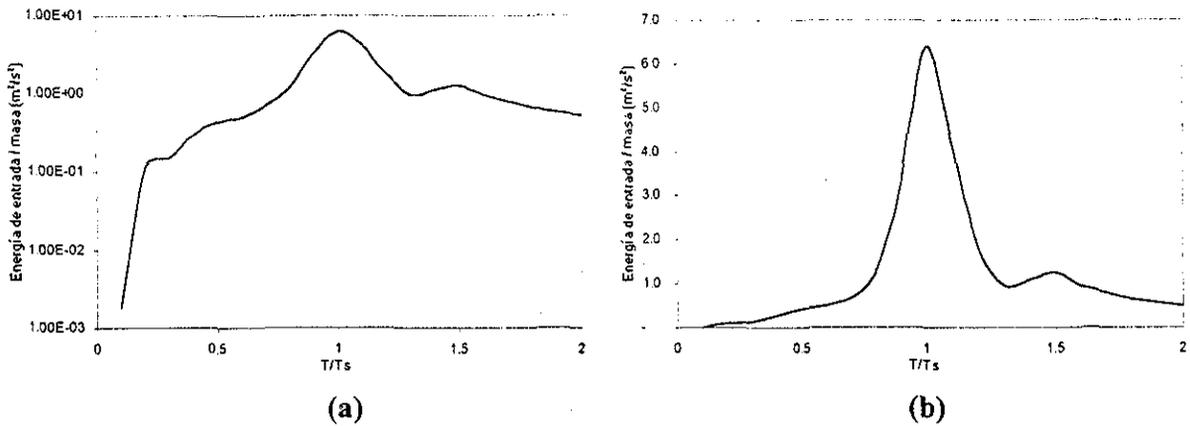


Figura 2.14 Envolturas de los espectros elásticos de energía de entrada en la zona de Lago del valle de México para el sismo del 25/04/89

(a) escala logarítmica

(b) escala aritmética

En el siguiente capítulo se hace un análisis más detallado de las características de los espectros de energía en el valle de México.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo 3

ENERGÍA EN LA ZONA DE LAGO DEL VALLE DE MÉXICO

La zona de Lago del valle de México ha sido objeto de numerosos estudios ya que, como en pocos lugares, se manifiestan de manera dramática los efectos de amplificación dinámica en depósitos lacustres. Por ejemplo, para algunas frecuencias, la amplificación de las ordenadas espectrales puede ser mayor a 500 veces la esperada en sitios a la misma distancia epicentral, y hasta 100 veces la observada en la zona de Lomas (Reinoso, 2000).

Las características del movimiento en el valle de México son complejas y cambiantes en unas cuantas centenas de metros. Algunas propiedades sobresalientes de los espectros de energía contribuyen a esclarecer parte del comportamiento de la energía de entrada en la zona de Lago. A continuación se comentan brevemente estas características y se muestran los espectros de energía para varios eventos sísmicos.

3.1 DIRECCIONES PRINCIPALES DE ENERGÍA

Hasta ahora poca importancia se ha otorgado a la dirección del movimiento en la zona de Lago. Esto se debe a que no se han encontrado patrones repetidos de un sismo a otro y se asume que en promedio el movimiento es el mismo e independiente de cualquier dirección (Reinoso y Quiroga, 2001). Sin embargo, en esta trabajo se muestra que existen importantes diferencias en los espectros de energía para distintas direcciones de análisis de los registros.

La mayoría de los registros de aceleración de campo libre se obtienen convencionalmente en una dirección vertical y en dos direcciones horizontales perpendiculares entre sí: norte-sur y este-oeste. Es de esperarse que exista una dirección del movimiento en que la energía sea mayor y que no coincida con las que convencionalmente se escogieron. Esto se muestra en la Figura 3.1 para algunos registros de la estación SCT, para los sismos ocurridos el 19 de septiembre de 1985, el 25 de abril de 1989, el 30 de septiembre de 1999 y el 15 de junio de 1999. Por ejemplo para el 19 de septiembre de 1985 (Figura 3.1a) la mayor ordenada de energía en la dirección principal corresponde a $29.7 \text{ m}^2/\text{s}^2$, la menor energía representa el 18% de este valor ($5.3 \text{ m}^2/\text{s}^2$), los valores máximos de los espectros se presentan en el período dominante del sitio (período de 2 segundos). En las otras gráficas de la Figura 3.1 se observan comportamientos similares, aunque para cada sismo la dirección en que se presenta la energía máxima es distinta.

Estos resultados podrían tener una repercusión importante en el diseño de estructuras si se logra caracterizar la dirección de la energía principal para distintos eventos sísmicos y de qué orden será el cociente entre la energía mayor y menor. Con ello se podrán utilizar reglas más eficientes sobre

las fuerzas sísmicas en los dos componentes ortogonales de las estructuras. Por simplicidad, en algunos de los análisis de este trabajo los cálculos de los espectros se realizaron tomando la dirección norte-sur.

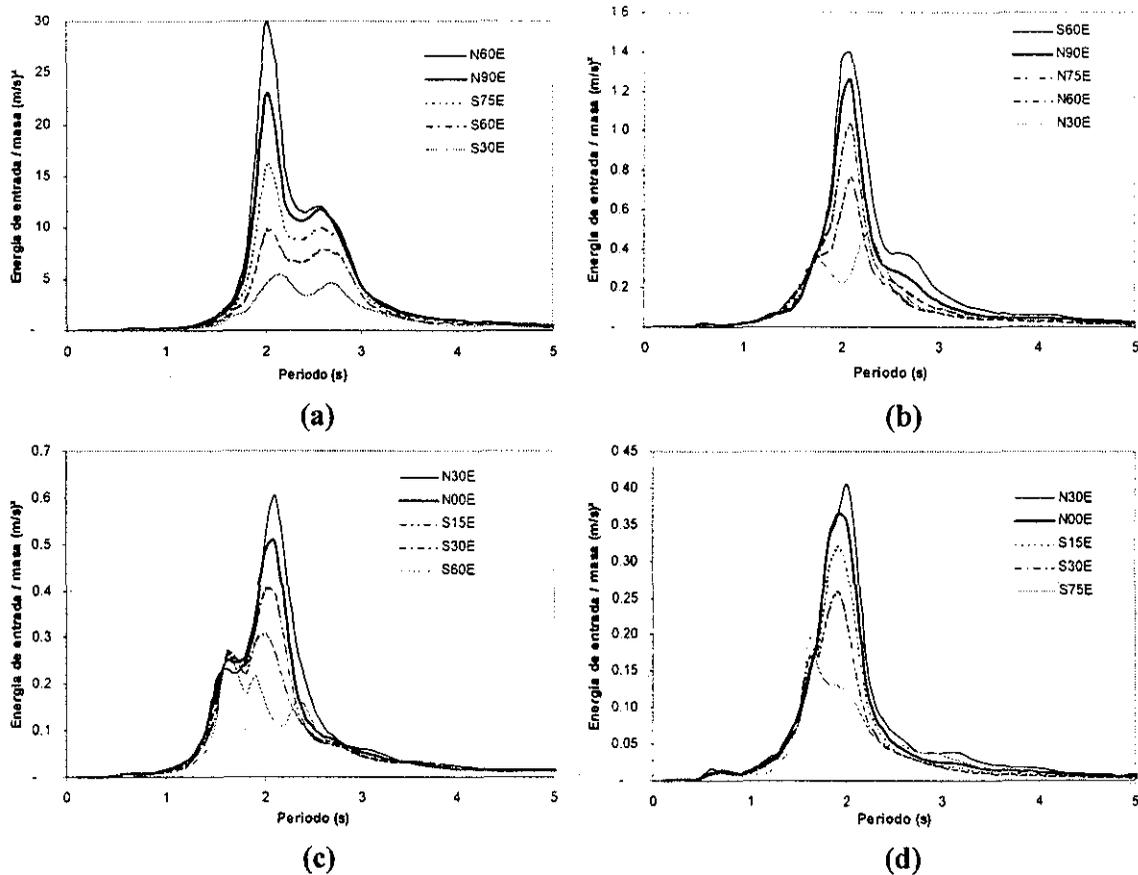


Figura 3.1 Variación de los espectros elásticos de energía de entrada con la dirección del movimiento en la estación SCT

- (a) sismo del 19/09/85
- (b) sismo del 25/04/89
- (c) sismo del 30/09/99
- (d) sismo del 15/06/99

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.2 INFLUENCIA DE LA MAGNITUD DEL SISMO

Con el propósito de observar la influencia de la magnitud del sismo en los espectros de energía en el valle de México, en la Figura 3.2 se muestran los espectros elásticos de energía de entrada en las estaciones SCT y Central de Abastos (CD) correspondientes a varios sismos de subducción. Los epicentros de algunos de estos sismos se muestran en el mapa de la Figura 2.1 con sus respectivas magnitudes. Se puede observar que casi todas las áreas de ruptura tienen una distancia a la ciudad de México similar ($R \approx 300$ km) excepto por los epicentros de los sismos del 30 de abril de 1986 y del 30 de septiembre de 1999, cuya distancia es mayor y de los epicentros de los sismos de falla normal (15 de junio de 1999 y 21 de julio de 2000) con una distancia menor.

Las gráficas de la izquierda de la Figura 3.2 muestran la diferencia sobresaliente de las ordenadas del espectro correspondiente al sismo del 19 de septiembre de 1985 ($19.7 \text{ m}^2/\text{s}^2$ para CD y $12.3 \text{ m}^2/\text{s}^2$ para SCT) con respecto a los otros sismos. Esto explica en parte los daños ocasionados por este sismo en las estructuras localizadas en estas estaciones con períodos cercanos al pico del espectro correspondiente. Para los demás sismos cuyas magnitudes oscilan entre 6.9 y 7.6, las ordenadas máximas son muy similares (1.5 a $2.5 \text{ m}^2/\text{s}^2$) excepto para el sismo del 30 de abril de 1986 ($0.4 \text{ m}^2/\text{s}^2$, Figura 3.2a); lo que es atribuible a su mayor distancia a la ciudad de México. Se observa que los niveles de energía de las estaciones SCT y CD para los sismos de magnitudes menores o iguales a 7.6 grados están por debajo de $3.0 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Dadas las observaciones de daño, este nivel de energía no produce daño a las estructuras. Debe considerarse que estos espectros son elásticos por lo que esta afirmación deba ser verificada mediante el uso de otros parámetros que se correlacionan mejor con el daño estructural como la energía histerética normalizada (NE_H). Es también importante analizar que papel juega la ductilidad en las observaciones de daño.

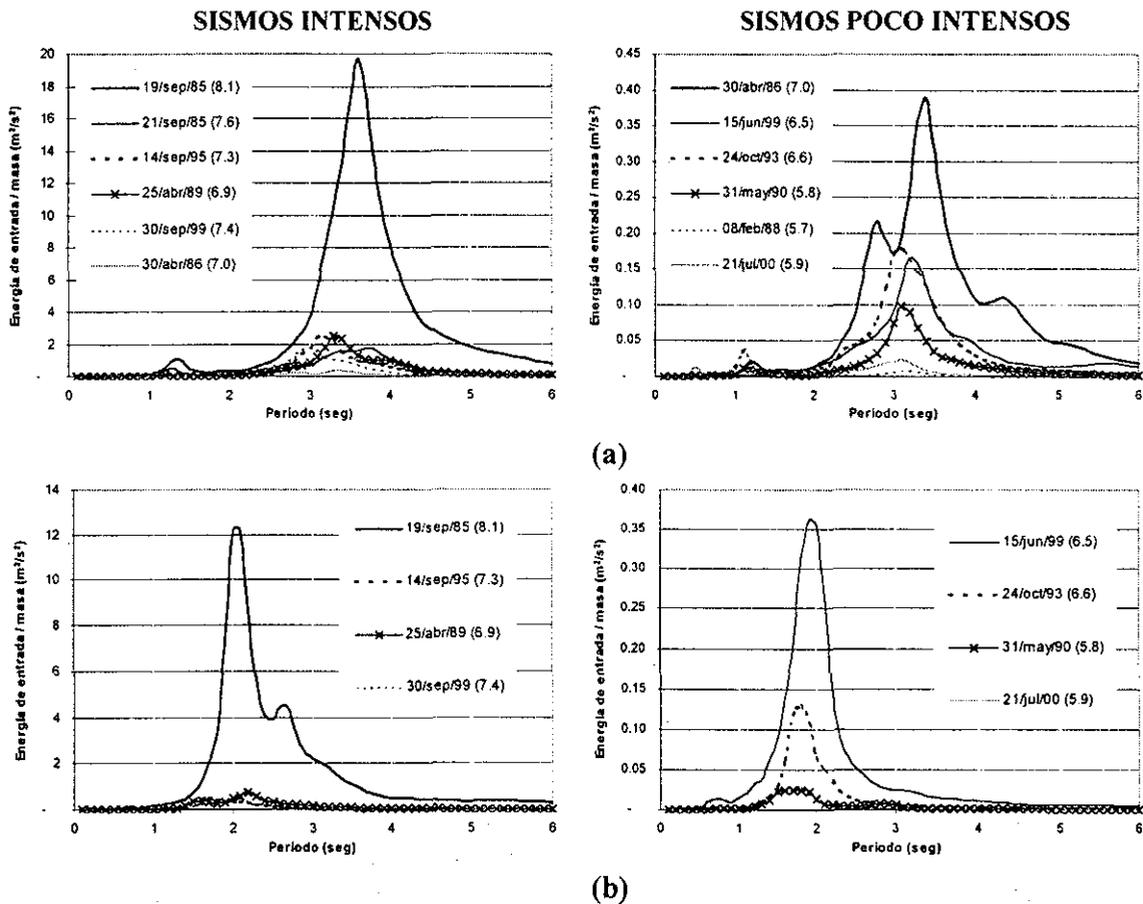


Figura 3.2 Espectros elásticos de energía de entrada para varios sismos

- (a) Estación CD
- (b) Estación SCT

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

En la Figura 3.2 se observa como, para ambas estaciones, el período en que se presenta la energía máxima aumenta ligeramente para sismos más intensos. Por ejemplo en la estación CD (Figura

3.2a) este período varía de 3.0 a 3.6 segundos y en la estación SCT (Figura 3.2b) de 1.8 a 2.1 segundos. Esto se debe a que el suelo presenta comportamiento no lineal a mayor intensidad del sismo que ocasiona un incremento en el período dominante. En las gráficas de la derecha se observa como para sismos de magnitud pequeña las diferencias de ordenadas de los espectros no son tan grandes como para sismos intensos. Excepto para los sismos del 8 de febrero de 1988 y del 21 de julio de 2000, este último de falla normal con epicentro localizado a una distancia de aproximadamente 150 km del valle de México.

En la Figura 3.3 se muestra la variación de la energía máxima ($E_{I\max}$) con la magnitud del sismo. Los datos corresponden a los espectros de la Figura 3.2, se omitieron los sismos del 30 de abril de 1986, del 30 de septiembre de 1999, del 15 de junio de 1999 y del 21 de julio de 2000 por tener una distancia al área de ruptura diferente. Los sismos considerados en la Figura 3.2 presentan una variación que se puede atribuir sólo a la magnitud ya que estos sismos tienen una distancia al área de ruptura muy similar. Se observa cómo varían $E_{I\max}$ en estas estaciones (CD y SCT) con una tendencia exponencial, como lo muestran las funciones de ajuste que en ambas estaciones tienen la misma pendiente. También se observa que el coeficiente de correlación (R^2) es cercano a la unidad, lo que significa un buen ajuste.

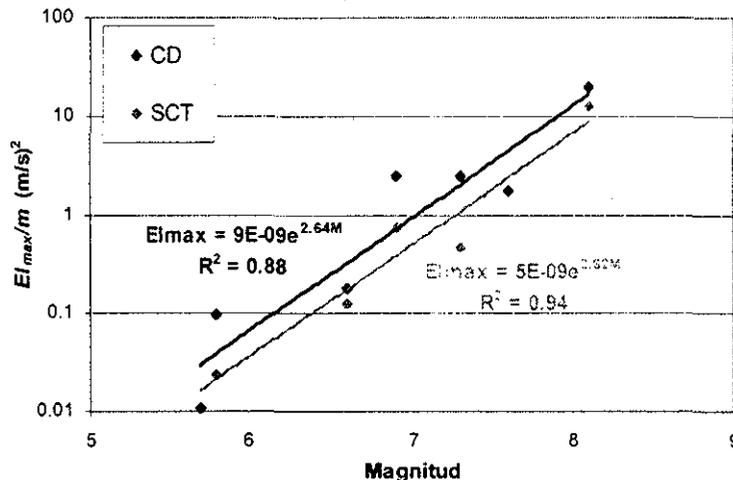


Figura 3.3 Variación de la $E_{I\max}$ con la magnitud para varios sismos, estaciones CD y SCT

Las expresiones obtenidas en este ajuste contribuyen a obtener una estimación de la energía máxima en el valle de México en función de la magnitud de sismos de subducción para una distancia al área de ruptura de aproximadamente 300 km.

3.3 ESPECTROS INELÁSTICOS DE ENERGÍA

Diseñar las estructuras para que su comportamiento sea elástico significa que no se presentarán daños estructurales ante los sismos considerados por el diseñador. Sin embargo, resulta sumamente costoso proporcionar los elementos de la resistencia necesaria, dimensiones y detallado, para lograr este comportamiento. En la práctica de diseño de estructuras no es común

proyectar estructuras elásticas, por lo que es necesario balancear el daño permitido por comportamiento inelástico con el costo total de la estructura. Debido a esto surge la necesidad de calcular espectros que consideren las sollicitaciones de la estructura correspondientes a comportamiento inelástico.

Los espectros inelásticos de energía más relevantes son los de entrada (E_I) y los de histéresis (E_H) ya que son los que se relacionan con la demanda de energía que impone el sismo a la estructura y con el daño que ésta puede sufrir. La Figura 3.4 muestra una representación espacial de estos espectros para el registro de la estación SCT-EO durante el sismo del 19 de septiembre de 1985. En estos espectros se utilizó un eje adicional perpendicular al plano del espectro, el cual representa el coeficiente sísmico C_y . Con ello se puede observar la variación de los espectros con diferentes niveles de resistencia. En estos cálculos se consideró un modelo de comportamiento elastoplástico perfecto y una fracción de amortiguamiento crítico de $\xi=5\%$.

La Figura 3.4a muestra la variación de los espectros de energía de entrada. Se observa que la traza de la superficie de esta gráfica en el plano vertical con $C_y=1.2$ (mayor coeficiente sísmico) representa el espectro de energía de entrada con comportamiento elástico (Figura 3.1a). Conforme se reduce la resistencia del oscilador, C_y , se incrementa la ductilidad y disminuye la energía de entrada debido a que la velocidad y la aceleración con que se mueve la masa del oscilador son menores por su comportamiento inelástico, y es cuando aparece la energía de histéresis (Figura 3.4b). Para períodos pequeños y resistencia muy baja la energía de entrada crece debido a la dependencia con el desplazamiento, el cual tiene un comportamiento similar.

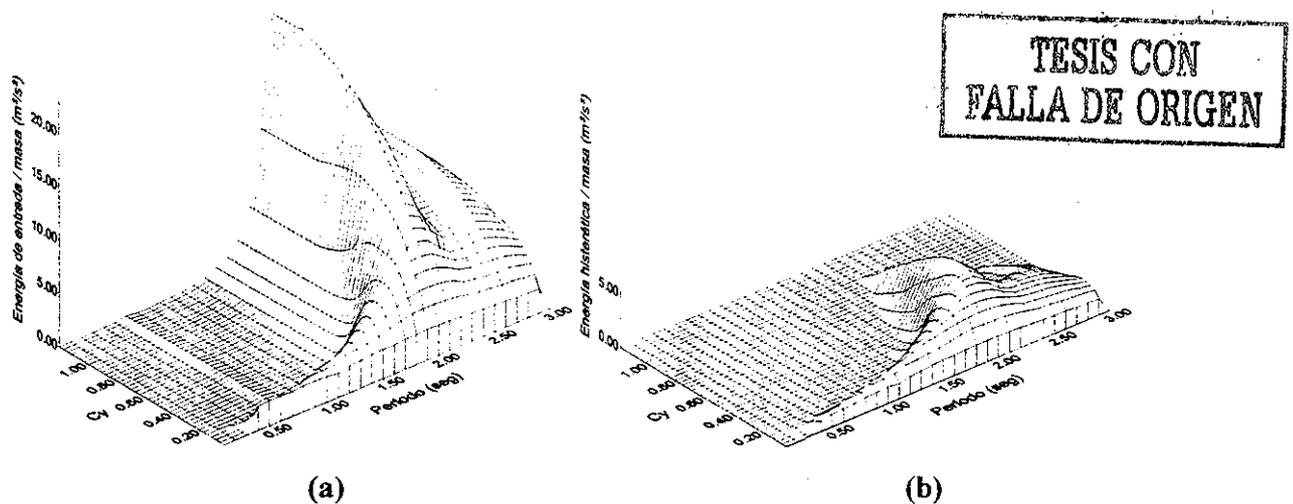


Figura 3.4 Representación espacial de la variación de los espectros de energía con resistencia para el registro de la estación SCT-EO del sismo del 19 de septiembre de 1985

- (a) Energía de Entrada
(b) Energía de Histéresis

Los espectros inelásticos mostrados en la Figura 3.4 no tienen limitada la ductilidad, por lo que para valores muy bajos de C_y la ductilidad tiene valores grandes. Por ejemplo, para $C_y=0.5$ la mayor demanda de ductilidad es de 1.33, para $C_y=0.2$ es de 2.78 y para $C_y=0.1$ que es una

resistencia de diseño común para los edificios de la ciudad de México ésta es aproximadamente de 20.0. Es difícil que un edificio diseñado para $C_y=0.1$ tenga realmente esa resistencia debido a la sobrerresistencia que experimentan estas estructuras, generalmente mayor a 2, por lo que estos edificios no tendrán resistencias menores a $C_y=0.2$.

En el espectro elástico de energía de entrada existe una aparente ausencia de demanda de energía en períodos cortos y en el predominante del terreno se aprecia un cambio abrupto demandando gran cantidad de energía. Esto se debe a que en terreno blando la respuesta de estructuras con períodos cortos (la deformación relativa, velocidad y aceleración) son menores que para las estructuras de período mayores. Cuando el período de la estructura es muy cercano al del terreno la respuesta de la estructura sufre amplificación debido a que se presenta el fenómeno de resonancia. Los espectros de energía de entrada y de histéresis también presentan un pico en el período predominante del terreno (2 segundos) en distintos niveles de resistencia. De estos diagramas resulta evidente qué estructuras son más vulnerables en esta zona para este tipo de temblor (estructuras con períodos alrededor de 2 segundos).

En la Figura 3.5 se muestra una representación similar a la anterior, excepto que la variación de los espectros de energía es ahora con la demanda de ductilidad, μ . En esta figura sólo el espectro elástico de energía presenta un pico en el período predominante del terreno y al aumentar la ductilidad el pico desaparece. En la Figura 3.5a se observa cómo existe una disminución de la energía de entrada en períodos cercanos al dominante del terreno y mayores a éste. Esta disminución es muy evidente entre los valores de $\mu=1$ a $\mu=2$ aproximadamente; sin embargo, para valores mayores a $\mu=2$ la energía es casi constante. Para algunos períodos menores al dominante se aprecia un ligero aumento de energía con la ductilidad, este aumento es menos evidente para ductilidades mayores a dos ($\mu>2$). Se observa que la energía de histéresis (Figura 3.5b) aparece y se incrementa a partir de la ductilidad $\mu=1$, y su comportamiento es casi constante para valores mayores de $\mu=2$.

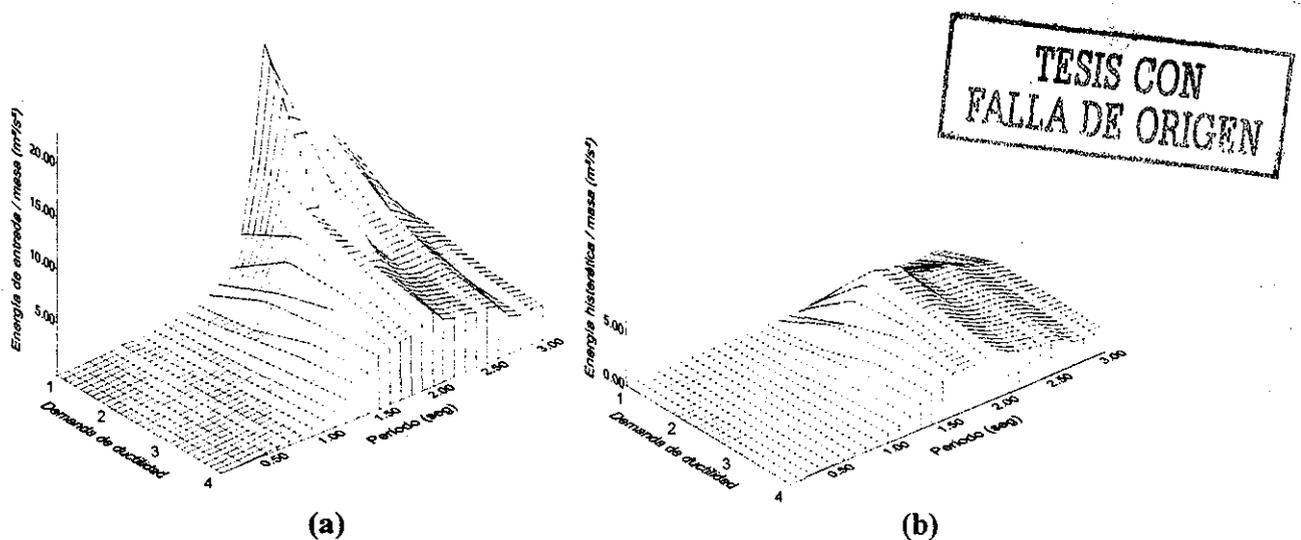


Figura 3.5 Representación espacial de la variación de los espectros de energía con la demanda de ductilidad para el registro de la estación SCT-EO del sismo del 19 de septiembre de 1985

- (a) Energía de Entrada
- (b) Energía de Histéresis

También se observa que en un rango de valores de demanda de ductilidad ($2 < \mu < 4$) la relación entre la energía de histeréisis (E_H) y la de entrada inelástica ($E_{I\mu}$) es una cantidad muy estable. Esto ya había sido observado por varios autores (Akiyama 1985; Kuwamura y Galambos 1989; Fajfar y Vidic 1994; Lawson y Krawinkler, 1995; Terán-Gilmore, 1996a y Decanini y Mollaioli, 2001). Así, en este intervalo de valores al conocer la relación de $E_H/E_{I\mu}$, el espectro E_H puede ser fácilmente obtenido del espectro $E_{I\mu}$ y viceversa. A continuación se presentan las propuestas para estimar esta relación.

Energía histerética normalizada

Como se mencionó en el primer capítulo de este trabajo, la energía histerética normalizada (NE_H) es el parámetro que mejor se correlaciona con el daño de las estructuras. En la Figura 3.6 se muestra la variación de este parámetro con la resistencia (Figura 3.6a) y con la demanda de ductilidad (Figura 3.6b) para el registro de la estación SCT-EO del sismo del 19 de septiembre de 1985. En la Figura 3.6a se observa que este parámetro tiende a infinito para resistencias muy pequeñas $C_y \rightarrow 0$ (comportamiento plástico muy grande). Esto se debe a que este parámetro tiene como cociente el producto $x_y F_y$, y así cuando la resistencia es pequeña ($F_y \rightarrow 0$) el valor de NE_H es muy grande y viceversa. En la Figura 3.6b se muestra que los espectros tienen forma irregular y que el valor NE_H disminuye con menor ductilidad o menor comportamiento no lineal, al igual que los espectros de la Figura 3.6a. Se observa un valor muy pequeño de NE_H para una ductilidad de $\mu=1$. Para un sistema elastoplástico perfecto sujeto a deformaciones plásticas acumuladas en dos sentidos opuestos, NE_H representa la demanda de ductilidad acumulada en el sistema durante todos los ciclos de deformación plástica (Arroyo *et al.*, 2000 y Ávila y Terán-Gilmore, 2000). La Figura 3.6 muestra que las estructuras presentarán mayor demanda de ductilidad acumulada a medida que el comportamiento inelástico es mayor y ninguna demanda cuando el comportamiento es elástico y no hay disipación de energía histerética.

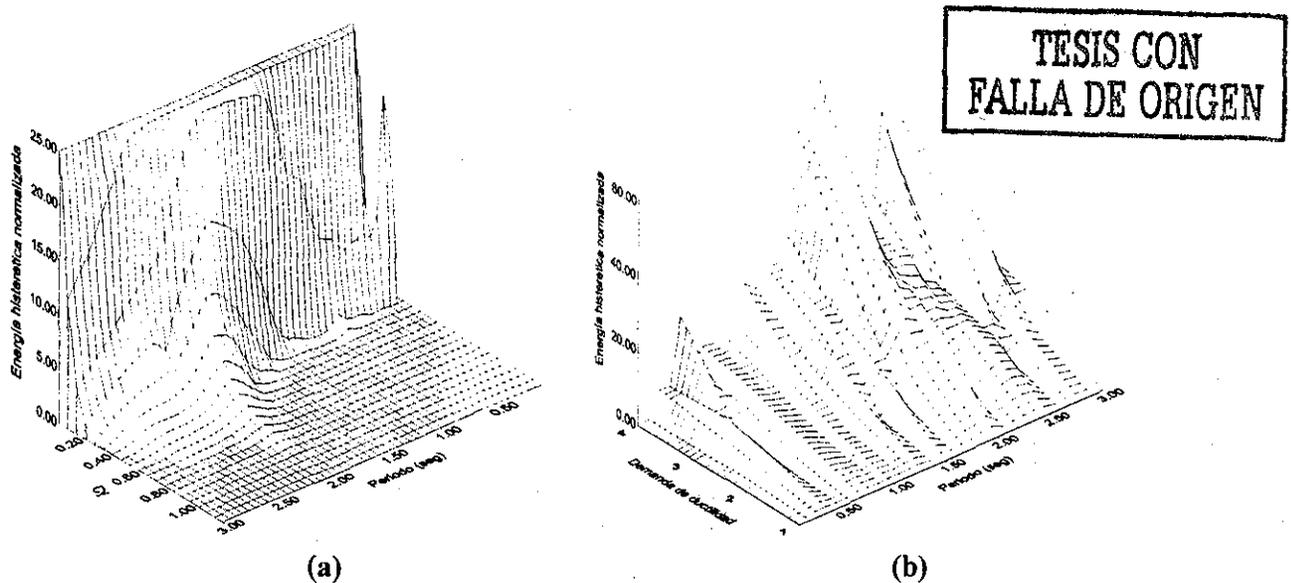


Figura 3.6 Representación espacial de los espectros de energía histerética normalizada, NE_H , para el registro de la estación SCT-EO del sismo del 19 de septiembre de 1985

- (a) Variación con la resistencia, C_y
 (b) Variación con la ductilidad, μ

3.3.1 Relaciones propuestas entre la energía de histéresis y la de entrada

Para los propósitos de diseño es de gran importancia obtener una buena aproximación de la energía de entrada e histérica. En algunos casos no es posible conocer ambas, sin embargo, se puede obtener una de ellas teniendo la estimación de la otra y la relación entre éstas. El parámetro más importante que influye en la relación entre la energía histérica y la energía inelástica de entrada ($E_H/E_{I\mu}$) es el amortiguamiento viscoso y en menor grado la ductilidad y el modelo histérico. Un decremento en el amortiguamiento viscoso incrementa la relación $E_H/E_{I\mu}$ en todo el intervalo de periodos, la ductilidad tiene menor influencia en esta relación, excepto para comportamiento cercano al elástico en que la relación $E_H/E_{I\mu}$ disminuye hasta cero (Fajfar y Vidic, 1994), debido a esto las expresiones que han sido propuestas para estimar la relación $E_H/E_{I\mu}$ tienen dependencia de estos dos parámetros (ξ , μ) y algunas también dependen del modelo de comportamiento histérico y del período (T).

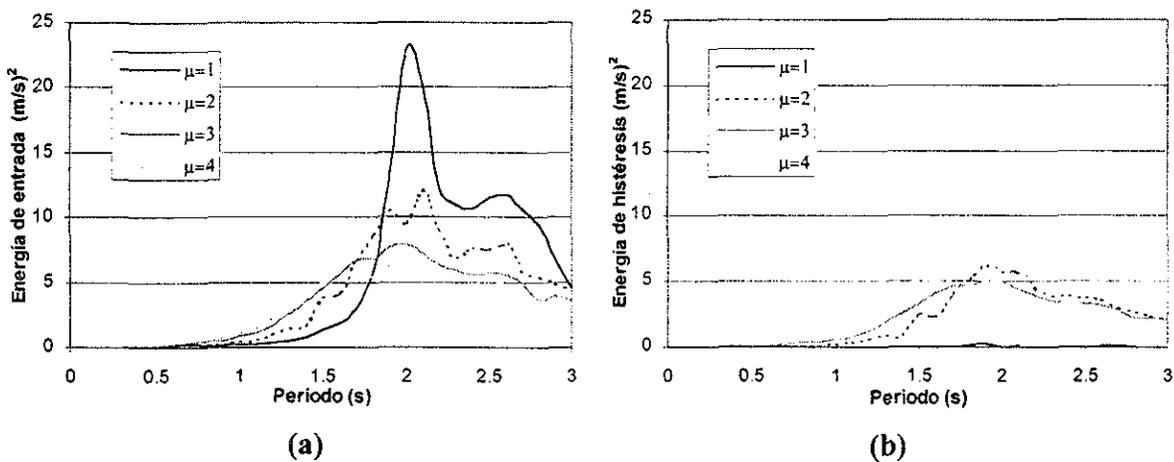


Figura 3.7 Variación de los espectros de energía con la demanda de ductilidad para el registro de la estación SCT-EO del sismo del 19 de septiembre de 1985

(a) Energía de Entrada

(b) Energía de Histéresis

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En la Figura 3.7 se muestran los mismos espectros de la Figura 3.5 en una representación diferente para varias demandas de ductilidad. En estas gráficas es más evidente que para periodos menores al dominante del terreno la energía aumenta con la ductilidad (Decanini y Mollaioli, 2001). Esto se debe a que los espectros de energía incluyen el desplazamiento de la estructura cuyos espectros tienen un comportamiento similar. La Figura 3.7b muestra los espectros de energía histérica, se observa que la energía histérica no existe para comportamiento elástico ($\mu=1$) ya que por definición ésta aparece debido a comportamiento inelástico. A pesar de las diferencias de ambas energías en el rango elástico y cercano a éste se observa que para ductilidades mayores e iguales a 3 estos espectros son similares.

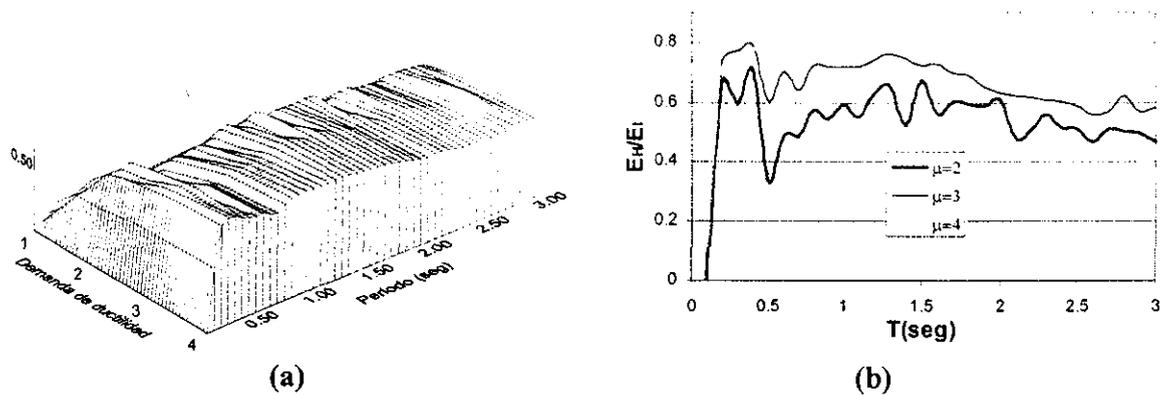


Figura 3.8 Variación de la relación E_H/E_I con la demanda de ductilidad para el registro de la estación SCT-EO del sismo del 19 de septiembre de 1985

- (a) Representación espacial
(b) Para ductilidad constante

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En la Figura 3.8 se muestran los espectros del cociente $E_H/E_{I\mu}$ en dos tipos de representaciones. En la Figura 3.8a se muestra este cociente para los espectros mostrados en la Figura 3.5 mediante una representación espacial. Se puede observar lo estable que es esta relación en el rango de valores de $2 < \mu < 4$. En la Figura 3.8b se muestran los espectros del cociente $E_H/E_{I\mu}$ para los espectros mostrados en la Figura 3.7.

Algunas de las expresiones que han sido propuestas por diferentes investigadores para esta relación se muestran a continuación. Con base en el análisis de registros de movimiento fuerte Kuwamura y Galambos (1989) proponen la siguiente expresión utilizando un modelo elastoplástico:

$$\frac{E_H}{E_I} \cong \frac{0.98}{\left[1 + 20(3\xi + 1.2 \cdot \bar{\xi})/(\mu_{cum} + 10)\right]^2} \quad (3.1)$$

Esta expresión depende de la fracción de amortiguamiento crítico, ξ , y de la ductilidad acumulada μ_{cum} . Para comparar estos valores con las relaciones calculadas que se muestran en la Figura 3.8 se supone una $\mu_{cum} = 5\mu$, $\xi = 0.05$ y $\mu = 4$. Se obtiene $E_H/E_{I\mu} = 0.6$.

Fajfar y Vidic (1994) proponen una expresión como función de la demanda de ductilidad, del modelo de histéresis, del coeficiente de amortiguamiento y del modelo de amortiguamiento,

$$\frac{E_H}{E_I} = C_E \frac{(\mu - 1)^{C_H}}{\mu} \quad (3.2)$$

donde C_E y C_H son constantes que dependen del modelo de histéresis y del amortiguamiento. Para $\xi = 0.05$ y un modelo bilineal se obtiene $E_H/E_{I\mu} = 0.63$, para el modelo de amortiguamiento proporcional a masa y a rigidez instantánea se obtiene $E_H/E_{I\mu} = 0.74$.

Lawson y Krawinkler (1995) confirman que esta relación constituye un parámetro muy estable y proponen un valor de $E_H/E_{I\mu}=0.4$ para $\mu=2$ y de $E_H/E_{I\mu}=0.6$ para $4<\mu<8$, excepto para períodos cortos.

Terán-Gilmore (1996a) sugiere establecer expresiones simples para demandas de ductilidad constante para un modelo elastoplástico perfecto. Él observa que el incremento de la relación $E_H/E_{I\mu}$ con la ductilidad generalmente no es significativo para $\mu \geq 3$. A diferencia de las expresiones anteriores esta propuesta varía con el período de la estructura proponiendo dos regiones como muestra la Figura 3.9. Para valores muy pequeños de T_1 la relación $E_H/E_{I\mu}$ tiende a incrementarse rápidamente con un comportamiento inestable que depende de las características del movimiento del terreno. Por ello, el autor propone expresiones sólo para períodos mayores a T_1 . Las dos ramas mostradas en la gráfica tienen una variación lineal decreciente, las ecuaciones (3.3) presentan las expresiones para los parámetros de este modelo.

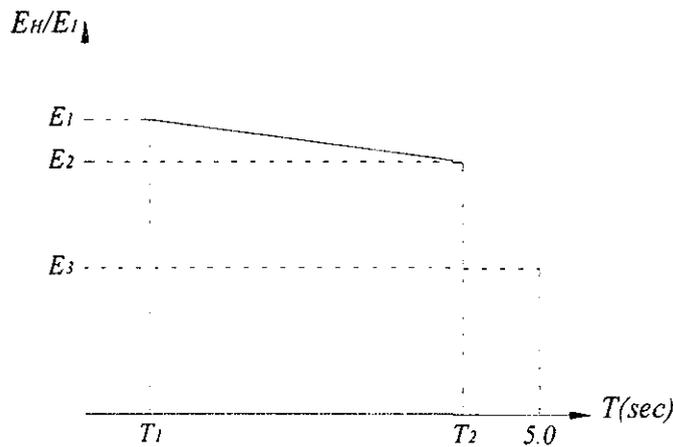


Figura 3.9 Forma del espectro de diseño de la relación E_H/E_I

$$T_1 = 0.1 + \frac{T_g}{4} \geq 0.3 \quad (3.3a)$$

$$T_2 = 1 + \frac{t_d}{20} + \frac{T_g}{3} + 2.5\xi \quad (3.3b)$$

$$E_1 = 0.90 - 0.002t_d + 0.10T_g - 0.20\xi_g - 4\xi + 9\xi^2 \quad (3.3c)$$

$$E_2 = 0.85 - 0.001t_d + 0.05T_g + 0.15\xi_g - 5.5\xi + 12\xi^2 \geq 0.15 \quad (3.3d)$$

$$E_3 = 0.30 + 0.007t_d + 0.05T_g + 0.15\xi_g - 3\xi + 6\xi^2 \geq 0.15 \quad (3.3f)$$

donde T_g , t_d y ξ_g son parámetros del movimiento del terreno. Para la estación SCT-EO el autor define los valores de los parámetros siguientes: $T_g=2$ seg., $\xi_g=0.05$ y $t_d=38$ seg. Con ellos se obtienen los valores que definen la forma del espectro: $T_1=0.6$, $T_2=3.7$, $E_1=0.84$, $E_2=0.68$, $E_3=0.54$.

Con referencia a un modelo elastoplástico perfecto y a la fracción de amortiguamiento crítico de $\xi=5\%$ Manfredi (2001) propone la siguiente expresión:

$$\frac{E_H}{E_I} = 0.72 \frac{\mu_c - 1}{\mu_c} \quad (3.4)$$

donde μ_c es igual a la ductilidad cíclica. Suponiendo un valor de $\mu_c=2\mu$ se obtiene $E_H/E_I=0.63$.

Decanini y Mollaioli (2001) propusieron una forma del espectro de diseño basada en la propuesta de Terán-Gilmore (1996a), ellos proponen tres regiones, una primera rama lineal creciente, una segunda aproximadamente constante y por último una rama decreciente, esta forma se muestra en la Figura 3.10.

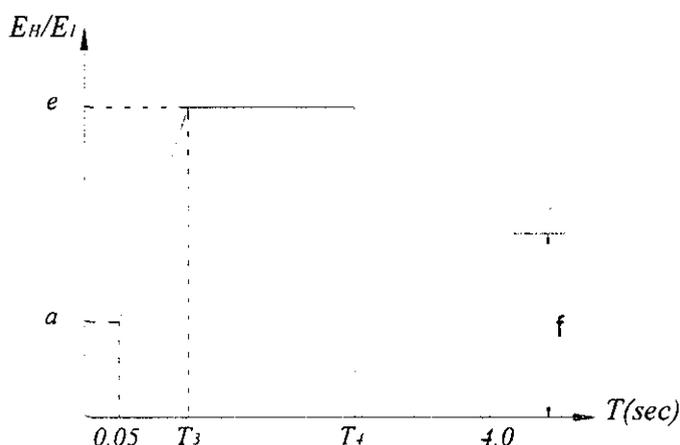


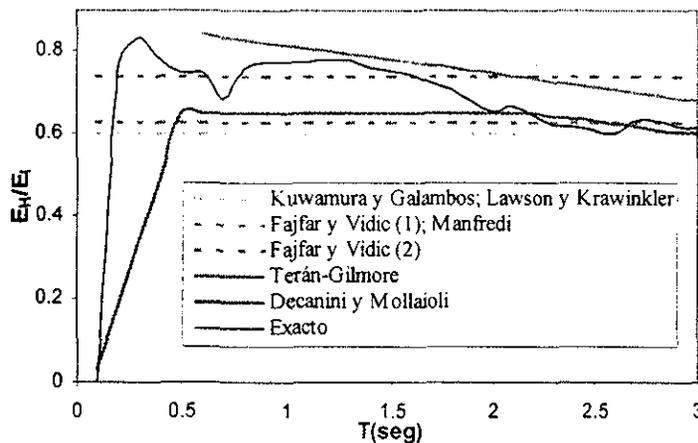
Figura 3.10 Forma del espectro de diseño de la relación E_H/E_I

Los parámetros característicos de la gráfica de la Figura 3.10 se muestran en la Tabla 3.1, en ésta están resaltados los valores para terreno blando y $\mu=4$ que posteriormente serán utilizados en una comparación.

Tabla 3.1 Parámetros del espectro de diseño de la relación E_H/E_I

Tipo de suelo	μ	a	e	f	$T_3(s)$	$T_4(s)$
Firme	2	0.13	0.45	0.38	0.15	1.6
	4	0.25	0.62	0.47	0.15	1.0
	6	0.30	0.65	0.48	0.15	1.0
Transición	2	0.10	0.48	0.40	0.30	2.0
	4	0.12	0.62	0.50	0.25	1.4
	6	0.15	0.66	0.52	0.20	1.2
Blando	2	0.01	0.50	0.47	0.60	2.4
	4	0.03	0.65	0.60	0.50	2.2
	6	0.05	0.70	0.62	0.45	1.8

En la Figura 3.11 se muestra una comparación de los resultados de cada propuesta con la relación $E_H/E_{I\mu}$ obtenida para la estación SCT-EO del sismo del 19 de septiembre de 1985 considerando una demanda de ductilidad de $\mu=4$. Se observa que los valores obtenidos con las propuestas de los autores mencionados se aproximan bastante al espectro exacto, las que mejor se aproximan son la propuesta de Fajfar y Vidic (2) para un modelo de amortiguamiento proporcional a la rigidez instantánea y la de Terán-Gilmore. A pesar de que varios de estos autores utilizaron el registro de SCT-EO para la obtención de sus propuestas, la propuesta hecha por Terán-Gilmore se ajusta más a este registro debido a que utilizó muy pocos eventos sísmicos y dentro de ellos los registros sintéticos de la estación SCT-EO.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 3.11 Comparación del espectro de la relación E_H/E_I con las expresiones propuestas

3.3.2 Factores de reducción

Al aceptar comportamiento inelástico en las estructuras es necesario obtener las demandas sísmicas para μ . Las demandas de resistencia asociadas a $\mu > 1$ por lo general resultan menores a la demanda de resistencia elástica en todo el rango de períodos. En la filosofía de diseño basada en los espectros de diseño de aceleración se reconoce que la principal razón por la que se reducen las ordenadas de los espectros elásticos es debida a la disipación de energía histerética que se obtiene al permitir un comportamiento no lineal en la estructura (Miranda, 1996). El factor de reducción R_μ que relaciona los espectros elásticos con los inelásticos se define como la demanda de resistencia elástica entre la demanda de resistencia inelástica:

$$R_\mu = \frac{F_y(\mu_i = 1)}{F_y(\mu_i = \mu)} \quad (3.5)$$

Algunas características de este factor son que su valor siempre es mayor que la unidad además que para $T=0$ s este factor es igual a uno y para períodos muy grandes ($T \rightarrow \infty$) el factor $R_\mu = \mu$. Este factor presenta grandes variaciones en suelo blando y sus mayores valores se presentan en el período dominante del terreno.

Como ya se ha mencionado los espectros inelásticos de energía de entrada tienen un comportamiento diferente a los espectros de respuesta de aceleración. Investigaciones realizadas por Decanini y Mollaioli (2001) han mostrado el comportamiento de la relación entre la energía elástica de entrada (E_I) y la inelástica ($E_{I\mu}$) con respecto a varios parámetros como el tipo de suelo, la ductilidad y la distancia al área epicentral. Ellos definen al cociente de esta relación como:

$$R_E = \frac{E_I}{E_{I\mu}} \quad (3.6)$$

Denominando R_E como "factor de modificación de respuesta". La intensidad y distribución de la relación R_E está principalmente influenciada por la demanda de ductilidad, μ , el período de vibración del sistema, T , el tipo de suelo y la distancia al área de ruptura. Los factores calculados por Decanini y Mollaioli (2001) se muestran en la Tabla 3.2. Una de las limitaciones de los factores obtenidos por estos autores es que proponen un espectro de R_E con dos intervalos de períodos de valores constantes; esto se debe a que los autores utilizaron un número reducido de registros para la determinación de este factor. Por ello los valores propuestos no son aplicables al suelo blando del valle de México.

Tabla 3.2 Factores de modificación de respuesta R_E (Decanini y Mollaioli, 2001)

Tipo de suelo	μ	D_f (km)	$R_E: T < T_a$	$R_E: T > T_b$
Firme	2	< 5	0.95	1.15
		> 5	0.95	1.09
	4	< 5	0.85	1.35
		> 5	0.88	1.25
Transición	2	< 5	0.95	1.15
		> 5	0.95	1.10
	4	< 5	0.85	1.35
		> 5	0.88	1.30
Blando	2	< 5	0.95	1.20
		> 5	0.95	1.15
	4	< 5	0.90	1.50
		> 5	0.85	1.35

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En la Figura 3.12 se muestra el factor de modificación de respuesta, R_E , para los espectros mostrados en la Figura 3.7a. En el pico se tiene la mayor reducción presentando un valor de aproximadamente $R_E=3.5$ para una ductilidad $\mu=4$. Este factor es superior a la media de los valores calculados por Decanini y Mollaioli (2001) que para un suelo clasificado como suave, con $\mu=4$ y con distancia al área de ruptura mayor a 5 km, $D_f > 5$ km y para períodos $T > 1.8$ s proponen un factor $R_E=1.35$. En esta figura también se observa la amplificación de la demanda de energía mostrada en la Figura 3.7a para períodos menores al predominante del terreno, esta amplificación se refleja con los valores de $R_E < 1$. También se observa como la amplificación es mayor conforme se incrementa la ductilidad, esto provocando que estas curvas se crucen. Decanini y Mollaioli (2001) proponen para los datos anteriores y para $T < 0.9$ s un factor $R_E=0.85$ que es superior al promedio mostrado en la figura, $R_E=0.5$. A continuación se presenta un breve análisis de este factor y de la relación $E_I/E_{I\mu}$ para el sismo del 25 de abril de 1989.

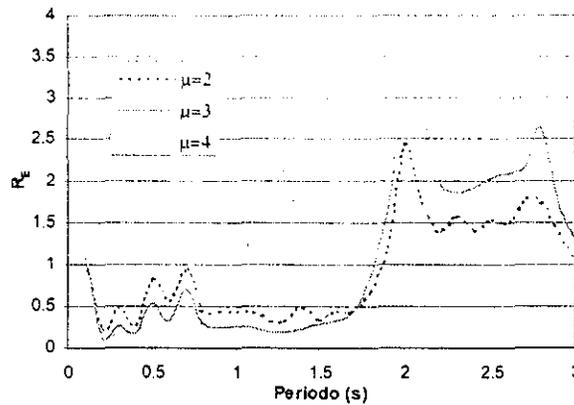


Figura 3.12 Factor de modificación de respuesta ($R_E = E_I / E_{I\mu}$) para cuatro demandas de ductilidad, $\mu=1, 2, 3$ y 4 para el registro de la estación SCT-EO del sismo del 19 de septiembre de 1985

3.4 ANÁLISIS DEL FACTOR DE MODIFICACIÓN DE RESPUESTA Y DE LA RELACIÓN E_H/E_I EN EL VALLE DE MÉXICO

Como se explico anteriormente, los espectros inelásticos de energía de entrada ($E_{I\mu}$) se pueden obtener conociendo el espectro elástico de energía de entrada (E_I) y teniendo una buena estimación del factor de modificación de respuesta (R_E) para las condiciones del sitio estudiado. Para conocer las características de comportamiento de energía inelástica en el valle de México se realizaron cálculos de los espectros inelásticos para el sismo del 25 de abril de 1989 y se estudiaron dos parámetros que definen este comportamiento: el factor de modificación de respuesta R_E y la relación $E_H/E_{I\mu}$.

Como lo observó Miranda (1993) en el caso de suelos blandos el factor de reducción de los espectros de aceleración tiene gran variación con el período de la estructura (T). Ya que sucede lo mismo con los espectros de energía, una forma más conveniente de presentar los resultados para el factor de modificación de respuesta R_E es normalizando los períodos (T) con el período dominante de la excitación (T_s).

En la Figura 3.13 se muestran los valores R_E para $\mu=4$ de las estaciones en suelo blando del valle de México que registraron el sismo del 25 de abril de 1989 y en línea oscura se muestra el promedio (Med) y el promedio más la desviación estándar (Med+DE) de las ordenadas de estos espectros. Para tomar en cuenta el valor de T_s se consideró el valor en que el espectro elástico de energía de entrada analizado presenta el valor máximo. Se observa que estos factores tienen una tendencia uniforme en casi todas las estaciones aunque en el pico, que corresponde al valor de $T/T_s=1$, el valor de R_E tiene variaciones de amplitud de 2.2 a 8. Un comportamiento similar ocurre para otras ductilidades.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

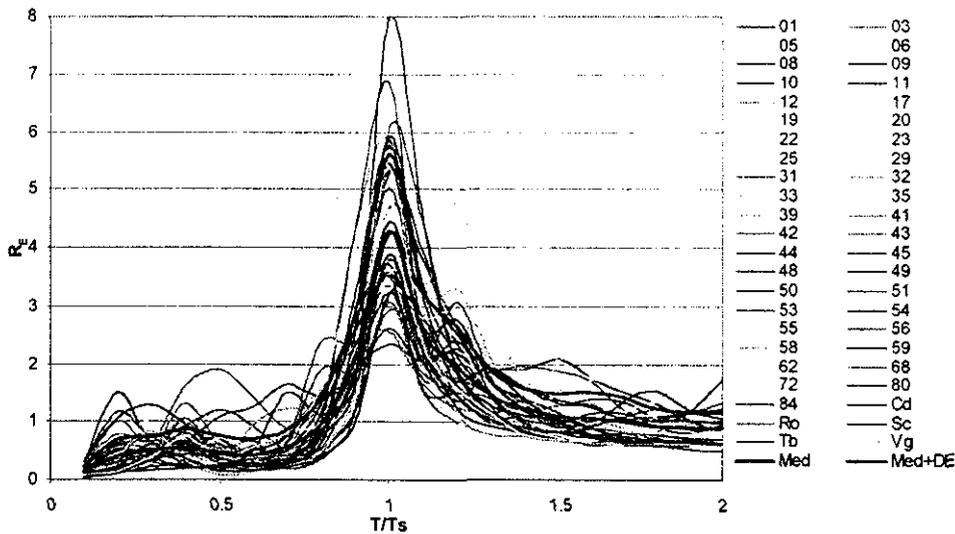


Figura 3.13 Factor R_E para $\mu=4$ de varias estaciones en suelo blando que registraron el sismo del 25/04/89

En la Figura 3.14 se muestran los valores $E_H/E_{I\mu}$ para las mismas estaciones y en línea oscura se muestra el promedio de las ordenadas de estos espectros. Se observa que estos factores tienen variaciones de aproximadamente ± 0.1 con respecto al promedio en cada período. Un comportamiento similar ocurre para los espectros en los diferentes tipos de suelo y con diferentes ductilidades.

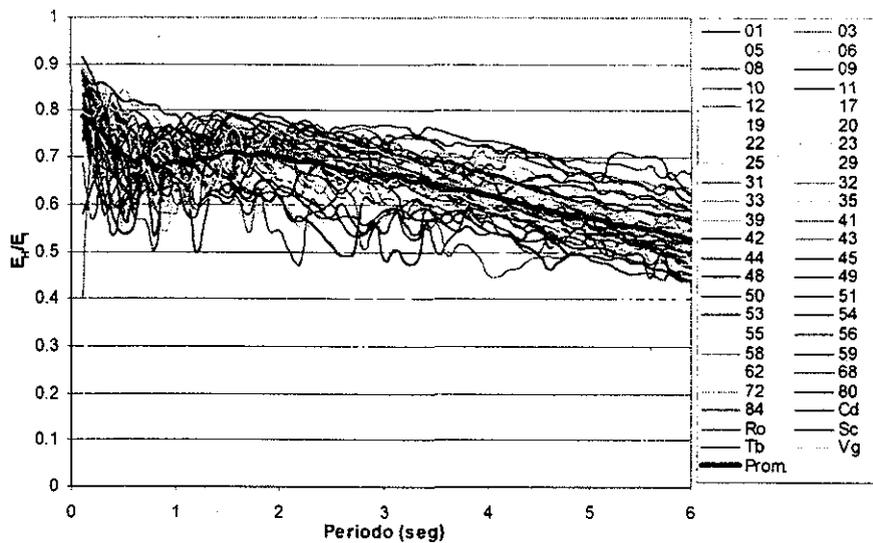


Figura 3.14 Relación $E_H/E_{I\mu}$ para $\mu=4$ de varias estaciones en suelo blando que registraron el sismo del 25/04/89

En la Figura 3.15 se muestran las gráficas para estas dos relaciones en los distintos tipos de suelos del valle de México. Estas gráficas corresponden al promedio de los valores obtenidos de los registros del sismo del 25 de abril de 1989.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

En las gráficas del lado izquierdo (R_E) se muestra una influencia significativa del tipo de suelo, en particular para suelo blando de la zona de Lago (Figura 3.15a). Para los otros tipos de suelo las gráficas son muy similares en su forma y la diferencia en ordenadas es menor. En las gráficas de la derecha ($E_H/E_{I\mu}$) se observa para los tres tipos de suelo un comportamiento muy similar y poca diferencia de este factor.

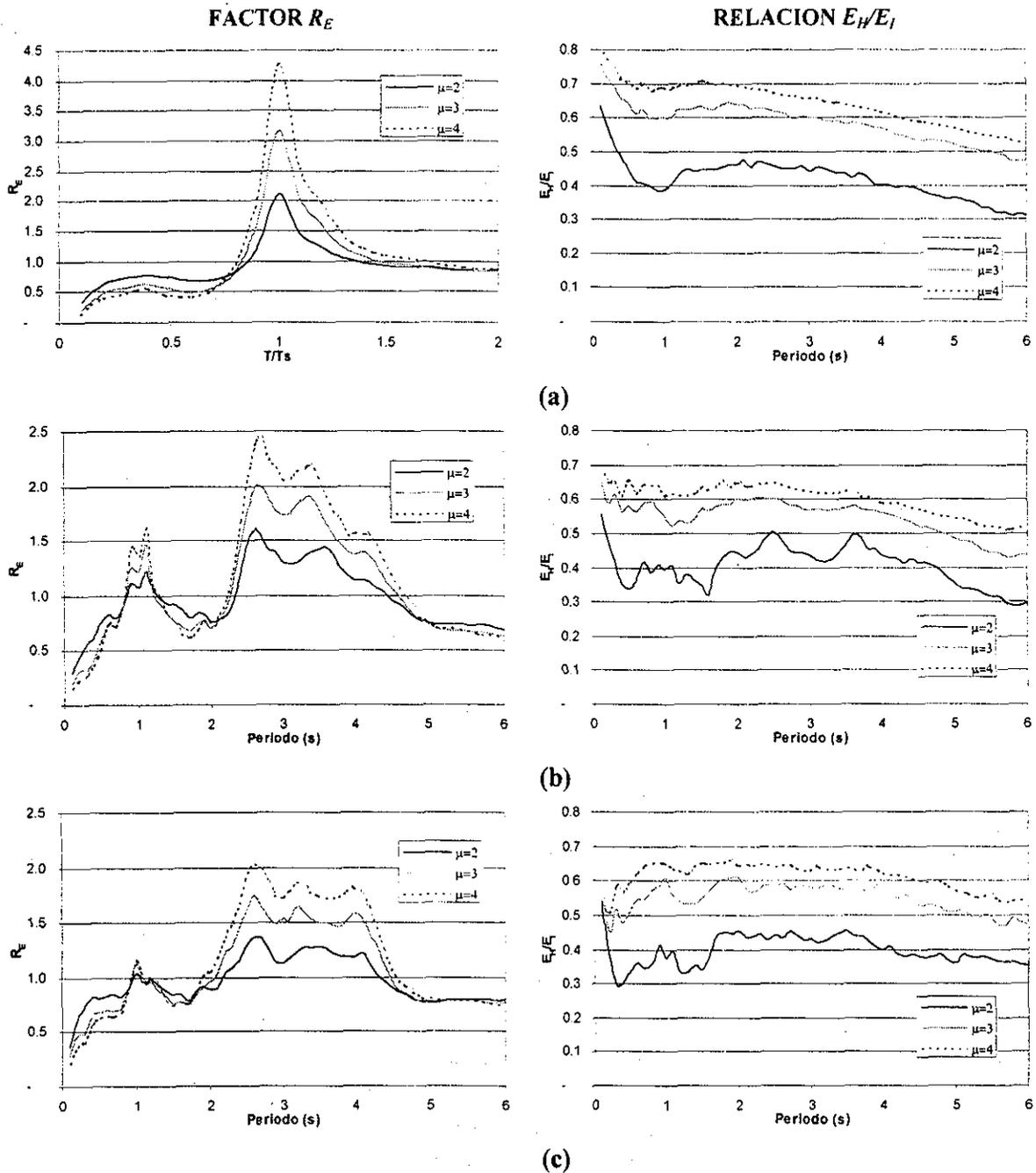


Figura 3.15 Promedio de las relaciones R_E y $E_H/E_{I\mu}$ para el sismo del 25/04/89

- (a) Zona de Lago
- (b) Zona de Transición
- (c) Zona de Lomas

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Una análisis más detallado del factor de modificación de respuesta (R_E) podría llevar a proponer expresiones que definan el comportamiento de los espectros inelásticos de energía de entrada. Ya que este no es uno de los objetivos de este trabajo, un análisis de este tipo se propone para futuras investigaciones. Como se vio en la sección anterior existen un gran número de expresiones que definen la relación $E_H/E_{I\mu}$ y que tienen buena aproximación con los valores calculados en el valle de México.

3.5 ESPECTROS DE ENERGÍA EN EL VALLE DE MÉXICO

En la Figura 3.16 se muestran los espectros elásticos de energía de entrada (E_I), en la Figura 3.17 se muestran los inelásticos de energía de entrada ($E_{I\mu}$) y de histéresis (E_H) y en la Figura 3.18 se muestran los de energía histerética normalizada (NE_H) para una demanda de ductilidad, $\mu=4$. Sólo se utilizó este valor ya que como se observó anteriormente los espectros inelásticos $E_{I\mu}$ y E_H son constantes con la ductilidad para un cierto intervalo de valores. Aunque esto no es cierto para NE_H , se analiza igualmente la energía para $\mu=4$ y se debe tomar en cuenta que este valor se incrementa con la ductilidad. Estos espectros corresponden al componente norte-sur de los registros localizados en las estaciones del valle de México para el sismo del 25 de abril de 1989. En este trabajo no se muestra el componente este-oeste pero la mayoría de los espectros del componente norte-sur tienen mayores ordenadas. Se escogió este sismo por ser el más intenso desde 1985 y porque fue ampliamente registrado por la red. El propósito de mostrar todos los registros no es el de identificar la energía en cada estación, sino mostrar algunas de las principales características del comportamiento global del valle.

Para la energía elástica de entrada (E_I) de la Figura 3.16 se observa lo siguiente:

- Los espectros de energía en terreno blando presentan un pico bien definido en el período dominante del terreno. Esto se observa en la uniformidad de los espectros de la Figura 3.16b
- Existe una gran variación en la amplitud de la energía entre distintas estaciones, incluso para estaciones sobre suelos con el mismo período dominante, esto se observa en la Figura 3.16b ya que varias estaciones quedan alejadas de la media y por fuera de la media más la desviación estándar mostradas con líneas oscuras en esta figura. Por ello, no es posible correlacionar la amplitud máxima con T_s . Se concluye que los niveles de energía no están directamente correlacionados con el período dominante del suelo
- A excepción de períodos de $T/T_s < 0.3$ el coeficiente de variación (COV) mostrado en la Figura 3.16c es del orden de 0.6 a 1.2
- La estación con la mayor ordenada espectral corresponde a la estación 49 (Centro Médico Siglo XXI) que presenta el pico en un período igual a 3 segundos. La estación SCT considerada a nivel mundial como la estación más representativa de amplificación dinámica en valles aluviales no es la de mayor demanda de energía dentro del valle (línea más gruesa en color negro en la Figura 3.16a). De hecho, el pico de la estación SCT tiene una ordenada espectral de aproximadamente un octavo de la ordenada máxima de la estación 49
- Las estaciones con mayores ordenadas espectrales, entre 2 y 3.2 segundos, se localizan en zonas en las que durante sismos grandes se han reportado daños considerables. Sin embargo,

hay zonas de $T_s \approx 1.5$ segundos donde ha habido muchos daños durante sismos pasados, como se observará en el capítulo siguiente, y que presentan baja energía. En periodos menores a 1.8 segundos la demanda de energía es muy pequeña, incluyendo las estaciones localizadas en terreno firme y algunas zonas donde ha habido daños

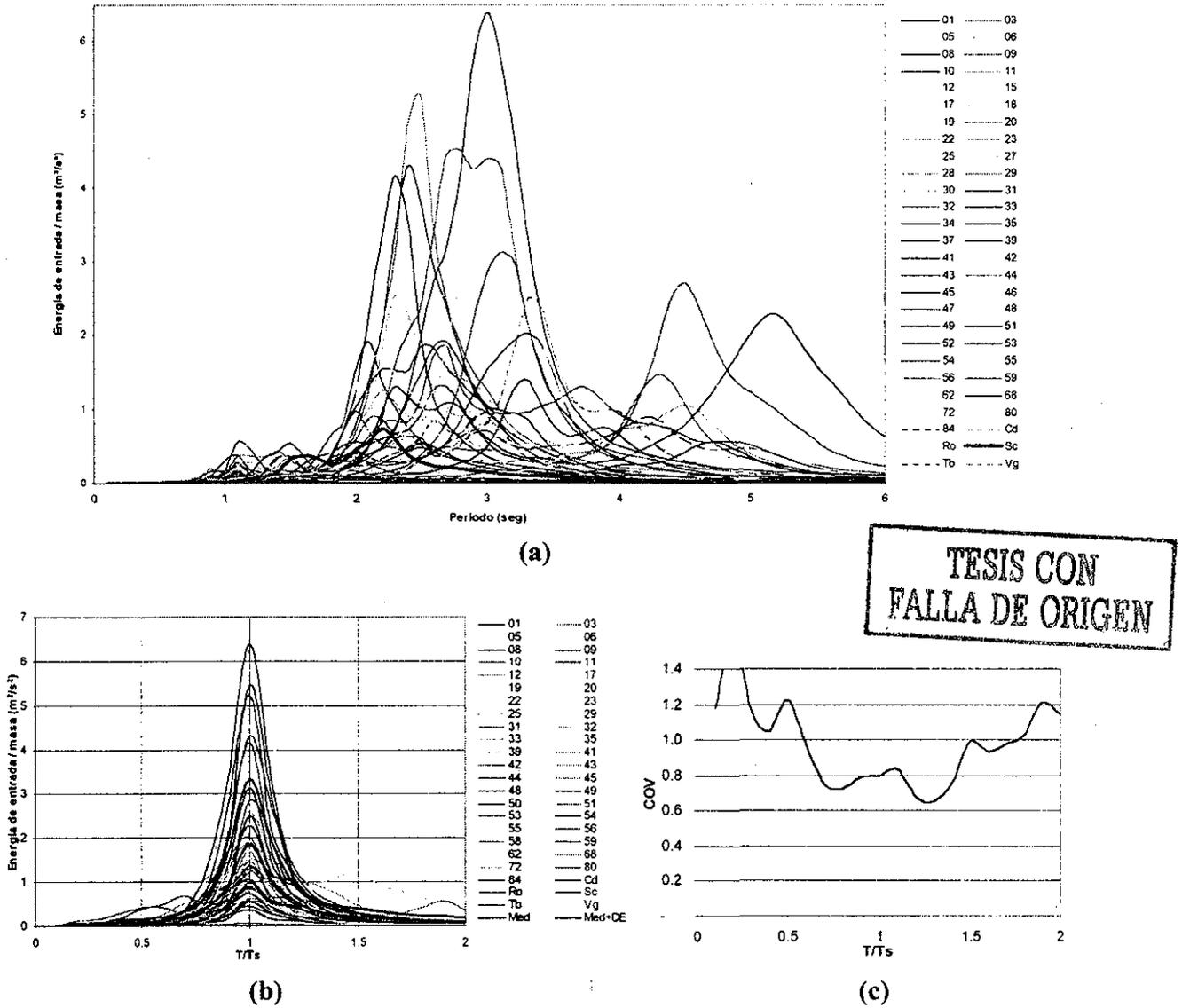


Figura 3.16 Espectros de energía de entrada del sismo del 25 de abril de 1989 en la ciudad de México en el componente norte-sur, $\xi=5\%$
 (a) Espectros para T en el valle de México
 (b) Espectros para T/Tb en terreno blando
 (c) Coeficiente de variación en terreno blando

Para la energía inelástica de entrada ($E_{I\mu}$) y la energía de histéresis para $\mu=4$ de la Figura 3.17 se observa lo siguiente:

- También se presenta la energía máxima en el período dominante del terreno

- Las mayores ordenadas de estos espectros se presentan en períodos de 2 a 3 segundos y a diferencia de los espectros elásticos existen zonas de 1 a 2 segundos con ordenadas de energía que no se pueden despreciar
- La estación SCT (línea más gruesa en color negro) no es la que presenta mayores ordenadas pero tiene valores de hasta un sexto de la ordenada espectral máxima (estación 49)
- Los espectros de energía inelástica de entrada ($E_{I\mu}$) e histerética (E_H) para cada estación son casi idénticos y solo difieren en la amplitud. Esto comprueba, como ya se había comentado, que la relación $E_H/E_{I\mu}$ es muy estable

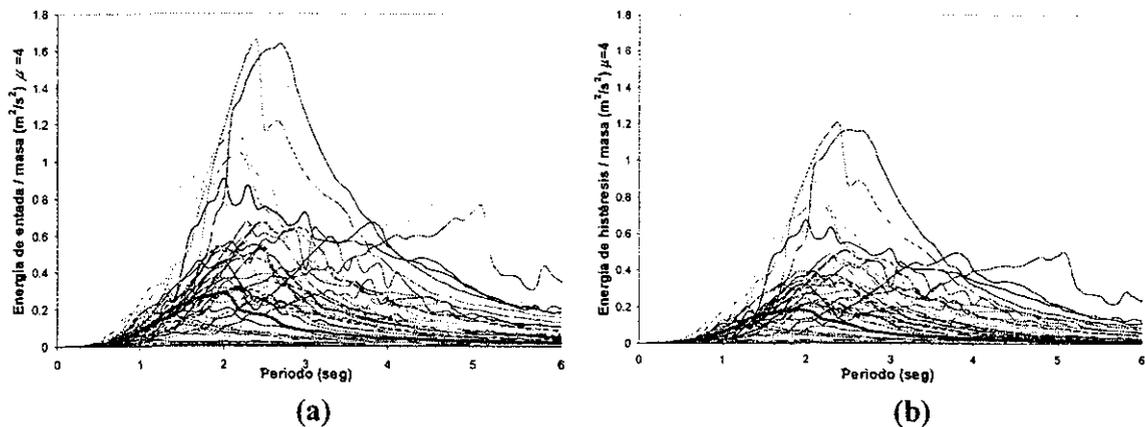


Figura 3.17 Espectros de energía de entrada del sismo del 25 de abril de 1989 en la ciudad de México en el componente norte-sur, $\xi=5\%$

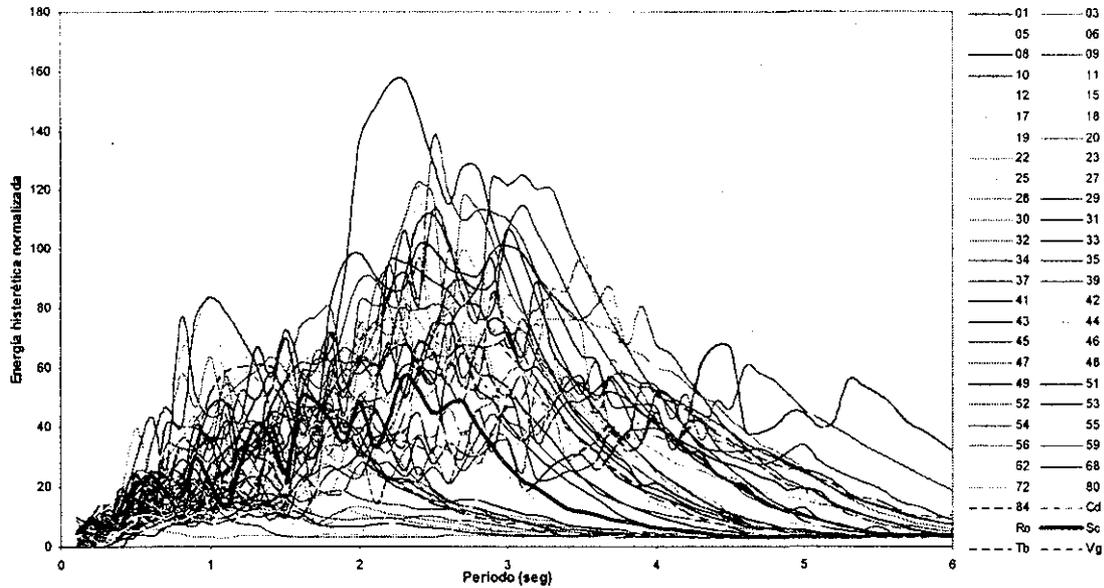
- (a) Energía de entrada, $\mu=4$
 (b) Energía de histeresis, $\mu=4$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

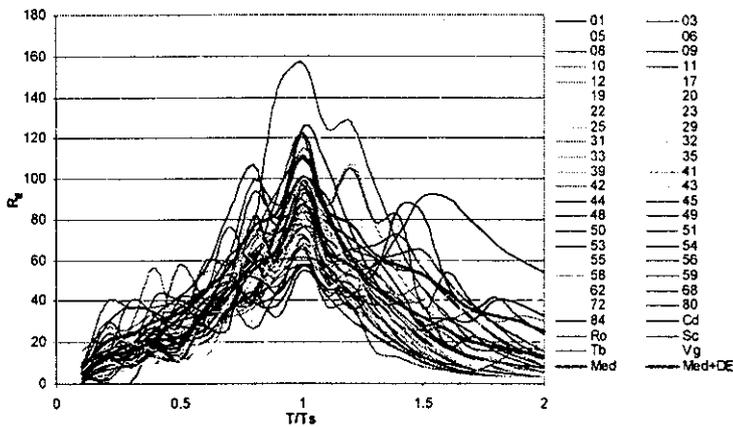
Para la energía histerética normalizada (NE_H) de la Figura 3.18 se observa lo siguiente:

- Los espectros de energía histerética normalizada tienen forma irregular pero en muchos de los espectros la energía máxima también se presenta en el período dominante del terreno
- La diferencia entre las distintas estaciones es menor
- La variación de las ordenadas en terreno blando es un poco menor que para los espectros de la Figura 3.16b, esto se observa en la Figura 3.18b en que muchas de las estaciones quedan por debajo de la media más la desviación estándar mostrada con líneas oscura
- El coeficiente de variación (COV) mostrado en la Figura 3.18c es del orden de 0.2 a 1.0 siendo el menor en $T/T_s=1$
- La estación con la mayor ordenada espectral corresponde a la estación 51 con período de 2.3 segundos. La estación SCT (línea más gruesa en color negro en la Figura 3.18a) no es la que presenta mayores ordenadas pero tiene valores de aproximadamente un tercio de la ordenada espectral máxima correspondiente a la estación 51
- Los estaciones en que se presentan las mayores ordenadas espectrales son las mismas que las de los espectros elásticos (de períodos entre 2 y 3.2 segundos), pero existen zonas de

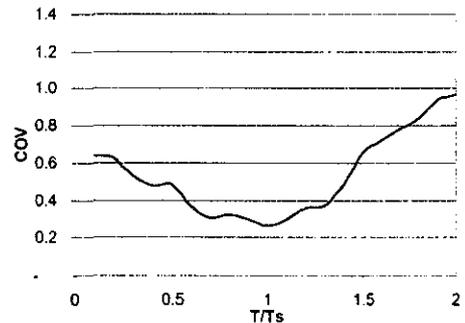
$T_s \approx 1.0$ segundo con valores de ordenadas importantes. Entre estas estaciones están algunas localizadas en zona de transición que en algunos casos tienen ordenadas superiores a las de terreno blando



(a)



(b)



(c)

Figura 3.18 Espectros de energía histerética normalizada, $\mu=4$ del sismo del 25 de abril de 1989 en la ciudad de México en el componente norte-sur, $\xi=5\%$

- (a) Espectros para T en el valle de México
- (b) Espectros para T/Tb en terreno blando
- (c) Coeficiente de variación en terreno blando

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Al analizar otros sismos se tienen conclusiones muy similares, pero no siempre las mismas estaciones tienen las mayores ordenadas de energía. Esto se observa en las Figuras 3.19, 3.20, 3.21 y 3.22 que muestran los espectros elásticos de energía de entrada para los sismos del 14 de

septiembre de 1995, 9 de octubre de 1995, 15 de junio de 1999 y 30 de septiembre de 1999, respectivamente.

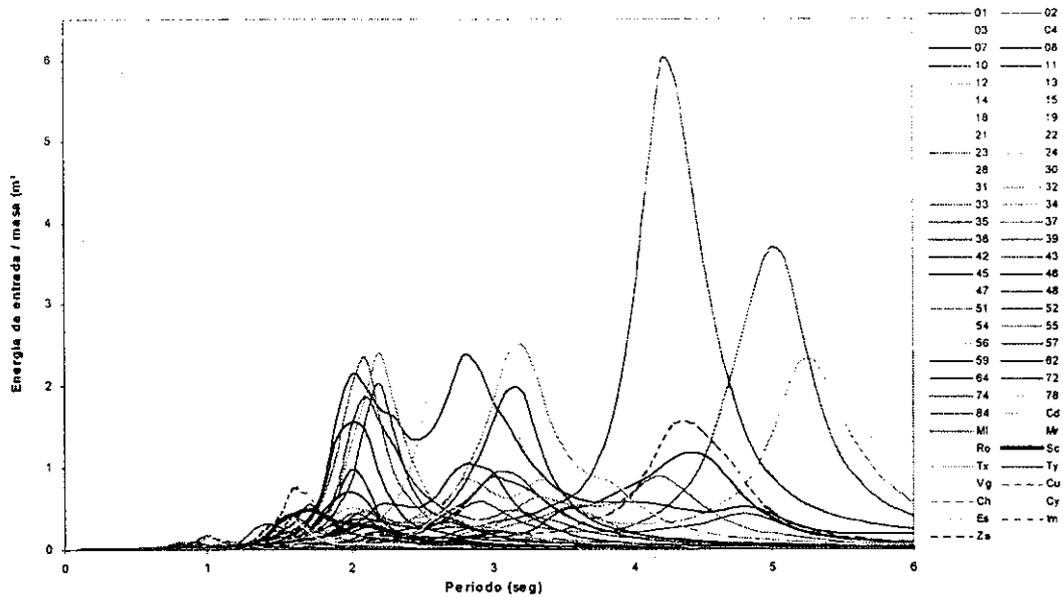


Figura 3.19 Espectros de energía de entrada del sismo del 14 de septiembre de 1995 en la ciudad de México en el componente norte-sur, $\xi=5\%$

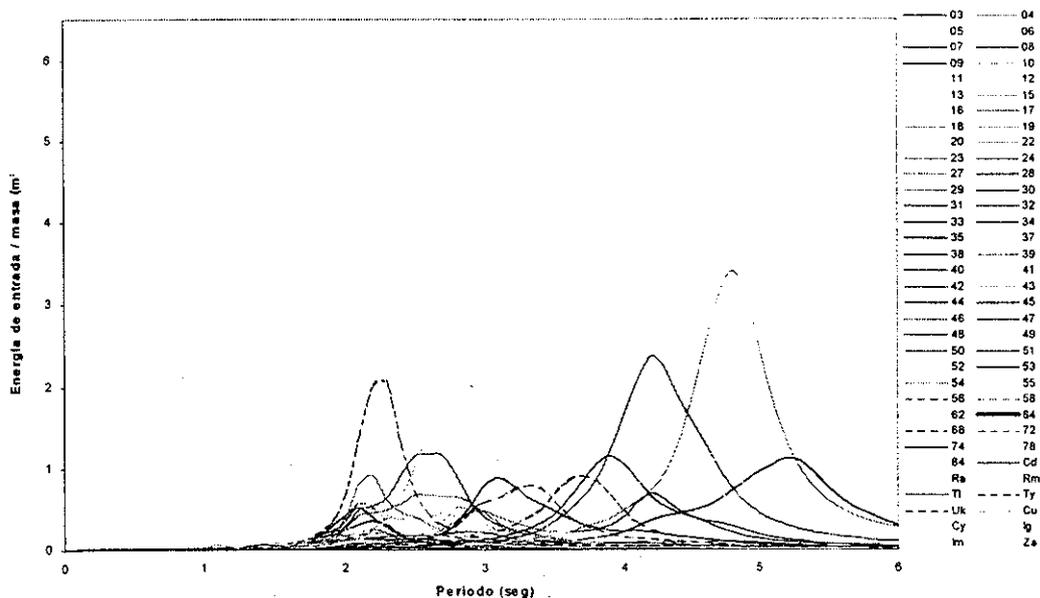


Figura 3.20 Espectros de energía de entrada del sismo del 9 de octubre de 1995 en la ciudad de México en el componente norte-sur, $\xi=5\%$

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

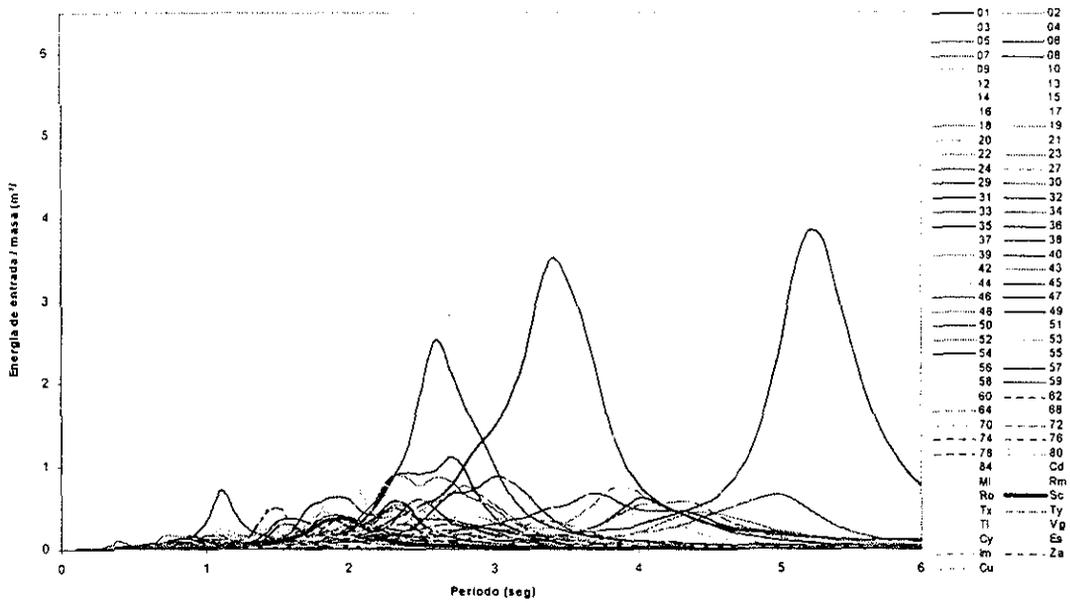


Figura 3.21 Espectros de energía de entrada del sismo del 15 de junio de 1999 en la ciudad de México en el componente norte-sur, $\xi=5\%$

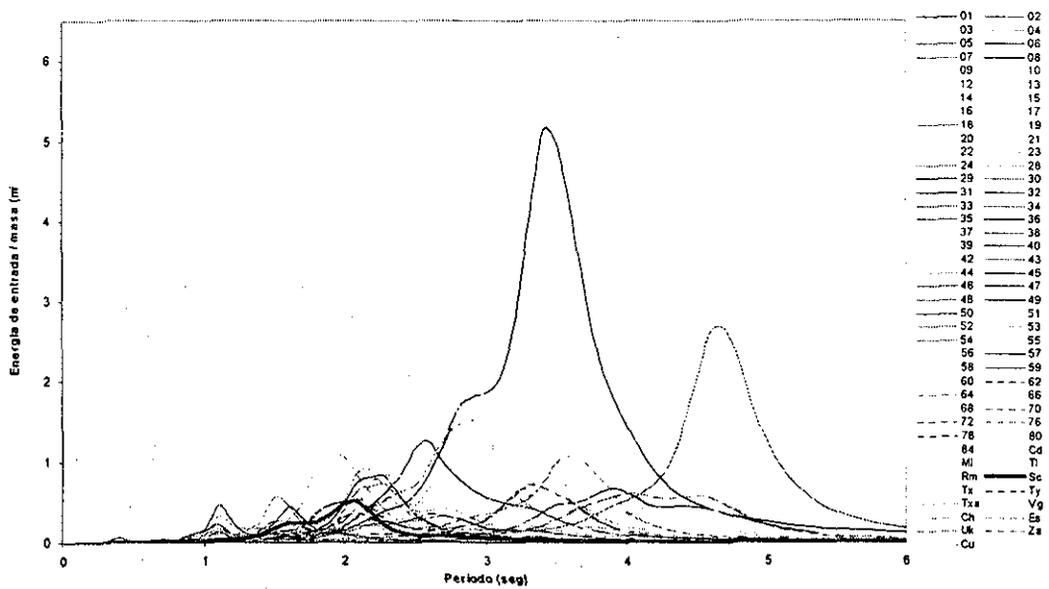
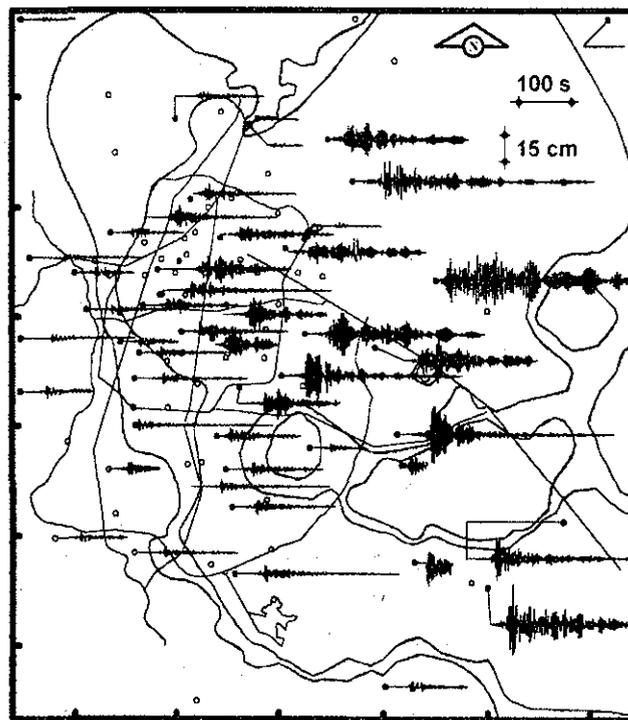


Figura 3.22 Espectros de energía de entrada del sismo del 30 de septiembre de 1999 en la ciudad de México en el componente norte-sur, $\xi=5\%$

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

MAPAS DE ENERGÍA EN EL VALLE DE MÉXICO

Como en pocos lugares, los edificios de la ciudad de México están sometidos ante fuerzas sísmicas con un número elevado de ciclos de movimiento. Como ejemplo, se observa en la Figura 4.1 los desplazamientos del terreno calculados en las tres zonas geotécnicas del valle para cada sitio en donde se captó el movimiento; el evento escogido es el sismo del 14 de septiembre de 1995 y los registros empleados corresponden al componente norte-sur del movimiento. En esta figura sorprende la extensa duración de las señales dentro de la zona de lago comparada con las que se presenta en terreno firme. Como puede apreciarse, la duración total de algunos de los registros es del orden de 300 segundos y aproximadamente de 150 segundos de etapa intensa para la zona de lago al noreste de la ciudad.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 4.1 Desplazamientos del terreno en el valle de México para el sismo de 14/09/95, componente norte-sur

La ciudad de México creció con estructuras ligeras y flexibles diseñadas para no experimentar hundimientos, pero con características que las hacen vulnerables ante sismos (Reinoso, 1996). Prueba de ello fueron los sismos de 1985 ($M=8.1$ y 7.6) originados en las costas de Michoacán que provocaron daños y destrucción sin precedente. Murieron más de cinco mil personas y se dañaron más de dos mil edificios (Reinoso, 2000). En este capítulo se calculan curvas de igual energía en el valle de México y se correlacionan con el daño ocurrido en sismos pasados, con ello se plantea proponer parámetros de energía para identificar zonas de peligro sísmico alto que puedan ser consideradas en la microzonificación sísmica del valle de México.

4.1 ANTECEDENTES

Los primeros trabajos de exploración y laboratorio para conocer las propiedades del subsuelo en la zona céntrica de la ciudad de México dieron fruto a la primer microzonación. Debido a los daños que causó el sismo de Guerrero de 1957 ($M=7.7$) se impulsaron estudios sobre el comportamiento del valle de México ante sismos. Desde entonces nuestra ciudad cuenta con un reglamento con microzonificación sísmica. En 1979 ocurre el sismo de Petatlán ($M=7.6$) que produce algunos daños en la colonia Roma y derriba la Universidad Iberoamericana. En esos momentos se pensó que defectos estructurales habían causado el colapso de la universidad, y no se consideró que los efectos de sitio pudieran haber sido tan importantes. Son los sismos de 1985 ($M=8.1$ y 7.6) los que dejan grandes lecciones sobre amplificación sísmica en depósitos lacustres al registrar el movimiento en los tres tipos de suelo del valle de México; el registro de aceleración en SCT evidencia la gran amplitud de la respuesta de ese sitio para períodos largos ($T=2s$).

Mediante las observaciones del daño en estructuras durante el sismo de 1985, se construyeron mapas de envolventes de daño que fueron tomados en cuenta para la microzonificación de 1987. También se realizaron varios estudios que correlacionan la intensidad sísmica con los efectos de sitio identificando zonas de alta intensidad (Earthquake Spectra, 1988 y 1989). El reglamento de 1987 reconoce estas zonas exigiendo consideraciones más estrictas de diseño.

La amplia y contundente evidencia ahora disponible a partir de la instrumentación sísmica que se ha colocado en el valle de México permite una zonificación más detallada y más precisa (Ordaz *et al.*, 2000). El cuerpo de la nueva versión de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal propone una subdivisión de la zona III en cuatro subzonas, que corresponden a intervalos de períodos dominantes del suelo que permiten construir espectros razonablemente uniformes. Inclusive este reglamento contiene un apéndice donde es posible construir espectros de diseño a partir del período dominante del sitio. Sin embargo, esta zonificación no considera efectos de duración del movimiento que es de gran importancia en el valle de México y que provoca en algunas estructuras varios ciclos de incursión en el rango plástico y por consiguiente daño por deterioro de los materiales.

Estudios de daños

Con base en el estudio de los edificios dañados en la Ciudad de México por los sismos de subducción de 1957, 1979 y 1985 (Iglesias y Aguilar, 1988 y Meli y Miranda, 1986), se obtuvieron mapas de las envolventes de daños. En la Figura 4.2 se muestran los resultados

obtenidos. La comparación de estas envolventes muestran que las zonas afectadas cercanas al centro de la ciudad tienden a ser concéntricas, independientemente de la diferente localización del epicentro y de la magnitud del sismo. Esto es evidente puesto que la respuesta de las estructuras en la zona de Lago está ligada a los efectos de sitio. Las zonas de daños mayores (ver Figura 4.2) para los sismos de septiembre de 1985 corresponden a construcciones que colapsaron o que sufrieron daños graves.

Para interpretar la distribución del daño (Meli y Miranda, 1986) hay que tomar en cuenta que la menor densidad de daños en algunas zonas pueden deberse a que el número de construcciones del tipo más afectado por el sismo era reducido y no necesariamente a que la intensidad del movimiento fuese menor. Es decir, estas curvas son en gran medida un reflejo de la mancha urbana y no tanto del peligro, sobretodo de zonas nuevas en donde no había edificios cuando ocurrieron estos sismos. Análisis y comparaciones hechas por Meli y Miranda (1986) dieron como resultado que las zonas dañadas corresponden con valores de entre 1.5 y 2.8 segundos de período dominante del terreno (T_s).

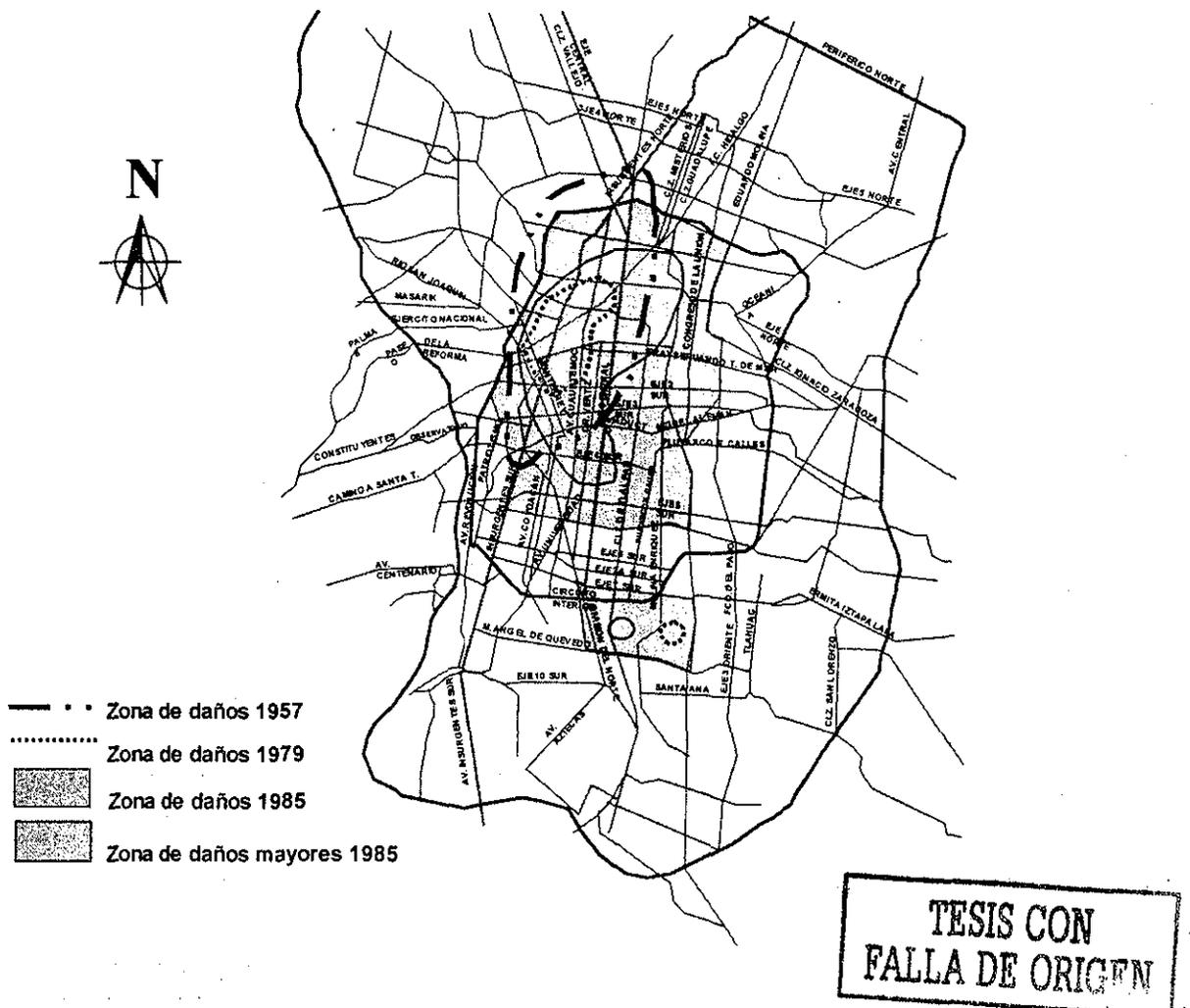


Figura 4.2 Zonas de daños en el valle de México para algunos sismos severos

4.2 CURVAS DE IGUAL ENERGÍA Y CORRELACIÓN CON EL DAÑO

Con los espectros mostrados en la Figura 3.16 calculados para el sismo del 25 de abril de 1989, se realizaron las curvas de igual energía elástica de entrada (E_i) para varios intervalos de períodos estructurales. La Figura 4.3 muestra cuatro gráficas que corresponden a períodos estructurales de 1.5, 2, 3 y 4 segundos, calculadas tomando el mayor valor en un intervalo de ± 0.2 segundos en cada período. Las curvas corresponden a cuatro diferentes niveles de energía, del tono más claro al más oscuro, de 0.0 a 0.1, de 0.1 a 0.3, de 0.3 a 1.5 y mayor que 1.5 m^2/s^2 , respectivamente. Estos niveles de energía son sólo para observar la variación de la energía y su distribución en el valle de México. También se muestran con líneas oscuras las zonas de daño del sismo de 19 de septiembre de 1985 (Figura 4.2) donde las zonas con bordes rectos representan los límites de las zonas que presentaron daños y las otras zonas representan las zonas de mayor daño. La zona sombreada con líneas corresponde a la zona de Lomas del valle, las líneas más tenues son las avenidas principales y los puntos negros corresponden a las estaciones que registraron ese temblor y que fueron utilizadas para la construcción de estas curvas. No se incluyen las zonas de daño de los sismos de 1957 y 1979 ya que son muy similares a las observadas en la parte central de la ciudad de México durante el sismo de 1985 (Figura 4.2). Las gráficas más interesantes son las correspondientes a los períodos de 1.5 y 2 segundos ya que son las que mejor se correlacionan con las zonas de daño de sismos pasados (Figura 4.2), aunque para la gráfica de 1.5 segundos la energía es baja.

De acuerdo a los datos existentes de estudios previos (Meli y Miranda, 1986) durante los sismos de 1985 la mayor cantidad relativa de fallas corresponde a construcciones de más de 5 pisos como lo muestra la Tabla 4.1. Una estimación aproximada del período de vibración de las estructuras se obtiene dividiendo el número de pisos (N) entre 10, con lo que se podría suponer, por ejemplo, que las construcciones de 9 pisos tienen un período de $T=0.9$ segundos y las de 12 niveles uno de $T=1.2$ segundos. En un estudio reciente, Murià y González (1995) proponen estimar el período vibración en función del sistema estructural, en sistemas de losa plana la estimación del período puede hacerse con $T \approx 0.2N$, así para construcciones de 9 pisos el $T=1.8$ segundos y para 12 pisos el $T=2.4$ segundos. Podríamos suponer que la mayoría de las construcciones que sufrieron daños tenían períodos aproximados de entre 1 y 2.5 segundos y que estos períodos podrían incrementarse al presentarse deterioro de los materiales que degrada la rigidez. Es por ello que existe coincidencia con los daños para las gráficas de 1.5 y 2 segundos.

Tabla 4.1 Estadísticas por número de pisos en la zona de mayor daño (Meli y Miranda, 1986)

Número de niveles	Construcciones		
	Existentes	Dañadas	% de daño
Hasta de 2	37,484	29	0.08%
De 3 a 5	13,498	78	0.58%
De 6 a 8	1,616	110	6.81%
De 9 a 12	529	62	11.72%
Más de 12	229	26	11.35%
Total	53,356	305	0.57%

En la Figura 4.3 no se incluyó la gráfica para período de un segundo ya que tienen ordenadas espectrales muy pequeñas como puede observarse en las ordenadas de los espectros de la Figura 3.16. Además, para hacer una comparación más formal de estas curvas con las zonas de daño,

habría que considerar sólo las construcciones que tuvieron un comportamiento elástico o cercano a éste, lo cual no es posible debido a la poca información existente sobre las construcciones dañadas. En la gráfica para $T=2s$ se observa un área con mucha energía y fuera de la envolvente de daños. Esta área se localiza en la esquina inferior derecha del Circuito Interior, entre las envolventes de daños mayores. Para este sismo es mayor la energía de entrada en la parte oeste de la zona de Lago que históricamente ha sido la más afectada durante sismos de subducción.

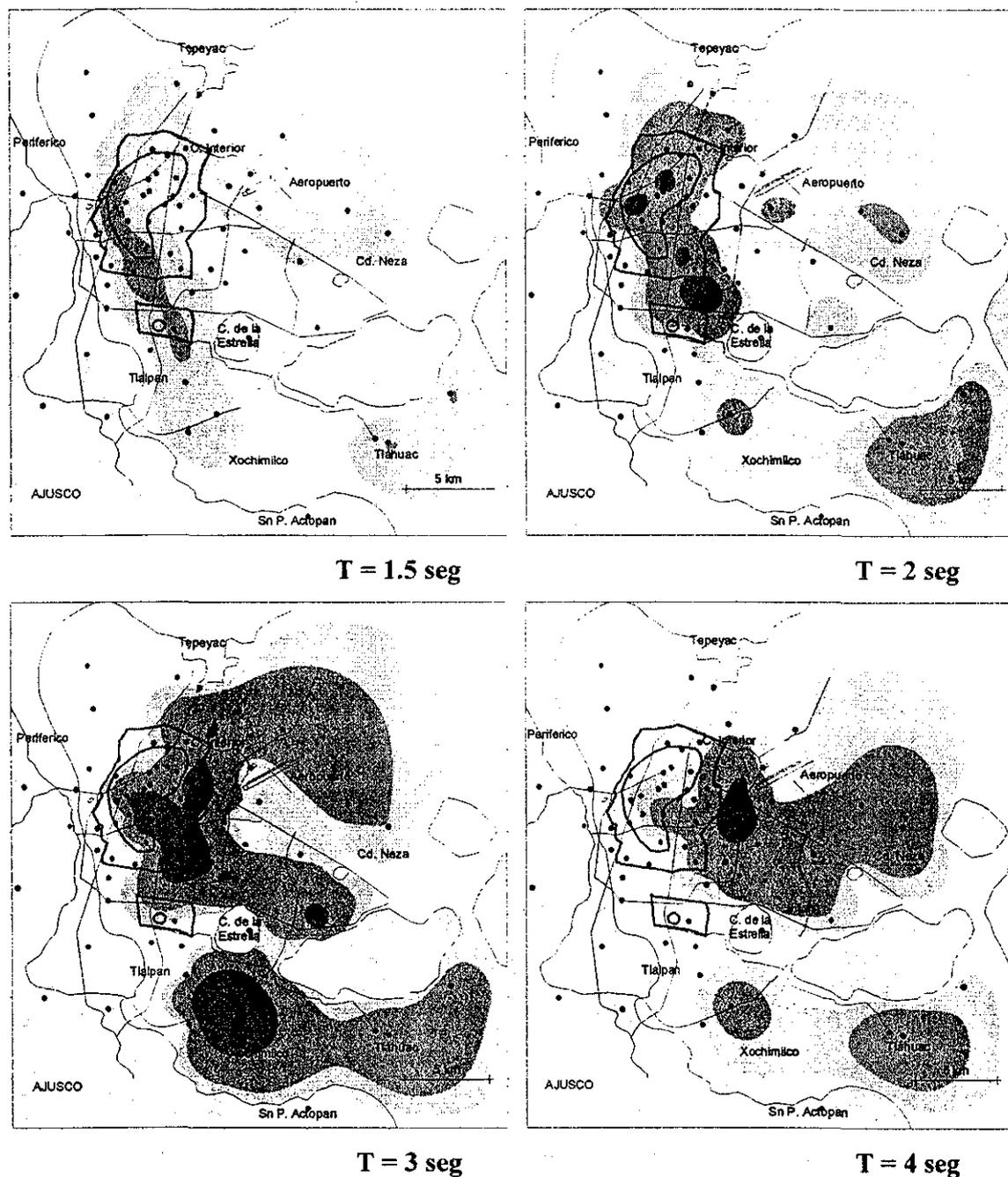


Figura 4.3 Curvas de igual E_I para cuatro períodos en el valle de México obtenidas para el sismo del 25 de abril de 1989, componente NS. Los cuatro diferentes niveles de energía (del tono más claro al más oscuro) corresponden a intervalos de 0.0 a 0.1, de 0.1 a 0.3, de 0.3 a 1.5 y mayor que 1.5 m^2/s^2 , respectivamente. Las líneas oscuras representan las zonas de daño de los sismos de 1985

En la Figura 4.3 se observa que al sur del valle de México (Xochimilco y Tláhuac) existen zonas con bastante energía E_I , aunque en estas zonas existe menor número de estaciones por lo que los contornos de energía tienen una gran incertidumbre al igual que en la zona noreste del valle. En estas zonas aún no hay estructuras de más de 5 niveles pero se deben tomar las medidas necesarias para evitar daños a este tipo de estructuras durante sismos futuros. Conforme se incrementa el período estructural la energía se mueve hacia las zonas de estratos de arcilla más profundos con T_s mayores ya que la energía de entrada máxima corresponde al período más largo (dominante) del terreno. En estas zonas de gran energía no se han registrado daños durante sismos pasados, esto se debe a que no existían estructuras con períodos tan largos.

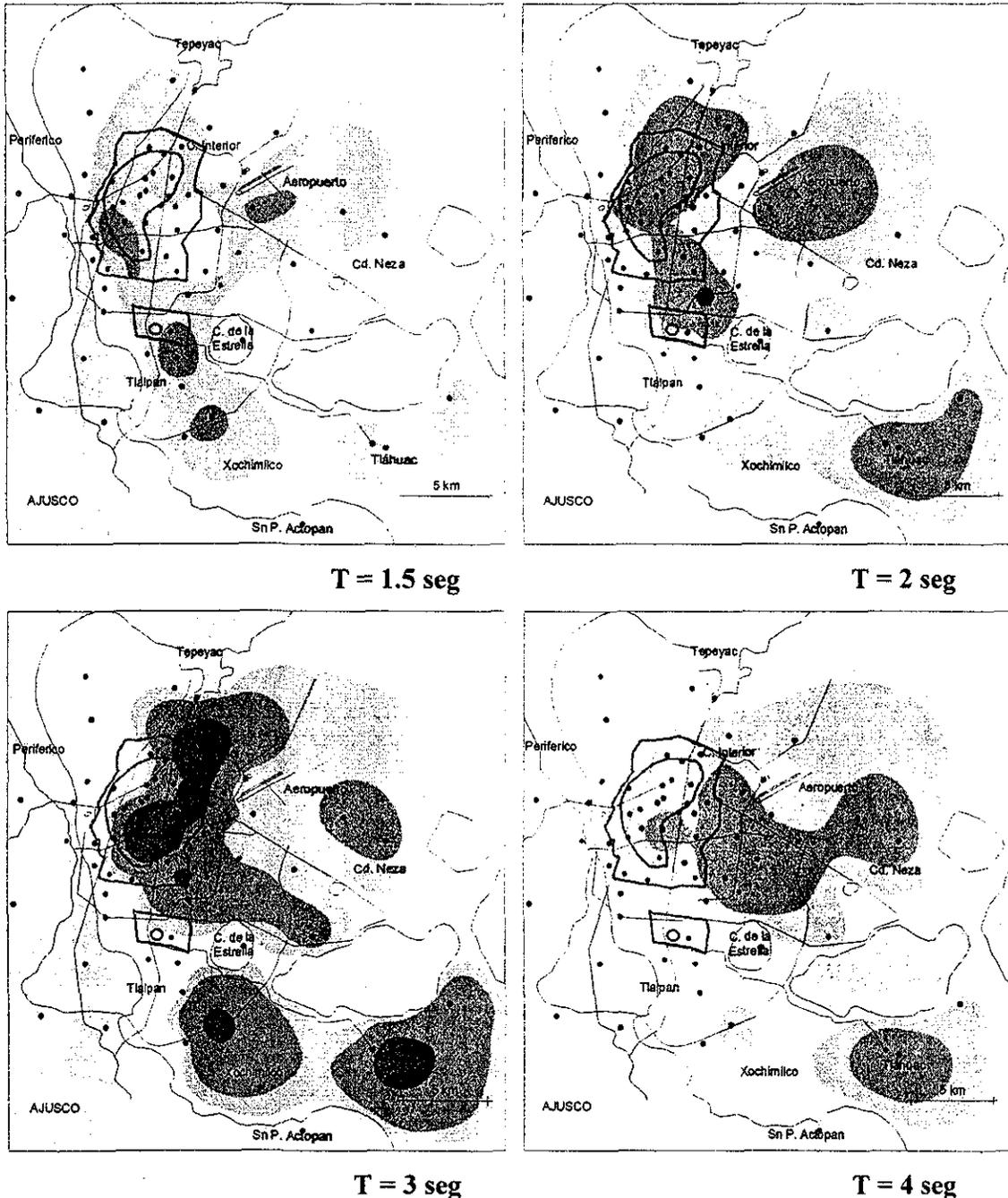


Figura 4.4 Las mismas curvas de la Figura 4.3 pero para el componente este-oeste

En la Figura 4.4 se muestran las gráficas correspondientes a las estaciones que registraron el sismo del 25 de abril de 1989 pero ahora para el componente este-oeste. Estas curvas fueron obtenidas de la misma manera que las anteriores (Figura 4.3) y utilizando los mismos niveles de energía. Se observa que para niveles bajos de energía estas curvas son muy similares a las correspondientes del componente norte-sur (Figura 4.3), pero para el nivel más alto de energía algunas zonas no corresponden con las observadas en el componente norte-sur. Esto se debe a que como se comentó anteriormente la dirección en que se presenta la máxima energía varía considerablemente de un sitio a otro y de un sismo a otro, en el valle de México.

Reinoso y Quiroga (2001) obtuvieron mapas de los movimientos en el plano considerando la ocurrencia simultánea de ambos movimientos horizontales. La dirección del movimiento se fijó con base en la amplitud del espectro de Fourier calculado de los registros de aceleración. Los resultados para cada estación se muestran sobre los mapas con rombos, donde la dirección mayor y la menor de cada rombo indican la energía mayor y menor, respectivamente. Cuando sólo se aprecia un rectángulo indica que la energía es igual para todos los sentidos. En la Figura 4.5 se muestran dos de estos mapas para los sismos del 25 de abril de 1989 y del 14 de septiembre de 1995 para un período natural de vibración, $T=2s$. Como lo indicaron los autores para este período la dirección del movimiento en la zona de daños (Figura 4.2) sigue aproximadamente el contorno del terreno firme. En la Figura 4.5a se observa que existe mayor energía en el componente norte-sur excepto para algunas estaciones dentro de las que se pueden observar TB, SCT, 3 y 58, entre otras. En la Figura 4.5b esta tendencia es muy similar aunque existen estaciones al norte con mayor energía en el componente este-oeste (estaciones 6 y 55).

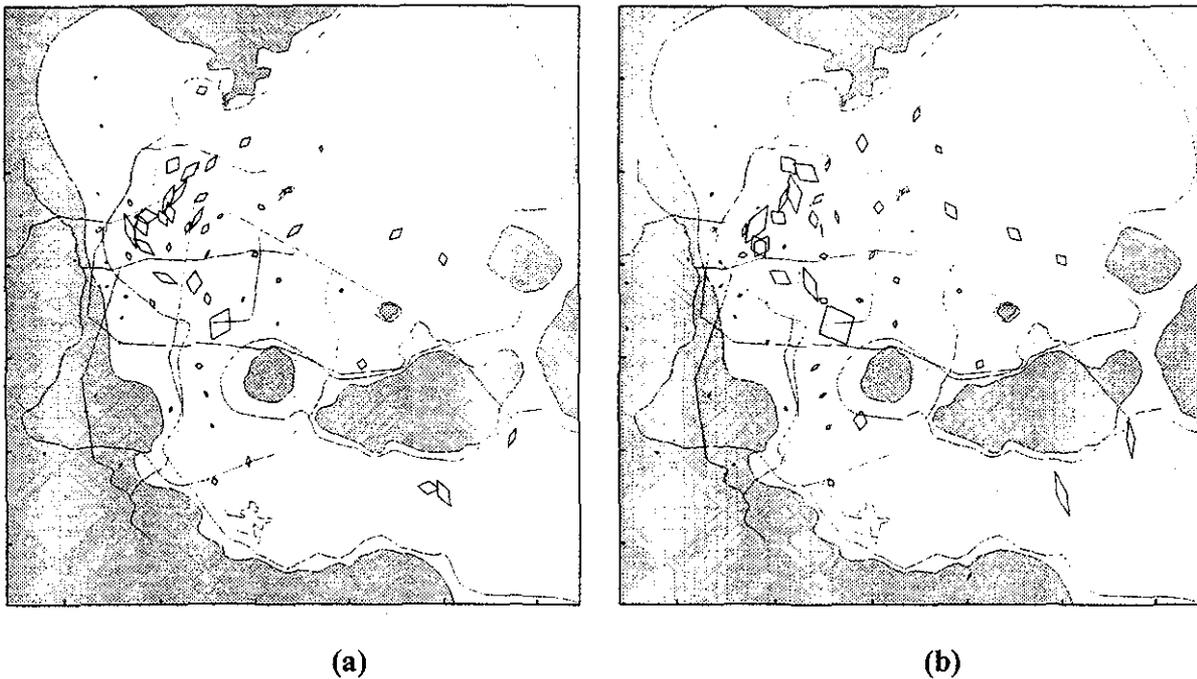


Figura 4.5 Mapas de dirección del movimiento sísmico para período de 2 segundos
(Reinoso y Quiroga, 2001)
(a) sismo del 25/04/89
(b) sismo del 14/09/95

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para los espectros inelásticos de energía de entrada ($E_{I\mu}$) mostrados en la Figura 3.17a también se realizaron las curvas de igual energía para los mismos valores de periodos estructurales. La Figura 4.6 muestra las gráficas calculadas de la misma manera que la Figura 4.3. Estas curvas corresponden a intervalos de energía $E_{I\mu}$ de 0 a 0.1, de 0.1 a 0.3, de 0.3 a 0.8 y mayor que 0.8, respectivamente. También se observa una buena correlación con los daños aunque en menor escala que la observada para los espectros elásticos (Figuras 4.3 y 4.4). Igualmente existen zonas de gran energía fuera de la envolvente de daños del sismo del 19 de septiembre. Como se comentó para las curvas anteriores, esto se debe a la densidad de construcciones de esa fecha. Sin embargo, se deben tomar las debidas precauciones al diseñar estructuras con periodos cercanos a los correspondientes de las curvas de esas zonas. También se observa que la mayoría de las zonas con valores grandes de energía tienen una notable coincidencia con las gráficas de la Figura 4.3 a pesar de que como se explicó con anterioridad, los valores de ordenadas elásticas tienen una gran disminución en el pico y un ligero aumento de las ordenadas para periodos menores al dominante del terreno cuando se presenta comportamiento inelástico.

Puede considerarse que las gráficas de la Figura 4.6 son más representativas de la demanda real de energía en las estructuras ya que estas se diseñan para que presente comportamiento inelástico y a pesar de que son sólo para una demanda de ductilidad, $\mu=4$, se puede considerar que para cualquier otra ductilidad que sea superior a 2 estas curvas tendrán muy poca variación.

La Figura 4.7 muestra las curvas de igual energía histerética normalizada (NE_H de la Figura 3.18) para los mismos valores de periodos estructurales y calculadas de la misma manera que las gráficas anteriores. Estas curvas corresponden a intervalos de energía NE_H de 0 a 30, de 30 a 60, de 60 a 100 y mayor que 100, respectivamente. Es interesante hacer notar que para las gráficas correspondientes a período de 1.5 segundos se observan zonas que tienen valores grandes de este parámetro incluso en zonas de transición. En estas gráficas se observa una distribución más uniforme de las curvas. Sin embargo, para el período de 2 segundos, que es el que se correlaciona mejor con el daño en las gráficas de las Figuras 4.3 y 4.6, los valores máximos de energía NE_H no coinciden con las zonas que fueron afectadas y sólo algunos valores intermedios de energía coinciden con las zonas de daños. Esto se puede deber a que en estos cálculos sólo se considera la demanda de energía histerética (E_H) impuesta por un movimiento sísmico a un oscilador con un modelo de comportamiento ideal (modelo elastoplástico perfecto). Este parámetro tiene una correlación más directa con el daño cuando en su cálculo se utiliza la energía histerética (E_H) disipada por la estructura que presenta degradación en resistencia y rigidez de acuerdo al tipo de material con el que se construyó.

En la Figura 4.8 se muestran las curvas de igual energía elástica de entrada (E_I) en el valle de México para cuatro sismos y período estructural de 2 segundos. Éstas se realizaron de forma similar a las anteriores, pero normalizando la energía de todas las estaciones por la energía máxima que se registró en cada sismo. Los cuatro diferentes niveles de energía corresponden a intervalos de 0% a 10%, de 10% a 20%, de 20% a 40% y mayor que 40% de energía máxima, respectivamente. Los sismos seleccionados fueron: del 14 de septiembre de 1995, del 9 de octubre de 1995, del 30 de septiembre de 1999 y del 15 de junio de 1999. Se escogieron porque al igual que el del 25 de abril, estos fueron los de mayor magnitud registrados por muchas estaciones después del sismo del 19 de septiembre de 1985. Además, tienen diferentes características de distancia, magnitud y origen que hacen interesante su comparación.

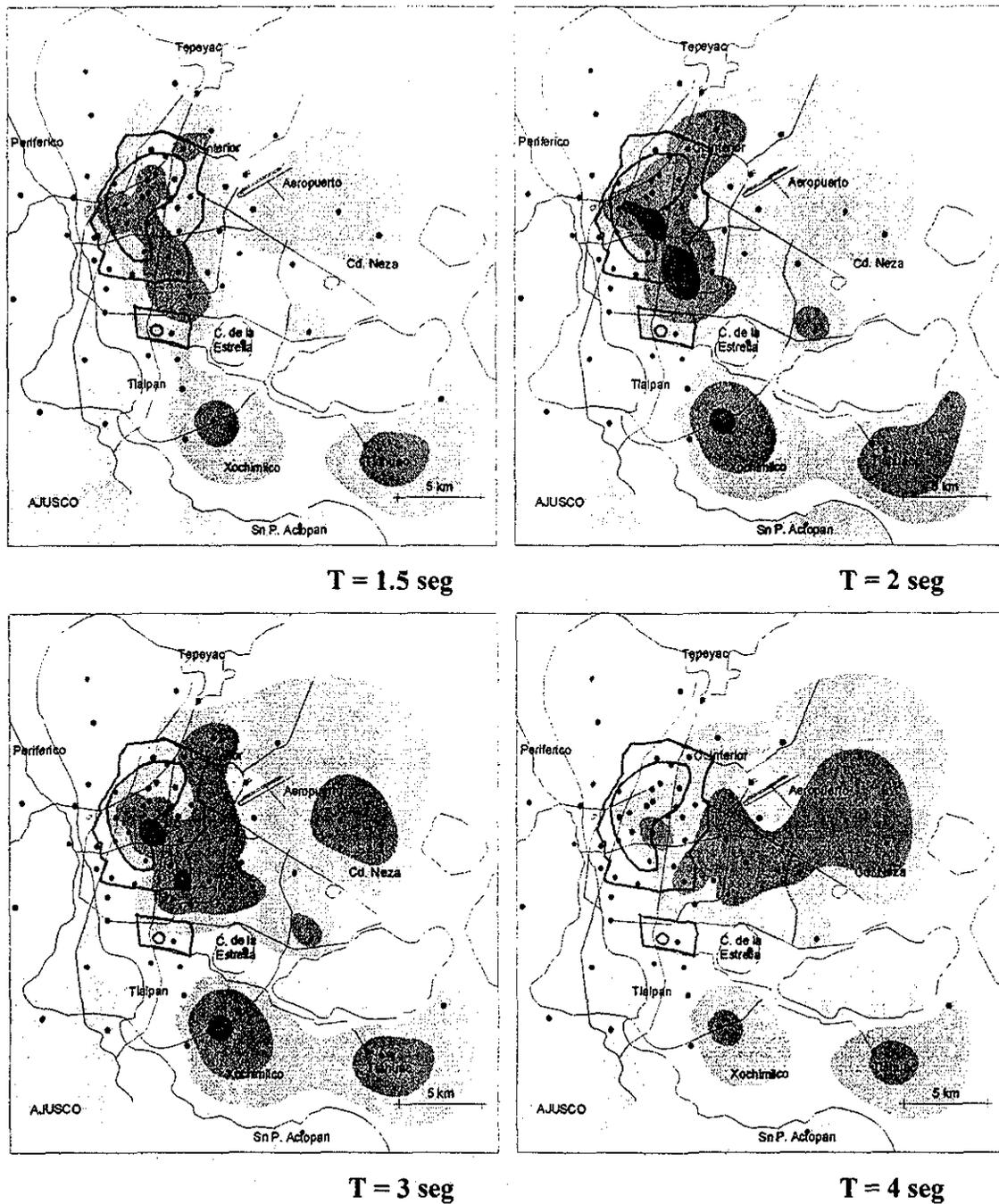


Figura 4.6 Curvas de igual $E_{I\mu}$ para cuatro períodos en el valle de México obtenidas para el sismo del 25 de abril de 1989, $\mu=4$. Los cuatro diferentes niveles de energía (del tono más claro al más oscuro) corresponden a intervalos de 0.0 a 0.1, de 0.1 a 0.3, de 0.3 a 0.8 y mayor que 0.8 m^2/s^2 , respectivamente. Las líneas oscuras representan las zonas de daño de los sismos de 1985

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

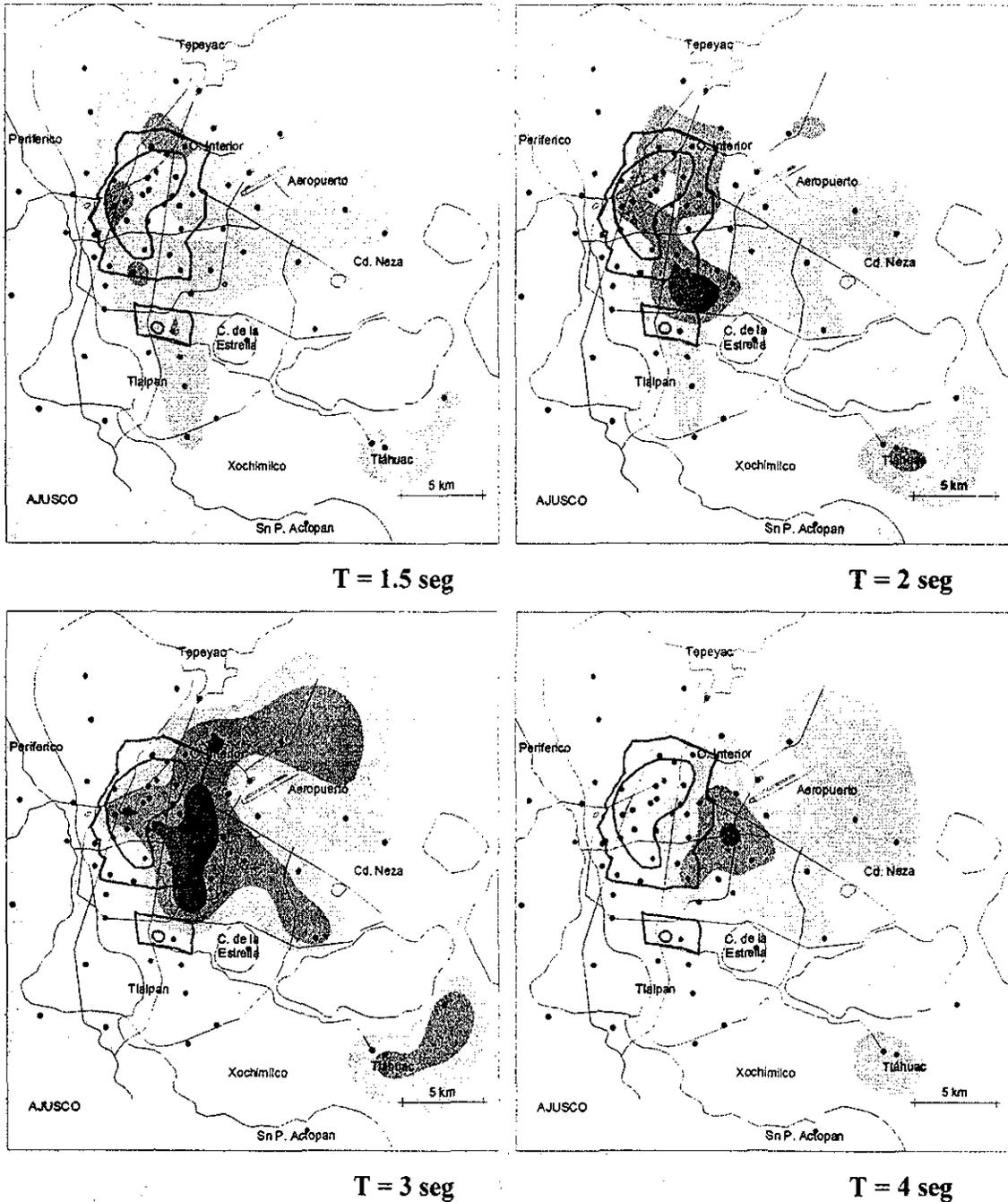
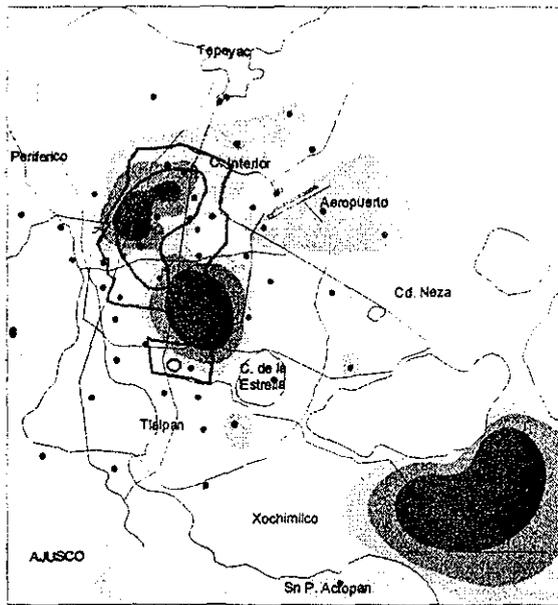
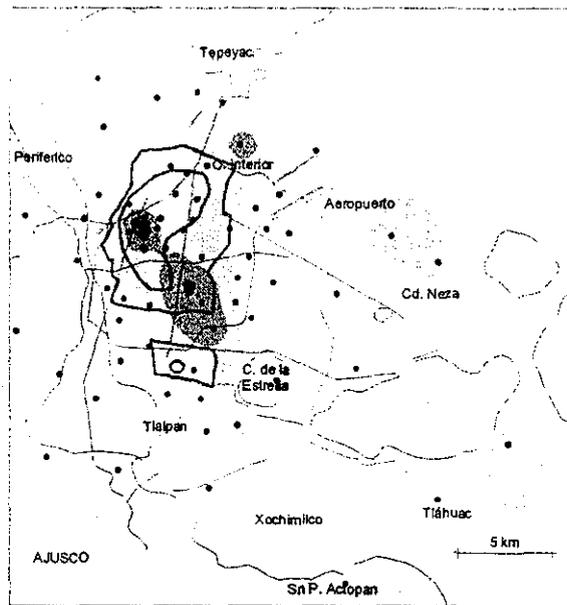


Figura 4.7 Curvas de igual NE_H para cuatro períodos en el valle de México obtenidas para el sismo del 25 de abril de 1989, $\mu=4$. Los cuatro diferentes niveles de energía (del tono más claro al más oscuro) corresponden a intervalos de 0 a 30, de 30 a 60, de 60 a 100 y mayor que 100, respectivamente. Las líneas oscuras representan las zonas de daño de los sismos de 1985

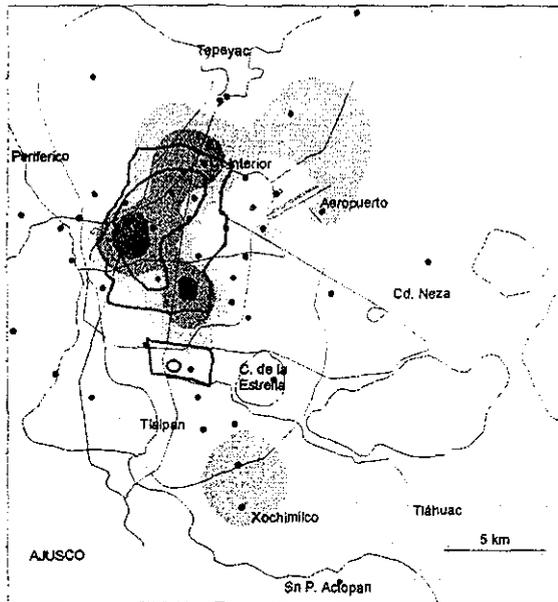
**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



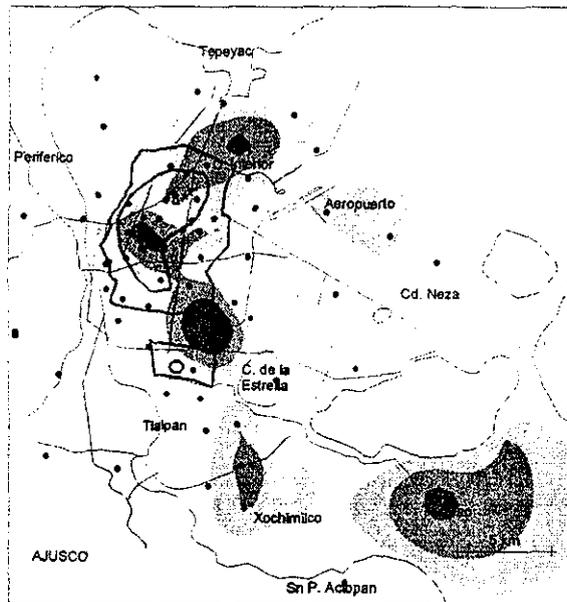
14 de septiembre de 1995



9 de octubre de 1995



30 de septiembre de 1999



15 de junio de 1999

Figura 4.8 Curvas de igual E_I en el valle de México para un período de 2 segundos para cuatro sismos, componente NS. Los cuatro diferentes niveles de energía (del tono más claro al más oscuro) corresponden a intervalos de porcentaje de energía máxima del sismo de 0% a 10%, de 10% a 20%, de 20% a 40% y mayor que 40%, respectivamente. Las líneas oscuras representan las zonas de daño de los sismos de 1985

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

De las Figuras 4.3 para $T=2s$ y 4.8 se observa que las zonas en que se presenta la energía máxima son recurrentes, con poca variación de un sismo a otro que puede ser atribuida a la magnitud, distancia al área epicentral y en menor escala a las características del sismo. De comprobarse este patrón para sismos futuros, el promedio de estas curvas puede contarse como una herramienta más para la microzonificación de la ciudad, proponiendo en las zonas de mayor energía recomendaciones para un mejor detallado constructivo con respecto del arrojado por el diseño convencional.

Implicaciones estructurales

Una gran demanda de energía implica que las estructuras estarán sujetas a un número elevado de ciclos de carga que podrían producir deterioro en los materiales. Por ello, es de vital importancia que en las construcciones localizadas en zonas de gran energía, del período correspondiente, se revise la calidad de los materiales y el correcto confinamiento de los elementos estructurales, así como también evitar el golpeteo entre aquéllas. Es también muy importante que los sistemas estructurales no colapsen por piso bajo débil, columna corta, torsión por asimetría en planta y otras configuraciones estructurales inadecuadas que no permiten que la estructura tenga un adecuado comportamiento.

Un incremento en la resistencia de una estructura tiene una influencia importante en sus demandas de comportamiento plástico. Al incrementar la resistencia se obtiene una reducción de las demandas de energía y de ductilidad. es por ello que la sobrerresistencia de los elementos estructurales ha jugado un papel muy importante en el comportamiento de las estructuras en sismos severos. Sin embargo, estudios recientes proponen considera por separado este parámetro, por lo que es de gran relevancia proporcionar a las estructuras una capacidad resistente mínima para evitar fallas debidas al fenómeno de fatiga de bajo ciclaje.

Las estructuras prefabricadas serán más vulnerables en estas zonas y se debe garantizar que las conexiones soporten un elevado número de ciclos de gran amplitud. Asimismo, las estructuras metálicas son también más vulnerables debido a la poca capacidad de la soldadura por resistir carga cíclica. En las construcciones de concreto se debe garantizar que las articulaciones plásticas se formen en las vigas y estos mecanismos deben ser diseñados para disipar la energía demandada y soportar los ciclos de deformación plástica sin daño excesivo.

Una alternativa en las construcciones que tengan grandes demandas de energía es el empleo de disipadores histeréticos y de amortiguamiento, ya que estos tienen la propiedad de resistir un gran número de ciclos de carga con poco deterioro. Así también, una forma de rehabilitación sugerida para las construcciones dañadas o construcciones que no cumplen con estos requisitos mínimos, es el uso de dispositivos disipadores de energía. Por ello se deben encaminar estudios que permitan al ingeniero de la práctica el uso de estos dispositivos en las construcciones que diseñan.

En el diseño sismorresistente es necesario considerar simultanea y explícitamente los suministros de resistencia, rigidez, y capacidades de deformación última y disipación de energía; de manera que sea posible establecer una combinación razonable de estas propiedades que conduzcan al nivel de desempeño sísmico deseado.

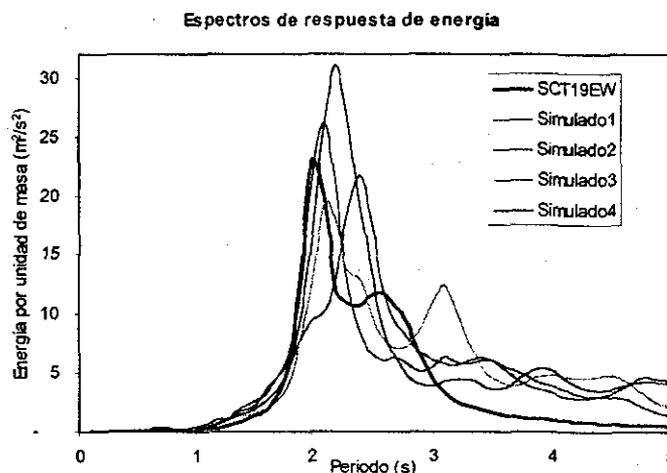
Capítulo 5

ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS Y ENERGÍA

Como se mencionó anteriormente las expresiones simplificadas para el cálculo de la energía no siempre proporcionan valores confiables y las expresiones que dependen de más parámetros no son sencillas de calcular. Una manera de predecir el movimiento y obtener una estimación confiable de los espectros de energía es mediante el uso de acelerogramas simulados.

En la literatura existen muchos trabajos que muestran el desarrollo de varios esquemas para la simulación de acelerogramas. Sin embargo, estas técnicas involucran el conocimiento de conceptos de ingeniería sísmica que no son conocidos en la práctica profesional y que difícilmente pueden ser asimilados por los ingenieros. Por ello, estas técnicas de simulación no han sido empleadas por los ingenieros, quienes recurren al uso de acelerogramas registrados que en la mayoría de los casos poco tienen que ver con las condiciones del sitio donde se erigirá la estructura que diseñan. Como ejemplo podemos mencionar el registro de la estación SCT obtenido durante el sismo de 1985, que es usado por ingenieros e investigadores como representativo de la zona de lago, cuando es válido únicamente para sitios con período del suelo de 2.0 segundos. En este capítulo se propone un modelo para generar acelerogramas sintéticos el cual es evaluado comparando los espectros elásticos de energía de entrada de estos registros con los correspondientes de registros reales.

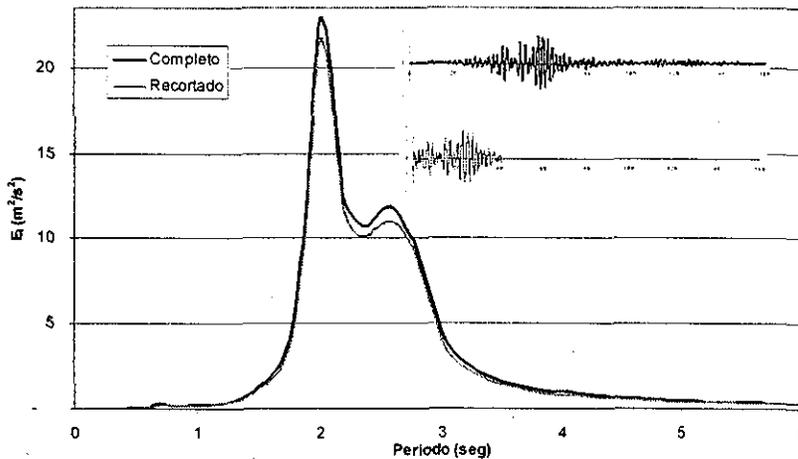
5.1 PREDICCIÓN DE ENERGÍA CON EL USO DE ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 5.1 Comparación de los espectros de E_I de acelerogramas simulados para el sismo del 19 de septiembre de 1985, estación SCT-EO

La energía captura las características de duración y amplitud del movimiento, así como también considera el contenido de frecuencias. Por ello, la energía de entrada puede utilizarse para evaluar la precisión de los métodos de simulación mediante la comparación de los espectros de energía de los acelerogramas simulados. Como ejemplo en la Figura 5.1 se muestran la comparación de los espectros de energía de 4 registros simulados a partir de la densidad espectral del movimiento (Alamilla, 2001) para el sismo del 19 de septiembre de 1985 en la estación SCT en el componente este-oeste. También se muestra el espectro de energía del acelerograma real, se observa que los espectros correspondientes a los acelerogramas simulados en la mayoría de los casos sobreestima al espectro del registro real. La complejidad del método de simulación no justifica las diferencias observadas.



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

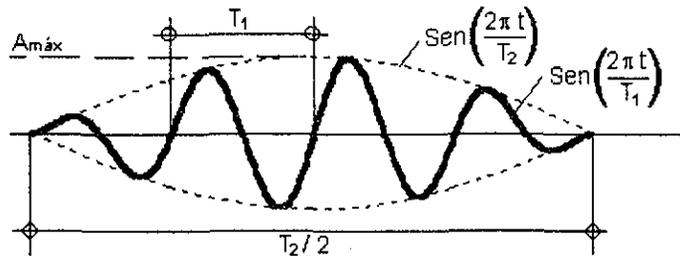
Figura 5.2 Comparación del espectro de la relación E_H/E_I con las expresiones propuestas

Por otra parte, es de suponerse que solo una parte del movimiento tiene efectos importantes en el daño de las estructuras. En la Figura 5.2 se muestran dos espectros de energía de entrada para la estación SCT-EO para el sismo del 19 de septiembre de 1985 de dos registros (también mostrados en la figura), uno completo y el otro recortado con el 25% de la duración del registro completo. En esta figura se puede observar que los espectros son muy similares y por lo tanto los efectos que pueden producir en las estructuras serán también muy similares. Varios investigadores han observado estas características y en años recientes han propuesto métodos de simplificación del movimiento por medio de ondas senoidales y de series de ondas (Sakai *et al.*, 2000, Iyama y Kuwamura, 1999). Guerrero y otros (1998) hacen una comparación de una estructura sometida a dos acelerogramas, uno completo y otro recortado con una duración de 10 segundos. Del análisis no lineal de la estructura con estos registros obtienen resultados muy similares de la evolución del daño. A partir de la forma casi armónica del acelerograma recortado proponen una expresión para simplificar el movimiento en la zona de lago del valle de México (Guerrero *et al.*, 1998),

$$A_s(t) = A_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen} \left[\frac{2\pi}{T_1} t \right] \cdot \text{sen} \left[\frac{2\pi}{T_2} t \right] \quad (5.1)$$

donde $A_s(t)$ es la aceleración de terreno en el tiempo t , $A_{m\acute{a}x}$ es la aceleración máxima del terreno dependiente de las características del sitio y el sismo, T_1 es el período dominante del terreno y T_2 es igual a dos veces la duración del movimiento.

La interpretación física de la expresión (5.1) señala como función principal una senoide que contiene el período dominante del suelo (T_1) y cuya amplitud es regulada por otra función del mismo tipo, con otro período (T_2), cuyo valor controla la duración del movimiento. El valor de $A_{m\acute{a}x}$ puede definirse a partir de datos observados en registros acelerométricos o por medio de expresiones matemáticas derivadas de estudios sobre la estimación de movimientos fuertes del terreno originados por temblores mexicanos (Singh *et al.* 1987). La Figura 5.3 muestra gráficamente las funciones propuestas y los parámetros que intervienen en la expresión (5.1).



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 5.3 Modelo del acelerograma sintético

Para aplicar y calibrar la ecuación (5.1), Guerrero y otros (1998) proponen utilizar parámetros característicos del sitio donde se ubica la estación SCT y del acelerograma del 19 de septiembre de 1985 registrado en ese mismo lugar, los datos empleados son: el período dominante y la aceleración máxima del terreno, calculados en 2.0 segundos y 168 gal, respectivamente; los valores anteriores representan a T_1 y $A_{m\acute{a}x}$ en la expresión (5.1).

El valor de $T_2/2$ está dado por una estimación de aquella duración en donde se hayan presentado las máximas demandas del movimiento, y dependerá en cierta forma de la serie de registros observados en el sitio de análisis. Se recomienda que la duración propuesta para el acelerograma sintético deba ser tal que el crecimiento en las amplitudes del mismo sea gradual desde el principio hasta alcanzar la aceleración máxima del terreno que se haya establecido previamente, y de la misma manera para el decremento de las amplitudes después de ese valor máximo. Por razones obvias de condiciones finales e iniciales, la duración debe ser un valor múltiplo del período dominante para que al final del movimiento la aceleración sea nula.

Para ilustrar las características de energía y de pseudoaceleración de los registros sintéticos se compararon las respuestas de dos acelerogramas sintéticos para los datos del registro SCT-EO ($T_1=2.0s$ y $A_{m\acute{a}x}=168$ gal) con duraciones de 10 y 20 segundos (Figura 5.4).

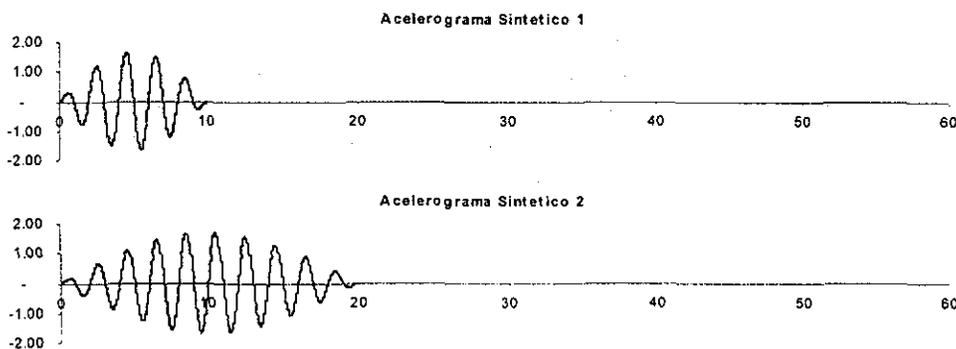


Figura 5.4 Registros sintéticos de la estación SCT

Los espectros de respuesta de pseudoaceleración de los registros anteriores (Figura 5.4) se compararon con el del acelerograma de SCT del sismo del 19 de septiembre de 1985. En la Figura 5.5a se observa que el espectro del registro sintético 1 tiene las mismas ordenadas espectrales que las del espectro original para períodos cercanos al predominante del terreno ($T_s=2s$). También se observa que el registro sintético 2 tiene mayores ordenadas que el espectro original en períodos cercanos al dominante del terreno.

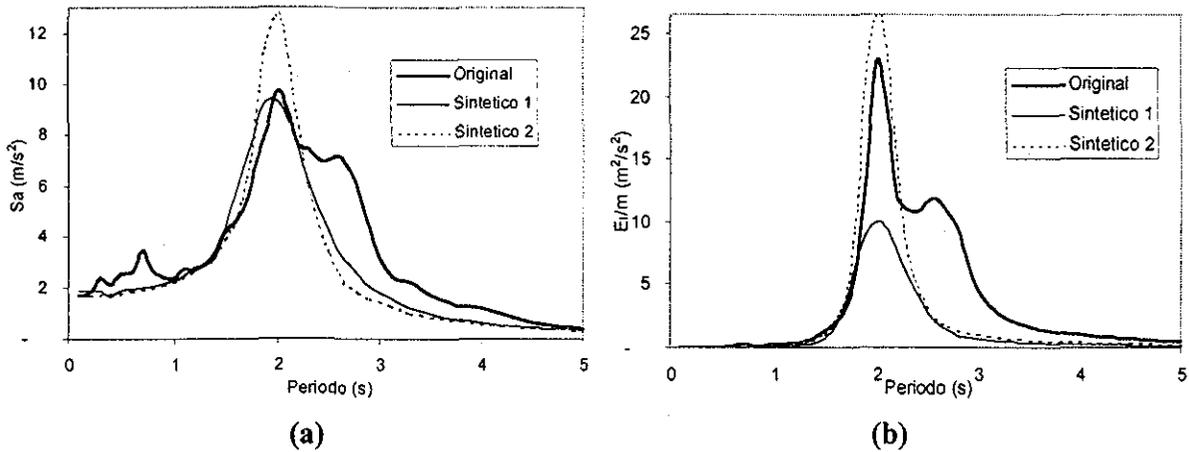


Figura 5.5 Comparación de las respuestas de dos registros sintéticos de la forma propuesta por Guerrero y otros (1998) con el registro original, para el sismo del 19 de septiembre de 1985
 (a) espectros de pseudoaceleración
 (b) espectros de energía de entrada

En la Figura 5.5b se muestran los espectros de respuesta de energía por unidad de masa de los registros anteriores. Se observa que en períodos cercanos al pico el espectro del registro sintético 1 tiene ordenadas menores que las del espectro del registro original y que el espectro correspondiente al registro sintético 2 presenta ordenadas de energía sensiblemente superiores. Por lo anterior se concluye que el modelo puede dar una buena aproximación de las respuestas anteriores, sin embargo la duración no es un parámetro que se pueda utilizar en su calibración por las diferencias mostradas en ambas respuestas para períodos cercanos al pico.

Propuesta de un nuevo modelo de acelerograma sintético

En este trabajo se propone el uso de un modelo simple para la estimación de acelerogramas sintéticos en el valle de México basado en la propuesta de Guerrero y otros (1998). Este modelo también utiliza parámetros que pueden ser fácilmente aplicados por los ingenieros de la práctica, los acelerogramas sintéticos obtenidos con este modelo sólo dependen de la aceleración máxima del terreno ($A_{máx}$), del período dominante del suelo (T_s) y de la duración de la fase intensa del movimiento (T_d) que se puede obtener como una fracción de la duración total. La expresión de acelerograma sintético propuesta es la siguiente:

$$A_s(t) = A_{máx} \cdot \frac{90t^2(t - T_d)^6}{T_d^8} \cdot \cos\left[\frac{2\pi(t - T_d)}{T_s}\right]$$

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

(5.2)

La aceleración máxima del terreno puede calcularse a partir de expresiones sencillas disponibles en la literatura, aunque una manera muy sencilla es tomar a_0 , la ordenada al origen del espectro de diseño. T_s puede obtenerse a partir del Reglamento que contiene mapas de período dominante del terreno. Por último, existen trabajos que predicen la duración del movimiento del terreno en el valle de México a partir de expresiones simples (Reinoso y Ordaz, 2001). En la Figura 5.6 se muestra la forma de este modelo para los datos del registro de la estación SCT-EO del sismo del 19 de septiembre de 1985. A diferencia del modelo propuesto por Guerrero y otros (1998), este modelo tiene una variación en amplitud que se asemeja más a un movimiento real. Se observa que el valor máximo se presenta a un cuarto de la duración ($40 \cdot 1/4 = 10s$) y a partir de allí la amplitud varía lentamente originando una mayor duración. Debido a su forma se pueden proponer valores de duración fraccionarios, por lo que su calibración es más sencilla.

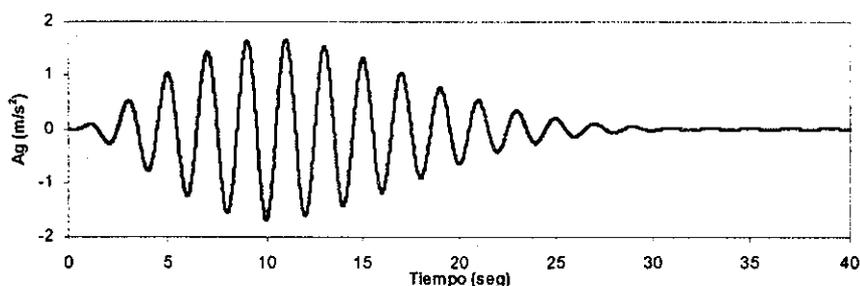


Figura 5.6 Modelo del acelerograma sintético

Los acelerogramas simulados propuestos en este trabajo fueron comparados con algunos acelerogramas registrados en suelo blando del valle de México. Se compararon los espectros de energía ya que representan el daño potencial acumulado del movimiento del terreno y consideran las características completas del movimiento: amplitud, duración y contenido de frecuencias. El modelo propuesto proporciona registros sintéticos cuyos espectros de energía tienen una adecuada aproximación con los espectros de los registros observados.

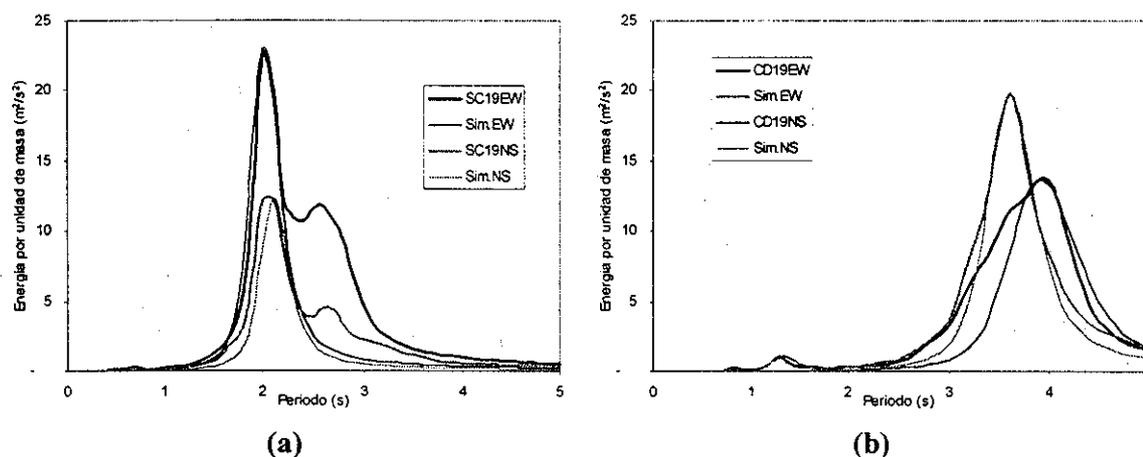


Figura 5.7 Comparación de los espectros de energía para el sismo del 19 septiembre de 1985

(a) Estación SCT
(b) Estación CD

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En la Figura 5.7 se muestran las comparaciones de los espectros de energía de entrada de cuatro acelerogramas sintéticos obtenidos para cuatro registros sobre terreno blando durante el sismo del 19 de septiembre de 1985, (estaciones SCT y CD en las dos componentes). Para estos espectros la duración, T_d , se ajusto de manera que las energías máximas coincidieran y así se pudiera comparar la forma de estos espectros, se observa que en la estación CD (Figura 5.7b) los espectros de los acelerogramas sintéticos tienen una mayor aproximación al espectro original, esto se debe a que estos espectros tienen una forma regular con un pico dominante y un pequeño pico que representa el segundo modo del sitio, el cual es difícil de considerar en este modelo. A diferencia de éstos, los espectros de la estación SCT (Figura 5.7a) presentan un segundo gran pico en un período superior al dominante ($T=2.6s$). Este pico no se puede reproducir porque no está asociado a los efectos de sitio, por lo que la estimación para períodos superiores al dominante no es buena.

En la Tabla 5.1 se muestran algunas propiedades de los registros de movimiento (T_s , $A_{m\acute{a}x}$) la duración utilizada en el registro sintético (T_d) y una comparación de ésta con la duración de la definición de la intensidad de Arias (1970).

Tabla 5.1 Parámetros para los registros sintéticos

	T_s (seg)	A_{max} (m/s^2)	T_d (seg)	T_{arias} (seg)	T_d/T_{arias}
Sc19ew	2	1.677	28.8	43	0.67
Sc19ns	2.1	0.972	36.7	72.3	0.51
Cd19ew	3.9	0.763	40.6	134	0.30
Cd19ns	3.6	0.659	51.2	115	0.45

Se concluye que los registros sintéticos pueden proporcionar una buena representación de las características del movimiento original, a excepción de movimientos particulares como el de SCT con efectos de sitio poco comunes (dos modos predominantes bastante evidentes en los espectros de energía), ya que como se indicó anteriormente los espectros de energía tienen una gran dependencia con el período dominante del terreno (T_s) y existen pocas estaciones en que los espectros de energía presentan dos picos como los de SCT. Por ello este modelo resulta una herramienta práctica y sencilla para predecir movimientos.

A continuación se muestra un intento de la calibración de este modelo con la duración, para el sismo del 25 de abril de 1989. En la Tabla 5.2 se resumen los resultados del análisis de los registros sintéticos calculados para los registros en zona de Lago y Transición. En este análisis se utilizaron dos definiciones de duración: la duración de Arias (1970) y la propuesta de Reinoso y Ordaz (2001). Inicialmente, en estas definiciones se comparo la duración del registro sintético necesaria para que en el período dominante del sitio se obtenga la misma ordenada que el espectro exacto, como en el caso de la Figura 5.7. Conociendo estos valores de T_d/D se propone la utilización de un valor promedio, el cual se utiliza en los registros sintéticos. Los espectros de energía correspondientes a los registros obtenidos son comparados para conocer el grado de error.

Tabla 5.2 Relaciones de duración para los registros sintéticos del sismo del 25/04/89

Est.	Ts(esp)	Td	D	Td/D	D arias	Td/D arias
01	2.1	30.3	82.45	0.37	51.70	0.59
03	2.1	22.9	82.45	0.28	87.40	0.26
05	2.1	28.0	82.45	0.34	74.70	0.37
06	2.7	26.6	92.72	0.29	82.60	0.32
08	2.0	31.1	80.74	0.39	88.10	0.35
09	2.7	33.6	92.72	0.36	110.00	0.31
10	2.4	38.5	87.59	0.44	74.30	0.52
11	4.5	45.1	123.54	0.37	148.00	0.30
12	4.0	45.3	114.98	0.39	134.00	0.34
15	1.4	15.5	70.47	0.22	69.90	0.22
17	1.2	18.9	67.04	0.28	74.50	0.25
19	2.7	28.2	92.72	0.30	81.10	0.35
20	4.5	30.4	123.54	0.25	118.00	0.26
22	1.5	27.8	72.18	0.39	84.50	0.33
23	3.0	35.2	97.86	0.36	114.00	0.31
25	2.3	37.3	85.87	0.43	66.70	0.56
27	0.9	18.8	61.91	0.30	42.80	0.44
29	2.8	40.7	94.43	0.43	85.80	0.47
31	5.2	36.8	135.52	0.27	160.00	0.23
32	4.3	50.9	120.11	0.42	93.10	0.55
33	2.7	28.1	92.72	0.30	87.60	0.32
35	2.5	23.8	89.30	0.27	68.80	0.35
37	1.1	21.9	65.33	0.34	38.40	0.57
39	2.7	39.4	92.72	0.42	95.90	0.41
41	4.7	20.0	126.96	0.16	104.00	0.19
42	4.2	68.4	118.40	0.58	134.00	0.51
43	3.3	36.7	102.99	0.36	79.80	0.46
44	1.4	13.6	70.47	0.19	47.80	0.28
45	2.3	26.1	85.87	0.30	77.10	0.34
48	2.6	31.5	91.01	0.35	87.80	0.36
49	3.0	43.4	97.86	0.44	111.00	0.39
51	2.3	43.9	85.87	0.51	83.10	0.53
53	1.5	20.3	72.18	0.28	54.10	0.38
54	1.1	30.9	65.33	0.47	57.50	0.54
55	2.0	18.8	80.74	0.23	55.60	0.34
56	2.5	30.1	89.30	0.34	65.40	0.46
59	3.1	57.6	99.57	0.58	118.00	0.49
62	2.2	24.4	84.16	0.29	78.90	0.31
68	3.3	32.3	102.99	0.31	103.00	0.31
72	2.2	25.0	84.16	0.30	79.00	0.32
80	3.0	43.4	97.86	0.44	74.10	0.59
84	1.5	24.7	72.18	0.34	58.90	0.42
Cd	3.3	52.4	102.99	0.51	97.00	0.54
Ro	1.2	19.5	67.04	0.29	50.80	0.38
Sc	2.2	22.6	84.16	0.27	72.40	0.31
Tb	4.2	24.5	118.40	0.21	66.80	0.37
Vg	3.0	26.7	97.86	0.27	65.30	0.41

En la Figura 5.8 se muestran las comparaciones de algunos de estos espectros, en general las comparaciones son buenas ya que la mayoría de estos espectros tienen un solo pico dominante como se puede constatar en la Figura 3.16.

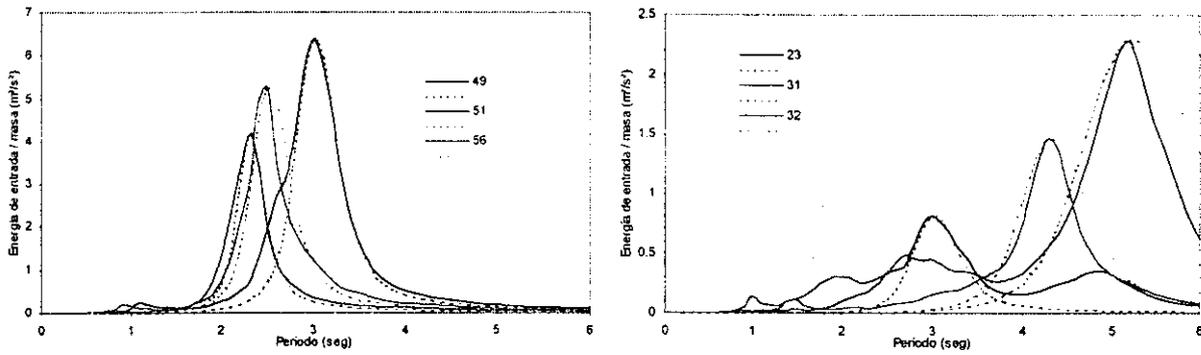


Figura 5.8 Comparaciones de los espectros para los registros sintéticos del sismo del 25/04/89

La duración de la definición de Arias (1970) se obtuvo mediante el programa Degtra 2000 ver 2.0.2. Para la propuesta de duración en el valle de México se empleó la siguiente fórmula (Reinoso y Ordaz, 2001):

$$D = 0.01e^M + (0.036M - 0.07)R + (4.8M - 16)(T_s - 0.5) \quad (4.3)$$

donde M es la magnitud del sismo y R es la distancia al epicentro. Para el sismo del 25 de abril se tiene una $M=6.9$ y una distancia del área de ruptura a CU promedio al valle de $R=253$ km.

En la Figura 5.9 se muestran las gráficas correspondientes a las relaciones de duración mostradas en la Tabla 5.2, en estas gráficas se utilizó en el eje horizontal el período dominante para buscar una posible relación con éste. Se muestra que estos valores varían del orden de 0.2 a 0.6 y que no presentan una tendencia definida con el período dominante. Un valor medio de estos valores es 0.35.

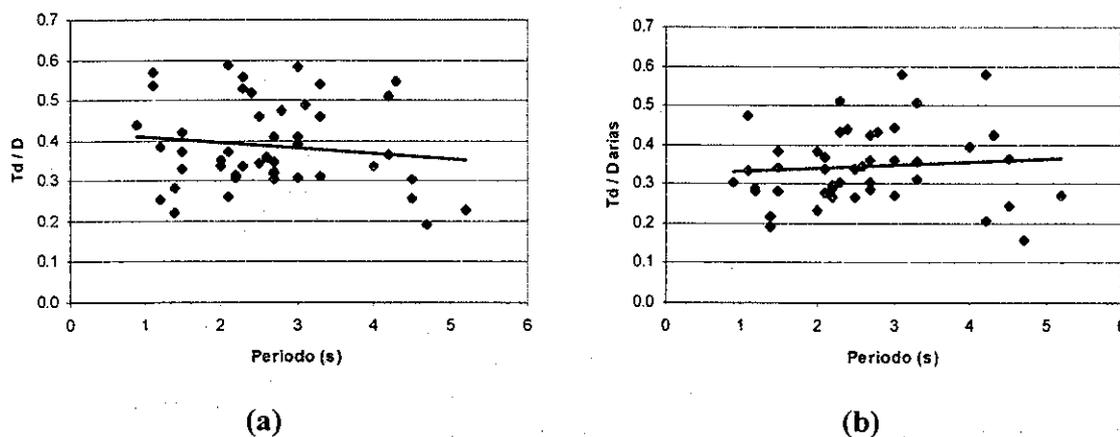


Figura 5.9 Relaciones de duración para los registros sintéticos para el sismo del 25/04/89

(a) Con la definición de Arias (1970)

(b) Con la propuesta de Reinoso y Ordaz (2001)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En la Figura 5.10 se muestra la comparación de dos espectros de energía de entrada obtenidos con acelerogramas sintéticos y empleando una duración de $0.35D$. Estos espectros corresponden a las estaciones 15 y 80 con menor aproximación al espectro exacto y a las estaciones 49 y 56 que tienen una buena aproximación. Se observa que a pesar de la dispersión de la duración de los acelerogramas sintéticos se obtiene una buena aproximación a los espectros reales.

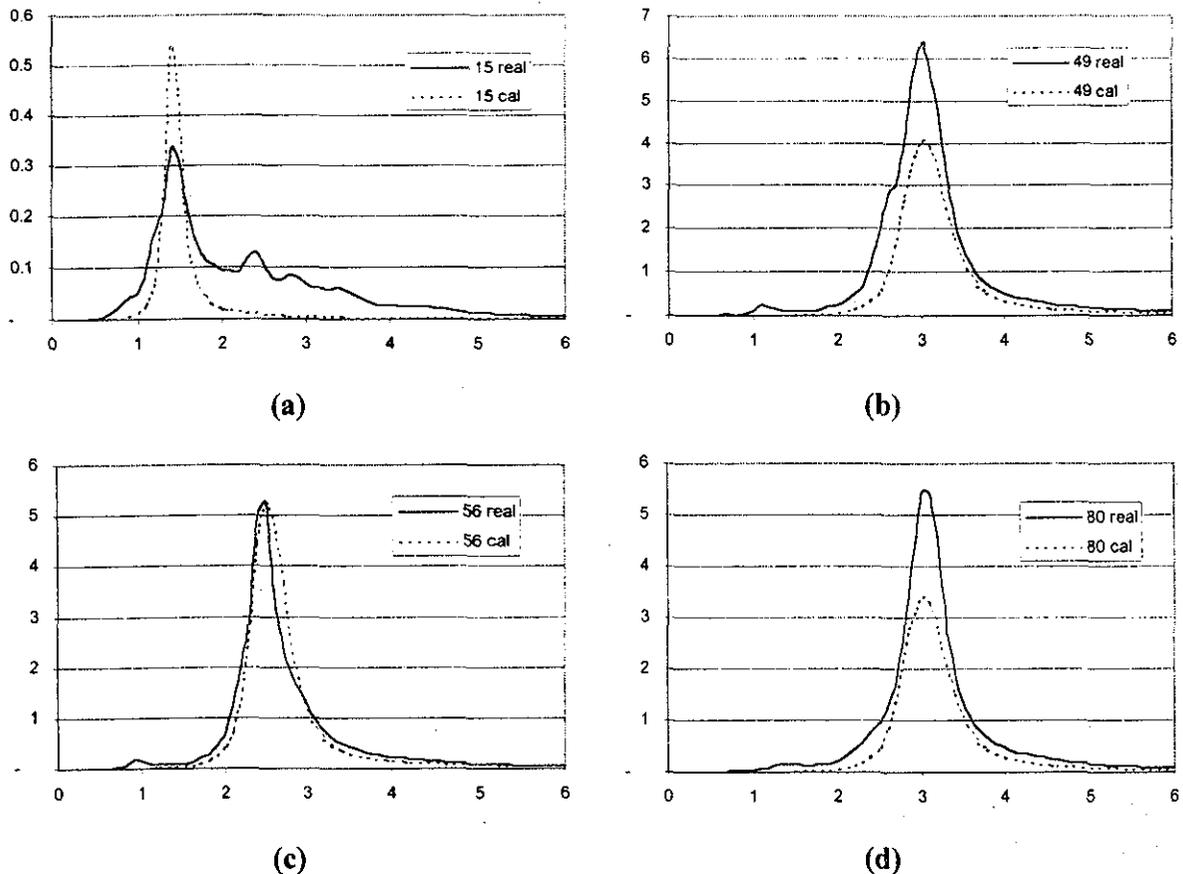


Figura 5.10 Comparaciones de los espectros obtenidos con registros sintéticos

- (a) Estación 15
- (b) Estación 49
- (c) Estación 56
- (d) Estación 80

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Se reconoce que la simplicidad en este modelo y las incertidumbre que existen en la predicción de la duración. Sin embargo, se estima que al realizar un análisis más detallado y considerando la incertidumbre de la calibración de la duración de este modelo, se puede obtener acelerogramas de diseño con cierta facilidad en función de la expresión propuesta por Reinoso y Ordaz (2001), lo cual permitiría el uso de estos acelerogramas en la práctica profesional.

CONCLUSIONES

En este trabajo se revisaron los conceptos de energía y se realizó un análisis de las principales características de la demanda de energía en sitios cercanos a la zona epicentral, en terreno firme y más a detalle en el valle de México.

En años recientes el uso de las computadoras ha permitido el cálculo de las demandas en términos de energía. Muchos investigadores han propuesto parámetros de energía que se relacionan con características estructurales, esto ha motivado su uso en la aplicación de los métodos de diseño y en la identificación de zonas de peligro sísmico.

El adecuado manejo de los conceptos de energía puede contribuir a que el diseño sismorresistente tenga una mayor transparencia, así como también a que en la microzonificación sísmica sean consideradas las características de duración y amplitud del movimiento. Algunas aplicaciones han dado buenos resultados en el estudio de peligro sísmico en el valle de México, obteniéndose una buena correlación de las zonas de alta energía con las de daños previos.

Capítulo I

En la actualidad los conceptos de energía han llamado la atención de numerosos investigadores, por ello han aparecido una gran cantidad de trabajos relacionados con la evaluación de la energía, con la obtención de parámetros representativos y con diseños basados en conceptos de energía. En este capítulo se hace una compilación de estos trabajos ya se cree que pueden aportar herramientas a los actuales métodos de diseño.

Al presentar la definición de energía se mostró que la energía impartida a una estructura durante un sismo depende de las características del movimiento y de la estructura misma. El comportamiento de sus componentes puede ser fácilmente explicado haciendo una analogía con un tanque de almacenamiento de agua.

Se mostró que las definiciones de energía relativa y absoluta tienen diferencias despreciables en un intervalo de períodos que son comunes en las estructuras, por lo que ambas proporcionan valores similares.

El espectro de velocidad al cuadrado y el espectro de Fourier al cuadrado se aproximan en valores y forma al espectro de energía de entrada. De las comparaciones observadas se reconoce que el espectro de velocidad equivalente basado en energía (v_e) puede obtenerse con el espectro de amplitudes de Fourier, ya que estos son casi idénticos. Esta comparación es una mejor predicción

del espectro de energía de entrada que la obtenida con las expresiones simplificadas propuestas por diversos autores. De las expresiones de estimación espectral, la expresión de Fajfar y Vidic (1994) y la de Manfredi (2001) dan buenos resultados para la estimación de energía en el valle de México. La expresión de energía desarrollada y que es función del espectro de amplitudes de Fourier es una herramienta de gran utilidad, ya que muchos de los estudios de peligros sísmico (mecanismo de falla, energía liberada en la fuente, movimientos sobre el área de ruptura, funciones de atenuación y efectos de sitio) están basados en los espectros de amplitudes de Fourier.

Capítulo II

Se mostró con los registros sobre el área epicentral que los espectros de aceleración incluyendo la aceleración de terreno no están correlacionados con la magnitud del sismo en la zona epicentral, ni con el daño que puede sufrir la estructura. La velocidad espectral está más correlacionada con el daño, pero, el daño observado en las estructuras, incluyendo las de período corto, no puede atribuirse a estas pequeñas diferencias. Existe una relación más estrecha de la magnitud del sismo con las ordenadas espectrales de energía de entrada que con los otros espectros.

En sitios muy cercanos a la falla el movimiento sísmico es muy complejo ya que provoca altas demandas de energía en diferentes periodos. Por ello, los espectros de energía tienen formas complicadas que dificultan su predicción. Fuera del área de ruptura, la atenuación de la energía máxima con la distancia tiene aproximadamente una tendencia logarítmica y al igual que los espectros de aceleración, son muy evidentes los efectos regionales en la zona de Lomas del valle de México, obteniéndose en algunos casos ordenadas de energía similares e incluso superiores a las observadas en las estaciones del área epicentral. Es sorprendente la amplificación de los espectros de energía en la zona de Lago que es consecuencia de la gran duración y amplitud de la respuesta.

Capítulo III

Basado en los análisis de las características de energía en la zona de Lago se concluye lo siguiente:

- La energía tiene gran variación con la dirección del movimiento, esto aparentemente no tiene trascendencia en el diseño de estructuras ya que estas se diseñan con una combinación de sollicitaciones en dos direcciones ortogonales. Sin embargo, en investigaciones futuras estos resultados podrían tener una repercusión importante en el diseño si se logra caracterizar la dirección de la energía principal para distintos eventos sísmicos y de qué orden será el cociente entre la energía mayor y menor. Con ello se podrán utilizar reglas más eficientes sobre las fuerzas sísmicas en los dos componentes ortogonales de las estructuras.
- Al igual que en la zona epicentral, la energía está directamente correlacionada con la magnitud de los sismos ocurridos a una misma distancia epicentral. La energía máxima varía en forma exponencial con la magnitud, presentando para sismos de mayor magnitud un gran incremento de la energía.
- Los espectros de energía más relevantes son los de energía de entrada y los de histéresis ya que son los que se relacionan con la demanda de energía que impone el sismo a la estructura y con

el daño que ésta puede sufrir. Se observa que en un rango de valores de demanda de ductilidad ($2 < \mu < 4$) la relación entre la energía de histéresis (E_H) y la de entrada inelástica ($E_{I\mu}$) es una cantidad muy estable. Esto ya había sido observado por varios autores que han propuesto expresiones para esta relación. Estas expresiones tienen una muy buena aproximación con los valores exactos del valle de México.

- La energía histerética normalizada tiene un comportamiento diferente al de la energía histerética. Para comportamiento elástico la primera es cero y se incrementa proporcional al comportamiento inelástico. Al representar éste, un número promedio de ciclos de deformación plástica, tiene una mejor correlación con el daño de las estructuras.
- Los valores del factor de modificación de respuesta propuestos por Decanini y Mollaioli (2001) no son aplicables al valle de México. Del análisis del factor de modificación de respuesta (R_E) en el valle se observa que en la zona de Lago este factor tiene una gran dependencia del período dominante del terreno.
- En el valle de México existe una gran variación en la magnitud de la energía de entrada entre distintas estaciones, incluso para las estaciones que tienen suelos con el mismo período dominante. Las estaciones con mayores ordenadas espectrales se localizan en zonas que en sismos grandes han reportado daños. Para el sismo del 25 de abril de 1989 las estructuras con período de 3 segundos localizadas en la parte este de la zona de lago tienen las mayores ordenadas espectrales de energía.

Capítulo IV

Las curvas de igual energía de entrada, de histéresis y de histéresis normalizada para el valle de México son similares, con diferencias para algunas estaciones. En cada mapa las curvas de igual energía tienen formas similares.

Para el sismo del 25 de abril de 1989, al comparar las gráficas de energía de entrada, de período de 2 y 3 segundos, con las correspondientes de energía histerética normalizada se observa que existen algunas coincidencias de las zonas de mayor energía. Para este sismo existe más energía de entrada e histerética normalizada en sitios que históricamente han mostrado ser los más afectados durante sismos de subducción. Las gráficas de energía elástica de entrada tienen mayor correlación con el daño ocurrido en el valle de México durante el sismo de 19 de septiembre de 1985, siendo la gráfica de 2 segundos la que tiene más coincidencia de alta energía con las zonas de daños de este sismo. Las curvas obtenidas para cuatro diferentes sismos para un período de 2 segundos muestran que las zonas en que se presenta la energía máxima son recurrentes, y la poca variación puede ser atribuida a las diferencias en magnitud, distancia al área epicentral, y en menor escala a las características del sismo. Se observa que los niveles de energía no están correlacionados con el período del suelo y que la estación SCT no tiene las mayores ordenadas de energía para los sismos analizados.

Las estructuras localizadas en zonas de alta demandad de energía estarán sujetas a un número elevado de ciclos de carga. Las actuales metodologías deben garantizar que estas estructuras cumplan con los requisitos de diseño sin sufrir daño excesivo.

La energía de entrada elástica es un parámetro que captura las características de la historia de amplitudes en el tiempo y duración del movimiento del terreno. Su uso en análisis probabilísticos de peligro sísmico puede proveer un mejoramiento en las bases de selección de escenarios sísmicos. Se considera que la energía elástica de entrada y la energía histerética normalizada pueden emplearse para mejorar la zonificación sísmica de la Ciudad de México y considerar aspectos de energía y duración del movimiento que hasta hoy no se han tomado en cuenta y que produce degradación en los materiales por el número elevado de ciclos en el rango plástico.

Capítulo V

En la zona de Lago del valle de México se propone la utilización de un modelo de acelerograma sintético. Este modelo podría ser utilizado en la práctica profesional ya que la determinación de los acelerogramas sintéticos es muy sencilla y depende de parámetros que son bien conocidos y fáciles de obtener. Esta herramienta puede ser considerada confiable, ya que da estimaciones razonables de las características del movimiento del terreno.

Anexo

MÉTODOS DE DISEÑO BASADOS EN ENERGÍA

Método basado en el factor de ductilidad equivalente, μ_e (Fajfar, 1992)

Para determinar acciones sísmicas de diseño los métodos actuales están basados en el espectro elástico de respuesta, cuyas ordenadas son subsecuentemente reducidas para tomar en cuenta el comportamiento inelástico y la sobrerresistencia de la estructura. Con este enfoque sólo se consideran los valores máximos de amplitud de la respuesta, mientras que se ignoran factores como la duración de la excitación y el número de ciclos de carga. Las fuerzas de diseño resultantes al aplicar estas metodologías se consideran razonables pero no existe una transparencia en los códigos que permita al ingeniero estructurista poder definir el daño esperado para diferentes niveles de intensidad sísmica. Además, esta manera de determinar fuerzas de diseño puede ser poco conservadora cuando las estructuras deben resistir un gran número de ciclos de carga con movimientos de gran amplitud y con periodos cercanos al fundamental de la estructura.

La energía de entrada elástica es un parámetro que captura las características de la historia en el tiempo de amplitud y duración del movimiento del terreno. La energía que realmente se asocia con el daño de la estructura es la energía histerética que se presenta cuando la estructura tiene comportamiento inelástico. Mediante un análisis elástico con fuerzas laterales equivalentes se puede estimar la fluencia de los miembros, pero no se puede proveer una estimación de la cantidad de energía disipada. El uso de términos de energía puede complicar la formulación del problema y oscurecer el entendimiento del fenómeno físico.

Una técnica prometedora que toma en consideración la influencia de la inversión de los ciclos de carga y representa solo un cambio menor en los conceptos que son bien entendidos y ampliamente utilizados en la práctica parece ser el concepto de factor de ductilidad equivalente o factor de ductilidad reducido, μ_e (Fajfar, 1992),

$$\mu_e = \frac{1 + 4\beta\gamma^2\mu_u ID_{PA} - 1}{2\beta\gamma^2} \quad (A.1)$$

donde ID_{PA} es el índice de daño de Park y Ang (1985), β es un parámetro del índice de daño ID_{PA} , μ_u es el cociente del máximo desplazamiento admisible bajo carga monotónica (x_u) entre el desplazamiento de fluencia (x_y) y el parámetro γ introducido por Fajfar (1992) se explicará posteriormente. Con en el factor de ductilidad equivalente (μ_e) la capacidad de deformación de la estructura se reduce debido al daño acumulado causado por carga cíclica reversible.

El índice propuesto por Park y Ang (1985) tiene especial interés puesto que toma en cuenta explícitamente la energía histerética disipada (E_H) y el máximo desplazamiento de la estructura (x). Este índice fue desarrollado y calibrado para estimar el nivel de daño estructural en elementos dúctiles de concreto reforzado (vigas y columnas). Con este índice también se puede estimar el daño global de marcos mediante un promedio ponderado del daño local de los diferentes miembros dúctiles. Tiene la siguiente forma:

$$ID_{PA} = \frac{x}{x_u} + \beta \frac{E_H}{F_y x_u} \quad (A.2)$$

donde x es el máximo desplazamiento de la estructura, x_u es el máximo desplazamiento que la estructura es capaz de soportar en carga monotónica, F_y es la fuerza de fluencia o resistencia de fluencia del sistema elastoplástico y β es un parámetro relacionado con la tasa con la que se degrada la resistencia estructural conforme la energía histerética (E_H) aumenta. Un β de 0.15 corresponde a la mediana de los valores obtenidos experimentalmente.

De su calibración experimental un valor de ID_{PA} menor o igual a 0.4 puede interpretarse como daño reparable, entre 0.4 y menor a 1.0 como daño no reparable y mayor o igual a 1.0 como falla del sistema.

Otra manera en que se puede representar este índice es considerando la ductilidad última ($\mu_u = x_u/x_y$). Dividiendo numerador y denominador de la ecuación (A.2) entre x_y , se llega a que:

$$ID_{PA} = \frac{\mu}{\mu_u} + \beta \frac{E_H}{F_y x_y \mu_u} = \frac{\mu}{\mu_u} + \frac{\beta NE_H}{\mu_u} \quad (A.3)$$

donde NE_H es la energía plástica histerética normalizada y μ es la demanda de ductilidad durante la excitación sísmica.

El parámetro γ se utiliza para determinar cual es la demanda de ductilidad que una estructura debe desarrollar durante un sismo y que evidentemente debe ser menor a la ductilidad última, μ_u . El parámetro γ introducido por Fajfar (1992) se define así:

$$\gamma = \frac{\sqrt{\frac{E_H}{m}}}{\omega x} \quad (A.4)$$

donde m es la masa y ω es la frecuencia del sistema. El factor γ representa una forma normalizada de la energía histerética (E_H). Este parámetro controla la reducción de la capacidad de deformación de estructuras debido a daño acumulado. Es proporcional al cociente entre la velocidad equivalente basada en E_H ($v_e = \sqrt{2E_H/m}$) entre la pseudo-velocidad (ωx). También puede ser interpretado como la raíz cuadrada del número de ciclos completos en un sistema de un grado de libertad elástico (cuando esta fuerza se desplaza una cantidad x) que se requieren para absorber la cantidad de energía igual a E_H (Rodríguez, 1994).

El factor γ es una cantidad muy estable que depende principalmente de las características del movimiento del terreno, ya que solo tiende a aumentar ligeramente con la duración del sismo mientras que casi es independiente de la demanda de ductilidad, μ , y de la fracción de amortiguamiento crítico, ξ (Hirao *et al.*; 1988. Fajfar *et al.*, 1992 y Terán-Gilmore, 1996a) y es moderadamente influenciado por algunos parámetros estructurales como el periodo y el comportamiento hysterético. Aceptando que $F_y = m\omega^2 x_y$ (donde $\omega^2 x_y$ es una pseudo-aceleración) se tiene las siguientes expresiones:

$$\gamma = \sqrt{\frac{E_H}{F_y x_y \mu^2}} = \frac{NE_H}{\mu} \quad (\text{A.5})$$

De la anterior expresión $NE_H = \gamma^2 \mu^2$. Sustituyendo este valor en la ecuación (A.3) que cuantifica el daño se obtiene:

$$ID_{PA} = \frac{\mu_e}{\mu_u} + \frac{\beta \gamma^2 \mu_e^2}{\mu_u} \quad (\text{A.6})$$

Al despejar μ_e de esta expresión, se obtiene la definición de factor de ductilidad equivalente presentada en la ecuación (A.2).

Terán-Gilmore (1996a) propuso un método de diseño sísmico basado en desempeño haciendo uso de los conceptos anteriores que ha adecuado a estructuras reales de varios grados de libertad. Este método ha sido exitosamente usado en algunos estudios analíticos para obtener diseños de estructuras que satisfacen los criterios de desempeño (Bertero y Bertero, 1992). El autor ilustra la aplicación de este método en el diseño de marcos dúctiles de concreto reforzado de 2 y 10 pisos, y comenta que ésta es lo suficientemente simple como para hacer posible su uso en la práctica profesional. Posteriormente Decanini y Mollaioli (2001) también han utilizado estos conceptos proponiendo una metodología similar a la propuesta por Terán-Gilmore (1996a).

Método basado en la evaluación de la energía sísmica en estructuras mediante la suposición del mecanismo de falla (Leelataviwat *et al.*, 1999)

Contrario a los numerosos avances conceptuales en los diseños basados en energía, no hay avances en cuanto a su aplicación en la práctica. La razón más probable de este hecho es debido a la dificultad de transformar los términos de energía en términos de diseño tales como rigidez y resistencia, además que los ingenieros no están acostumbrados a pensar en términos de energía (Fajfar, 1998).

El método propuesto por Leelataviwat *et al.* (1999) trata de introducir los conceptos de energía mediante una propuesta de diseño basada en capacidad. Una de las aportaciones de este método es la de reconocer que en estructuras regulares construidas con marcos es posible predecir su suministro de energía. Esto es debido a que es más sencillo predecir su comportamiento ante una acción sísmica al proponer y controlar el mecanismo de falla. En resumen, ellos propusieron un

método de diseño plástico basado en desempeño para marcos fabricados de acero. Con este método se propone la determinación del cortante sísmico basal último a través del uso de la energía de entrada (E_I), de un mecanismo de fluencia preseleccionado y una distorsión de entrepiso objetivo o de diseño.

Basado en los trabajos de Housner (1956), la energía de entrada que contribuye al daño en una estructura es igual a la suma de la energía de deformación vibratoria elástica, E_e , y de trabajo plástico acumulado realizado por la estructura E_p .

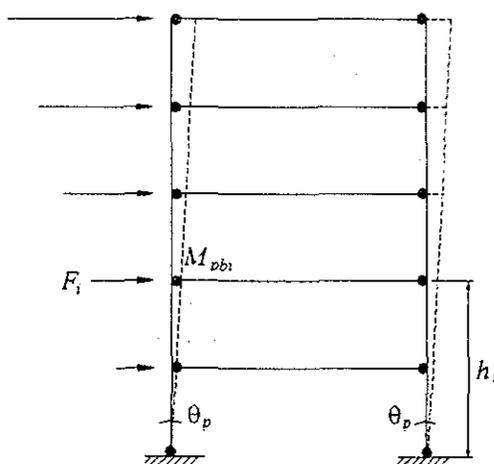
$$E_e + E_p = E_I \quad (\text{A.7})$$

Housner (1956) indicó que para determinar exactamente cuanta energía sería absorbida por deformación plástica debería ser necesario conocer las propiedades elásticas e inelásticas exactas de la estructura y del movimiento del terreno a la que ésta fuera sujeta, y que debería de ser necesario realizar cálculos detallados del comportamiento de la estructura.

Por otra parte, Akiyama (1985) mostró que la energía vibratoria elástica (E_e) puede ser calculada con la suposición de que la estructura entera se reduce a un sistema de un solo grado de libertad,

$$E_e = \frac{1}{2} M \left(\frac{T}{2\pi} \cdot \frac{V_y}{W} \cdot g \right)^2 \quad (\text{A.8})$$

donde V_y es el cortante basal de fluencia, W es el peso sísmico total de la estructura ($W=Mg$), M la masa total de la estructura, g la aceleración de la gravedad y T el periodo de la estructura. Esta simplificación está justificada por los resultados de varios análisis dinámicos (Akiyama 1985).



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura A.1 Mecanismo para el marco de una crujía equivalente

Considerando un marco equivalente de una crujía y n -niveles sujeto a fuerzas de inercia equivalentes en un estado de respuesta de distorsión máxima y suponiendo un mecanismo de falla global con articulaciones sólo en las vigas y en los apoyos de la estructura, como el mostrado en la

Figura A.1. La deformación plástica del marco se presenta después de que la estructura alcanza su punto de fluencia. Después de la formación de los mecanismos de fluencia la deformación del marco se supone que será uniforme en la altura de la estructura y que toda la energía se disipará solo en las articulaciones plásticas. La distorsión de entrepiso inelástica de la estructura se relacionada con la rotación plástica del marco, θ_p . La idea principal de este procedimiento es la de controlar la distorsión de entrepiso para limitar la rotación plástica de la estructura.

La energía plástica acumulada total que la estructura necesita disipar durante la excitación completa se obtiene calculando el trabajo interno realizado por las articulaciones plásticas del mecanismo propuesto. Así:

$$E_p = \left(\sum_{i=1}^n 2M_{pbi} + 2M_{pc} \right) \theta_p \quad (\text{A.9})$$

donde M_{pbi} es el momento plástico de la viga en el nivel i y M_{pc} es el momento plástico de las columnas en la base de la estructura. En adición, después de la fluencia la fuerza de inercia equivalente debe equilibrarse con las fuerzas internas. Igualando el trabajo interno realizado en las articulaciones plásticas con el trabajo externo realizado por las fuerzas de inercia equivalentes dadas se tiene la siguiente expresión:

$$\sum_{i=1}^n 2M_{pbi} + 2M_{pc} = \sum_{i=1}^n F_i h_i \quad (\text{A.10})$$

donde F_i es la fuerza de inercia equivalente en el nivel i y h_i es la altura de la viga del nivel i a partir del suelo. Suponiendo una distribución de fuerzas triangular invertida a lo largo de la altura de la estructura, las fuerzas de inercia en el nivel i pueden relacionarse con el cortante basal por:

$$F_i = \frac{w_i h_i}{\sum_{j=1}^n w_j h_j} \cdot V_y \quad (\text{A.11})$$

donde w_i es el peso de la estructura en el nivel i (o j). La distribución propuesta corresponde a la suposición de que la forma del primer modo de vibrar sea una línea. Sustituyendo las ecuaciones 1.26 y 1.27 en la ecuación se obtiene que la energía plástica, E_p , es igual a:

$$E_p = V_y \left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i h_i^2}{\sum_{i=1}^n w_i h_i} \right) \theta_p \quad (\text{A.12})$$

Leelataviwat *et al.* (1999) proponen estimar la energía de entrada (E_I) máxima con la siguiente función (Housner 1956):

$$E_I = \frac{1}{2} MS_v^2 \quad (\text{A.13})$$

donde S_v es el espectro de pseudo-velocidad. Al sustituir los valores de E_e , E_p y E_I (ecuaciones A.8, A.12 y A.13, respectivamente) en la ecuación A.7, y simplificándola se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{V_y}{W} \left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i h_i^2}{\sum_{i=1}^n w_i h_i} \right) \frac{\theta_p 8\pi^2}{T^2 g} = \left(\alpha^2 - \left(\frac{V_y}{W} \right)^2 \right) \quad (\text{A.14})$$

En donde α es el coeficiente sísmico del espectro de diseño. Resolviendo la ecuación cuadrática A.14 para un coeficiente de fluencia reducido (V_y/W), la solución admisible es la siguiente:

$$\frac{V_y}{W} = \frac{-\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4a^2}}{2} \quad (\text{A.15})$$

$$\alpha = \left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i h_i^2}{\sum_{i=1}^n w_i h_i} \right) \frac{\theta_p 8\pi^2}{T^2 g} \quad (\text{A.16})$$

donde α es un parámetro adimensional que depende de la rigidez de la estructura, de sus propiedades modales y del nivel de distorsión de entrepiso objetivo. Esta expresión estima los requerimientos de diseño de cortante basal correspondientes a un nivel de distorsión de entrepiso de diseño de la estructura, θ_p .

Como se observa en este trabajo el autor propone un valor de energía de entrada (E_I) aproximado (ecuación A.13). Algunos estudios (Uang, 1988; Akbas y Shen, 1997) han mostrado que esta ecuación puede subestimar significativamente la demanda de energía, por lo que para cálculos precisos de estructuras este valor debe ser obtenido de una manera más confiable y se debe replantear las ecuaciones anteriores para determinar el coeficiente sísmico último.

REFERENCIAS

- Akbas, B. y Shen, J.** (1997) "Energy-based earthquake resistant design" *Structures in the New Millennium, Proceedings of the Fourth International Kerensky Conference*, A. A. Balkema, Rotterdam, pages 559-565
- Akiyama, H.** (1985) "Earthquake Resistant Limit-State Design for Buildings" *Universidad de Tokio Press*. Japan.
- Arias, A** (1970) "A measure of earthquake intensity" *Seismic Design of Nuclear Power Plants*, R. Hansen, Editor, MIT Press, Cambridge, Mass.
- Arroyo, D., Rangel, G. y Terán-Gilmore, A.** (2000) "Efecto de la Resistencia en las Diferentes Demandas Sísmicas", *Memorias del XII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, León Gto.*
- Ávila, E. y Terán-Gilmore, A.** (2000) "Efecto de la Historia de Disipación de Energía en el Desempeño Estructural", *Memorias del XII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, León Gto.*
- Bertero, R. D. y Bertero, V. V.** (1992) "Tall reinforced concrete buildings: conceptual earthquake-resistant design methodology" *UCB/EERC-92/16, Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California*, Dec., 251 pages
- Bertero, V. V.** (2000) "Performance-Based Seismic Engineering: Conventional vs. Innovative Approaches" *Memorias 12vo Congreso Mundial de Ingeniería Sísmica*, New Zealand, No. 2074
- Chapman, M.** (1999) "On the Use of Elastic Input Energy for Seismic Hazard Analysis" *Earthquake Spectra*, 15, 4, pag 607-623, noviembre
- Chai, Y. H.; Fajfar, P. y Romstad, K. M.** (1998) "Formulation of duration-dependent inelastic seismic design spectrum" *Journal of Structural Engineering*, 124, 8. Aug., pages 913-921
- Chai, Y. H. y Fajfar, P.** (2000) "A procedure for estimating input energy spectra for seismic design" *Journal of Earthquake Engineering*, 4, 4, Oct., pages 539-561
- Chou, Ch. y Uang, Ch.** (2000) "Establishing absorbed energy spectra: an attenuation approach" *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 29, 10, Oct., pages 1441-1455

- Decanini, L. y Mollaioli, F.** (1998) "Formulation of elastic earthquake input energy spectra" *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 27, 12, Dec., pages 1503-1522
- Decanini, L. y Mollaioli, F.** (2001) "An energy-based methodology for the assessment of seismic demand" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21, 2, Feb., pages 113-137
- Earthquake Spectra** (1988) Vol. 4 Nos. 3 y 4 Octubre y Diciembre
- Earthquake Spectra** (1989) Vol. 5 No.1 Febrero
- Fajfar P.; Vidic T. y Fischinger M.** (1991) "On the Energy Input Into Structures" *Conferencia del Pacifico en Ingeniería Sísmica*, New Zealand, Auckland, pag. 81-92, Vol. 1
- Fajfar, P.** (1992) "Equivalent ductility factors, taking into account low-cycle fatigue" *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 21, 10, Oct., pages 837-848
- Fajfar P., Vidic T. y Krawinkler H.** (1992) "On energy demand seismic in SDOF system" *Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings*, Elsevier Applied Science, New York, pag. 41-62
- Fajfar P. y Vidic T.** (1994) "Consistent Inelastic Design Spectra: Hysteretic and Input Energy" *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 23, 5, pag. 523-537, mayo
- Fajfar, P.** (1998) "Trends in seismic design and performance evaluation approaches" *Proceedings of the Eleventh European Conference on Earthquake Engineering*, A. A. Balkema, Rotterdam, pag. 237-249
- Galambos, T. V.** (1968) "Deformation and energy absorption capacity of steel structures in the in-elastic range" *American Iron and Steel Institute*, New York, 42 pages
- Guerrero, R.; Reinoso, E. y Ordaz, M.** (1998) "Acelerogramas analíticos empleados para estimar el comportamiento estructural de edificios en la zona del lago de la Ciudad de México" *Revista de Ingeniería Sísmica*, 58, Jan.-June, pages 23-39
- Hirao K.; Sasada S. y Nariyuki Y.** (1988) "The Effect of Duration and Frequency Content of Earthquake Motion on Energy Responses of SDOF Structures" *Memorias 9no Congreso Mundial de Ingeniería Sísmica*, Vol. V, pag 141-146, Tokio, Japón
- Housner G. W.** (1956) "Limit Design of Structures to Resist Earthquakes", *Memorias del Primer Congreso Mundial de Ingeniería Sísmica*, Berkeley, California, pag. 5-1 a 5-13
- Housner, G. W.** (1975) "Measures of severity of earthquake ground shaking" *Proceedings of the U.S. National Conference on Earthquake Engineering-1975*, EERI, Oakland, California, pag. 25-33, junio
- Huerta, B. y Reinoso E.** (2001) "Espectros de energía de movimientos fuertes registrados en México" aceptado para su publicación en la *Revista de Ingeniería Sísmica*, SMIS.

- Iglesias, J. y Aguilar, J.** (1988) "Estudio sobre sismicidad en el valle de México. Capítulo III. Identificación de daños ocasionados por los sismos de 1985, 1979 y 1957 en la zona metropolitana" DDF, PNUD, HABITAT, México
- Iyama, J. y Kuwamura, H.** (1999) "Application of wavelets to analysis and simulation of earthquake motions" *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 28, 3, Mar., pages 255-272
- Kato, B. y Akiyama, H.** (1975) "Energy input and damage in structures subjected to severe earthquakes" *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, 235, Sept., pages 9-18
- Kuwamura, H. y Galambos, T. V.** (1989) "Earthquake load for structural reliability" *Journal of Structural Engineering*, 115, 6, pag. 1446-1462, junio
- Kuwamura H.; Kirino Y. y Akiyama W.** (1994) "Prediction of Earthquake Energy Input from Smoothed Fourier Amplitude Spectrum", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 23, pag. 1125-1137
- Lawson, R. S. y Krawinkler, H.** (1995) "Cumulative damage potential of seismic ground motion" *Proceedings, 10th European Conference on Earthquake Engineering*, A. A. Balkema, Rotterdam, pages 1079-1086, Vol. 2
- Manfredi, G.** (2001) "Evaluation of seismic energy demand" *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 30, 4, Apr., pages 485-499
- Medeot R.** (2000) "New Design Approaches Based on Energy Concepts and Related Seismic Hardware" *Memorias 12vo Congreso Mundial de Ingeniería Sísmica*, New Zealand, No. 1836
- Meli, R. y Miranda, E.** (1986), "Aspectos estadísticos de los daños ocasionados por los sismos de septiembre de 1985 en edificaciones de la ciudad de México" *Memorias del V Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Jalapa, Ver.
- Miranda, E.** (1993) "Site-dependent strength-reduction factors" *Journal of Structural Engineering*, 119, 12, Dec., pages 3503-3519
- Miranda, E.** (1996) "Hacia la transparencia en criterios de diseño sísmico" *Memorias del XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Morelia, Mich.
- Murià, D. y González, R.** (1995) "Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México" *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 51, pag 25-45
- Nau J. M. y Hall W. J.** (1984) "Scaling methods for earthquake response spectra" *Journal of Structural Engineering*, 110, 7, pag. 1533-1548, julio
- Nurtug, A. y Sucuoglu, H.** (1995) "Prediction of seismic energy dissipation in SDOF systems" *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 24, 9, Sept., pages 1215-1223
- Ordaz, M. y Singh, S. K.** (1992) "Source Spectra and Spectral Attenuation of Seismic Waves from Mexican Earthquakes, and Evidence of Amplification in the Hill Zone of Mexico City" *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82, 1, Feb., pag 24-43

- Ordaz, M. y Pérez-Rocha, L. E.** (1998) "Estimation of strength-reduction factors for elastoplastic systems: a new approach" *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 27, 9, Sept., pages 889-901
- Ordaz, M. y Montoya, C.** (1999) "Degtra 2000 ver 2.0.2" *Instituto de Ingeniería*, México, D. F.
- Ordaz, M.; Miranda, E. y Avilés J.** (2000) "Propuesta de espectros de diseño por sismo para el D.F." *VI Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica*, Querétaro Qro.
- Ordaz, M.** (2001) Comunicación personal
- Park, Y.-J. y Ang, A. H.-S.** (1985) "Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete" *Journal of Structural Engineering*, 111, 4, Apr., pages 722-739
- Popov, E. P.; Yang, T. y Grigorian, C.** (1993), "New Directions in Structural Seismic Designs" *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No. 4
- Leelataviwat, S.; Goel, S. y Stojadinovic, B.** (1999) "Toward performance-based seismic design of structures" *Earthquake Spectra*, 15, 3, Aug., pages 435-461
- Reinoso, E. y Ordaz, M.** (1996) "Algunos Resultados Recientes sobre el Peligro Sísmico en la Ciudad de México" *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 53, 2, pag 1-24
- Reinoso, E. y Ordaz, M.** (1999) "Spectral Ratios for Mexico City from Free-Field Recordings" *Earthquake Spectra*, 15, 2, pag 273-295, mayo
- Reinoso, E.** (2000), "Estudios para la microzonificación" *VI Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica*, Querétaro, Qro.
- Reinoso, E. y Ordaz, M.** (2001) "Duration of Strong Ground Motion During Mexican Earthquakes in Terms of Magnitude, Distance to the Rupture Area and Dominant Site Period", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 30: 653-673
- Reinoso, E. y Quiroga, C.** (2001) "Movimiento bidimensional en la zona de Lago de la ciudad de México y su efecto en las estructuras" aceptado para su publicación *XIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Guadalajara, Jal.
- Riddell, R.** (1989) "Espectros de energía disipada y daño sísmico" *Mem. 5as Jorn. Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Santiago, Chile, 2, pag. 895-904, 7-11 August
- Rodriguez, M.** (1994) "A measure of the capacity of earthquake ground motions to damage structures" *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 23, 6, June, pages 627-643
- Ruiz, S. y Badillo, H** (2000) "Diseño sísmico del refuerzo de edificios con disipadores de energía: algunos estudios y aplicaciones en México" *Seminario 2000 Desastres Sísmicos: Escenarios, Seguridad y Prevención en ciudades de países en desarrollo*, Caracas, Venezuela, 21-25, febrero

Sakai, Y.; Minami, T. y Kabeyasawa, T. (2000) "Simplification of strong ground motion considering inelastic responses of structures" *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 29, 6, June, pages 823-846

Sánchez-Sesma, F.; Pérez-Rocha L. y Reinoso E. (1993) "Ground Motion in Mexico City during the April 25, 1989, Guerrero Earthquake", *Tectonophysics*, Vol 218, 127-140

Singh, S. K.; Mena, E., Castro, R. y Carmona, C. (1987) "Empirical prediction of ground motion in Mexico city from coastal earthquake" *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 77, pag. 1862-1867

Teran-Gilmore, A. (1996a) "Performance-Based Earthquake-Resistant Design of Framed Buildings Using Energy Concepts", *Tesis (Ph. Dr. en Ingeniería Civil) Universidad de California, Berkeley*

Teran-Gilmore, A. (1996b), "Diseño basado en el desempeño sísmico de las estructuras" *Décimo Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Mérida, Yuc.

Uang, C. M. y Bertero, V. V. (1988) "Use of Energy as a Design Criterion in Earthquake Resistant Design", *Report No. UCB/EERC-88/18, Earthquake Engineering Research Center, Universidad de California, Berkeley*

Uang, C. M. y Bertero, V. V. (1990) "Evaluation of Seismic Energy in Structures", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 19, pag. 77-90

Zahrah, T. y Hall, W. (1985) "Earthquake Energy Absorption in SDOF Structures" *Journal of Structural Engineering*, 110, 8, Agosto, pag. 1757-1772