

0161

4



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

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

**“ FACTORES CORRECTIVOS DE LOS FACTORES DE
REDUCCIÓN POR DUCTILIDAD PARA CONSIDERAR EL
EFECTO DE LA FATIGA DE BAJO CICLAJE ”**

TESIS

PRESENTADA POR:

EDÉN BOJÓRQUEZ MORA

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA
(ESTRUCTURAS)**

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. SONIA E. RUIZ GÓMEZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, 2003.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

a



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Dra. Sonia gracias por brindarme su confianza y su apoyo incondicional, pero sobre todo "gracias por su amistad y por haberme comprendido"

Autorizo a la Dirección General de Universidades de
UNAM a difundir en formato electrónico y digital el
contenido de mi trabajo recepcionado
NOMBRE: Edén Egojorquez
Hora
FECHA: 21 Oct 2003
FIRMA: Edén Egojorquez Hora

*Para mis padres con todo mi cariño y mi amor,
pues todo lo que soy, lo soy gracias
a ustedes.*

A mi dios ...

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN **b**

“ Los sueños jamás terminan, solo cambian ”

“ Solo alguien carente de fe puede creer en lo imposible ”

“ Empieza por hacer lo necesario, después lo que te es posible y terminarás haciendo lo imposible ”

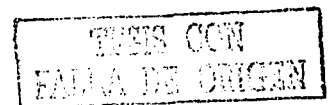
San Francisco de Asis

**“ Con orden y tiempo se encuentra el secreto
de hacerlo todo y de hacerlo bien ”**

Pitágoras

**“ Si contribuyes a la felicidad de otras personas, encontrarás
el verdadero bien, el auténtico significado de la vida ”**

Dalai Lama



C

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Sonia E. Ruiz Gómez, los Doctores Luis Esteva Maraboto, Roberto Meli Piralla, Amador Terán Gilmore y Mario Ordaz Schroeder por sus valiosos comentarios que fueron de vital importancia para enriquecer este trabajo y además por brindarme un poco de su gran sabiduría.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por brindarme un lugar de trabajo sin el cual no habría terminado mi tesis en tiempo y forma. A Elenita y Magy gracias por todo su apoyo.

A CONACYT por su apoyo económico que me permitió dar un paso más en mi vida académica.

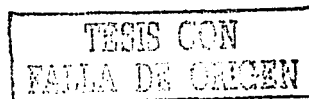
A mi hermanita Wilnya, mis hermanos Juan, Omar y Wildo por todos los momentos de dicha y felicidad que hemos tenido, por tantas alegrías y tristezas que hemos compartido durante este maravilloso sendero que se llama vida, por todo lo que he aprendido de ustedes y por todo lo que me enorgullecen, pues hasta hoy ha sido mi más grande satisfacción el tenerlos a mi lado y los quiero con todo mi corazón, ya que son mi más grande motivación e inspiración. Sigán luchando y en busca de sus sueños y por lo que tanto anhelan y desean, pues estoy seguro que pueden lograr todo lo que se propongan, sigamos adelante y jamás perdamos la fe.

A mi abuelita, mi tío y mis padrinos porque siempre puedo contar con su apoyo invaluable.

A mis nuevas hermanitas por haberme soportado todo este tiempo, porque sin importar como me comportaba siempre estaban ahí cuando más las necesitaba, sin lugar a dudas sin ustedes me habría resultado muy difícil la estancia en este lugar y pero que por el contrario han hecho que para mi se convirtiera en un paraíso, siempre estarán en mi corazón.

A todos mis amigos y compañeros cuyos nombres prefiero omitir para no cometer el error de que se me pase alguno, pero estoy seguro que ellos saben quienes son y que hicieron de mi estancia aquí algo inolvidable, donde aprendí muchísimas cosas, pero sobre todo me di cuenta que la niñez no es un estado físico, sino un estado mental que nace del corazón y del alma. A todos ustedes gracias por brindarme su amistad y compañerismo, siempre serán una parte muy importante en mi vida.

Finalmente, a todos los que han contribuido a lo largo de mi vida en mi formación como persona, siempre en busca de la integridad y que me han enseñado cuales son las cosas verdaderamente importantes de la vida a todos ustedes GRACIAS.



ÍNDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
CAPÍTULO 1. ENERGÍA DE ENTRADA EN SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD	4
CAPÍTULO 2. CAPACIDAD DE DUCTILIDAD DE ESTRUCTURAS, BASADA EN DIFERENTES MODELOS DE DAÑO	14
CAPÍTULO 3. CÁLCULO DE LA ENERGÍA DE ENTRADA EN SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD	19
CAPÍTULO 4. MOVIMIENTOS SÍSMICOS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO	21
CAPÍTULO 5. RELACIÓN ENTRE LA ENERGÍA HISTERÉTICA Y LA ENERGÍA DE ENTRADA PARA DISTINTAS ZONAS DEL VALLE DE MÉXICO	30
CAPÍTULO 6. INFLUENCIA DE LA FATIGA DE BAJO CICLAJE EN LA CAPACIDAD DE DUCTILIDAD DE SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD	43

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

e

CAPÍTULO 7. FACTORES DE REDUCCIÓN DE FUERZAS SÍSMICAS SIN CONSIDERAR Y CONSIDERANDO EL EFECTO DE LA FATIGA DE BAJO CICLAJE	59
CONCLUSIONES	76
APÉNDICE A	78
BIBLIOGRAFÍA	

RESUMEN

En este estudio, se determina la influencia de la fatiga de bajo ciclaje en la ductilidad máxima que pueden desarrollar los sistemas estructurales de un grado de libertad (SUGL) ubicados en el valle de México. La ductilidad tomando en cuenta la fatiga de bajo ciclaje se obtiene utilizando el concepto de ductilidad equivalente (Fajfar, 1992), que toma en cuenta el daño a través del índice de Park y Ang (1985). Se trazan los espectros de respuesta para las nuevas ductilidades, y con ello se obtienen nuevos factores de reducción de fuerzas sísmicas por ductilidad para el valle de México. También se obtienen los factores de reducción de fuerzas sísmicas por ductilidad sin considerar el efecto de la fatiga de bajo ciclaje. Estos se comparan con los propuestos en el Apéndice del Reglamento de Construcciones del D.F. y con base en esta comparación se hace una crítica del mismo. Finalmente, se propone un factor correctivo de los factores de reducción por ductilidad para tomar en cuenta el efecto de la fatiga de bajo ciclaje.

TESIS CON
VALOR DE CREDITO

INTRODUCCIÓN

Existen una infinidad de variables que intervienen en un fenómeno físico. Tratar de tomar en cuenta todas estas variables para representarlo matemáticamente requeriría de un largo tiempo, durante el cual el número de variables podría incrementarse o disminuir. Es por eso que para tratar de modelar matemáticamente un problema físico se deben de tomar en cuenta aquellas variables que son temporalmente más significativas, y con las cuales se puede predecir el fenómeno de una manera bastante precisa o con un grado de inexactitud tal que el ser humano no pueda percibir mediante su tecnología.

Los criterios de diseño sísmico de estructuras actualmente se basan en hipótesis de fuerzas y desplazamientos. Estos no toman en cuenta explícitamente el daño acumulado en una estructura durante un sismo, el cual se puede considerar mediante conceptos de energía sísmica. El daño acumulado puede ser muy importante en el diseño sísmico de estructuras, ya que cuando una estructura incursiona en su rango de comportamiento plástico sufre deterioro en sus propiedades mecánicas debido a las deformaciones plásticas acumuladas. Este fenómeno se conoce como fatiga de bajo ciclaje y puede ser muy importante en sismos de larga duración. Debido a la fatiga de bajo ciclaje, la ductilidad de una estructura se ve reducida. Lo que implica que dicho fenómeno debe ser tomado en cuenta en los criterios de diseño sísmico de estructuras; es decir, en los factores de reducción de fuerzas sísmicas por ductilidad usados por los reglamentos.

El presente estudio está dividido de la siguiente manera:

En el Capítulo 1 se presentan los conceptos fundamentales de energía de entrada en sistemas de un grado de libertad, y se mencionan las diferencias entre energía de entrada relativa y absoluta.

En el Capítulo 2 se hace una revisión de la ductilidad de estructuras basada en diferentes modelos de daño, se mencionan cuales son los parámetros más importantes en la reducción de la ductilidad debido a la fatiga de bajo ciclaje, y finalmente se menciona la expresión utilizada para considerar dicho efecto.

El Capítulo 3 presenta cual es el algoritmo que utiliza el programa RBENERGÍA para trazar los espectros de respuesta considerando el efecto de la fatiga de bajo ciclaje.

Los movimientos sísmicos utilizados en este estudio se mencionan en el Capítulo 4.

La relación entre la energía histerética y la energía de entrada se determina en el Capítulo 5. Esta relación ha resultado ser muy estable, independientemente del registro sísmico utilizado, por lo que puede servir de base para un diseño sísmico con base en conceptos de energía. En este capítulo se proponen fórmulas para determinar esta relación para las distintas zonas del valle de México.

En el Capítulo 6 se determina la ductilidad tomando en cuenta el efecto de la fatiga de bajo ciclaje, y se proponen expresiones para determinarla para las distintas zonas del valle de México. También se menciona en qué casos resulta más importante tomar en cuenta el efecto de la fatiga de bajo ciclaje.

En el Capítulo 7 se obtienen los factores de reducción de fuerzas sísmicas sin considerar el efecto de la fatiga de bajo ciclaje. Estos son comparados con los que marca el Apéndice A del Reglamento de Construcciones del D.F. Finalmente, se obtienen los factores de reducción de fuerzas sísmicas considerando el efecto de la fatiga de bajo ciclaje y con ello se obtiene la relación entre los factores sin considerar dicho efecto y considerándolo. Por último se proponen factores correctivos para tomar en cuenta el efecto de la fatiga de bajo ciclaje en los factores de reducción por ductilidad.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO 1

ENERGÍA DE ENTRADA EN SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD

Cuando ocurre un sismo se libera una gran cantidad de energía, la cual se transmite a las estructuras a través de su base. La energía que un sismo le transmite a una estructura se denomina energía de entrada. Parte de la energía de entrada es absorbida temporalmente por la estructura en forma de energía cinética y de deformación, mientras que el resto se disipa por amortiguamiento y deformación inelástica. Al término del movimiento, toda la energía transmitida a la estructura será disipada hasta que la estructura llegue al reposo.

La mayoría de los investigadores utilizan el concepto energía de entrada relativa. Uang y Bertero (1990) explican la importancia de considerar la energía de entrada absoluta, ya que existen algunas diferencias importantes entre ambas definiciones. Además, muestran la importancia del significado físico de la energía de entrada absoluta. Más adelante se verá que para la mayoría de los edificios construidos es indistinto usar cualquiera de las energías antes mencionadas, ya que para la mayoría de éstos, ambas energías resultan prácticamente iguales.

ECUACIONES DE ENERGÍA DE ENTRADA RELATIVA Y DE ENTRADA ABSOLUTA PARA SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD

ENERGÍA DE ENTRADA RELATIVA

En la figura 1.1 se ilustra un sistema de un grado de libertad sometido a un movimiento sísmico en su base.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

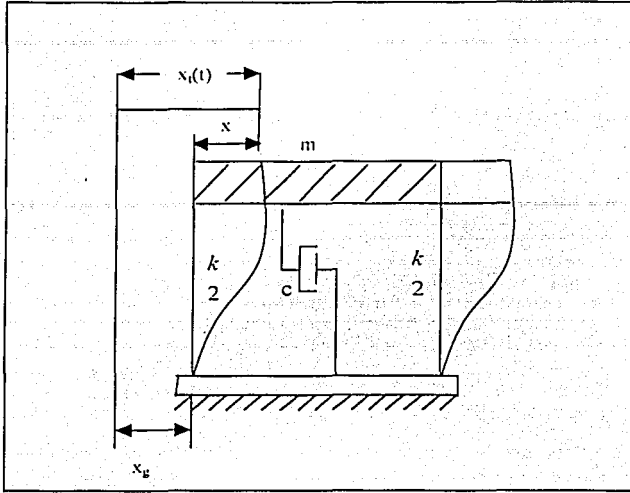


Figura 1.1. Oscilador de un grado de libertad sometido a un movimiento sísmico en su base.

La ecuación de movimiento de este sistema puede escribirse de la siguiente forma:

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + f_s(x, \dot{x}) = -m \ddot{x}_g(t) \quad (1.1)$$

donde m representa la masa del sistema, c es el coeficiente de amortiguamiento viscoso del sistema, f_s es la fuerza de deformación, x_g es el desplazamiento del terreno y x es el desplazamiento relativo del sistema con respecto al del terreno; el punto sobre la literal indica derivada con respecto al tiempo. La energía de entrada se puede determinar integrando miembro a miembro dicha ecuación con respecto al desplazamiento relativo x , con lo cual se obtiene:

$$\int m \ddot{x}(t) dx + \int c \dot{x}(t) dx + \int f_s(x, \dot{x}) dx = - \int m \ddot{x}_g(t) dx \quad (1.2)$$

Esta es conocida como la ecuación de la energía de entrada relativa.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El término de la derecha representa la energía de entrada relativa sobre la estructura:

$$E_t = - \int m \ddot{x}_g(t) dx \quad (1.3)$$

La energía de entrada relativa representa el trabajo realizado por una fuerza lateral equivalente en un sistema de base fija.

El primer término del lado izquierdo de la ecuación (1.2) representa la energía cinética de la masa asociada a la velocidad relativa de la masa con respecto a el terreno.

$$E_k = \int m \dot{x}(t) dx \quad (1.4)$$

Haciendo cambio de variables, la energía cinética se puede escribir:

$$E_k = \frac{m \dot{x}^2}{2} \quad (1.5)$$

El segundo término del lado izquierdo de la ecuación (1.2) es la energía disipada por amortiguamiento viscoso:

$$E_D = \int c \dot{x}(t) dx = \int c \dot{x}^2 dt \quad (1.6)$$

El tercer término del lado izquierdo de la ecuación (1.2) representa la suma de la energía disipada por comportamiento inelástico del material (energía histerética E_h), más la energía de deformación del sistema E_s . Éstas se obtienen de la siguiente manera:

$$E_s = \frac{k x^2}{2} \quad (1.7)$$

$$E_h = \int f_s(x, \dot{x}) dx - E_s \quad (1.8)$$

La ecuación (1.2) puede escribirse de la siguiente forma:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$E_I = E_k + E_D + E_s + E_h \quad (1.9)$$

que representa el balance de energía en una estructura (Uang y Bertero, 1990).

Se observa que la estructura disipará energía por amortiguamiento durante todo el sismo. Por otro lado disipará energía por comportamiento inelástico, siempre y cuando la estructura se encuentre en el intervalo inelástico. Por lo tanto, mientras el sistema se encuentre en su intervalo elástico, la estructura solo tendrá capacidad de disipar energía por amortiguamiento. Con esto se concluye que si se quiere disipar gran cantidad de energía, la estructura debe trabajar en su intervalo inelástico o tener gran amortiguamiento. Esto es lo que se busca en un diseño, porque un diseño elástico resultaría antieconómico.

ENERGÍA DE ENTRADA ABSOLUTA

La ecuación de movimiento de la figura 1.1 también puede escribirse de la siguiente forma:

$$m \ddot{x}_i(t) + c \dot{x}_i(t) + f_s(x, \dot{x}) = 0 \quad (1.10)$$

donde x_i es el desplazamiento total de la masa:

$$x_i = x + x_g \quad (1.11)$$

Integrando la ecuación (1.10) con respecto al desplazamiento relativo x se tiene:

$$\int m \ddot{x}_i(t) dx + \int c \dot{x}_i(t) dx + \int f_s(x, \dot{x}) dx = 0 \quad (1.12)$$

Esta es conocida como la ecuación de la energía de entrada absoluta.

Mediante algunos cambios de variable es fácil demostrar que la ecuación (1.12) puede escribirse de la siguiente manera:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$\frac{m \dot{x}_i^2}{2} + \int c \dot{x}^2 dt + \int f_i(x, \dot{x}) dx = \int m \ddot{x}_i(t) dx_g \quad (1.13)$$

Al igual que en el caso de la energía de entrada relativa, el término del lado derecho de la ecuación (1.13) representa la energía de entrada absoluta:

$$E_{I_a} = \int m \ddot{x}_i(t) dx_g \quad (1.14)$$

El primer término del lado izquierdo de la ecuación (1.13) representa la energía cinética de la masa asociada a la velocidad absoluta de la misma:

$$E_{k_a} = \frac{m \dot{x}_i^2}{2} \quad (1.15)$$

Los otros términos de la ecuación representan exactamente lo mismo que para el caso de la energía de entrada relativa.

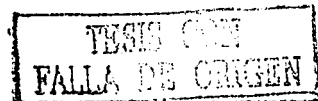
De la ecuación (1.14), se observa que el término $m \ddot{x}_i$ representa la fuerza total aplicada en la base de la estructura. Integrando dicha fuerza para cada instante de tiempo respecto a x_g se obtiene la energía de entrada absoluta:

$$E_{I_a} = \int m \ddot{x}_i(t) dx_g$$

que representa el trabajo realizado por la fuerza total aplicada en la base de la estructura.

Por lo tanto, la ecuación de la energía de entrada absoluta puede escribirse de la siguiente manera (Uang y Bertero, 1990):

$$E_{I_a} = E_{k_a} + E_D + E_s + E_h \quad (1.16)$$



DIFERENCIAS ENTRE LA ENERGIA DE ENTRADA RELATIVA Y ABSOLUTA

Es claro que la única diferencia entre las energías de entrada absoluta y relativa está dada por las energías cinéticas.

Una estructura que tiene un periodo muy corto, tiende a desplazarse como cuerpo rígido, por lo cual el desplazamiento relativo entre esta y el terreno será prácticamente cero. Se puede demostrar que la energía de entrada relativa resulta prácticamente nula para periodos muy cortos, mientras que la energía de entrada absoluta resulta (Uang y Bertero, 1990):

$$E_{Ia} = \frac{m \ddot{x}_g^2}{2} \quad (1.17)$$

Para periodos muy largos y por lo tanto estructuras muy flexibles, la energía de entrada absoluta será prácticamente nula, mientras que la energía de entrada relativa resulta (Uang y Bertero, 1990):

$$E_I = \frac{m \ddot{x}_x^2}{2} \quad (1.18)$$

Las siguientes gráficas muestran la variación de la energía cinética absoluta y relativa a través del tiempo de un oscilador de un grado de libertad con comportamiento bilineal. Se consideran dos periodos de vibración del sistema: $T=0.2$ s y $T=5$ s. El sistema se sometió al sismo registrado en la SCT-EO el 19 de septiembre de 1985. Se consideró una rigidez de posfluencia de 0.03 veces la rigidez inicial del sistema, y un amortiguamiento del 5% del amortiguamiento crítico, una masa unitaria y una relación de resistencia de fluencia contra masa $F_y/m=0.1$ m/s².

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

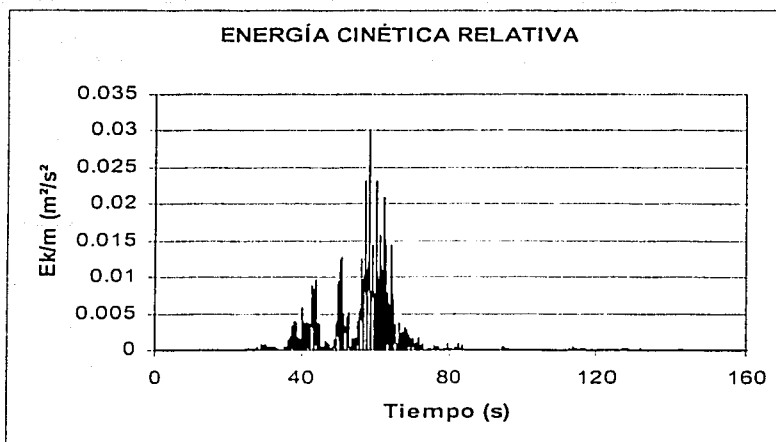


Figura 1.2. Variación de la energía cinética relativa en el tiempo. Registro SCT-EO del sismo del 19 de septiembre de 1985, $T=0.2$ seg.

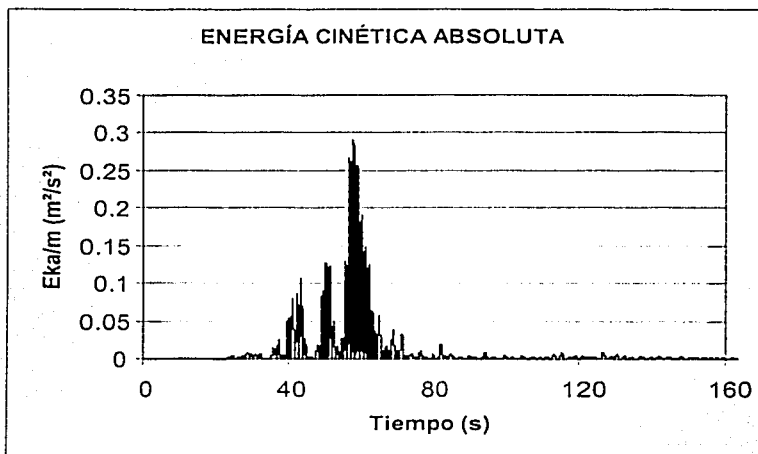


Figura 1.3. Variación de la energía cinética absoluta en el tiempo. Registro SCT-EO del sismo del 19 de septiembre de 1985, $T=0.2$ seg.

Es claro que la única diferencia entre las energías de entrada relativa y absoluta está dada por la energía cinética. De las figuras 1.2 y 1.3 puede observarse que para periodos

cortos, la energía cinética absoluta resulta mucho mayor que la relativa. Por lo tanto existirá la misma diferencia entre las energías de entrada.

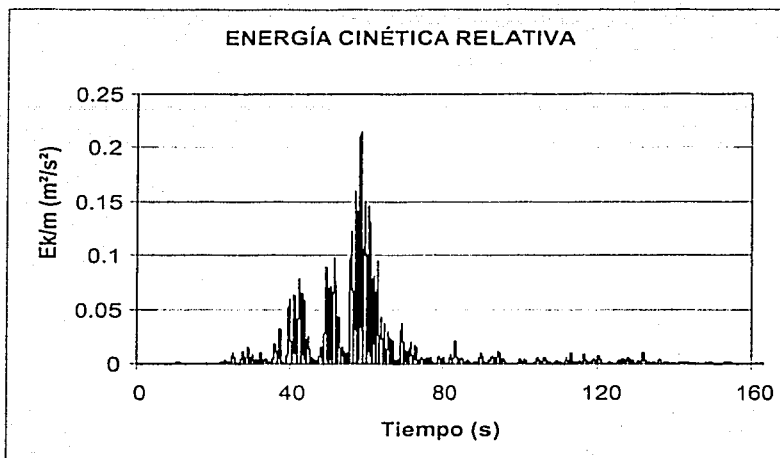


Figura 1.4. Variación de la energía cinética relativa en el tiempo. Registro SCT-EO del sismo del 19 de septiembre de 1985, T=5.0 seg.

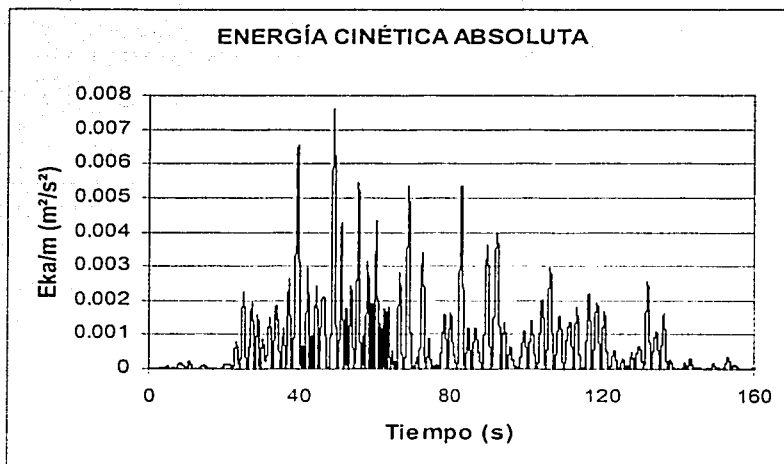


Figura 1.5. Variación de la energía cinética absoluta en el tiempo. Registro SCT-EO del sismo del 19 de septiembre de 1985, T=5.0 seg.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En las figuras 1.4 y 1.5 se muestra la variación de la energía cinética relativa y absoluta para un periodo largo de la estructura. Se observa lo contrario que en el caso de periodos cortos ($T=0.2$ s). La energía cinética relativa resulta mucho mayor que la absoluta. Esta diferencia será la misma en el caso de las energías de entrada.

La figura 1.6 muestra la variación a través del tiempo de las energías de entrada absoluta y relativa para un periodo del oscilador con $T=2$ seg. Este es aproximadamente igual al periodo predominante del terreno. No se observan cambios significativos entre ambas definiciones como lo fue en el caso de periodos largos y cortos. Lo anterior hace suponer que si se trata de estructuras con periodos intermedios, la diferencia entre las energías de entrada absoluta y relativa puede ser despreciable. Esto se observa en el espectro de energía de entrada mostrado en la figura 1.7.

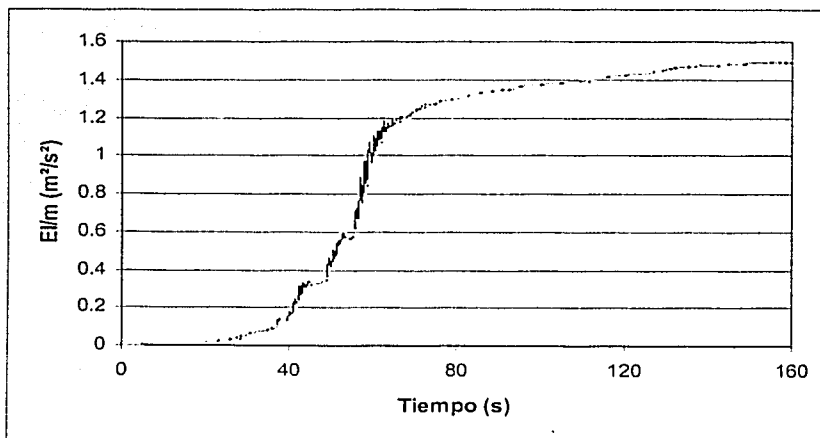


Figura 1.6. Variación de las energías de entrada absoluta y relativa en el tiempo.
Registro SCT-EO del sismo del 19 de septiembre de 1985, $T=2.0$ seg.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

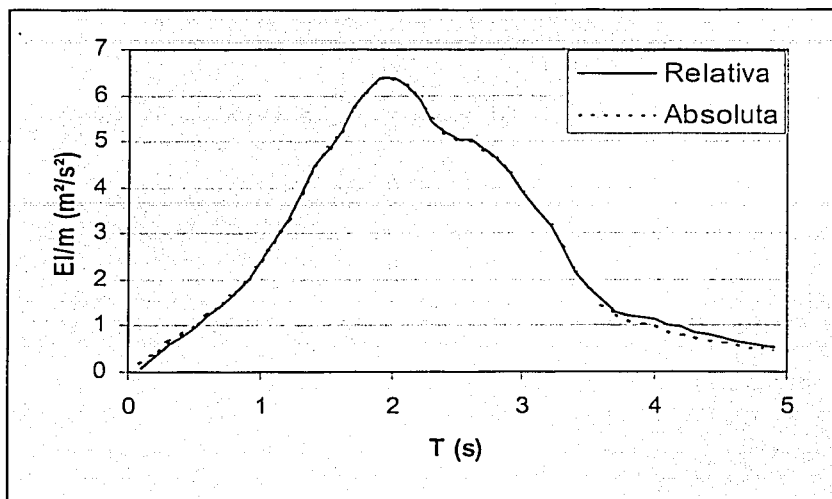


Figura 1.7. Espectros de energía de entrada relativa y absoluta de un oscilador con relación $F_y/m=1 \text{ m/s}^2$, para el registro SCT-EO del sismo del 19 de septiembre de 1985.

La figura 1.7 muestra que para periodos cortos la energía absoluta resulta mayor que la relativa. En el caso de periodos largos se observa lo contrario. Para el caso de periodos intermedios, no existen diferencias significativas entre ambas energías, por lo que se pueden considerar iguales, como se ilustró anteriormente.

Resulta evidente que para periodos de estructuras comúnmente utilizados en la práctica, la energía de entrada absoluta y la relativa resultan prácticamente iguales. En este estudio, cuando se trate con la energía de entrada, se referirá a la energía de entrada relativa.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO 2

CAPACIDAD DE DUCTILIDAD DE ESTRUCTURAS, BASADA EN DIFERENTES MODELOS DE DAÑO

Modelo basado en el desplazamiento máximo bajo carga monotónicamente creciente

Este modelo es el comúnmente usado en la práctica para medir el daño en las estructuras. El índice de daño (I_D) para este caso puede escribirse de la siguiente manera:

$$I_D = \frac{D - D_y}{D_u - D_y} = \frac{\mu - 1}{\mu_u - 1} \quad \text{para } D > D_y \quad (2.1)$$

donde:

D representa el desplazamiento en la estructura.

D_y es el desplazamiento de fluencia.

D_u es el último desplazamiento que una estructura puede soportar ante desplazamiento monotónicamente creciente.

μ_u capacidad de ductilidad ante desplazamiento monotónicamente creciente.

μ ductilidad desarrollada por la estructura.

La ductilidad se define como la relación entre el desplazamiento máximo y el desplazamiento de fluencia. Se puede escribir:

$$\mu = \frac{D}{D_y} \quad (2.2)$$

Resulta claro de la ecuación 2.1 que para valores de I_D mayores que 1 la estructura falla, mientras que para valores menores que la unidad, la estructura sufrirá daño. La ecuación 2.1 puede escribirse de la siguiente forma:

$$\mu = I_D(\mu_u - 1) + 1 \quad (2.3)$$

Cuando la estructura se encuentra en el límite de su falla, es decir si $I_D = 1$, se tiene:

$$\mu = \mu_u \quad (2.3a)$$

Resulta claro que la demanda de ductilidad definida mediante la ec. 2.2 corresponde a la máxima capacidad de ductilidad que puede desarrollar la estructura, en otras palabras representa el límite superior de la ductilidad que podría desarrollar la estructura. Pero ante cargas cíclicas se estaría sobrestimando la demanda ductilidad en las estructuras.

Modelo basado en la energía disipada bajo carga monotónicamente creciente

Si se considera que la energía histerética disipada por una estructura bajo carga cíclica es igual a la capacidad de disipar energía histerética bajo carga monotónicamente creciente, el índice de daño se puede escribir de la siguiente forma:

$$I_D = \frac{E_H}{F_y(D_u - D_y)} = \frac{E_H}{F_y D_y (\mu_u - 1)} \quad (2.4)$$

donde:

F_y representa la fuerza de fluencia en la estructura.

E_H es la energía histerética disipada.

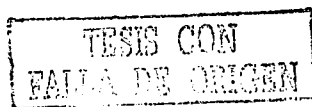
Para un sistema estructural con comportamiento elastoplástico se tiene la siguiente relación:

$$F_y = m\omega^2 D_y \quad (2.5)$$

donde:

m es la masa.

ω frecuencia natural.



Al término $\frac{E_H}{F_y D_y}$ se le llama comúnmente energía histerética normalizada. Utilizando las ecuaciones 2.2 y 2.5, se puede obtener la siguiente expresión (Fajfar, 1992):

$$\frac{E_H}{F_y D_y} = \gamma^2 \mu^2 \quad (2.6)$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{E_H / m}}{\omega D} \quad (2.7)$$

La relación entre la ductilidad equivalente y la ductilidad última bajo carga monótonicamente creciente puede escribirse de la siguiente manera:

$$\mu = \frac{\sqrt{I_D (\mu_u - 1)}}{\gamma} \quad (2.8)$$

De la ecuación 2.8 puede observarse que el parámetro que controla la reducción de la ductilidad debido a la fatiga de bajo ciclaje es γ . Si este parámetro es pequeño, el efecto de la fatiga de bajo ciclaje puede ser despreciable, y el daño que sufre la estructura esta dada por los desplazamientos máximos. A medida que γ crece, la influencia de la fatiga de bajo ciclaje se va haciendo más importante y por lo tanto la demanda de ductilidad de la estructura dependerá tanto de los desplazamientos máximos, como de los desplazamientos plásticos acumulados, los cuales pueden definirse en función de la energía histerética.

Es evidente que la mínima energía histerética que puede disipar la estructura, es el área bajo la curva de carga monótonicamente creciente. Por lo tanto, la ductilidad asociada a este modelo de daño está del lado conservador. Esta ductilidad representa el límite inferior de la capacidad de ductilidad que puede tener una estructura. Por consiguiente, es claro que la capacidad de ductilidad de una estructura debe ser mayor que la obtenida con este modelo y menor que la obtenida con el modelo anterior.

Modelo basado en el índice de daño de Park y Ang para concreto reforzado

El índice de daño de Park y Ang puede ser escrito de la siguiente forma:

$$I_D = \frac{D}{D_u} + \beta \frac{E_H}{F_y D_u} = \frac{\mu}{\mu_u} + \beta \frac{E_H}{F_y D_y \mu_u} \quad (2.9)$$

donde β es una constante que depende de las características estructurales. Éste se puede interpretar como el parámetro que caracteriza el deterioro del ciclo histerético en función de la cantidad de energía histerética disipada. Para una estructura que este hecha con un material que no sufra deterioro en sus propiedades mecánicas cuando la estructura este disipando energía, es decir se encuentre en su intervalo de comportamiento plástico, β es nulo.

Cuando el índice de daño de Park y Ang es menor a 0.4 se considera que el daño es reparable. Valores mayores a 0.4 pero menores a la unidad representan daño considerable pero sin que la estructura colapse, mientras que valores mayores que o iguales a la unidad representan el colapso del sistema (Park y Ang, 1985). Cosenza et al (1993), encontró que el valor de $\beta = 0.15$, es el que mejor se aproxima al daño en las estructuras que exhiben un comportamiento histerético razonablemente estable.

De las ecuaciones 2.9 y 2.6 se obtiene la siguiente relación entre la ductilidad equivalente μ y la ductilidad última bajo carga monotónicamente creciente μ_u .

$$\mu = \frac{I_D \mu_u}{1 + \beta \gamma^2 \mu} \quad (2.10)$$

o

$$\mu = \frac{\sqrt{1 + 4 I_D \beta \gamma^2 \mu_u} - 1}{2 \beta \gamma^2} \quad (2.11)$$

En la ecuación 2.11 se observa que los parámetros que controlan la reducción de la ductilidad máxima que puede desarrollar la estructura debido a la fatiga de bajo ciclaje son β y γ .

La ecuación 2.11 se conoce como la ductilidad equivalente (Fajfar, 1992), y fue utilizada en este estudio para considerar la fatiga de bajo ciclaje.

TESIS
FALLA DE CARGA

CAPÍTULO 3

CÁLCULO DE LA ENERGÍA DE ENTRADA EN SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD CONSIDERANDO FATIGA DE BAJO CICLAJE

Para lograr los objetivos de este estudio, se desarrolló un programa de cómputo de análisis dinámico de sistemas de un grado de libertad con comportamiento bilineal, RBENERGÍA (Bojórquez, 2002). Este es capaz de estimar además de las respuestas dinámicas comúnmente utilizadas en el diseño sísmico de estructuras (desplazamientos, velocidades y aceleraciones), la energía de entrada y todos los parámetros necesarios para su obtención (ver capítulo 1).

El algoritmo que utiliza el programa RBENERGÍA es el siguiente:

1. Declarar los siguientes datos iniciales: acelerograma, diferencial de tiempo del acelerograma, porcentaje del amortiguamiento crítico, rigidez de post-fluencia, ductilidad, y las condiciones iniciales del oscilador de un grado de libertad, las cuales se consideran nulas.
2. Para trazar los espectros, es necesario definir los límites inferior y superior del espectro, así como el diferencial de periodo que se desea. En este estudio se tomó un intervalo de valores de periodo desde 0.1 hasta 5 seg, con un diferencial de periodo de 0.1 segundos.
3. Hacer un ciclo para el intervalo de periodos seleccionado, y determinar la respuesta elástica del oscilador de un grado de libertad, si la demanda de ductilidad del oscilador es menor o igual a uno, se evalúan las energías (ver mas adelante) y termina el programa. Si la demanda de ductilidad es mayor que uno, entonces continua el programa.

4. Del análisis elástico, se obtiene la resistencia necesaria en el oscilador para que desarrolle una ductilidad unitaria (fuerza elástica). Para obtener una ductilidad mayor que uno, resulta claro que la resistencia en el oscilador debe ser menor que la fuerza elástica. En este caso se desconoce cuál es la fuerza que debe tener el oscilador para que desarrolle cierta ductilidad, por lo que comienza un proceso iterativo. Primero se supone una resistencia muy pequeña para el oscilador, asegurando que la ductilidad del oscilador para dicha fuerza, sea mayor que la que se desea obtener.

La resistencia necesaria en el oscilador para que desarrolle la ductilidad que se desea obtener, estará entre la fuerza elástica y la pequeña resistencia propuesta.

5. Con la resistencia del oscilador obtenida en el paso anterior, se encuentran las máximas respuestas, con ello fácilmente se pueden trazar los espectros de respuesta para esa ductilidad.

6. Se aplica la ecuación 2.11 y se obtiene la ductilidad equivalente para cada uno de los periodos del rango seleccionado.

7. Se repiten los pasos 4 a 6 pero usando la "nueva" ductilidad. Con esto se obtienen los espectros correspondientes a la ductilidad equivalente.

CAPÍTULO 4

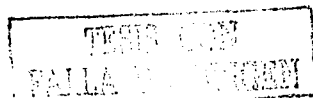
MOVIMIENTOS SÍSMICOS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO

Eventos sísmicos seleccionados

Para el presente estudio se seleccionaron eventos sísmicos de subducción, que son los que presentan mayor magnitud en la Republica Mexicana. Estos ocurrieron entre 1960 y 1997, y tienen una magnitud mayor o igual a 6.9. Es claro que las intensidades sísmicas que se obtienen son muy distintas para los sismos seleccionados, pero como se observará más adelante, esto no tiene serías implicaciones en los parámetros obtenidos en este estudio, ya que los resultados son muy similares. En la Tabla 4.1 se muestran los eventos con los que se trata en esta tesis.

	Fecha	Magnitud Richter	Hr:Min:Sec (GMT)	Latitud (N)	Longitud (E)	Profundidad (Km)
1	68-08-02	7.1	14:06:37	16.6	-97.8	16
2	78-11-29	7.8	19:52:50	16.01	-96.59	23
3	79-03-14	7.0	11:07:15	17.75	-101.26	25
4	81-10-25	7.3	03:22:16	18.09	-102	21
5	82-06-07	6.9	06:52:33	16.42	-98.25	6
6	85-09-19	8.1	13:17:49	18.42	-102.47	15
7	85-09-21	7.6	01:37:14	17.83	-101.68	17
8	86-04-30	7.0	07:07:19	18.36	-103.05	22
9	89-04-25	6.0	14:29:03	16.8	-99.28	23
10	95-09-14	7.3	14:04:33	16.75	-98.67	21
11	95-10-09	7.5	15:35:54	18.99	-104.25	25
12	96-02-25	6.9	03:08:19	15.88	-97.98	15
13	97-01-11	6.9	20:28:26	18.34	-102.58	40

Tabla 4.1. Eventos sísmicos seleccionados.



Estaciones Acelerométricas

Las instituciones encargadas de registrar los movimientos sísmicos en el valle de México son las siguientes:

- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (CENAPRED)
- Centro de Instrumentación y Registro Sísmico. (CIRES)
- Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, BC. (CICESE)
- Comisión Federal de Electricidad. (CFE)
- Fundación de Ingenieros Civiles Asociados (FICA), que transfirió sus aparatos a CIRES.
- Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. (IIUNAM)
- Red Inter-universitaria de Instrumentación Sísmica. (RIIS)

En la siguiente tabla se muestran las estaciones acelerométricas del Valle de México.

	Clave de la estación	Institución encargada	Coordenadas de la estación		Nombre de la estación
			Latitud N	Longitud W	
1	AE02	Cires	19.429	99.058	Aeropuerto
2	AL01	Fica	19.436	99.145	Alameda
3	ALOL	unnam	19.352	99.155	Alberca olímpica
4	AO24	Cires	19.359	99.154	Alberca olímpica
5	AP68	Cires	19.381	99.107	Apatlaco
6	AR14	Cires	19.481	99.076	Aragón
7	AU11	Fica	19.392	99.087	Autódromo
8	AU46	Cires	19.383	99.168	Angel Urraza
9	BA49	Fica	19.41	99.145	Buenos Aires
10	BL45	Fica	19.425	99.148	Balderas
11	BO39	Fica	19.465	99.105	Bondojito
12	CA59	Fica	19.426	99.118	Candelaria
13	CDAF	unnam	19.366	99.086	Central de abastos frigorífico
14	CDAO	unnam	19.372	99.096	Central de abastos oficina
15	CE23	Fica	19.462	99.064	Cetis
16	CE32	Cires	19.386	99.054	Cetis 57
17	CI05	Fica	19.419	99.165	Cibeles
18	CJ03	Fica	19.41	99.157	CU Juárez
19	CJ04	unnam	19.41	99.157	Centro urbano Presidente Juárez
20	CO47	Fica	19.371	99.17	Coyoacán
21	CO56	Cires	19.422	99.159	Córdoba

22	COYS	Cenapred	19.348	99.169	Est. # 6 Coyoacán
23	CP28	Cires	19.439	99.084	Cerro del Peñón
24	CS78	Cires	19.366	99.226	Colinas del Sur
25	CU01	iunam	19.33	99.183	ii inst. sísmica
26	CU02	iunam	19.33	99.183	Lab. de desarrollo
27	CU03	iunam	19.33	99.183	Lab. de desarrollo
28	CUS0	Cires	19.294	99.104	Cuemanco
29	CUIP	iunam	19.33	99.183	ii patio
30	CUMV	iunam	19.33	99.183	Mesa vibradora
31	CUP1	iunam	19.33	99.183	ii patio 1
32	CUP4	iunam	19.33	99.183	ii patio 4
33	CH84	Cires	19.33	99.125	Culhuacán
34	CHAS	Cenapred	19.416	99.205	Est. # 14 Chapultepec
35	DFRO	iunam	19.405	99.166	Roma
36	DFVG	iunam	19.419	99.126	Prepa # 7 La Viga
37	DM12	Cires	19.431	99.096	Deportivo Moctezuma
38	DR16	Cires	19.501	99.183	Deportivo Reynoso
39	DX37	Fica	19.332	99.144	Xotepingo
40	EJCL	iunam	19.423	99.159	Edif. Jalapa
41	EO30	Cires	19.389	99.177	Esparza Oteo
42	ES57	Fica	19.402	99.177	Escandón
43	FJ74	Cires	19.299	99.21	Fund. Javier Barros Sierra
44	GA62	Cires	19.439	99.14	Garibaldi
45	GC38	Cires	19.316	99.106	García Campillo
46	GR27	Fica	19.475	99.18	Granjas
47	HA41	Fica	19.418	99.079	Hangares
48	HJ72	Cires	19.425	99.13	Hospital Juárez
49	IB22	Cires	19.345	99.13	Ibero
50	IMPS	Cenapred	19.488	99.149	Est. # 15 IMP
51	JA43	Fica	19.405	99.125	Jamaica
52	JC54	Cires	19.313	99.127	Jardines de Coyoacán
53	LI33	Cires	19.306	98.963	Liconsa
54	LI58	Cires	19.426	99.157	Liverpool
55	LOTA	iunam	19.418	99.14	Lotería Nacional
56	LV17	Fica	19.493	99.128	Lindavista
57	ME52	Cires	19.438	99.182	Mariano Escobedo
58	MI15	Fica	19.283	99.125	Miramontes
59	MI50	Cires	19.425	99.19	Mariscal Tito
60	MY19	Fica	19.346	99.043	Mexhualco
61	NONP	iunam	19.45	99.144	Nonoalco Atizapán patio
62	NZ20	Cires	19.403	99	Nezahualcoyotl
63	NZ31	Fica	19.417	99.025	Nezahualcoyotl
64	PA34	Cires	19.202	99.049	San Pedro Atocpan
65	PD42	Cires	19.406	99.1	Palacio de los deportes
66	PE10	Cires	19.39	99.132	Plutarco Elias Calles
67	PENR	iunam	19.332	99.041	Col. Quetzalcoatl
68	PII6	Cires	19.351	99.186	Campo libre
69	RIDA	riis	19.52	99.19	UAM Azcapotzalco
70	RIDI	riis	19.36	99.06	UAM Iztapalapa
71	RIDX	riis	19.31	99.1	UAM Xochimilco
72	RM48	Cires	19.436	99.128	Rodolfo Menéndez
73	RMAS	Cenapred	19.42	99.155	Est. # 10 Roma A
74	RMBS	Cenapred	19.42	99.154	Est. # 11 Roma B
75	RMCS	Cenapred	19.419	99.155	Est. # 12 Roma C
76	SCT1	iunam	19.393	99.147	SCT
77	SCT2	iunam	19.393	99.147	SCT
78	SI53	Fica	19.375	99.148	San Simón
79	SP51	Cires	19.366	99.119	Sector Popular

TESTES
FALLA DE CONTROL

80	SXCU	iunam	19.326	99.182	Sismex CU
81	SXHO	iunam	19	99.205	Sismex Hospital ABC
82	SNSO	iunam	19.393	99.147	Sismex Sahop
83	SXVI	iunam	19.358	99.171	Sismex Viveros
84	TACY	iunam	19.403	99.194	Tacubaya
85	TH35	Fica	19.279	99	Tlahuac
86	TL08	Cires	19.45	99.134	Tlatelolco
87	TL55	Cires	19.436	99.143	Tlatelolco
88	TLAS	Cenepred	19.397	99.105	Est. # 7 Tlacotal
89	TLHB	iunam	19.279	99.008	Tlahuac Bombas
90	TLHD	iunam	19.293	99.035	Tlahuac deportivo
91	TP13	Fica	19.292	99.171	Tlalpan
92	TNCL	iunam	19.48	98.991	Texcoco centro lago
93	TXCH	iunam	19.43	98.95	Texcoco Chimalhuacán
94	UC44	Cires	19.434	99.165	Unidad Colonia IMSS
95	UI21	Cires(fica)	19.365	99.226	Universidad Iberoamericana
96	UNKS	Cenepred	19.419	99.111	Est. # 9 U. Kennedy
97	VG09	Cires	19.454	99.123	Valle Gómez
98	VM29	Fica	19.381	99.125	Villa del Mar
99	XO36	Cires	19.271	99.102	Nochimilco
100	XP06	Cires	19.42	99.135	Nochipilli
101	ZARS	Cenepred	19.419	99.088	Est. # 8 Zaragoza

Tabla 4.2 Estaciones acelerométricas del Valle de México

En este estudio se dividió el Valle de México por zonas según el periodo del suelo, ya que los sismos presentan características muy similares para cada una de las zonas utilizadas. Por lo tanto se pueden considerar que pertenecen a una misma familia. La zonación se muestra en la tabla 4.3. En esta Ts representa el periodo del suelo.

Zona	Periodo
T1	$0.5s < T_s \leq 1.5s$
T2	$1.5s < T_s \leq 2.5s$
T3	$2.5s < T_s \leq 3.5s$
T4	$T_s > 3.5s$

Tabla 4.3. Zonación utilizada en este estudio.

Se utilizaron 223 acelerogramas en total registrados en las distintas estaciones del Valle de México, los cuales fueron previamente filtrados para modificar amplitudes relativas de las componentes de frecuencia en una señal o eliminar algunas componentes de frecuencia y rotados de manera que se obtuviera la máxima intensidad de Arias (Villa

Velázquez y Ruiz Gómez, 2001). En las tablas 4.4 a 4.8 se listan los registros utilizados por zona.

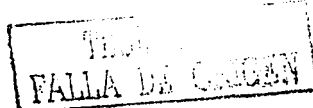
Registro	Clave de Estación	Institución Encargada	Coordenadas de la Estación		Nombre de la Estación	Fecha	Magnitud
			Latitud N	Longitud W			
1	CU01	iiunam	19.33	99.183	ii inst. sísmica	68-08-02	7.1
2	CU01	iiunam	19.33	99.183	ii inst. sísmica	79-03-14	7.0
3	SXCU	iiunam	19.326	99.182	Sismex CU	79-03-14	7.0
4	SXHO	iiunam	19	99.205	Sismex Hospital ABC	79-03-14	7.0
5	SXCU	iiunam	19.326	99.182	Sismex CU	81-10-25	7.3
6	CU01	iiunam	19.33	99.183	ii inst. sísmica	82-06-07	6.9
7	CU01	iiunam	19.33	99.183	ii inst. sísmica	85-09-19	8.1
8	CUIP	iiunam	19.33	99.183	ii patio	85-09-19	8.1
9	CUMV	iiunam	19.33	99.183	Mesa vibradora	85-09-19	8.1
10	TACY	iiunam	19.403	99.194	Tacubaya	85-09-19	8.1
11	CUIP	iiunam	19.33	99.183	ii patio	85-09-21	7.6
12	CUMV	iiunam	19.33	99.183	Mesa vibradora	85-09-21	7.6
13	TACY	iiunam	19.403	99.194	Tacubaya	85-09-21	7.6
14	CU01	iiunam	19.33	99.183	ii inst. sísmica	89-04-25	6.9
15	CU02	iiunam	19.33	99.183	Lab. de desarrollo	85-09-21	6.9
16	FJ74	Cires	19.299	99.21	Fund. Javier Barros Sierra	85-09-21	6.9
17	MT50	Cires	19.425	99.19	Mariscal Tito	85-09-21	6.9
18	PA34	Cires	19.202	99.049	San Pedro Atocpan	85-09-21	6.9
19	TACY	iiunam	19.403	99.194	Tacubaya	85-09-21	6.9
20	TP13	Fieca	19.292	99.171	Tlalpan	85-09-21	6.9
21	CHAS	Cenapred	19.416	99.205	Est. # 14 Chapultepec	95-09-14	7.3
22	CS78	Cires	19.366	99.226	Colinas del Sur	95-09-14	7.3
23	CUP1	iiunam	19.33	99.183	ii patio 1	95-09-14	7.3
24	CUP4	iiunam	19.33	99.183	ii patio 4	95-09-14	7.3
25	FJ74	Cires	19.299	99.21	Fund. Javier Barros Sierra	95-09-14	7.3
26	PA34	Cires	19.202	99.049	San Pedro Atocpan	95-09-14	7.3
27	PII6	Cires	19.351	99.186	Campo libre	95-09-14	7.3
28	TACY	iiunam	19.403	99.194	Tacubaya	95-09-14	7.3
29	TP13	Fieca	19.292	99.171	Tlalpan	95-09-14	7.3
30	UI21	Cires(fieca)	19.365	99.226	Universidad Iberoamericana	95-09-14	7.3
31	SXV1	iiunam	19.358	99.171	Sismex Viveros	81-10-25	7.3
32	SXV1	iiunam	19.358	99.171	Sismex Viveros	85-09-19	8.1
33	AU46	Cires	19.383	99.168	Angel Urraza	89-04-25	6.9
34	CO47	Fieca	19.371	99.17	Coyoacán	89-04-25	6.9
35	DR16	Cires	19.501	99.183	Deportivo Reynoso	89-04-25	6.9
36	DX37	Fieca	19.332	99.144	Notepingo	89-04-25	6.9
37	EO30	Cires	19.389	99.177	Esparza Oteo	89-04-25	6.9
38	ESS7	Fieca	19.402	99.177	Escandón	89-04-25	6.9
39	GR27	Fieca	19.475	99.18	Granjas	89-04-25	6.9
40	ME52	Cires	19.438	99.182	Mariano	89-04-25	6.9

FALLA DE MEXICO

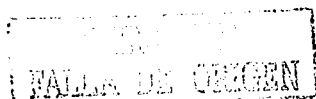
					Escobedo		
41	AO24	Cires	19.359	99.154	Alberca olímpica	95-09-14	7.3
42	AU46	Cires	19.383	99.168	Angel Urraza	95-09-14	7.3
43	CO47	Fica	19.371	99.17	Coyoacán	95-09-14	7.3
44	COYS	Cenapred	19.348	99.169	Est. # 6 Coyoacán	95-09-14	7.3
45	DX37	Fica	19.332	99.144	Notepingo	95-09-14	7.3
46	ES57	Fica	19.402	99.177	Escandón	95-09-14	7.3
47	IMPS	Cenapred	19.488	99.149	Est. # 15 IMP	95-09-14	7.3
48	ME52	Cires	19.438	99.182	Mariano Escobedo	95-09-14	7.3
49	RIDA	rus	19.52	99.19	UAM Azeapatzaleo	95-09-14	7.3
50	AO24	Cires	19.359	99.154	Alberca olímpica	97-01-11	6.9
51	AU46	Cires	19.383	99.168	Angel Urraza	97-01-11	6.9
52	DR16	Cires	19.501	99.183	Deportivo Reynoso	97-01-11	6.9
53	DX37	Fica	19.332	99.144	Notepingo	97-01-11	6.9
54	GR27	Fica	19.475	99.18	Granjas	97-01-11	6.9
55	IMPS	Cenapred	19.488	99.149	Est. # 15 IMP	97-01-11	6.9
56	ME52	Cires	19.438	99.182	Mariano Escobedo	97-01-11	6.9
57	RIDA	rus	19.52	99.19	UAM Azeapatzaleo	97-01-11	6.9
58	CH84	Cires	19.33	99.125	Culhuacán	89-04-25	6.9
59	DFRO	munam	19.405	99.166	Roma	89-04-25	6.9
60	JC54	Cires	19.313	99.127	Jardines de Coyoacán	89-04-25	6.9
61	LV17	Fica	19.493	99.128	Lindavista	89-04-25	6.9
62	MI15	Fica	19.283	99.125	Miramontes	89-04-25	6.9
63	SI53	Fica	19.375	99.148	San Simón	89-04-25	6.9
64	CH84	Cires	19.33	99.125	Culhuacán	95-09-14	7.3
65	DFRO					95-09-14	7.3
66	JC54	Cires	19.313	99.127	Jardines de Coyoacán	95-09-14	7.3
67	MI15	Fica	19.283	99.125	Miramontes	95-09-14	7.3
68	CH84	Cires	19.33	99.125	Culhuacán	97-01-11	6.9
69	DFRO	munam	19.405	99.166	Roma	97-01-11	6.9
70	JC54	Cires	19.313	99.127	Jardines de Coyoacán	97-01-11	6.9
71	LV17	Fica	19.493	99.128	Lindavista	97-01-11	6.9
72	MI15	Fica	19.283	99.125	Miramontes	97-01-11	6.9
73	SI53	Fica	19.375	99.148	San Simón	97-01-11	6.9

Tabla 4.4. Registros utilizados en la zona T1.

Registro	Clave de Estación	Institución Encargada	Coordenadas de la Estación		Nombre de la Estación	Fecha	Magnitud
			Latitud N	Longitud W			
1	NONP	munam	19.45	99.144	Nonoalco Atizapán patio	78-11-29	7.8
2	IB22	Cires	19.345	99.13	Ibero	89-04-25	6.9
3	UC44	Cires	19.434	99.165	Unidad Colonia IMSS	89-04-25	6.9
4	IB22	Cires	19.345	99.13	Ibero	95-09-14	7.3
5	SCT1	munam	19.292	99.147	SCT	85-09-19	8.1
6	TLHD	munam	19.293	99.035	Tlahuac deportivo	85-09-21	7.6



7	ALO1	Fica	19.436	99.145	Alameda	89-04-25	6.9
8	BL45	Fica	19.425	99.148	Balderas	89-04-25	6.9
9	CI05	Fica	19.419	99.165	Cibeles	89-04-25	6.9
10	CJ03	Fica	19.41	99.157	CU Juárez	89-04-25	6.9
11	CO56	Cires	19.422	99.159	Córdoba	89-04-25	6.9
12	GA62	Cires	19.439	99.14	Garibaldi	89-04-25	6.9
13	LIL33	Cires	19.306	98.963	Licónsa	89-04-25	6.9
14	PE10	Cires	19.39	99.132	Plutarco Elías Calles	89-04-25	6.9
15	SCT2	inunam	19.393	99.147	SCT	89-04-25	6.9
16	SP51	Cires	19.366	99.119	Sector Popular	89-04-25	6.9
17	TL08	Cires	19.45	99.134	Tlateloleo	89-04-25	6.9
18	TL55	Cires	19.436	99.143	Tlateloleo	89-04-25	6.9
19	VG09	Cires	19.454	99.123	Valle Gómez	89-04-25	6.9
20	AL01	Fica	19.436	99.145	Alameda	95-09-14	7.3
21	BL45	Fica	19.425	99.148	Balderas	95-09-14	7.3
22	CJ03	Fica	19.41	99.157	CU Juárez	95-09-14	7.3
23	CJ04	inunam	19.41	99.157	Centro urbano Presidente Juárez	95-09-14	7.3
24	CO56	Cires	19.422	99.159	Córdoba	95-09-14	7.3
25	EJCL	inunam	19.423	99.159	Edif. Jalapa	95-09-14	7.3
26	GA62	Cires	19.439	99.14	Garibaldi	95-09-14	7.3
27	GC38	Cires	19.316	99.106	García Campillo	95-09-14	7.3
28	LI33	Cires	19.306	98.963	Licónsa	95-09-14	7.3
29	PE10	Cires	19.39	99.132	Plutarco Elías Calles	95-09-14	7.3
30	RIDN	rms	19.31	99.1	UAM Nochimilco	95-09-14	7.3
31	RMCS	Cenapred	19.419	99.155	Est. # 12 Roma C	95-09-14	7.3
32	SP51	Cires	19.366	99.119	Sector Popular	95-09-14	7.3
33	TL08	Cires	19.45	99.134	Tlateloleo	95-09-14	7.3
34	TL55	Cires	19.436	99.143	Tlateloleo	95-09-14	7.3
35	BL45	Fica	19.425	99.148	Balderas	95-10-09	7.5
36	CI05	Fica	19.419	99.165	Cibeles	95-10-09	7.5
37	CJ03	Fica	19.41	99.157	CU Juárez	95-10-09	7.5
38	CJ04	inunam	19.41	99.157	Centro urbano Presidente Juárez	95-10-09	7.5
39	CO56	Cires	19.422	99.159	Córdoba	95-10-09	7.5
40	EJCL	inunam	19.423	99.159	Edif. Jalapa	95-10-09	7.5
41	GA62	Cires	19.439	99.14	Garibaldi	95-10-09	7.5
42	LI33	Cires	19.306	98.963	Licónsa	95-10-09	7.5
43	LI58	Cires	19.426	99.157	Liverpool	95-10-09	7.5
44	PE10	Cires	19.39	99.132	Plutarco Elías Calles	95-10-09	7.5
45	RMCS	Cenapred	19.419	99.155	Est. # 12 Roma C	95-10-09	7.5
46	SP51	Cires	19.366	99.119	Sector Popular	95-10-09	7.5
47	VG09	Cires	19.454	99.123	Valle Gómez	95-10-09	7.5
48	AL01	Fica	19.436	99.145	Alameda	97-01-11	6.9
49	BL45	Fica	19.425	99.148	Balderas	97-01-11	6.9
50	CI05	Fica	19.419	99.165	Cibeles	97-01-11	6.9
51	CJ03	Fica	19.41	99.157	CU Juárez	97-01-11	6.9
52	CJ04	inunam	19.41	99.157	Centro urbano Presidente Juárez	97-01-11	6.9
53	CO56	Cires	19.422	99.159	Córdoba	97-01-11	6.9
54	GA62	Cires	19.439	99.14	Garibaldi	97-01-11	6.9
55	GC38	Cires	19.316	99.106	García Campillo	97-01-11	6.9
56	LI33	Cires	19.306	98.963	Licónsa	97-01-11	6.9
57	LI58	Cires	19.426	99.157	Liverpool	97-01-11	6.9
58	PE10	Cires	19.39	99.132	Plutarco Elías	97-01-11	6.9



					Calles		
59	RMAS	Cenapred	19.42	99.155	Est. # 10 Roma A	97-01-11	6.9
60	RMBS	Cenapred	19.42	99.154	Est. # 11 Roma B	97-01-11	6.9
61	RMCS	Cenapred	19.419	99.155	Est. # 12 Roma C	97-01-11	6.9
62	SP51	Cires	19.366	99.119	Sector Popular	97-01-11	6.9
63	TL08	Cires	19.45	99.134	Tlatelolco	97-01-11	6.9
64	TL55	Cires	19.436	99.143	Tlatelolco	97-01-11	6.9
65	YG09	Cires	19.454	99.123	Valle Gómez	97-01-11	6.9
66	BA49	Fica	19.41	99.145	Buenos Aires	89-04-25	6.9
67	MY19	Fica	19.346	99.043	Meyehualco	89-04-25	6.9
68	VM29	Fica	19.381	99.125	Villa del Mar	89-04-25	6.9
69	MY19	Fica	19.346	99.043	Meyehualco	95-09-14	7.3
70	BA49	Fica	19.41	99.145	Buenos Aires	95-10-09	7.5
71	MY19	Fica	19.346	99.043	Meyehualco	95-10-09	7.5
72	VM29	Fica	19.381	99.125	Villa del Mar	95-10-09	7.5
73	VM29	Fica	19.381	99.125	Villa del Mar	96-02-25	6.9
74	BA49	Fica	19.41	99.145	Buenos Aires	97-01-11	6.9
75	VM29	Fica	19.381	99.125	Villa del Mar	97-01-11	6.9

Tabla 4.5. Registros utilizados en la zona T2.

Registro	Clave de Estación	Institución Encargada	Coordenadas de la Estación		Nombre de la Estación	Fecha	Magnitud
			Latitud N	Longitud W			
1	RM48	Cires	19.436	99.128	Rodolfo Menéndez	89-04-25	6.9
2	RM48	Cires	19.436	99.128	Rodolfo Menéndez	95-09-14	7.3
3	RM48	Cires	19.436	99.128	Rodolfo Menéndez	95-10-09	7.5
4	CDAO	iunam	19.372	99.096	Central de abastos oficina	85-09-19	8.1
5	CDAF	iunam	19.366	99.086	Central de abastos frigorífico	85-09-21	7.6
6	CDAO	iunam	19.372	99.096	Central de abastos oficina	85-09-21	7.6
7	TXCL	iunam	19.48	98.991	Texcoco centro lago	85-09-21	7.6
8	AP68	Cires	19.381	99.107	Apatlaco	89-04-25	6.9
9	BO39	Fica	19.465	99.105	Bondojito	89-04-25	6.9
10	CA59	Fica	19.426	99.118	Candelaria	89-04-25	6.9
11	DFVG	iunam	19.419	99.126	Prepa # 7 La Viga	89-04-25	6.9
12	JA43	Fica	19.405	99.125	Jamaica	89-04-25	6.9
13	XP06	Cires	19.42	99.135	Xochipilli	89-04-25	6.9
14	AP68	Cires	19.381	99.107	Apatlaco	95-09-14	7.3
15	BO39	Fica	19.465	99.105	Bondojito	95-09-14	7.3
16	CA59	Fica	19.426	99.118	Candelaria	95-09-14	7.3
17	CDAO	iunam	19.372	99.096	Central de abastos oficina	95-09-14	7.3
18	HJ72	Cires	19.425	99.13	Hospital Juárez	95-09-14	7.3
19	JA43	Fica	19.405	99.125	Jamaica	95-09-14	7.3
20	AP68	Cires	19.381	99.107	Apatlaco	95-10-09	7.5
21	BO39	Fica	19.465	99.105	Bondojito	95-10-09	7.5
22	CA59	Fica	19.426	99.118	Candelaria	95-10-09	7.5
23	JA43	Fica	19.405	99.125	Jamaica	95-10-09	7.5
24	XP06	Cires	19.42	99.135	Xochipilli	95-10-09	7.5
25	AP68	Cires	19.381	99.107	Apatlaco	97-01-11	6.9
26	BO39	Fica	19.465	99.105	Bondojito	97-01-11	6.9
27	CA59	Fica	19.426	99.118	Candelaria	97-01-11	6.9
28	JA43	Fica	19.405	99.125	Jamaica	97-01-11	6.9

TESORO
FALLA DE ORIGEN

29	RIDI	riis	19.36	99.06	UAM Iztapalapa	97-01-11	6.9
30	XO36	Cires	19.271	99.102	Xochimilco	97-01-11	6.9
31	XP06	Cires	19.42	99.135	Xochipilli	97-01-11	6.9
32	AR14	Cires	19.481	99.076	Aragón	95-09-14	7.3
33	AR14	Cires	19.481	99.076	Aragón	96-10-09	7.5

Tabla 4.6. Registros utilizados en la zona T3.

Registro	Clave de Estación	Institución Encargada	Coordenadas de la Estación		Nombre de la Estación	Fecha	Magnitud
			Latitud N	Longitud W			
1	TLHB	iunam	19.279	99.008	Tlahuac Bombas	85-09-19	8.1
2	TLHB	iunam	19.279	99.008	Tlahuac Bombas	86-04-30	7.0
3	AU11	Fica	19.392	99.087	Autodromo	89-04-25	6.9
4	CE23	Fica	19.462	99.064	Cetis	89-04-25	6.9
5	CE32	Cires	19.386	99.054	Cetis 57	89-04-25	6.9
6	DM12	Cires	19.431	99.096	Deportivo Moctezuma	89-04-25	6.9
7	HA41	Fica	19.418	99.079	Hangares	89-04-25	6.9
8	NZ31	Fica	19.417	99.025	Nezahualcoyotl	89-04-25	6.9
9	PD42	Cires	19.406	99.1	Palacio de los deportes	89-04-25	6.9
10	TH35	Fica	19.279	99	Tlahuac	89-04-25	6.9
11	AE02	Cires	19.429	99.058	Aeropuerto	95-09-14	7.3
12	AU11	Fica	19.392	99.087	Autodromo	95-09-14	7.3
13	CE23	Fica	19.462	99.064	Cetis	95-09-14	7.3
14	CE32	Cires	19.386	99.054	Cetis 57	95-09-14	7.3
15	DM12	Cires	19.431	99.096	Deportivo Moctezuma	95-09-14	7.3
16	NZ31	Fica	19.417	99.025	Nezahualcoyotl	95-09-14	7.3
17	PD42	Cires	19.406	99.1	Palacio de los deportes	95-09-14	7.3
18	TH35	Fica	19.279	99	Tlahuac	95-09-14	7.3
19	UNKS	Cenapred	19.419	99.111	Est. # 9 U. Kennedy	95-09-14	7.3
20	ZARS	Cenapred	19.419	99.088	Est. # 8 Zaragoza	95-09-14	7.3
21	AU11	Fica	19.392	99.087	Autodromo	95-10-09	7.5
22	CE23	Fica	19.462	99.064	Cetis	95-10-09	7.5
23	DM12	Cires	19.431	99.096	Deportivo Moctezuma	95-10-09	7.5
24	HA41	Fica	19.418	99.079	Hangares	95-10-09	7.5
25	NZ20	Cires	19.403	99	Nezahualcoyotl	95-10-09	7.5
26	NZ31	Fica	19.417	99.025	Nezahualcoyotl	95-10-09	7.5
27	PD42	Cires	19.406	99.1	Palacio de los deportes	95-10-09	7.5
28	TLAS	Cenapred	19.397	99.105	Est. # 7 Tlacotal	95-10-09	7.5
29	UNKS	Cenapred	19.419	99.111	Est. # 9 U. Kennedy	95-10-09	7.5
30	ZARS	Cenapred	19.419	99.088	Est. # 8 Zaragoza	95-10-09	7.5
31	AE02	Cires	19.429	99.058	Aeropuerto	97-01-11	6.9
32	AU11	Fica	19.392	99.087	Autodromo	97-01-11	6.9
33	CE32	Cires	19.386	99.054	Cetis 57	97-01-11	6.9
34	DM12	Cires	19.431	99.096	Deportivo Moctezuma	97-01-11	6.9
35	NZ20	Cires	19.403	99	Nezahualcoyotl	97-01-11	6.9
36	NZ31	Fica	19.417	99.025	Nezahualcoyotl	97-01-11	6.9
37	PD42	Cires	19.406	99.1	Palacio de los deportes	97-01-11	6.9
38	TH35	Fica	19.279	99	Tlahuac	97-01-11	6.9
39	ZARS	Cenapred	19.419	99.088	Est. # 8 Zaragoza	97-01-11	6.9

Tabla 4.7. Registros utilizados en la zona T4.

TRIP
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO 5

RELACIÓN ENTRE ENERGÍA HISTERÉTICA Y ENERGÍA DE ENTRADA PARA SISTEMAS UBICADOS EN DISTINTAS ZONAS DEL VALLE DE MÉXICO

Antecedentes

La relación entre la energía histerética (E_H) y la energía de entrada (E_I), representa el porcentaje de energía que una estructura disipa por comportamiento plástico del total de energía que un movimiento sísmico le suministra. Algunos investigadores han propuesto algunas fórmulas para determinar esta relación en función de los parámetros que definen a una estructura y el tipo de suelo.

Kuwamura y Galambos, 1989, con base en la energía de entrada relativa obtenida para sistemas de un grado de libertad sujetos a cuatro registros sísmicos (El Centro, 1940; Parkfield, 1966; Pacoima Dam, 1971; Hachinoe, 1968) han sugerido que para sistemas elastoplásticos, la relación E_H/E_I depende de una fracción del amortiguamiento crítico ξ y de ductilidad acumulada μ_{cum} . Estos autores proponen la siguiente expresión:

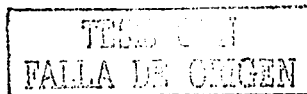
$$\frac{E_H}{E_I} \cong \frac{0.98}{\left[1 + \frac{20(3\xi + 1.2\sqrt{\xi})}{\mu_{cum} + 10}\right]^2} \quad (5.1)$$

donde:

$$\mu_{cum} \cong 5\mu$$

Fajfar y Vidic, 1994, han propuesto que la relación E_H/E_I queda definida de la siguiente manera:

$$\frac{E_H}{E_I} = c_v \frac{(\mu - 1)^{c_u}}{\mu} \quad (5.2)$$



donde c_e y c_{H1} son constantes que dependen del modelo histerético y el amortiguamiento.

Lawson y Krawinkler, 1994, en base a una investigación de daño potencial acumulado de movimientos sísmicos, han postulado que el parámetro E_H/E_I es muy estable, sugieren un valor de 0.4 para $\mu=2$, y de 0.6 para $\mu=4$ a 8, excepto para periodos muy cortos.

Manfredi, 1995, obtuvo la siguiente fórmula empírica que da valores constantes de E_H/E_I como una función de la ductilidad cíclica $\mu_c=2\mu$, para un oscilador elastoplástico con 5% de amortiguamiento.

$$\frac{E_H}{E_I} = 0.72 \frac{(\mu_c - 1)}{\mu_c} \quad (5.3)$$

Terán-Gilmore (1996) 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 con la ductilidad generalmente no es significativo para $\mu \geq 3$. A diferencia de las expresiones anteriores, esta propuesta varía con el periodo de la estructura.

Decanini y Mollaioli, (2001), para evaluar la energía histerética (posiblemente el parámetro más importante en el daño acumulado), proponen un espectro de diseño de energía de entrada, para conocer los valores y la distribución espectral de la relación E_H/E_I . Opinan que debido a que este parámetro podría ser uno de los más estables en análisis energético, constituye un parámetro conveniente para la determinación de la energía histerética, considerando que la energía de entrada es conocida.

Influencia de la ductilidad en la relación E_H/E_I para las distintas zonas del valle de México

Enseguida se determina la relación entre la energía histerética y la energía de entrada para cada una de las zonas del valle de México usando un oscilador de un grado de libertad con comportamiento elastoplástico y 5% de amortiguamiento. En las siguientes

figuras se observan los valores medios obtenidos de la relación E_{H1}/E_I para cada una de las zonas y para distintos niveles de ductilidad.

ZONA T1

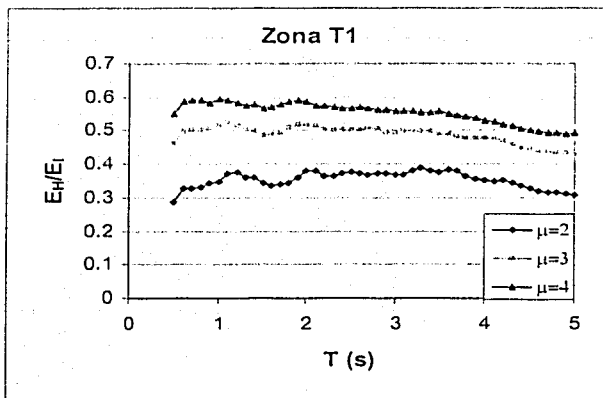


Figura 5.1. Valores medios de la relación E_{H1}/E_I para la zona T1 y distintos niveles de ductilidad.

De la figura 5.1 resulta evidente que para la zona T1 que corresponde a suelo "duro", la ductilidad juega un papel importante en la cantidad de energía que una estructura puede disipar por comportamiento inelástico. A medida que la ductilidad de la estructura crece, la relación E_{H1}/E_I también lo hace. Se observa que la máxima energía histerética disipada como % de la energía de entrada se alcanza en valores cercanos a un periodo de 1 seg. Para periodos mayores a la unidad, la relación empieza a disminuir; posiblemente la relación continúe disminuyendo para valores mayores de periodo a los utilizados en este estudio, por lo tanto se deben trazar estas gráficas para valores mayores y observar si continua la misma tendencia, o la relación se mantiene constante para periodos de estructuras muy grandes.

ZONAS T2, T3 y T4

Los periodos dominantes del suelo en las zonas T2, T3 y T4 se consideraron aquí como: 2, 3 y 4 respectivamente. En las siguientes figuras se muestran los valores medios de E_{II}/E_I obtenidos para cada una de estas zonas.

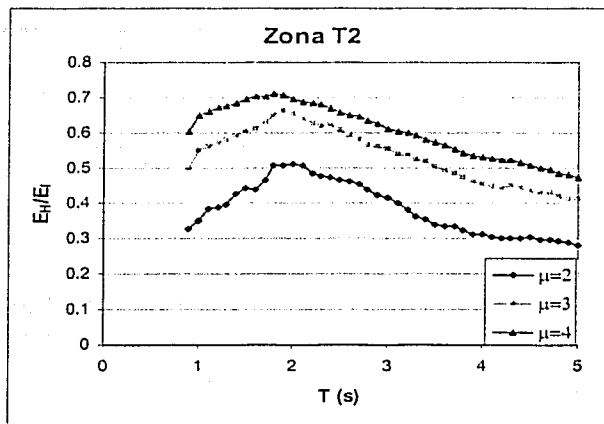


Figura 5.2. Valores medios de la relación E_{II}/E_I para la zona T2 y distintos niveles de ductilidad.

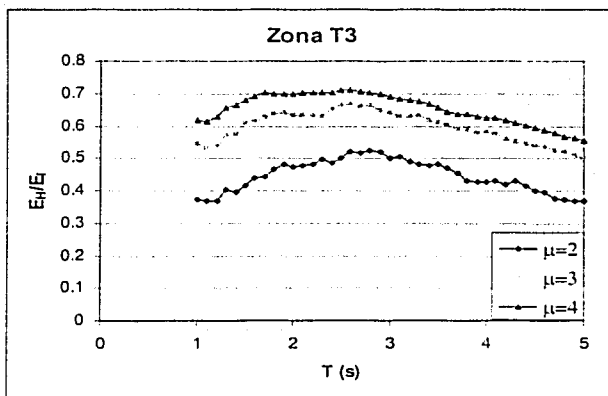


Figura 5.3. Valores medios de la relación E_{II}/E_I para la zona T3 y distintos niveles de ductilidad.

TERMINADO CON
FALLA DE ORIGEN

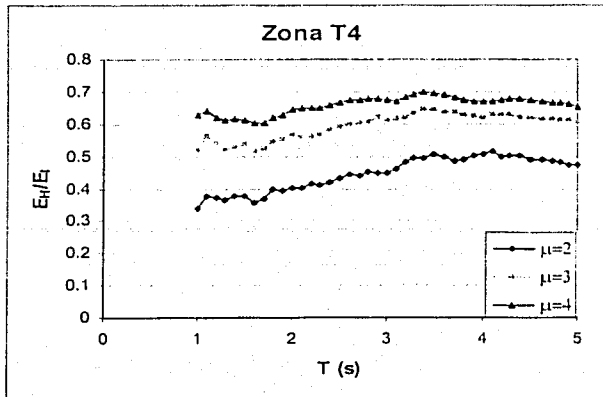


Figura 5.4. Valores medios de la relación E_{II}/E_I para la zona T4 y distintos niveles de ductilidad.

Los comentarios mencionados para la zona de suelo “duro” T1 son también válidos para las zonas T2, T3 y T4, excepto que en este caso en lugar de que la energía histerética alcance valores máximos en periodos cercanos a la unidad, lo hace en periodos cercanos al periodo dominante del suelo.

La energía histerética se encuentra asociada al daño que puede sufrir una estructura; es decir para valores grandes de E_{II}/E_I la estructura sufre mayor daño. Resulta evidente de las figuras 5.1 a 5.4 que estructuras diseñadas con un periodo dominante cercano al del terreno en el que se encuentren desplantadas, tenderán a sufrir mayor daño. También es claro que a medida que la estructura se vuelve más dúctil, también se vuelve más vulnerable a recibir daño; por lo tanto, las estructuras deben diseñarse no solo para que disipen la mayor cantidad de energía, sino también para controlar el daño que puedan sufrir (como se observó en el capítulo 3).

En las figuras 5.1 a 5.4 se observa que no aparecen los valores de la relación E_{II}/E_I para estructuras de periodos cortos. Esto se debe a que la relación obtenida aumentó para periodos cortos, pero una estructura que tiene un periodo muy pequeño es muy rígida, por lo tanto una estructura con periodo nulo será infinitamente rígida y no fluirá; es decir, no tiene capacidad de deformación. Todo lo anterior implicaría que en teoría la curva debería ir hacia abajo, más no fue así, quizás se deba a la aproximación que se

este usando en la computadora, aún así, se debe tener cuidado al evaluar la relación E_H/E_I para estructuras con periodos cortos.

Influencia del tipo de suelo en la relación E_H/E_I

En las siguientes figuras se compara la influencia del tipo de suelo en la relación E_H/E_I para distintos niveles de ductilidad.

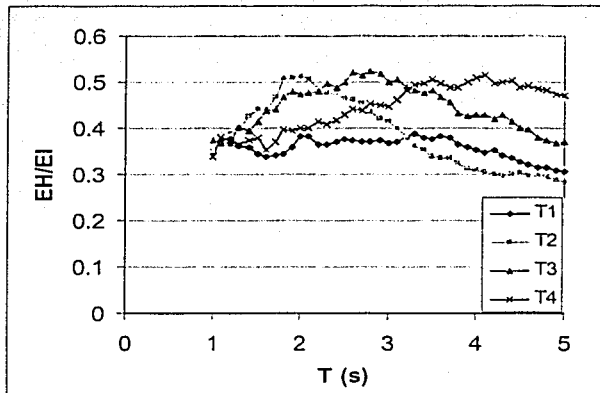


Figura 5.5. Valores medios de la relación E_H/E_I para una $\mu=2$.

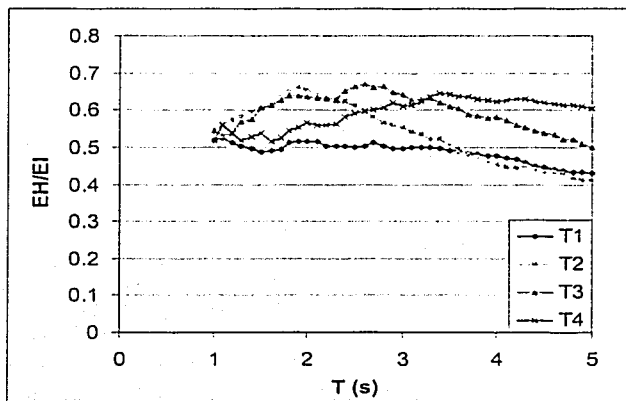


Figura 5.6. Valores medios de la relación E_H/E_I para una $\mu=3$.

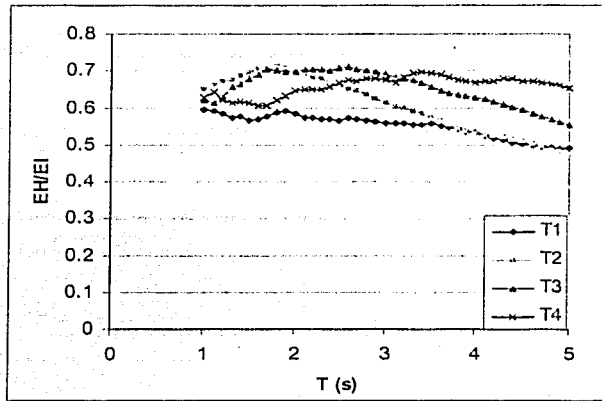


Figura 5.7. Valores medios de la relación E_{II}/E_I para una $\mu=4$.

De las figuras 5.5 a 5.7 se observa que para estructuras con periodos muy grandes, la relación E_{II}/E_I es mayor para suelo blandos independientemente de la ductilidad. Esto era de esperarse debido a que según lo que se obtuvo anteriormente. Las estructuras cercanas al periodo dominante del suelo disipan más energía en comparación con la que el sismo les suministra. Las figuras muestran que independientemente de la ductilidad, la relación E_{II}/E_I resulta mayor para cualquier suelo en su periodo dominante que para los demás. Excepto en el caso de suelo duro, donde esta observación no se cumple, ya que no existe un periodo que sea francamente dominante.

Influencia de la rigidez de postfluencia en la relación E_{II}/E_I

Para mostrar la influencia de la rigidez de postfluencia en la relación E_{II}/E_I , se comparan los resultados para un oscilador elastoplástico, y uno con comportamiento bilineal y una rigidez de postfluencia de 3% la rigidez inicial. Los resultados se muestran en la siguiente figura para la zona T2 y una ductilidad $\mu=2$. En esta se observan valores mayores de la relación E_{II}/E_I para el modelo bilineal, implicando que el oscilador bilineal disipa más energía que el elastoplástico para una misma ductilidad. Por lo tanto no necesariamente el modelar una estructura con comportamiento elastoplástico en un análisis dinámico paso a paso, nos dará valores más conservadores respecto a la energía que disipa una estructura.

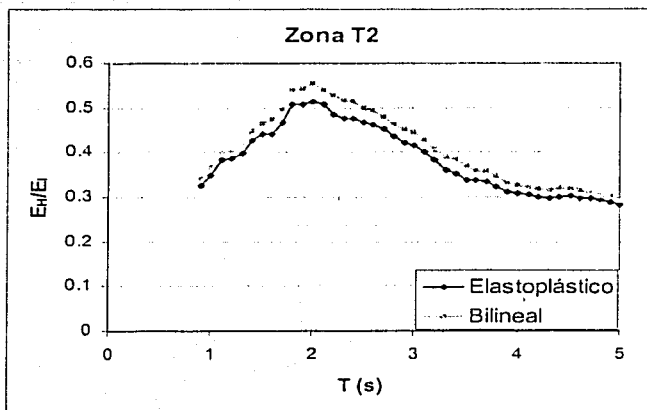


Figura 5.8. Comparación entre los valores medios de E_{II}/E_I de un oscilador elastoplástico y uno bilineal para una ductilidad $\mu=2$.

Desviaciones estándar de la relación E_{II}/E_I para las distintas zonas del valle de México

En la tabla 5.1 se muestran los valores de las máximas desviaciones estándar y coeficientes de variación de la relación E_{II}/E_I para las distintas zonas del valle de México.

ZONA	μ	$\sigma_{\text{máx}}$	$CV_{\text{máx}}$
T1	2	0.165	0.480
	3	0.165	0.338
	4	0.156	0.267
T2	2	0.143	0.343
	3	0.125	0.231
	4	0.106	0.167
T3	2	0.130	0.330
	3	0.120	0.213
	4	0.106	0.168
T4	2	0.142	0.403
	3	0.123	0.169
	4	0.128	0.234

Tabla 5.1. Máximas desviaciones estándar y coeficientes de variación de la relación E_{II}/E_I .

De la tabla 5.1 se observa que tanto la máxima desviación estándar como el máximo coeficiente de variación ocurren en la zona T1 para una ductilidad $\mu=2$. En la figura 5.9 se muestran los resultados obtenidos para este caso. En esta se observa mucha dispersión de los datos, en la cual el coeficiente de variación es de 0.48. Como se mencionó anteriormente este es el máximo coeficiente de variación obtenido para los casos estudiados, por lo tanto la dispersión en los datos para los otros casos será mucho menor, ya que los coeficientes de variación son mucho más pequeños (ver tabla 5.1).

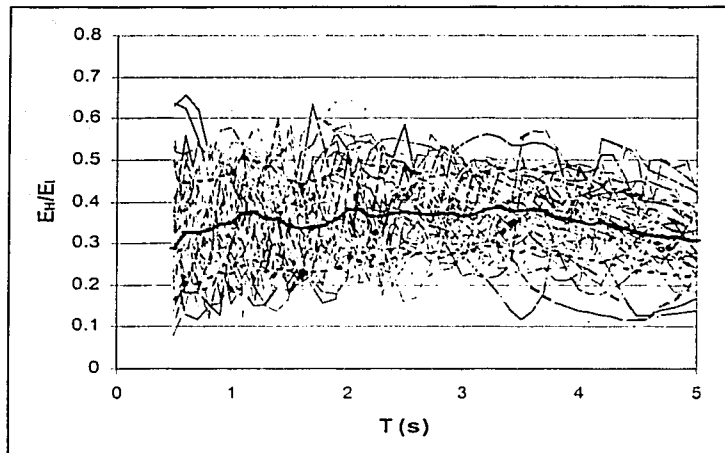
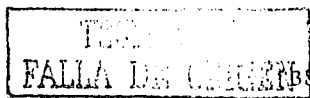


Figura 5.9. Relación E_H/E_I para la zona T1 y $\mu=2$.

Fórmulas para determinar la relación E_H/E_I para las distintas zonas del valle de México

El parámetro E_H/E_I ha resultado ser muy estable en el análisis energético (Lawson y Krawinkler, 1994, Decanini y Mollaioli (2001), Terán-Gilmore(1996)), por lo tanto constituye un parámetro conveniente para la determinación de la energía histerética, cuando se considera que la energía de entrada es conocida.

A continuación se proponen expresiones para determinar la relación E_H/E_I para estructuras con comportamiento elastoplástico y 5% de amortiguamiento, en función de la ductilidad y el periodo de la estructura para las distintas zonas del valle de México. Éstas son válidas para periodos de estructuras $T \leq 5$ seg.



ZONA T1

$$\frac{E_H}{E_I} = (-0.024\mu + 0.155)T + 0.146\mu - 0.029 \quad \text{para } T \leq T_s$$

$$\frac{E_H}{E_I} = (-0.01\mu + 0.014)T + 0.131\mu + 0.112 \quad \text{para } T > T_s$$

(5.5)

ZONA T2

$$\frac{E_H}{E_I} = (-0.048\mu + 0.269)T + 0.197(\mu - 1) \quad \text{para } T \leq T_s$$

$$\frac{E_H}{E_I} = (0.003\mu - 0.103)T + 0.094\mu + 0.545 \quad \text{para } T > T_s$$

(5.6)

ZONA T3

$$\frac{E_H}{E_I} = (-0.022\mu + 0.125)T + 0.156\mu \quad \text{para } T \leq T_s$$

$$\frac{E_H}{E_I} = (0.003\mu - 0.104)T + 0.081\mu + 0.686 \quad \text{para } T > T_s$$

(5.7)

ZONA T4

$$\frac{E_H}{E_I} = (-0.011\mu + 0.078)T + 0.148\mu + 0.01 \quad \text{para } T \leq T_s$$

$$\frac{E_H}{E_I} = (-0.016\mu - 0.008)T + 0.164\mu + 0.355 \quad \text{para } T > T_s$$

(5.8)

Las fórmulas anteriores no son aplicables para estructuras de periodos cortos, entendiéndose por periodos cortos aquellos menores que 0.5 seg.

Comparación del parámetro E_H/E_I entre las fórmulas propuestas y los valores medios obtenidos para cada una de las zonas

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

ZONA T1

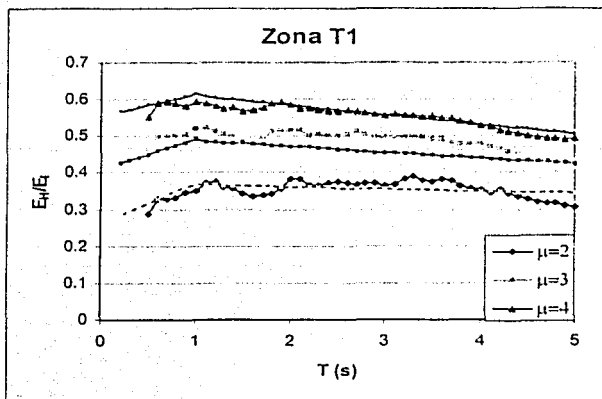


Figura 5.9. Comparación entre las fórmulas propuestas y los valores medios obtenidos de E_{II}/E_I Zona T1.

ZONA T2

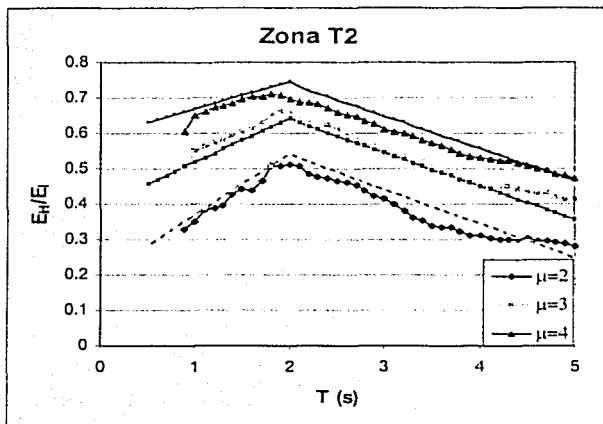


Figura 5.10. Comparación entre las fórmulas propuestas y los valores medios obtenidos de E_{II}/E_I Zona T2.

TRSE CON
TALLA DE ORIGEN

ZONA T3

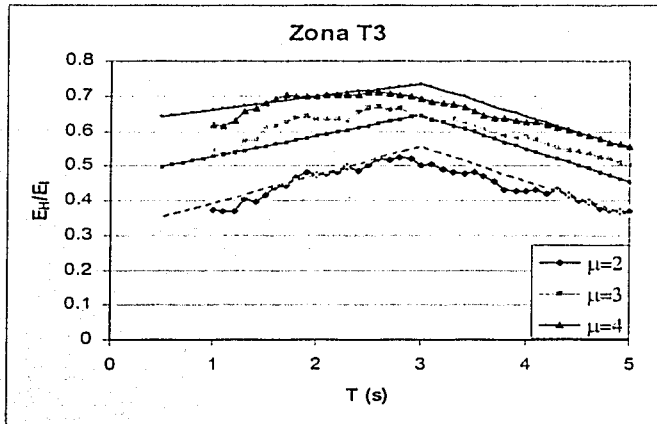


Figura 5.11. Comparación entre las fórmulas propuestas y los valores medios obtenidos de E_{II}/E_I Zona T3.

ZONA T4

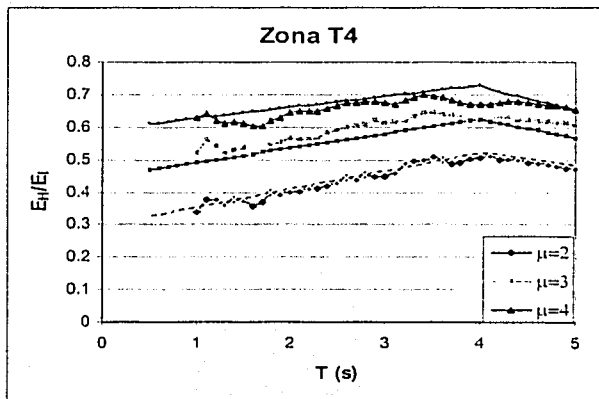


Figura 5.12. Comparación entre las fórmulas propuestas y los valores medios obtenidos de E_{II}/E_I Zona T4.

En las figuras 5.9 a 5.12 se observa que los valores obtenidos con las formulas propuestas dan aproximaciones bastante buenas a los obtenidos mediante los análisis. Por lo tanto pueden ser empleadas para obtener el parámetro E_{II}/E_I para el valle de México con cierto grado de confianza.

CONCLUSIONES DE ESTE CAPÍTULO

El parámetro E_{II}/E_I ha demostrado ser muy estable en el análisis energético, por lo que puede ser utilizado para determinar la energía histerética, considerando que la energía de entrada se conoce. Se observa que el parámetro E_{II}/E_I se incrementa para estructuras de periodos cercanos al periodo dominante del terreno. Resulta evidente que el parámetro crece a medida que la capacidad de ductilidad lo hace. En otras palabras, dicho parámetro está muy relacionado tanto con el periodo del suelo y de la estructura, como con la capacidad de ductilidad de la estructura. Es por ello que se propusieron fórmulas sencillas en función de las variables antes mencionadas. Es claro que el parámetro E_{II}/E_I es un indicador del daño que recibe una estructura. Como era de esperarse, aquí se ha confirmado que estructuras con periodos cercanos al dominante del terreno, sufrirán más daño, que las que tienen periodos lejanos a éste.

FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO 6

INFLUENCIA DE LA FATIGA DE BAJO CICLAJE EN LA CAPACIDAD DE DUCTILIDAD DE SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD

La capacidad de ductilidad tomando en cuenta la fatiga de bajo ciclaje se obtiene utilizando el concepto de ductilidad equivalente (Fajfar, 1992), que toma en cuenta el daño a través del índice de Park y Ang (1985). Se considera $I_D=1$ que representa la máxima ductilidad que puede desarrollar el sistema sin que colapse.

En esta tesis la ductilidad equivalente se obtiene para distintos niveles de ductilidad bajo desplazamiento monotónicamente creciente, la cual depende solamente de los desplazamientos máximos del sistema. Es decir para un oscilador que tiene una capacidad de ductilidad última μ_u bajo desplazamiento monotónicamente creciente, se obtiene la ductilidad que desarrolla ante carga cíclica considerando que sufre daño debido tanto a los desplazamientos máximos, como a la fatiga de bajo ciclaje.

En la ecuación 2.11 se hizo la observación que los parámetros que controlan la reducción de la ductilidad debido a la fatiga de bajo ciclaje son β y γ . En este estudio, el parámetro β se tomó como 0.15 (Cosenza et al., 1993). Por ser β una constante, la influencia de la fatiga de bajo ciclaje quedará regida por el parámetro γ .

Determinación del parámetro γ para las distintas zonas del valle de México

El parámetro γ se obtiene para cada uno de los registros por zona y para distintos niveles de ductilidad. En las siguientes figuras se observan los valores de γ obtenidos para un oscilador de un grado de libertad con comportamiento bilineal y rigidez de postfluencia de 0.03 y amortiguamiento de 5% del crítico. Se observa que el valor de γ se incrementa para valores cercanos al periodo dominante del suelo. Esto implica que para estructuras con periodo dominante cercano al del suelo, la influencia de la fatiga de bajo ciclaje es mayor, ya que a medida que el valor de γ se incrementa, la ductilidad equivalente se

reduce. De las figuras, resulta claro que el valor de γ es mucho más importante para terreno blando que para terreno duro, debido a que los valores de γ en suelo blando pueden en algunos casos duplicar a los obtenidos en suelo duro. En todas las zonas a medida que se incrementa la capacidad de ductilidad de la estructura, el valor de γ crece, excepto en el caso de periodos cercanos al periodo dominante del suelo donde existe una pequeña disminución del valor de γ para ductilidades de 4, ya que resultan un poco mayor las ductilidades de 3. Podrían utilizarse ductilidades intermedias para ver si esta tendencia se sigue manteniendo para todos los casos; es decir buscar una ductilidad para la cual la estructura sufre el mayor daño debido a la fatiga de bajo ciclaje.

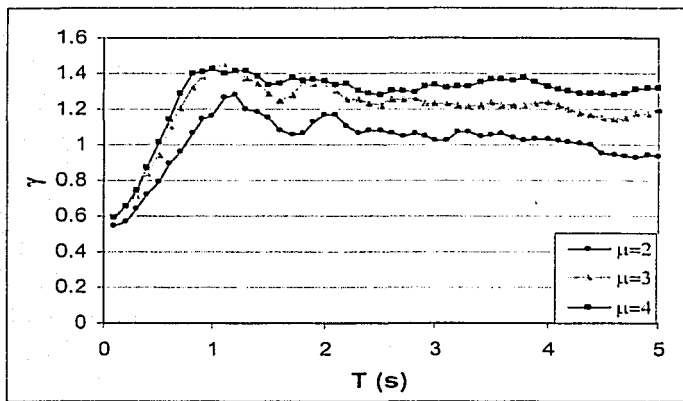


Figura 6.1. Valores medios de γ para la zona T1.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

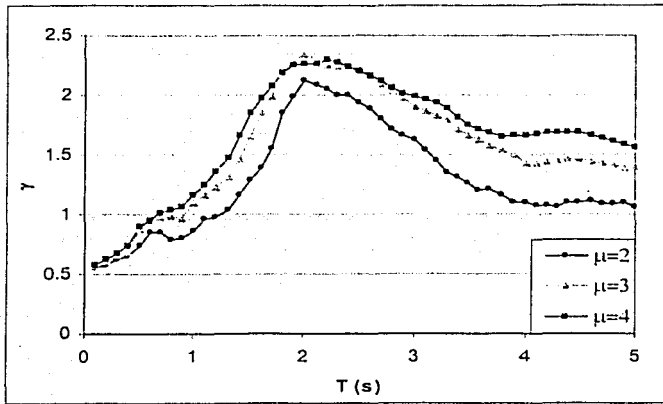


Figura 6.2. Valores medios de γ para la zona T2.

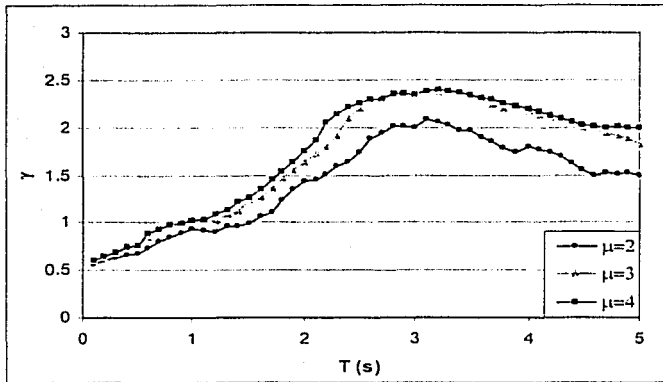


Figura 6.3. Valores medios de γ para la zona T3.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

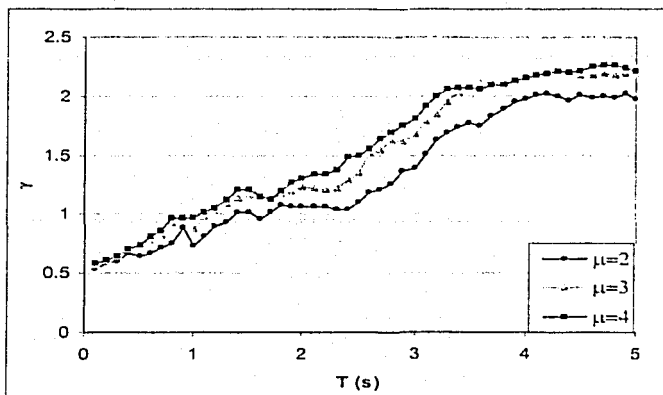


Figura 6.4. Valores medios de γ para la zona T4.

Desviaciones estándar del parámetro γ para las distintas zonas del valle de México

En la tabla 6.1 se muestran los valores de las máximas desviaciones estándar y coeficientes de variación del parámetro γ para las distintas zonas del valle de México.

ZONA	μ	$\sigma_{\text{máx}}$	$CV_{\text{máx}}$
T1	2	0.542	0.488
	3	0.548	0.399
	4	0.512	0.362
T2	2	0.711	0.437
	3	0.672	0.399
	4	0.609	0.359
T3	2	0.768	0.422
	3	0.699	0.366
	4	0.574	0.337
T4	2	1.174	0.607
	3	1.206	0.598
	4	1.025	0.604

Tabla 6.1. Máximas desviaciones estándar y coeficientes de variación del parámetro γ .

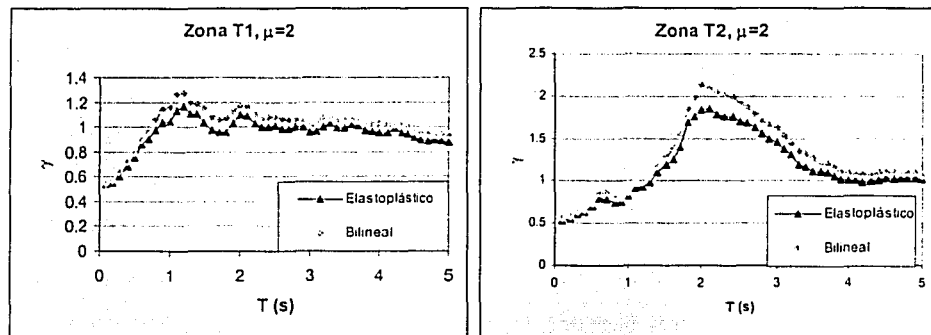
De la tabla 6.1 se observa que tanto las máximas desviaciones estándar como los máximos coeficientes de variación tienen valores bastante altos comparados con los

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

obtenidos para la relación E_f/E_s , aún así; el parámetro γ puede considerarse suficientemente estable con las dispersiones ilustradas en la tabla 6.1.

Influencia de la rigidez de postfluencia en la determinación del parámetro γ .

En las siguientes figuras se muestran los valores medios de γ para algunas zonas y distintas ductilidades, utilizando modelo bilineal con rigidez de postfluencia de 0.03 la rigidez inicial y modelo elastoplástico. En el oscilador con comportamiento bilineal se obtienen valores de γ mayores que en el caso del oscilador elastoplástico. Esto implica que en una estructura con comportamiento bilineal, el efecto de la fatiga de bajo ciclaje resulta mayor que en el caso de sistemas elastoplásticos.



6.5 y 6.6. Valores medios de γ para los registros de las zonas T1 y T2 y $\mu=2$.

Ductilidad equivalente para las distintas zonas del valle de México

Enseguida se evalúa la ductilidad equivalente (μ_{eq}) para las distintas zonas del valle de México para el oscilador con comportamiento elastoplástico. Los resultados se muestran en las siguientes figuras:

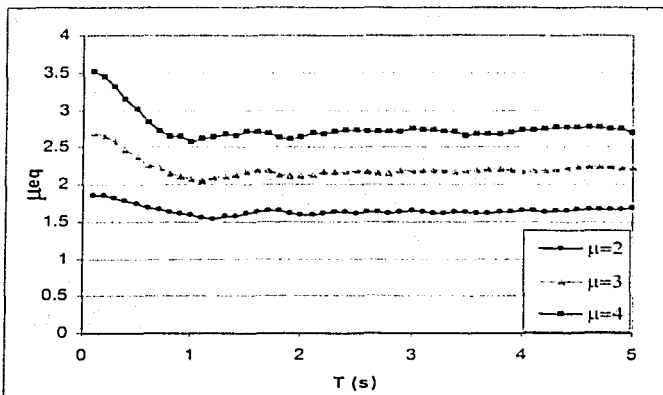


Figura 6.7. Valores medios de μ_{eq} para la zona T1.

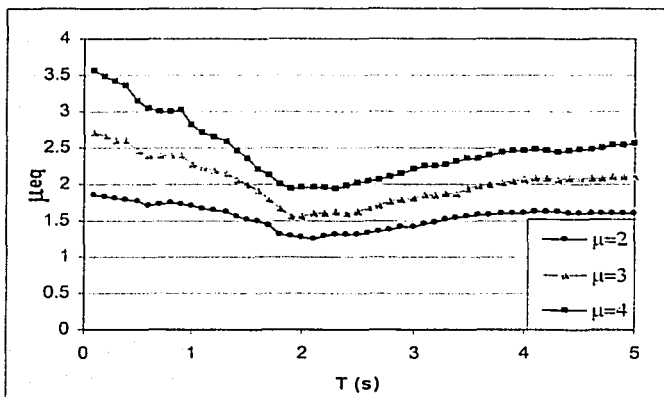


Figura 6.8. Valores medios de μ_{eq} para la zona T2.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

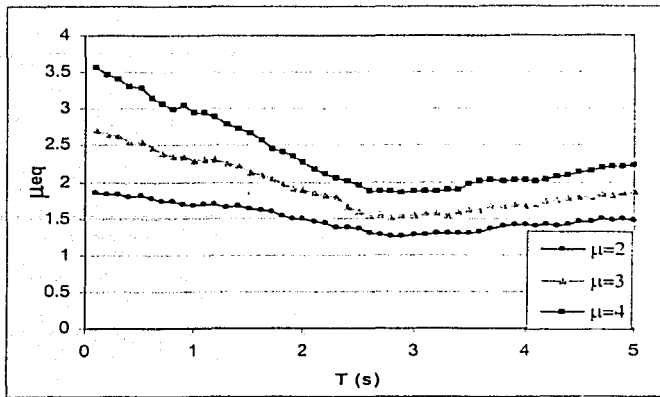


Figura 6.9. Valores medios de μ_{eq} para la zona T3.

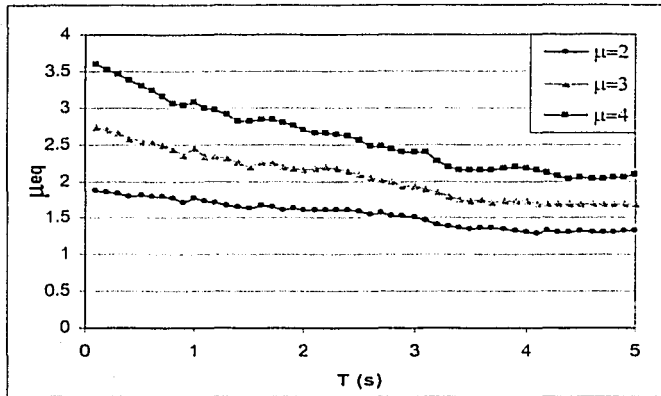


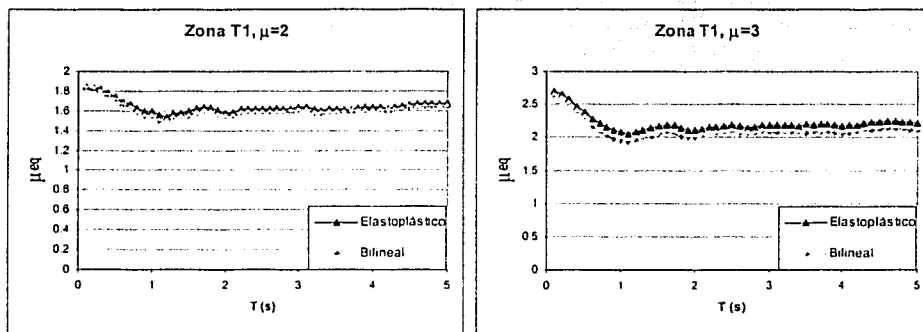
Figura 6.10. Valores medios de μ_{eq} para la zona T4.

Los resultados son los que se esperaban según el valor de γ que se obtuvo anteriormente. Para periodos cercanos al periodo dominante del terreno, la ductilidad equivalente resulta ser más pequeña que para otros periodos. Implicando que la reducción en la ductilidad máxima por fatiga de bajo ciclaje es de mayor importancia en estructuras cercanas al periodo dominante del suelo; estas observaciones son válidas para todas las zonas.

Para periodos mayores a la unidad, la ductilidad equivalente en terreno duro se mantiene prácticamente constante, y solo depende de la capacidad de ductilidad del sistema. Por lo tanto se puede obtener una expresión sencilla para evaluar la ductilidad equivalente en el suelo duro del valle de México en función de la ductilidad.

Influencia de la rigidez de postfluencia en la ductilidad equivalente.

En las figuras 6.11 y 6.12, se observa que la ductilidad equivalente es ligeramente mayor para el modelo elastoplástico que para el bilineal. Esto era de esperarse debido a que el parámetro γ que controla la reducción de la ductilidad equivalente es mayor para el modelo bilineal.



Figuras 6.11 y 6.12. Comparación de los valores medios de μ_{eq} para modelos elastoplásticos y bilineal con $\alpha=0.03$.

Desviaciones estándar de μ_{eq} para las distintas zonas del valle de México

En la tabla 6.2 se muestran los valores de las máximas desviaciones estándar y coeficientes de variación de la ductilidad equivalente μ_{eq} para las distintas zonas del valle de México.

ZONA	μ	$\sigma_{\text{máx}}$	CV
T1	2	0.228	0.145
	3	0.363	0.172
	4	0.508	0.190
T2	2	0.240	0.182
	3	0.377	0.220
	4	0.500	0.212
T3	2	0.243	0.188
	3	0.383	0.242
	4	0.449	0.221
T4	2	0.288	0.218
	3	0.441	0.255
	4	0.571	0.255

Tabla 6.2. Máximas desviaciones estándar y coeficientes de variación de la ductilidad equivalente μ_{eq} .

En la tabla 6.2 se observa que tanto la máxima desviación estándar como el máximo coeficiente de variación ocurren en la zona T4 para una ductilidad $\mu=4$. En la figura 6.13 se muestran los resultados obtenidos para este caso. De la tabla 6.2 y la figura 6.13 se puede observar que la dispersión de los datos es mucho menor a lo que se obtuvo respecto a la relación E_{II}/E_I . Por lo tanto se concluye que el parámetro resulta bastante estable.

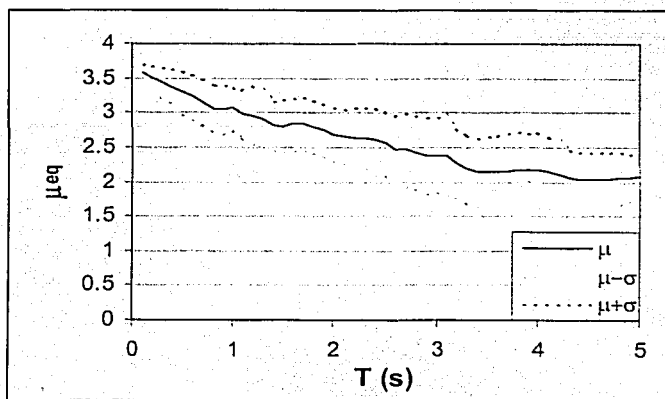


Figura 6.13. μ_{eq} para la zona T4 y $\mu=4$.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fórmulas para determinar la ductilidad equivalente para las distintas zonas del valle de México

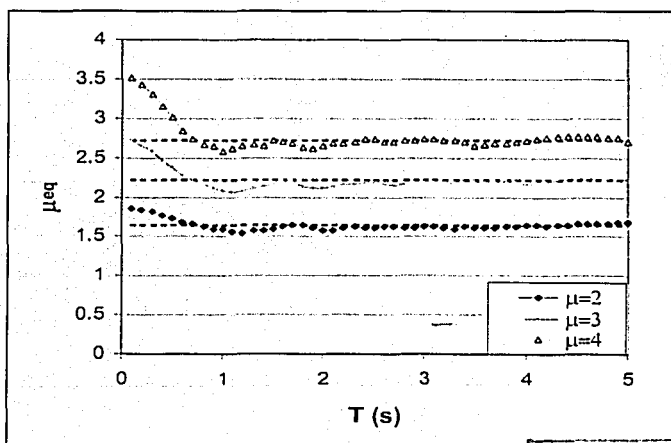
A continuación se muestran expresiones para determinar la ductilidad equivalente para estructuras con 5% de amortiguamiento, en función de la ductilidad y el periodo del oscilador para las distintas zonas del valle de México. Todas las expresiones propuestas son válidas para $T \leq 5$ seg., que fue el límite superior de periodo utilizado en éste estudio.

ZONA T1

Se observó que para suelo duro, la ductilidad equivalente puede obtenerse con una expresión sencilla que depende de la ductilidad. La siguiente expresión permite obtener la ductilidad equivalente en suelo duro en función de la ductilidad.

$$\mu_{eq} = \mu^{0.723} \quad (6.1)$$

En la figura 6.14 se comparan los valores medios de la ductilidad equivalente obtenidos para la zona T1 y para ductilidades de 2, 3 y 4, con los obtenidos usando la ecuación 6.1.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 6.14. Comparación entre los valores medios de la ductilidad equivalente y la ecuación 6.1, para la zona T1.

De la figura 6.14 se observa que la expresión 6.1 es adecuada para casi todos los periodos, excepto para estructuras con periodos muy pequeños, donde resulta conservadora. En general, resulta una expresión sumamente sencilla de aplicar para determinar la ductilidad equivalente en el terreno duro del valle de México, y que da lugar a resultados con suficiente aproximación.

ZONA T2

La siguiente expresión puede ser utilizada para determinar la ductilidad equivalente en estructuras ubicadas en la zona T2 del valle de México.

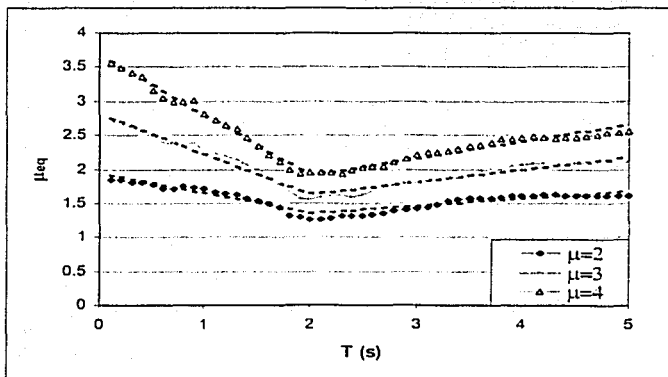
$$\begin{aligned} \mu_{eq} &= 0.296 T(1 - \mu) + 0.87 \mu + 0.211 && \text{para } T \leq T_s \\ \mu_{eq} &= (0.072 \mu - 0.037) T + 0.131 \mu + 0.878 && \text{para } T > T_s \end{aligned} \quad (6.2)$$

donde:

T es el periodo de la estructura

T_s periodo dominante del suelo

Los resultados entre los valores medios para el valle de México en la zona T2 y los obtenidos con la expresión 6.2 se muestran en la figura 6.15.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 6.15. Comparación entre los valores medios de la ductilidad equivalente y la ecuación 6.2, para la zona T2 ($T_s=2$ seg).

Resulta evidente que la ecuación 6.2 da buenos resultados de la ductilidad equivalente para la zona T2, para cualquier periodo de estructura. Por lo tanto, es adecuada para medir la ductilidad equivalente en la zona T2 del valle de México.

ZONA T3

La expresión propuesta para determinar la ductilidad equivalente en estructuras ubicadas en la zona T3 del valle de México es como sigue:

$$\begin{aligned} \mu_{eq} &= (-0.23\mu + 0.284)T + 0.855\mu + 0.164 && \text{para } T \leq T_s \\ \mu_{eq} &= (0.129\mu - 0.198)T - 0.222\mu + 1.609 && \text{para } T > T_s \end{aligned} \quad (6.3)$$

Los resultados entre los valores medios para el valle de México en la zona T3 y los obtenidos con la expresión 6.3 se muestran en la figura 6.16.

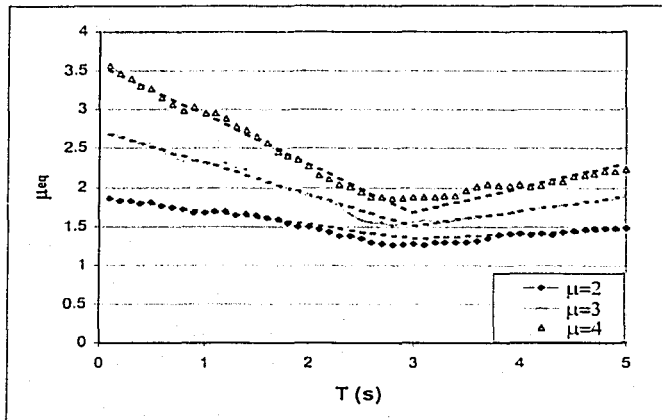


Figura 6.16. Comparación entre los valores medios de la ductilidad equivalente con la ecuación 6.3 para la zona T3 ($T_s=3$ seg).

Los mismos comentarios que en el caso de la zona T2 son válidos para la zona

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ZONA T4

Expresión propuesta para determinar la ductilidad equivalente en estructuras ubicadas en la zona T4 del valle de México.

$$\begin{aligned} \mu_{eq} &= (-0.082\mu + 0.02)T + 0.763\mu + 0.349 && \text{para } T < T_s \\ \mu_{eq} &= 0.435\mu + 0.429 && \text{para } T \geq T_s \end{aligned} \quad (6.4)$$

Los resultados de los valores medios para el valle de México en la zona T4 y los obtenidos con la expresión 6.4 se muestran en la figura 6.17.

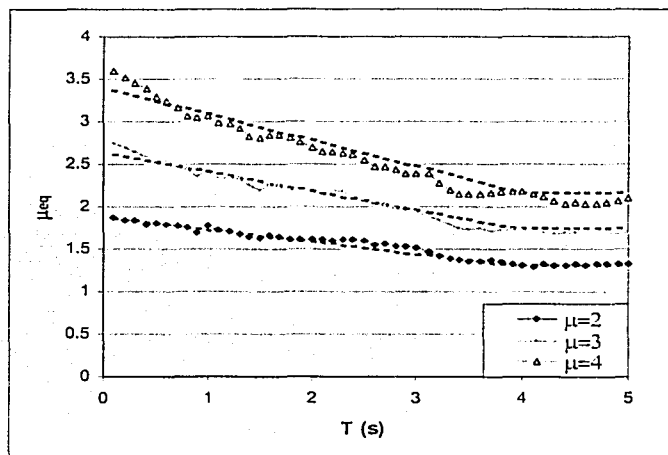


Figura 6.17. Comparación entre los valores medios de la ductilidad equivalente y la ecuación 6.4, para la zona T4 ($T_s=4$ seg).

Los mismos comentarios son válidos para la zona T4, y para los casos anteriores.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Se observa que las expresiones propuestas (ecuaciones 6.1 a 6.4) dependen solamente de la ductilidad y el periodo del sistema, así como de la zona en la que se encuentre la estructura. Es por eso que su aplicación resulta sumamente sencilla y práctica para evaluar la ductilidad equivalente o en otras palabras, para considerar el efecto de la fatiga de bajo ciclaje en estructuras sin necesidad de realizar ningún tipo de análisis dinámico.

La expresión 6.1 resulta muy práctica para evaluar la ductilidad equivalente en la zona T1, en el caso de las otras zonas, resulta evidente que normalizando el periodo de la estructura respecto al periodo dominante del terreno, se pueden obtener un juego único de ecuaciones que sea válido para las tres zonas antes mencionadas. En La figura 6.18, 6.19 y 6.20 se muestran los valores obtenidos para las zonas T2, T3 y T4 utilizando las expresiones propuestas anteriormente, para cada una de las ductilidades respectivas. En estas se observa que sus valores son bastante parecidos independientemente de la zona que se este utilizando, incluso los valores obtenidos con la expresión para la zona T2 normalizada respecto al periodo dominante de cada una de las zonas da valores bastante precisos para todas las zonas; es decir, la ecuación 6.2 normalizada respecto al periodo dominante del suelo, puede ser utilizada para cualquier zona.

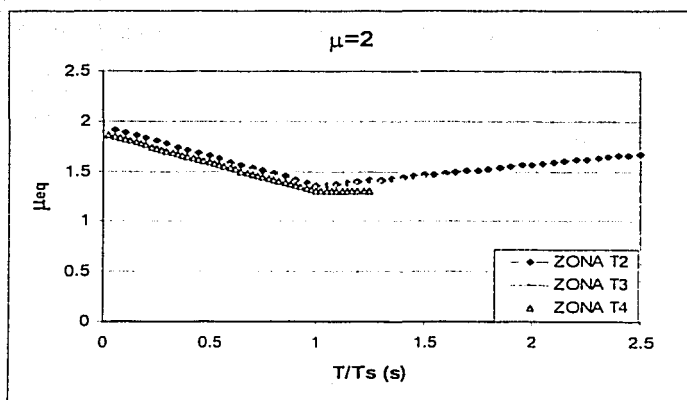


Figura 6.18. Comparación de los valores obtenidos con las expresiones propuestas para las zonas mostradas y una ductilidad $\mu=2$.

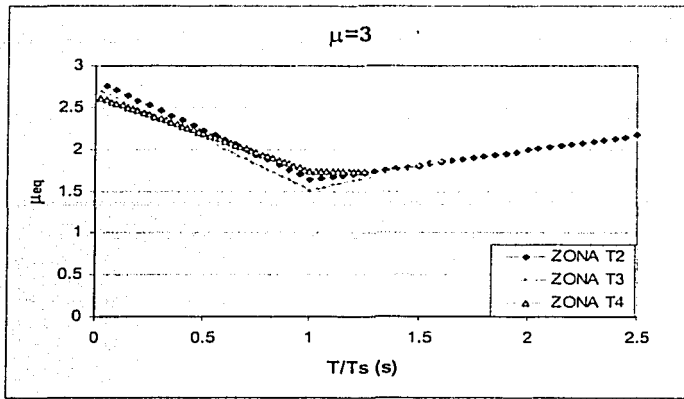


Figura 6.19. Comparación de los valores obtenidos con las expresiones propuestas para las zonas mostradas y una ductilidad $\mu=3$.

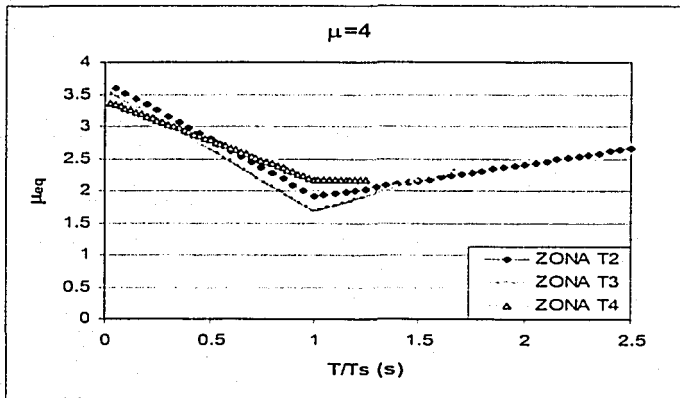


Figura 6.20. Comparación de los valores obtenidos con las expresiones propuestas para las zonas mostradas y una ductilidad $\mu=4$.

Expresión propuesta para determinar la ductilidad equivalente en estructuras ubicadas en las zonas T2, T3 y T4 del valle de México.

$$\mu_{eq} = 0.296 \frac{T}{T_S} (1 - \mu) + 0.87\mu + 0.211 \quad \text{para } T/T_S \leq 1 \quad (6.5)$$

$$\mu_{eq} = (0.072\mu - 0.037) \frac{T}{T_S} + 0.131\mu + 0.878 \quad \text{para } T/T_S > 1$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CONCLUSIONES DE ESTE CAPÍTULO

Se evaluó la ductilidad considerando el efecto de la fatiga de bajo ciclaje; es decir, la ductilidad equivalente. Se observa que la fatiga de bajo ciclaje tiene mucha influencia en la capacidad de ductilidad, sobretodo para estructuras con periodos cercanos al periodo dominante del suelo donde la reducción de la ductilidad debido al efecto de la fatiga de bajo ciclaje puede llegar a ser menor a la mitad de la ductilidad bajo carga monotónicamente creciente. Por lo tanto es muy recomendable que se tome en cuenta el efecto de la fatiga de bajo ciclaje para medir la capacidad de ductilidad de las estructuras.

TEMA CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO 7

FACTORES DE REDUCCIÓN DE FUERZAS SÍSMICAS SIN CONSIDERAR EL EFECTO DE LA FATIGA DE BAJO CICLAJE Y CONSIDERÁNDOLO

Con el fin de tomar en cuenta el comportamiento inelástico de las estructuras los reglamentos de diseño sísmico consideran un factor de reducción de fuerzas sísmicas por ductilidad. Esto es debido a que cuando una estructura entra en su comportamiento inelástico, las fuerzas sísmicas se reducen considerablemente comparadas con las fuerzas sísmicas que actúan cuando la estructura se comporta elásticamente. En este capítulo se obtienen factores de reducción de fuerzas sísmicas por ductilidad sin considerar el efecto de la fatiga de bajo ciclaje y considerando éste, para cada una de las zonas del valle de México que se han venido estudiando. Para determinar los factores de reducción se utilizó un modelo de comportamiento elastoplástico.

Los factores de reducción de fuerzas sísmicas por ductilidad se obtienen al dividir el espectro elástico entre el espectro inelástico de pseudoaceleración; es decir el espectro obtenido para que el sistema desarrolle cierta capacidad de ductilidad. Esta relación indica la cantidad de veces que las fuerzas sísmicas se reducen.

Factores de reducción de fuerzas sísmicas sin considerar la fatiga de bajo ciclaje

Las siguientes figuras muestran los factores de reducción de fuerzas sísmicas R_{μ} obtenidos para cada una de las zonas, y distintas ductilidades de los sistemas analizados.

FALLA DE ORIGEN

ZONA T1

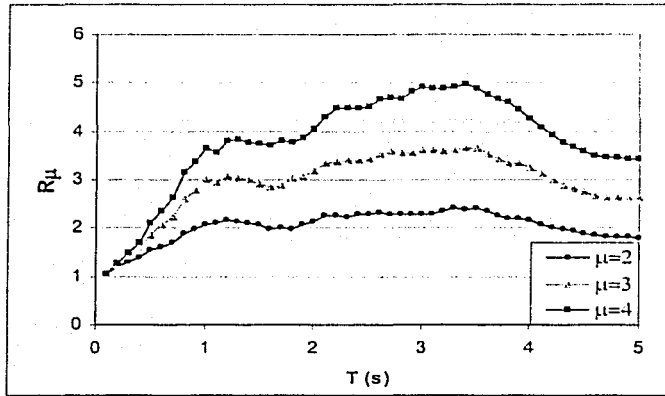


Figura 7.1. Factores de reducción por ductilidad para la zona T1 sin considerar el efecto de la fatiga de bajo ciclaje.

De la figura 7.1 se observa que para estructuras de periodo corto, el factor de reducción es muy cercano a uno. Esto indica que la reducción de las fuerzas sísmicas en este tipo de estructuras es muy pequeña. Resulta evidente que el factor de reducción crece conforme aumenta la capacidad de ductilidad del sistema. Se observa que el factor de reducción de las fuerzas sísmicas crece casi linealmente entre estructuras de periodos muy cortos menores que la unidad. Para estructuras con periodos mayores o iguales a la unidad, el factor de reducción por ductilidad es muy cercano a la capacidad de ductilidad de la estructura, excepto para periodos muy largos de estructuras donde el factor se reduce ligeramente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ZONA T2, ZONA T3 y ZONA T4

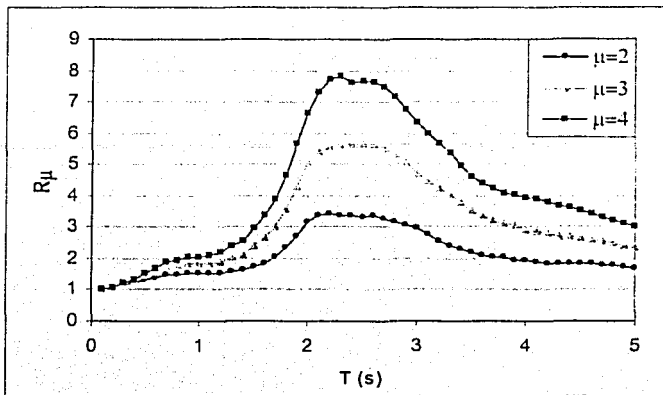


Figura 7.2. Factores de reducción por ductilidad para la zona T2 sin considerar el efecto de la fatiga de bajo ciclaje.

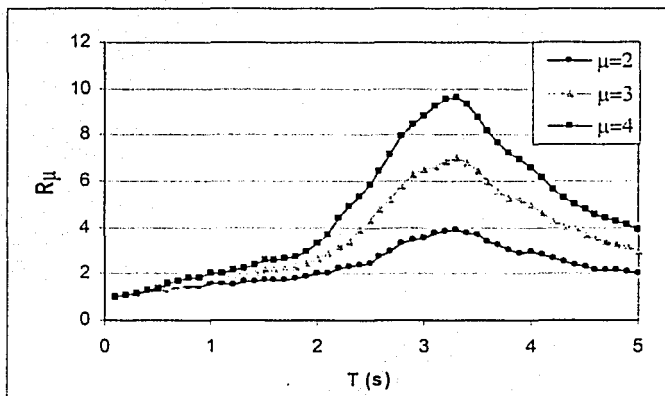


Figura 7.3. Factores de reducción por ductilidad para la zona T3 sin considerar el efecto de la fatiga de bajo ciclaje.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

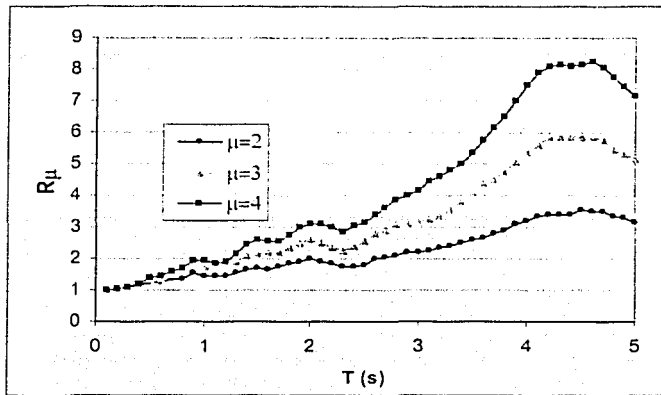


Figura 7.4. Factores de reducción por ductilidad para la zona T4 sin considerar el efecto de la fatiga de bajo ciclaje.

Las mismas observaciones que se hicieron para estructuras de periodos cortos correspondientes a la zona T1 son válidas para las demás zonas. Por lo tanto, se puede concluir que para estructuras de periodos muy cortos independientemente del tipo de suelo sobre el que estén desplantadas, las fuerzas sísmicas no se reducen de manera significativa, como se puede inferir por dinámica estructural. Se observa que para estructuras con periodos ligeramente mayores que el periodo dominante del suelo, el factor de reducción es máximo independientemente de la zona. Lo que indica que el periodo dominante del terreno juega un papel muy importante en el factor de reducción de fuerzas sísmicas.

Factores de reducción de fuerzas sísmicas considerando la fatiga de bajo ciclaje

En las siguientes figuras se muestran los resultados obtenidos considerando el efecto de la fatiga de bajo ciclaje para todas las zonas del valle de México. Para estructuras de periodos cortos los resultados son los mismos que para el caso de los factores obtenidos sin considerar el efecto de la fatiga de bajo ciclaje. Esto es, la reducción de fuerzas sísmicas no es muy importante.

TESIS CON
FALLA DE CALIFICACIÓN

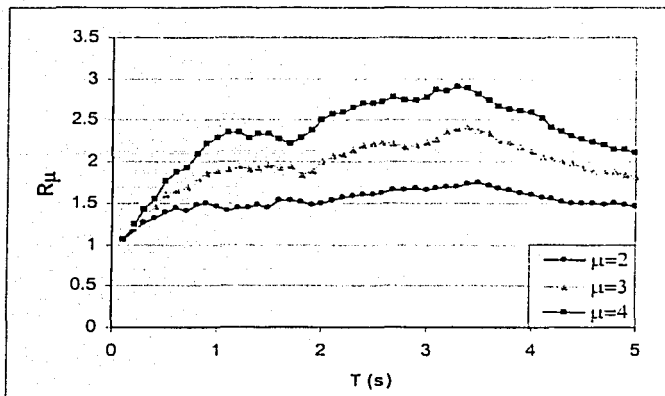


Figura 7.5. Factores de reducción por ductilidad para la zona T1 considerando el efecto de la fatiga de bajo ciclaje.

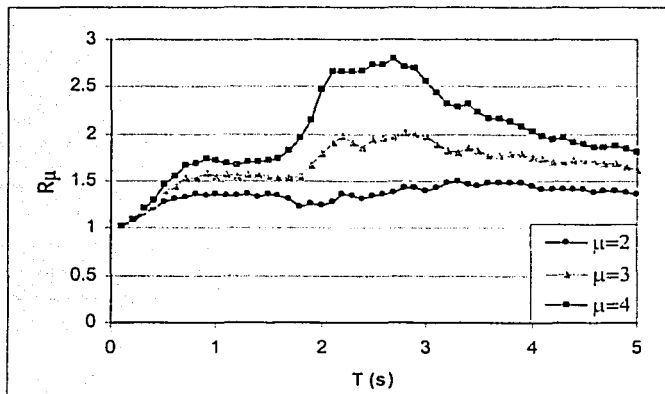


Figura 7.6. Factores de reducción por ductilidad para la zona T2 considerando el efecto de la fatiga de bajo ciclaje.

TESIS CON
FALLA DE ENGEN

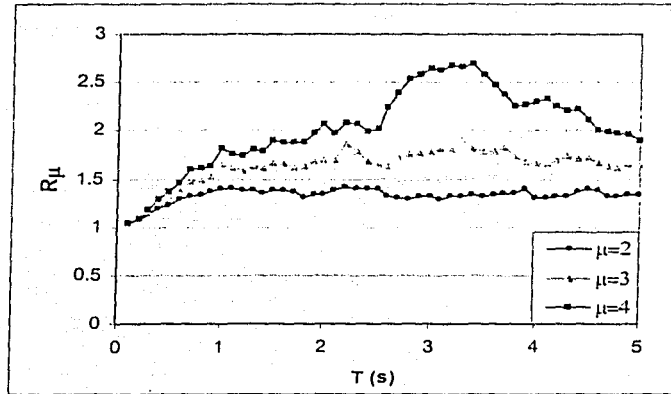


Figura 7.7. Factores de reducción por ductilidad para la zona T3 considerando el efecto de la fatiga de bajo ciclaje.

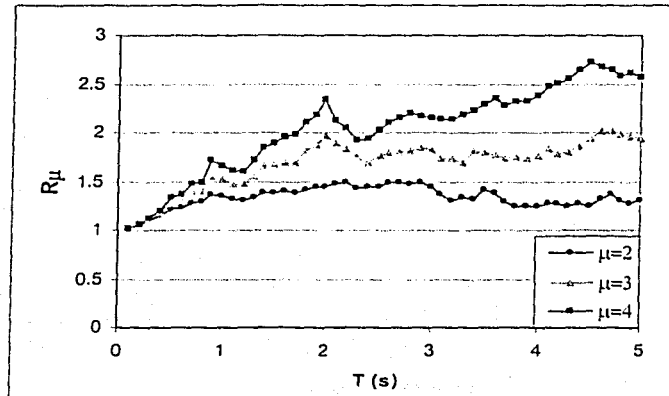


Figura 7.8. Factores de reducción por ductilidad para la zona T4 considerando el efecto de la fatiga de bajo ciclaje.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Para el caso de ductilidades pequeñas el factor de reducción se mantiene prácticamente constante, excepto para estructuras de periodos cortos. Esto indica que para estructuras con capacidades de ductilidad bajas y periodos mayores a uno, el periodo del suelo no

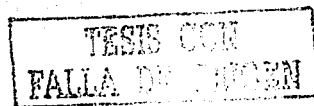
influye en los factores de reducción, así como el periodo de la estructura. Por lo tanto, la reducción de fuerzas solo depende de la ductilidad.

En el caso de ductilidades grandes, el periodo del suelo y de la estructura sí influyen de manera significativa, ya que ocurre lo mismo que en el caso sin considerar la fatiga de bajo ciclaje, excepto que los factores de reducción son mas pequeños. Es decir, para periodos ligeramente mayores al periodo dominante del suelo, los factores de reducción crecen de manera significativa, y después se reducen para estructuras de periodos muy largos.

Comparación entre los factores de reducción sin considerar el efecto de la fatiga de bajo ciclaje y considerandola

Las figuras 7.9 a 7.20 muestran la relación entre los factores de reducción sin considerar el efecto de la fatiga de bajo ciclaje y considerandolo. Para el caso de sistemas con periodos cortos esta relación es prácticamente uno, ya que como se mencionó anteriormente, para estructuras con periodos cortos las fuerzas sísmicas no se reducen de manera considerable. En la zona T1 correspondiente a suelo "duro", y para periodos mayores a uno, la relación de factores se mantiene prácticamente constante, y es muy cercana a 1.5. Esto indica que en terreno "duro" existe una influencia significativa de la fatiga de bajo ciclaje, que no debe ser despreciable, ya que implica un incremento del 50% de las fuerzas sísmicas de los factores que se obtienen sin considerar el efecto de la fatiga de bajo ciclaje.

En las otras zonas se observa que la relación de factores es muy significativa para periodos de estructuras ligeramente mayores al periodo dominante del terreno. En la mayoría de los casos la relación es aproximadamente de 3, e incluso puede alcanzar valores de 3.5 como en el caso de la zona 3. Por lo tanto despreciar el efecto de la fatiga de bajo ciclaje puede conducir a diseños del lado de la inseguridad.



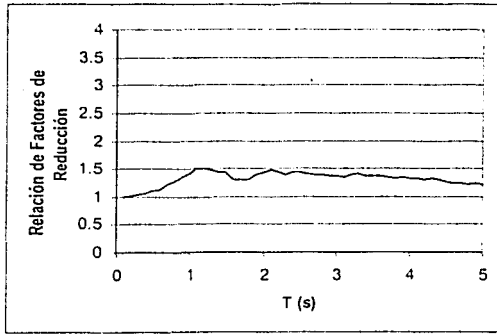


Figura 7.9. Zona T1, $\mu=2$.

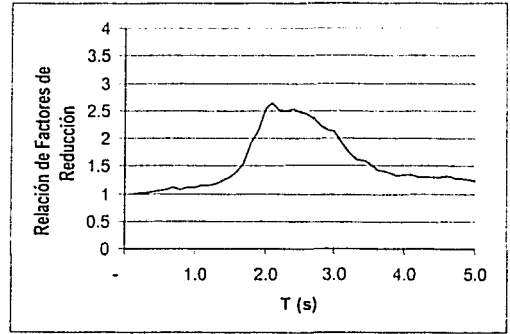


Figura 7.12. Zona T2, $\mu=2$.

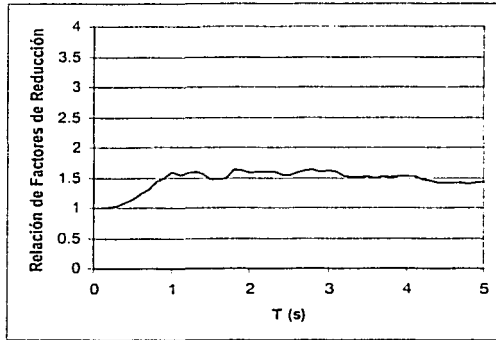


Figura 7.10. Zona T1, $\mu=3$.

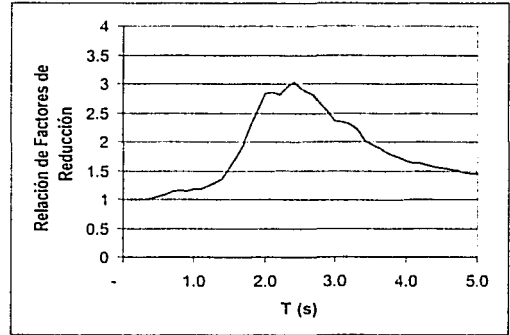


Figura 7.13. Zona T2, $\mu=3$.

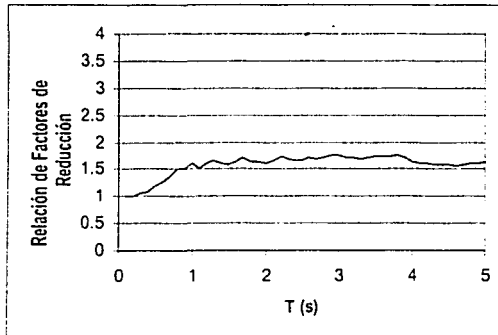


Figura 7.11. Zona T1, $\mu=4$.

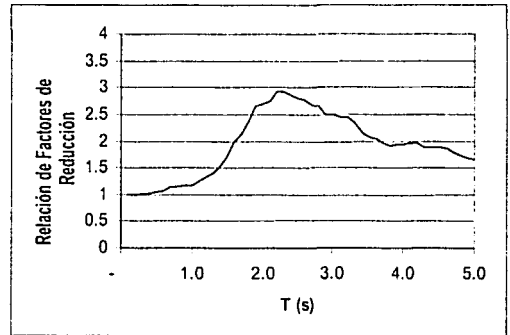


Figura 7.14. Zona T2, $\mu=4$.

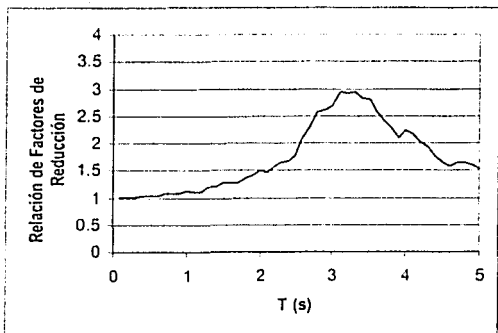


Figura 7.15. Zona T3, $\mu=2$.

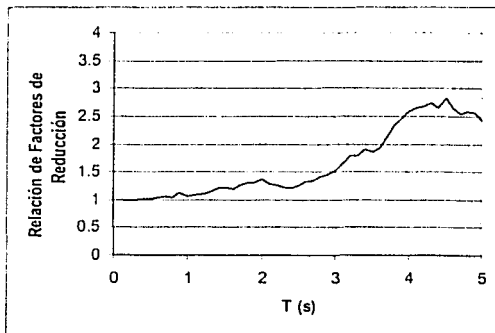


Figura 7.18. Zona T4, $\mu=2$.

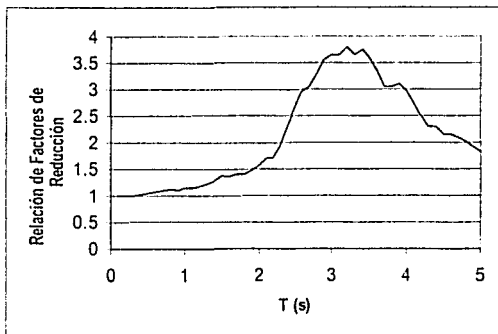


Figura 7.16. Zona T3, $\mu=3$.

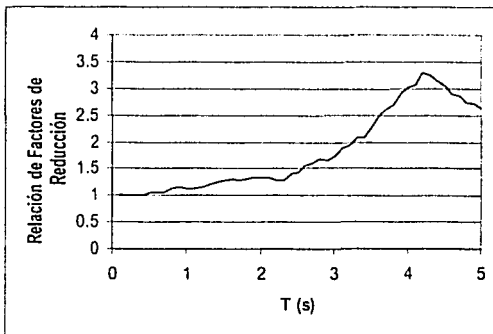


Figura 7.19. Zona T4, $\mu=3$.

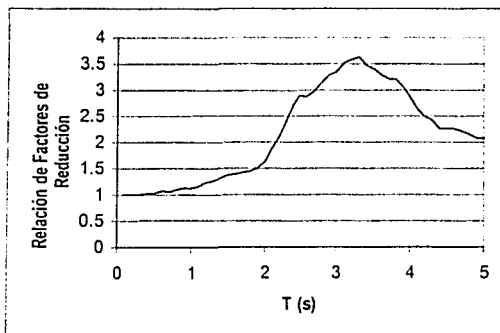


Figura 7.17. Zona T3, $\mu=4$.

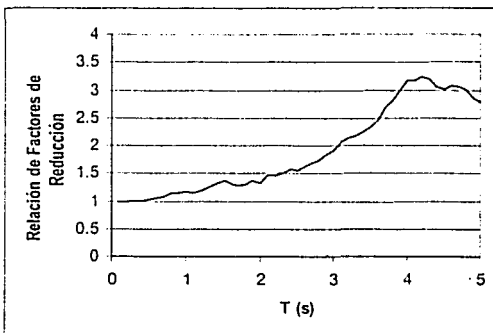


Figura 7.20. Zona T4, $\mu=4$.

Comparación entre los factores de reducción obtenidos en este estudio y los factores de reducción propuestos en el Apéndice A del Reglamento de Construcciones del D.F.

En las figuras 7.21 a 7.24 se comparan los valores medios de los factores de reducción obtenidos, con los que marca el Apéndice A del Reglamento de Construcciones del D.F. En el caso de periodos cortos el reglamento da valores mucho mayores de los factores de reducción, por lo tanto pueden estar del lado de la inseguridad. Para el caso de periodos cercanos al periodo dominante del suelo, el Reglamento propone valores cercanos a los valores medios obtenidos en este estudio, por lo tanto para el caso de periodos cercanos al periodo dominante del suelo, se puede concluir que los valores propuestos por el reglamento son adecuados. Para el caso de periodos largos tampoco se observan muchas diferencias comparadas con las observadas en periodos cortos. Con esto se puede concluir que para periodos cercanos al periodo dominante del suelo y mayores a este, los valores propuestos por el Reglamento resultan adecuados, más no es así para el caso de periodos cortos. El Reglamento corrige el problema de periodos cortos mediante el espectro elástico, en el cual para periodos muy pequeños propone valores espectrales muy grandes, y con esto se compensa el hecho de que los factores de reducción por ductilidad sean muy grandes para periodos cortos, como se verá más adelante.

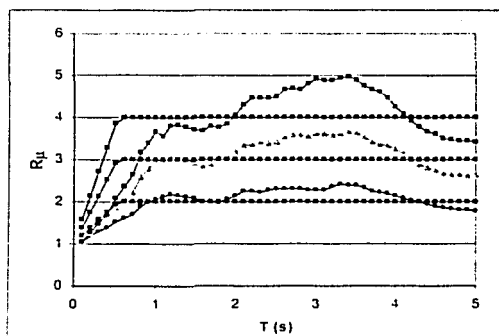


Figura 7.21. Zona T1.

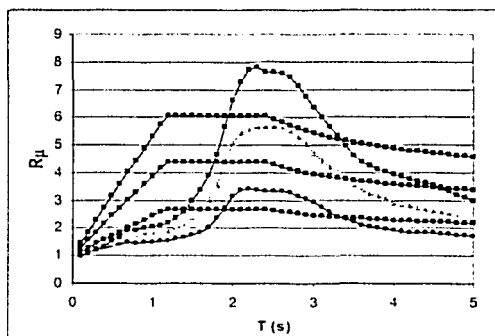


Figura 7.22. Zona T2.

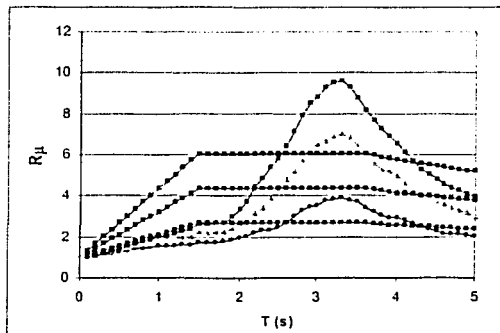


Figura 7.23. Zona T3.

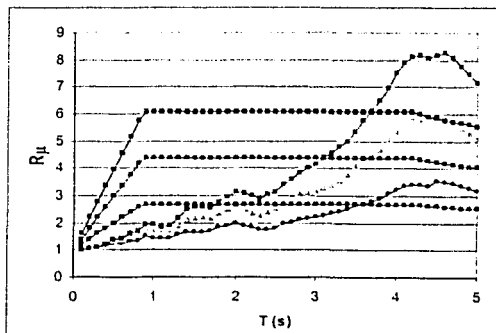


Figura 7.24. Zona T4.

Comparación entre el espectro de respuesta de SCT obtenido y el espectro de diseño propuesto en el Apéndice A del Reglamento de Construcciones del D.F.

Se hace una comparación entre el espectro SCT y el espectro propuesto en el Apéndice A del reglamento, reducido por ductilidad, para ductilidades $\mu=2, 3$ y 4 . Los resultados se ilustran en la gráfica 7.25. Para periodos muy grandes, se observan valores muy similares entre el reglamento y los obtenidos para SCT. Para periodos cortos y periodos cercanos al periodo dominante del suelo, los valores propuestos por el reglamento resultaron conservadores menores comparados con los obtenidos para SCT, esto puede deberse a que el Reglamento toma en cuenta una gran diversidad de registros y no solo el SCT, además las incertidumbres involucradas en el peligro sísmico.

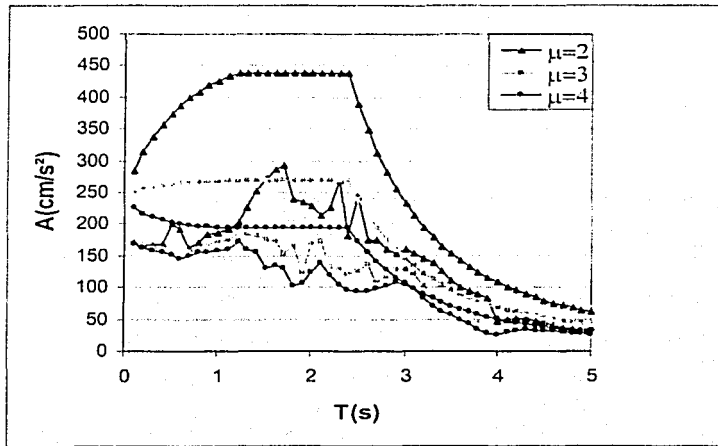


Figura 7.25. Zona T2.

Comparación entre los factores de reducción obtenidos en este estudio considerando el efecto de la fatiga de bajo ciclaje y los factores de reducción propuestos en el Apéndice A del Reglamento de Construcciones del D.F.

En las figuras 7.26 a 7.29 se comparan los valores medios de los factores de reducción considerando la fatiga de bajo ciclaje obtenidos, con los que marca el Apéndice A del Reglamento de Construcciones del D.F. Se observan grandes diferencias entre ambos, para el caso de todos los periodos de estructuras y todas las zonas, los valores obtenidos en este estudio son mucho menores que los valores propuestos por el reglamento, por lo tanto se debe de tener cuidado al no considerar el efecto de la fatiga de bajo ciclaje, ya que puede dar lugar a diseños del lado de la inseguridad.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

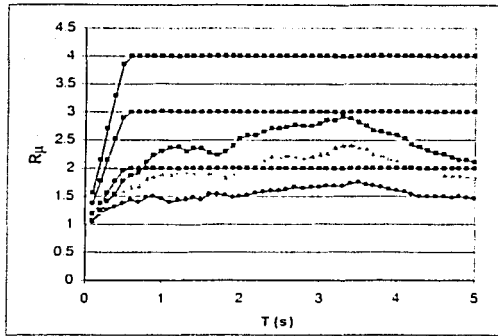


Figura 7.26. Zona T1.

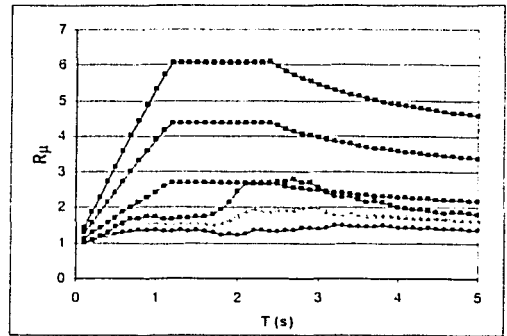


Figura 7.27. Zona T2.

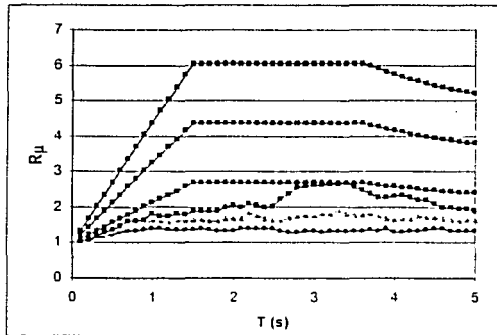


Figura 7.28. Zona T3.

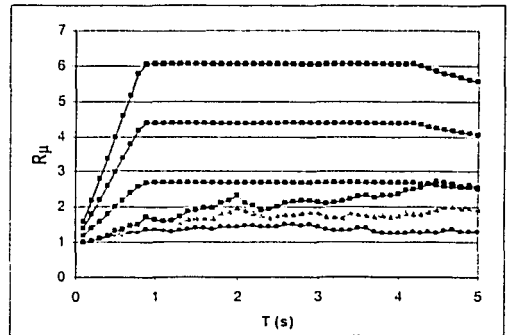


Figura 7.29. Zona T4.

Factor de corrección de los factores de reducción por ductilidad para considerar el efecto de la fatiga de bajo ciclaje

Para considerar el efecto de la fatiga de bajo ciclaje en las estructuras, se propone un factor de corrección (F_c) del factor de reducción por ductilidad; es decir, los factores de reducción por ductilidad deben ser divididos por F_c para considerar el efecto de la fatiga de bajo ciclaje. En la figura 7.30 se muestra la relación de factores obtenidos para la zona T1, para ductilidades de 2, 3 y 4. Resulta claro de la figura que para periodos cortos, la relación es muy cercana a la unidad, implicando que el factor de reducción por

ductilidad no se reduce por la influencia de la fatiga de bajo ciclaje. Para periodo mas grandes, la relación permanece casi constante entre valores de 1.2 y 1.8.

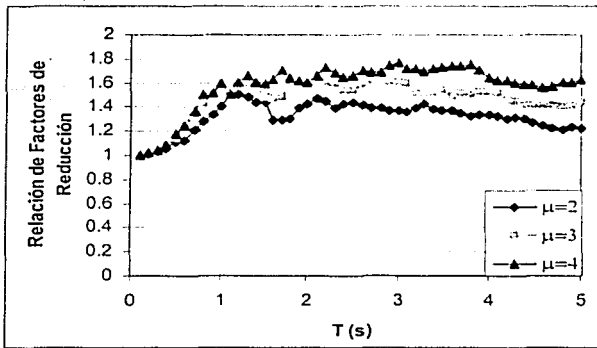


Figura 7.30. Relación de los factores de reducción para la zona T1 y $\mu=2, 3$ y 4.

ZONA T1

$$\begin{aligned}
 F_c &= 1 && \text{para } T \leq 0.2 \text{ seg.} \\
 F_c &= \frac{5}{4}(F_u - 1) \frac{T}{T_i} - \frac{1}{4} F_u + \frac{5}{4} && \text{para } T > 0.2 \text{ y } T \leq 1 \text{ seg.} \quad (7.1) \\
 F_c &= -0.0575 \mu^2 + 0.5025 \mu + 0.5625 && \text{para } T \geq 1 \text{ seg.}
 \end{aligned}$$

donde:

$$F_u = -0.0575 \mu^2 + 0.5025 \mu + 0.5625$$

En la figura 7.31 se comparan los resultados obtenidos con la fórmula propuesta (7.1).

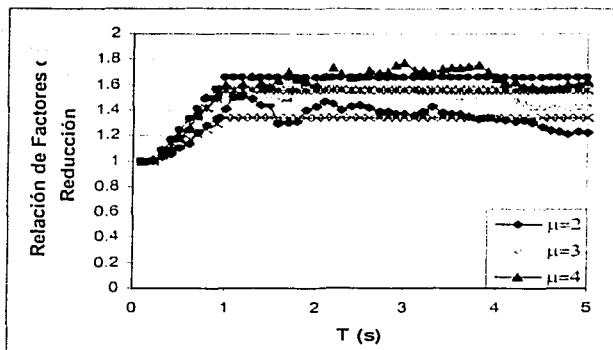


Figura 7.31. Comparación entre los resultados obtenidos para la zona T1 y la ecuación 7.1.

De las figuras 7.12 a 7.20 se puede observar que normalizando la relación de factores de reducción respecto al periodo dominante del suelo, no existe mucha influencia de la zona. Es por eso que se propone una expresión en función de la capacidad de ductilidad y el periodo de la estructura. También se puede observar que tanto para periodos cortos como para periodos largos, la relación de factores de reducción es muy cercana a la unidad. Esto implica que la fatiga de bajo ciclaje no tiene gran influencia para estructuras con los periodos antes mencionados. La expresión 7.2 nos da el factor correctivo para las zonas T2, T3 y T4 en función del periodo de la estructura y la capacidad de ductilidad de la misma.

ZONAS T2, T3 y T4

$$F_c = 1 + \alpha_1 e^{\frac{(T-\alpha_2)^2}{-\alpha_3}} + \alpha_4 e^{\frac{(T-\alpha_5)^2}{-\alpha_6}} \quad (7.2)$$

Los parámetros α_1 , α_2 , α_3 , α_4 , α_5 y α_6 , dependen de la capacidad de ductilidad de la estructura, estos valores se muestran en la tabla 7.1. En las figuras 7.31 a 7.33, se comparan los resultados obtenidos de los valores medios de la relación de factores de reducción, con los obtenidos empleando la expresión 7.2 para cada una de las ductilidades empleadas en este estudio.

	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6
$\mu = 2$	1.7	1.1	0.15	0.3	2	0.7
$\mu = 3$	1.614	1.05	0.105	0.879	1.6	0.9
$\mu \geq 4$	1.61	1.05	0.134	1.021	1.8	0.917

Tabla 7.1. Valores de los parámetros α_1 , α_2 , α_3 , α_4 , α_5 y α_6 , según la capacidad de ductilidad del sistema.

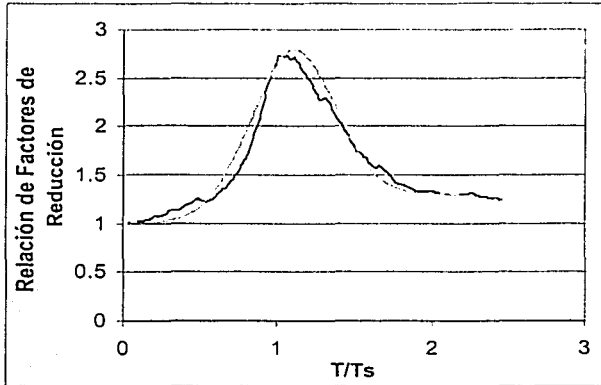
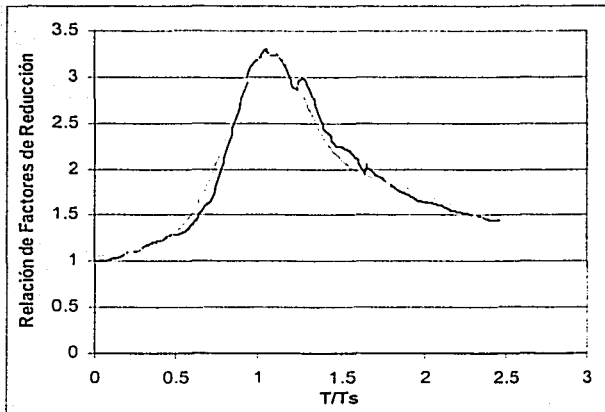


Figura 7.32. Comparación entre los resultados obtenidos para las zonas T2, T3 y T4 y la ecuación 7.2, $\mu=2$.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 7.33. Comparación entre los resultados obtenidos para las zonas T2, T3 y T4 y la

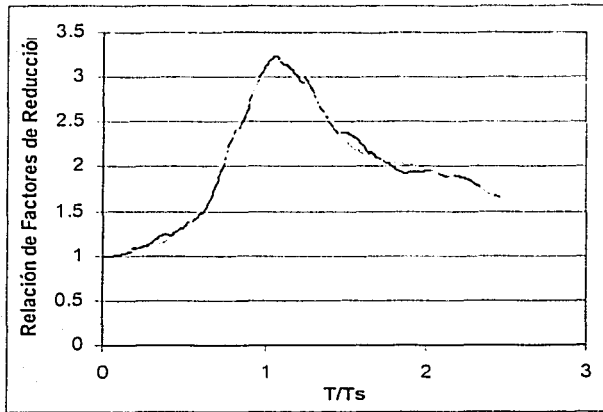


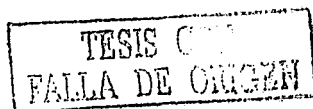
Figura 7.34. Comparación entre los resultados obtenidos para las zonas T2, T3 y T4 y la ecuación 7.2, $\mu=4$.

TESIS CON
FALLA DE CUMPLIMIENTO

CONCLUSIONES

El parámetro E_{II}/E_I ha demostrado ser muy estable en el análisis energético por lo que puede ser utilizado para determinar la energía histerética, considerando que la energía de entrada se conoce. Dicho parámetro puede servir como base para proponer metodologías de diseño en base a conceptos de energía. Para estructuras cercanas al periodo dominante del suelo este parámetro presenta sus valores máximos, por lo tanto debido a que en este parámetro está implícito el daño en la estructura, se puede concluir que las estructuras con periodos cercanos al periodo dominante del suelo sufrirán más daño. También se observa que a medida que la ductilidad del sistema es mayor, también lo es la relación E_{II}/E_I de ahí la importancia de la capacidad de ductilidad de una estructura. Debido a la estabilidad de este parámetro se propusieron fórmulas sencillas en función de la capacidad de ductilidad del sistema y de los periodos de la estructura y del suelo. Dichas expresiones pueden servir de base para criterios de diseño con base a conceptos de energía para el valle de México.

Los factores de reducción de fuerzas sísmicas por ductilidad sin considerar el efecto de la fatiga de bajo ciclaje se compararon con los propuestos por el Apéndice A del Reglamento de Construcciones del D.F. (RCDF-2003). Para periodos de estructuras cercanas al periodo dominante del suelo y estructuras con periodos mayores al periodo del suelo, no existen diferencias significativas entre los valores medios de los factores de reducción obtenidos en este estudio y los propuestos por el Reglamento. Esto no sucede para el caso de periodos cortos, donde los valores propuestos por el Reglamento son mucho mayores; es decir se sobrestiman dichos factores. Lo anterior es corregido por el Reglamento al proponer ordenadas espectrales muy grandes, al comparar las ordenadas espectrales de diseño reducidas por ductilidad del Reglamento, con las obtenidas en este estudio para SCT, se observa que para el caso de periodos cortos los valores propuestos por el Reglamento son mayores a los obtenidos en este trabajo, esto podría llevar a diseños conservadores. Por otra parte en el caso de periodos cercanos al periodo dominante del suelo, las ordenadas espectrales del reglamento resultaron menores, por lo que se podría estar del lado de la inseguridad para el caso de estructuras con estos periodos. En el caso de periodos largos, no existen diferencias significativas

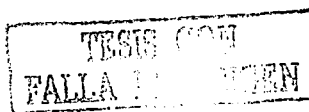


entre las ordenadas espectrales de diseño que propone el Reglamento y las obtenidas en este estudio.

Se evaluó la capacidad de ductilidad considerando el efecto de la fatiga de bajo ciclaje para el valle de México. Se observa una gran influencia de dicho parámetro en la capacidad de ductilidad, por lo tanto despreciarla puede llevar a diseños del lado de la inseguridad, sobretodo en estructuras con periodos cercanos al periodo dominante del suelo donde la ductilidad se reduce significativamente. Se obtienen los factores de reducción por ductilidad considerando el efecto de la fatiga de bajo ciclaje, y se proponen factores de corrección de los factores de reducción por ductilidad para las distintas zonas del valle de México. Como lo indica la capacidad de ductilidad, dicho factor de corrección resulta mayor para periodos cercanos al periodo dominante del suelo que para otros periodos.

Por último, se observa que la fatiga de bajo ciclaje tiene gran influencia en estructuras con periodos cercanos al periodo dominante del suelo sometidas a movimientos de larga duración; en ese sentido, los factores de reducción que marca el Reglamento para el caso de periodos cercanos al periodo dominante del suelo pueden estar sobrestimados.

En futuras versiones del Reglamento será deseable incorporar de manera explícita factores de reducción que tomen en cuenta el efecto de la fatiga de bajo ciclaje, en especial para estructuras con periodos cercanos al dominante de terreno sometidas a movimientos de larga duración, como ocurre en el terreno blando de la ciudad de México.



APÉNDICE A

CODIGO FUENTE DEL PROGRAMA RBENERGÍA

El programa RBENERGÍA se desarrollo en el lenguaje Visual Basic 6, a continuación se muestra el código fuente del algoritmo principal del programa:

Public sub

For T = 0.1 To 5 Step 0.1 ' PONER CUANDO SE TRACE EL ESPECTRO

Call CONSTANTES_ELASTICAS1
Call CONSTANTES_ELASTICAS2

Q = QI
CONQI = 1
IJ = IJ + 1

Do

FYM = 100000
XEMAX = 0
EHM = 0
Call RESPUESTA
F1 = $WN^2 * XEMAX$
FYY = F1
D1 = 1

DUCTI = 1
FYM = F1
JJ = 1 'ACOMODAR CUANDO SE TRACE EL ESPECTRO
CO = 0.05 'ACOMODAR CUANDO SE TRACE EL ESPECTRO

Do

F10 = FYM
D1 = DUCTI
JJ = JJ - CO

If JJ < 0 Then
JJ = CO + JJ
CO = CO / 10
JJ = JJ - CO
End If

FYM = JJ * F1

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

```
XEMAX = 0
EHM = 0
Call RESPUESTA
DUCTI = XEMAX / XY
D2 = DUCTI
F2 = FYM
Loop Until D2 > Q
F1 = F10
```

CICLO = 0

```
Do
  CICLO = CICLO + 1
  FYM = Exp(Log(F2) + (Log(F1) - Log(F2)) * (Log(D2) - Log(Q)) / (Log(D2) -
  Log(D1)))
```

```
XEMAX = 0
EHM = 0
EMAXR = 0
EMAXA = 0
AAMAX = 0
VMAX = 0
Call RESPUESTA
DUCTI = XEMAX / XY
```

```
If DUCTI < Q Then
  F1 = FYM
  D1 = DUCTI
End If
If DUCTI > Q Then
  F2 = FYM
  D2 = DUCTI
End If
```

Loop Until (DUCTI >= 0.985 * Q And DUCTI <= 1.015 * Q Or CICLO = 20)

```
XMAXIMA(IJ) = XEMAX
AAMAXIMA(IJ) = AAMAX
EMAXIMAR(IJ) = EMAXR
EMAXIMAH(IJ) = EHM
EHEI(IJ) = EMAXIMAH(IJ) / EMAXIMAR(IJ)
GAMMA(IJ) = (EMAXIMAH(IJ)) ^ 0.5 / (WN * XMAXIMA(IJ))
EHFYDY(IJ) = EMAXIMAH(IJ) / (FYY * XY)
MMUU(IJ) = ((1 + 4 * 0.15 * GAMMA(IJ) ^ 2 * Q) ^ 0.5 - 1) / (2 * 0.15 *
GAMMA(IJ) ^ 2)
```

```
MMUUT(IJ, NUMAC) = MMUU(IJ)
DMAXT(IJ, NUMAC) = XMAXIMA(IJ)
AAMAXT(IJ, NUMAC) = AAMAXIMA(IJ)
GAMMAT(IJ, NUMAC) = GAMMA(IJ)
```

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ESTADO LIBRE ASOCIADO DE PUERTO RICO
DE LA UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO

EMAXIMAHT(IJ, NUMAC) = EMAXIMAH(IJ)
 EHEIT(IJ, NUMAC) = EHEI(IJ)
 VMAXT(IJ, NUMAC) = VMAX
 EIT(IJ, NUMAC) = EMAXIMAR(IJ)

Q = MMUU(IJ)
 CONQI = CONQI + 1

If QI = 1 Then CONQI = 3

If Q < 1 Then Q = 1

Loop Until (CONQI = 3)

Next T

Q = QI
 Next Q

End Sub

Sub CONSTANTES_ELASTICAS10

' CONSTANTES ELASTICAS DE LA PRIMERA RAMA

E = Exp(-SI * WN * DT)
 S = Sin(WD * DT)
 C = Cos(WD * DT)

D1E = E * ((SI / (1 - SI ^ 2) ^ 0.5) * S + C)
 D2E = E * S / WD
 D3E = (-1 / WN ^ 2) * (2 * SI / (WN * DT) + E * (((1 - 2 * SI ^ 2) / (WD * DT) - SI / (1 - SI ^ 2) ^ 0.5) * S - (1 + 2 * SI / (WN * DT)) * C))
 D4E = (-1 / WN ^ 2) * (1 - (2 * SI / (WN * DT)) + E * ((2 * SI ^ 2 - 1) * S / (WD * DT) + (2 * SI / (WN * DT)) * C))

V1E = -E * S * WN / (1 - SI ^ 2) ^ 0.5
 V2E = E * (C - SI * S / (1 - SI ^ 2) ^ 0.5)
 V3E = (-1 / (WN ^ 2 * DT)) * (-1 + E * (S * (WN * DT + SI) / (1 - SI ^ 2) ^ 0.5 + C))
 V4E = (-1 / (WN ^ 2 * DT)) * (1 - E * (SI * S / (1 - SI ^ 2) ^ 0.5 + C))

End Sub

Sub CONSTANTES_ELASTICAS20

' CONSTANTES ELASTICAS DE LA SEGUNDA RAMA

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

E = Exp(-SI2 * WN2 * DT)
S = Sin(WD2 * DT)
C = Cos(WD2 * DT)

D1E2 = E * ((SI2 / (1 - SI2 ^ 2) ^ 0.5) * S + C)
D2E2 = E * S / WD2
D3E2 = (-1 / WN2 ^ 2) * (2 * SI2 / (WN2 * DT) + E * (((1 - 2 * SI2 ^ 2) / (WD2 * DT) - SI2 / (1 - SI2 ^ 2) ^ 0.5) * S - (1 + 2 * SI2 / (WN2 * DT)) * C))
D4E2 = (-1 / WN2 ^ 2) * (1 - (2 * SI2 / (WN2 * DT))) + E * ((2 * SI2 ^ 2 - 1) * S / (WD2 * DT) + (2 * SI2 / (WN2 * DT)) * C))

V1E2 = -E * S * WN2 / (1 - SI2 ^ 2) ^ 0.5
V2E2 = E * (C - SI2 * S / (1 - SI2 ^ 2) ^ 0.5)
V3E2 = (-1 / (WN2 ^ 2 * DT)) * (-1 + E * (S * (WN2 * DT + SI2) / (1 - SI2 ^ 2) ^ 0.5 + C))
V4E2 = (-1 / (WN2 ^ 2 * DT)) * (1 - E * (SI2 * S / (1 - SI2 ^ 2) ^ 0.5 + C))

End Sub

Sub RESPUESTA()

For I = 2 To NP
If DT <> DTA Then
DT = DTA
Call CONSTANTES_ELASTICAS1
Call CONSTANTES_ELASTICAS2
End If
AUXFLUENCIA = False
LINEA = False
II = 0

Do

If LINEA = True Then
II = II + 1
If II = 1 Then
Call CONSTANTES_ELASTICAS1
Call CONSTANTES_ELASTICAS2
End If
End If

If (X0 <= XYP And X0 >= XYN) Then
Call ELASTICO
Else
Call BILINEAL
End If

TESIS CON
FALLA DE CORTEN

Loop Until (II = 20 Or DT = DTA)

Call ENERGY

Next I

End Sub

Sub RESPUESTA_ELASTICA1()

A0 = A(I - 1)

If AUXFLUENCIA = True Then A0 = AF

AF = A(I - 1) + (A(I) - A(I - 1)) * DT / DTA

If AUXFLUENCIA = True Then AF = A(I)

If LINEA = True Then

A0 = A(I - 1) + (A(I) - A(I - 1)) * DT * (II - 1) / DTA

AF = A(I - 1) + (A(I) - A(I - 1)) * DT * II / DTA

End If

A1 = A0 - WN ^ 2 * XP

A2 = AF - WN ^ 2 * XP

If LINEA = True And II = 1 Then

X0 = X(I - 1)

V0 = V(I - 1)

End If

X(I) = D1E * X0 + D2E * V0 + D3E * A1 + D4E * A2

V(I) = V1E * X0 + V2E * V0 + V3E * A1 + V4E * A2

AA(I) = -WN ^ 2 * (X(I) - XP) - 2 * S1 * WN * V(I)

End Sub

Sub RESPUESTA_ELASTICA2()

A0 = A(I - 1)

If AUXFLUENCIA = True Then A0 = AF

AF = A(I - 1) + (A(I) - A(I - 1)) * DT / DTA

If AUXFLUENCIA = True Then AF = A(I)

If LINEA = True Then

A0 = A(I - 1) + (A(I) - A(I - 1)) * DT * (II - 1) / DTA

AF = A(I - 1) + (A(I) - A(I - 1)) * DT * II / DTA

If II = 1 Then

X0 = X(I - 1)

V0 = V(I - 1)

End If

TESIS COTI
FALLA DE ORIGEN

End If

If V0 > 0 Then

$$A1 = A0 + WN ^ 2 * XY * (1 - ALFA)$$

$$A2 = AF + WN ^ 2 * XY * (1 - ALFA)$$

End If

If V0 < 0 Then

$$A1 = A0 - WN ^ 2 * XY * (1 - ALFA)$$

$$A2 = AF - WN ^ 2 * XY * (1 - ALFA)$$

End If

$$X(I) = D1E2 * X0 + D2E2 * V0 + D3E2 * A1 + D4E2 * A2$$

$$V(I) = V1E2 * X0 + V2E2 * V0 + V3E2 * A1 + V4E2 * A2$$

$$AA(I) = -WN ^ 2 * (X(I) - XP) - 2 * SI * WN * V(I)$$

If V0 > 0 Then AA(I) = -WN ^ 2 * (XYP - XP) - ALFA * WN ^ 2 * (X(I) - XYP) - 2 * SI * WN * V(I)

If V0 < 0 Then AA(I) = -WN ^ 2 * (XYN - XP) - ALFA * WN ^ 2 * (X(I) - XYN) - 2 * SI * WN * V(I)

End Sub

Sub ELASTICO()

Call RESPUESTA_ELASTICA1

If (X(I) > XYP Or X(I) < XYN) Then ' LA ESTRUCTURA ESTA FLUYENDO

'Call FLUENCIA10

$$DT = DTA / 20$$

LINEA = True

Else

$$X0 = X(I)$$

$$V0 = V(I)$$

$$FE(I) = WN ^ 2 * (X(I) - XP)$$

End If

End Sub

Sub BILINEAL()

Call RESPUESTA_ELASTICA2

If V0 * V(I) <= 0 Then

If DT <> DTA Then

If V0 > 0 Then

$$XUNL = X(I)$$

$$XYP = XUNL$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

```

XYN = XUNL - 2 * XY
XP = (1 - ALFA) * (XUNL - XY)
V0 = 0
V(I) = 0
End If

```

```

If V0 < 0 Then
  XUNL = X(I)
  XYP = XUNL + 2 * XY
  XYN = XUNL
  XP = (1 - ALFA) * (XUNL + XY)
  V0 = 0
  V(I) = 0
End If
End If

```

```

  DT = DTA / 20
  LINEA = True
Else
  FE(I) = WN ^ 2 * (XYP - XP) + ALFA * WN ^ 2 * (X(I) - XYP)
  If V0 < 0 Then FE(I) = WN ^ 2 * (XYN - XP) + ALFA * WN ^ 2 * (X(I) - XYN)
End If

```

```

X0 = X(I)
V0 = V(I)

```

End Sub

Sub ENERGY()

```

EA(I) = 2 * SI * WN * (V(I) ^ 2 + V(I - 1) ^ 2) * DT / 2 + EA(I - 1)
ED(I) = FE(I) ^ 2 / (2 * WN ^ 2)

```

```

If (X0 > XYP Or X0 < XYN) Then
  ED(I) = WN ^ 2 * XY ^ 2 / 2 + (Abs(FE(I)) - WN ^ 2 * XY) ^ 2 / (2 * WN ^ 2)
End If

```

```

VG(I) = ((A(I) + A(I - 1)) * DT / 2) + VG(I - 1)
ECA(I) = (VG(I) + V(I)) ^ 2 / 2
ECR(I) = V(I) ^ 2 / 2
EDEN = III

```

```

If EPLASTICO = True Then
  EBM = NP
  INTEG(I) = ((V(I) * FE(I) + V(I - 1) * FE(I - 1)) * DT / 2) + INTEG(I - 1)
  FLUEN(I) = INTEG(I) - ED(I)
  ETA(I) = EA(I) + ED(I) + FLUEN(I) + ECA(I)
  ETR(I) = EA(I) + ED(I) + FLUEN(I) + ECR(I)

```

TESIS COM
FALLA I ENGEN

Else

ETA(I) = EA(I) + ED(I) + ECA(I)

ETR(I) = EA(I) + ED(I) + ECR(I)

End If

If Abs(X(I)) > XEMAX Then XEMAX = Abs(X(I))

If Abs(V(I)) > VMAX Then VMAX = Abs(V(I))

If Abs(AA(I)) > AAMAX Then AAMAX = Abs(AA(I))

If ETR(I) > EMAXR Then EMAXR = ETR(I)

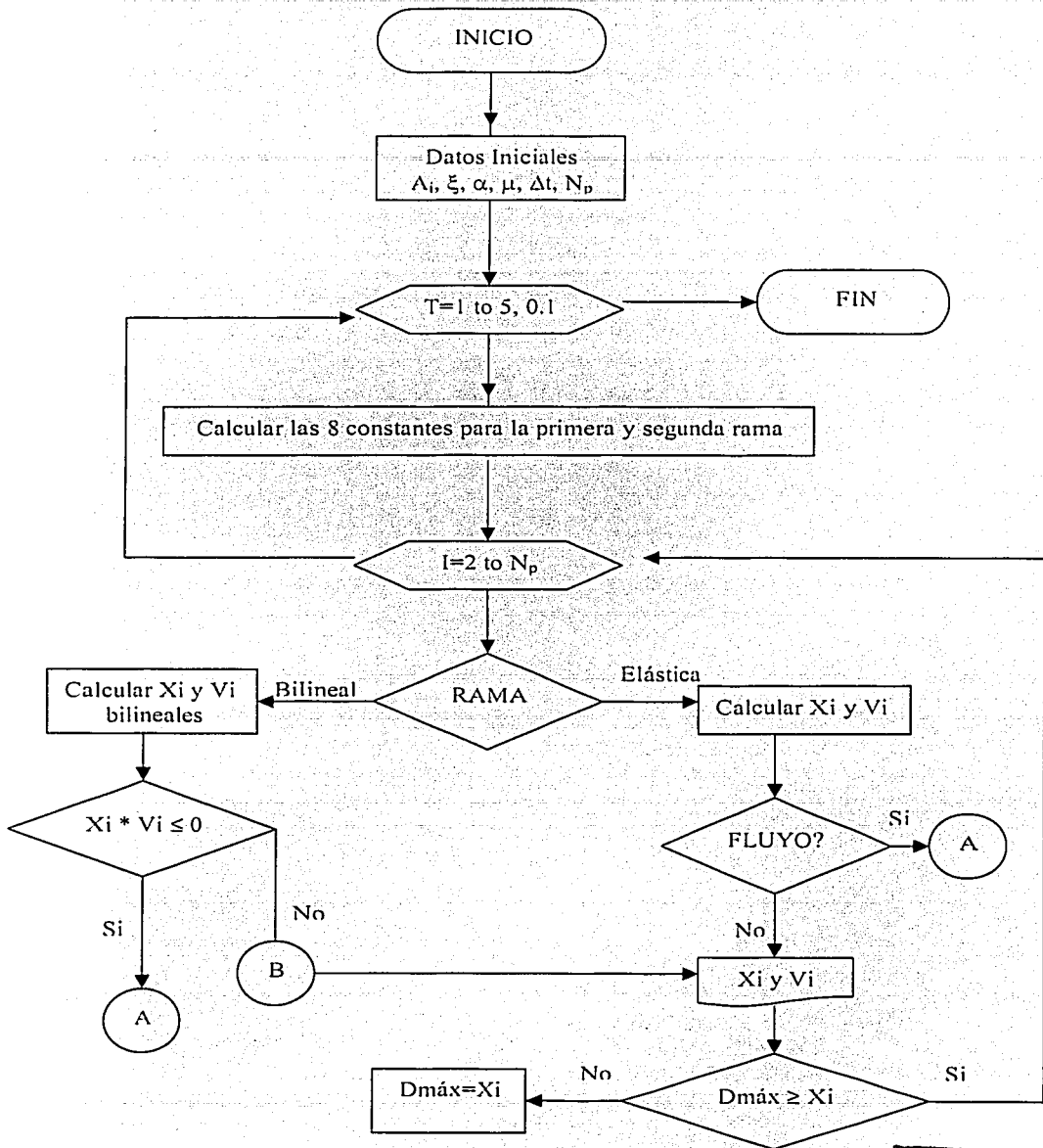
If ETA(I) > EMAXA Then EMAXA = ETA(I)

If FLUEN(I) > EHM Then EHM = FLUEN(I)

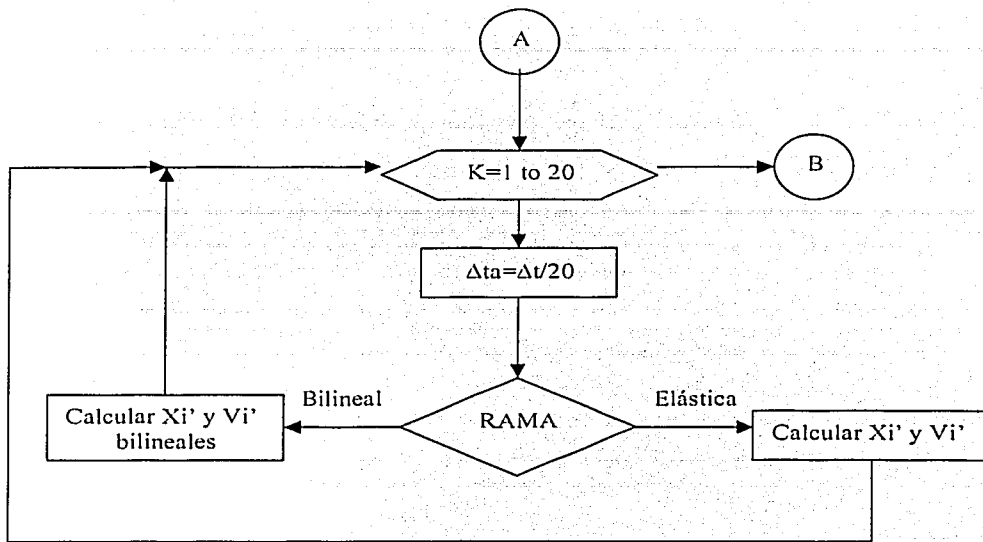
End Sub

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA RBENERGÍA



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

BIBLIOGRAFÍA

Akbas B., Shen J. y Hao H. (2001) "Energy Approach in performance-based design of steel moment resisting frames for basic safety objective", The Structural Design of Tall Buildings, Vol 10, pp. 193-217.

Akiyama H. (1980), "Earthquake-Resistant limit-state design for buildings", University of Tokyo Press, Japan.

Akiyama H. (1988) "Earthquake resistant design based on the energy concept", 9th World Conference on Earthquake Engineering.

Arroyo-Espinoza D. and Terán-Gilmore A. (2002) "Use of strength reduction factors to account for low cycle fatigue", 7th U.S. National Conference on Earthquake Engineering.

Bojórquez E. (2002) "RBENERGÍA" Programa para obtener la energía sísmica en sistemas de un grado de libertad con comportamiento bilineal.

Bojórquez E., Ruiz S., Rito A. y Pech E. (2003) "Reducción de fuerzas Sísmicas considerando la fatiga de bajo ciclaje", aceptado para el XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica.

Chai Y. H., Fajfar P. and Romstad K. M. (1998) "Formulation of duration-dependent inelastic seismic design spectrum", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol 124, No. 8, pp. 913-921.

Chopra A. K. (1995) "Dynamics of Structures", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Cosenza E., Manfredi G. y Ramasco R. (1993) "The use of damage functional in earthquake engineering: a comparison between different methods", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 22, pp. 855-868.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Decanini L. D. y Mollaioli F. (1998) "Toward the definition of the relation between hysteretic and input energy", 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering.

Decanini L. D. 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.

Fajfar P. (1992) "Equivalent ductility factors, taking into account low-cycle fatigue", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 21, 837-848.

Fajfar P. y Fischinger M. (1992) "On energy demand and supply in SDOF systems", Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings, Elsevier Applied Science.

Fajfar P. y Vidic T. (1994) "Consistent Inelastic Design Spectra: Hysteretic and Input Energy", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 23,5, pag. 523-537, mayo.

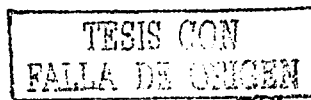
Housner G. W. (1956) "Limit design of structures to resist earthquakes", Memorias del Primer Congreso Mundial de Ingeniería Sísmica, Berkeley, California, pp 5-1 a 5-13.

Huerta G. B. (2002) "Análisis de la energía sísmica durante movimientos fuertes y sus características en el valle de México", Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería (Estructuras) DEPEFI – UNAM.

Krawinkler H. y Nassar A. A. (1992) "Seismic design based on ductility and cumulative damage and capacities", Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Building, Elsevier Applied Science.

Kuwamura H. y Galambos, T. V. (1989) "Earthquake load for structural reliability" Journal of Structural Engineering, 115, 6, pag. 1446-1462, junio.

Lawson R. S. y Krawinkler, H. (1995) "Cumulative damage potencial of seismic ground motion" Proceedings, 10th European Conference on Earthquake Engineering, A. A. Balkema, Rotterdam, pages 1079-1086, Vol. 2.



Leelataviwat S., Goel S. C. y Stojadinovic B. (1998) "Drift and yield mechanism based seismic design of structures", 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering.

Manfredi, G. (2001) "Evaluation of seismic energy demand", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 30, 4 Apr., pages 485-499.

Miranda E. y Bertero V. V. (1994) "Evaluation of strength reduction factors for earthquake-resistant design", Earthquake Spectra, Vol 10, No. 2, pp. 357-379.

Nau J. M. (1983) "Computation of inelastic response spectra", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol 109, No. 1, pp. 279-288.

Ordaz M., Reinoso E. y Pérez-Rocha L. (1996) "Criterios De diseño sísmico: consideraciones para suelos blandos", Revista de Ingeniería Sísmica No. 53.

Ordaz M. y Pérez-Rocha L. (1998) "Estimation of strength-reduction factors for elastoplastic systems: a new approach ", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 27, 9 Sept., pp. 889-901.

Ordaz M., Miranda E. y Avilés J. (2000) "Propuesta de espectros de diseño por sismo para el DF", VI Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica.

Ordaz M. (2002-2003) Comunicación personal.

Park Y. J. y Ang A. H. (1985) "Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol 111, No. ST4, pp. 740-757.

Pech R. (2003) "Obtención de demanda de ductilidad equivalente en estructuras sometidas a excitaciones sísmicas registradas en diferentes zonas del valle de México", Tesis para obtener el grado de Ingeniero Constructor en la Escuela Militar de Ingenieros.

Ridell R. y García J. (2001) "Hysteretic energy spectrum and damage control", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 30, 1791-1816.

Rito A. (2003) "Cálculo de la relación existente entre la energía histerética y la energía sísmica de entrada en marcos de acero, diseñados conforme al Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias", Tesis para obtener el grado de Ingeniero Constructor en la Escuela Militar de Ingenieros.

Rivera S. J. L. (2002-2003) Comunicación personal.

Rodríguez M. E. (1997) "Una medida de la capacidad destructiva de terremotos", Revista de Ingeniería Sísmica, No. 55, pp. 37-59.

Rosas H, Ruiz S. E. y Díaz O. (1989) "Construcción de espectros inelásticos a partir de registros en la ciudad de México", Memorias VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Acapulco, 1989, pp. A77-A86.

Ruiz S. (2002-2003) Comunicación personal.

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

Terán-Gilmore A. (2001) "Consideraciones de uso de la energía plástica en el diseño sísmico", Revista de Ingeniería Sísmica.

Uang y Bertero (1990) "Evaluation of seismic energy in structures", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 19 pp. 77-90.

Villa, V C y S E Ruiz (2001) "Influencia de la intensidad en las características de los movimientos registrados en el valle de México", Informe elaborado para la Secretaría de Obras y Servicios de D.F., Instituto de Ingeniería, UNAM.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN