

01161

2



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

---

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERIA**

**"FACTORES DE REDUCCION PARA EL DISEÑO  
DE SISTEMAS PASIVOS DE DISIPACION DE  
ENERGIA"**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERIA**

**( ESTRUCTURAS )**

**P R E S E N T A**

**DANNY ARROYO ESPINOZA**

**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. AMADOR TERAN GILMORE**

**MEXICO, D. F.**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, NOV. 2001**

298736



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.

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	2
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	4
<b>1. DISIPACIÓN DE ENERGÍA</b> .....	5
1.1 Balance de energía.....	5
1.2 Mecanismos adicionales de disipación de energía.....	7
1.3 Uso de disipación de energía.....	11
1.4 Comportamiento de sistemas disipadores de energía.....	12
<b>2. FACTORES DE REDUCCIÓN</b> .....	20
2.1 Normas técnicas complementarias del RCDF para el diseño por sismo.....	20
2.2 Definición.....	21
2.3 Estudios previos.....	21
<b>3. EFECTO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA EXCITACIÓN SÍSMICA Y DE LAS PROPIEDADES ESTRUCTURALES</b> .....	30
3.1 Alcance paramétrico.....	30
3.2 Efecto de las características de la excitación sísmica.....	35
3.3 Efecto de las propiedades estructurales.....	36
<b>4. FACTORES DE REDUCCIÓN PARA SUELO FIRME</b> .....	40
4.1 Alcance paramétrico.....	40
4.2 Factores de reducción promedio.....	41
4.3 Regresión.....	48
4.4 Comentarios.....	54
<b>5. FACTORES DE REDUCCIÓN PARA SUELO BLANDO</b> .....	70
5.1 Alcance paramétrico.....	70
5.2 Factores de reducción promedio.....	76
5.3 Regresión.....	78
5.4 Comentarios.....	82
<b>6. OBSERVACIONES FINALES Y CONCLUSIONES</b> .....	98
<b>REFERENCIAS</b> .....	100

## INTRODUCCIÓN

Varios eventos sísmicos recientes han puesto en evidencia algunos de los problemas asociados al uso de sistemas estructurales tradicionales para resistir los efectos de las excitaciones sísmicas. Como consecuencia, el uso de sistemas estructurales innovadores ha recibido un gran impulso. Dentro de este contexto, una de las opciones más atractivas que se han desarrollado es la adición de amortiguamiento a las estructuras por medio de uso de sistemas pasivos de disipación de energía. Dado que los códigos actuales de diseño sísmico no contemplan explícitamente el diseño de este tipo de sistemas, es necesario desarrollar herramientas analíticas que permitan un diseño sísmico racional de sistemas de disipación de energía.

Esta tesis presenta un estudio paramétrico de la respuesta de sistemas de un grado de libertad con comportamiento elastoplástico perfecto y diferente grado de amortiguamiento. A partir de este estudio se establecen expresiones que permiten estimar el valor del factor que debe utilizarse para reducir el espectro elástico de resistencia para un coeficiente de amortiguamiento del cinco por ciento, con el propósito de establecer las fuerzas sísmicas de diseño para sistemas con diferente capacidad de deformación plástica y de disipación de energía viscosa. Se ofrecen expresiones para suelo firme y suelo blando, donde el valor del factor de reducción se estima en función del periodo de la estructura, de su demanda máxima de ductilidad y de su coeficiente equivalente de amortiguamiento.

En el capítulo uno se introduce el concepto de disipación de energía. Además, se discuten las condiciones que dan lugar a un uso eficiente de este recurso para plantear un mecanismo sismorresistente confiable y se comentan las metodologías que pudieran seguirse para estimar las fuerzas de diseño para sistemas disipadores de energía.

En el capítulo dos se introduce el concepto de factor de reducción de resistencia. Se discute el uso de este concepto dentro del contexto de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, y se presenta la definición adoptada en esta tesis para dicho concepto. Finalmente, se presenta una revisión de estudios previos en este tema.

En el capítulo tres se identifica, a partir del estudio de la respuesta de sistemas de un grado de libertad con comportamiento elastoplástico perfecto ante la acción de varias familias de sismos sintéticos, qué características de la excitación sísmica y las características mecánicas de la estructura tienen una influencia importante en el valor del factor de reducción.

En el capítulo cuatro se presenta una expresión para estimar el factor de reducción correspondiente a estructuras sujetas a excitaciones generadas en suelo firme. Las expresiones

propuestas se basan en el estudio de la respuesta de sistemas de un grado de libertad con comportamiento elasto-plástico perfecto ante acelerogramas registrados, durante eventos sísmicos recientes, en sitios de terreno firme ubicados en diferentes zonas de la República Mexicana (en particular, en la costa del Pacífico).

En el capítulo cinco se presenta una expresión para estimar el factor de reducción correspondiente a estructuras sujetas a excitaciones generadas en suelo blando. Las expresiones propuestas se basan en el estudio de la respuesta de sistemas de un grado de libertad ante acelerogramas registrados, durante eventos sísmicos recientes, en sitios ubicados en la zona del lago de la Ciudad de México.

Finalmente, en el capítulo seis se presenta una serie de conclusiones y recomendaciones. Destacan entre ellas la necesidad de actualizar las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo del Distrito Federal.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Dr. Amador Terán Gilmore por la dirección de este trabajo, sin la cual no hubiera sido posible la realización de esta tesis. Por su apoyo, sus consejos y los conocimientos que pacientemente me ha transmitido durante estos años.

A mis sinodales: Dra. Sonia E. Ruiz, Dr. Mario Ordaz, Dr. Arturo Tena y Dr. Eduardo Reinoso, por sus valiosas opiniones y sugerencias las cuales permitieron mejorar este trabajo.

Al área de estructuras de la Universidad Autónoma Metropolitana -Azcapotzalco por el apoyo y las facilidades que me otorgó para la realización de este trabajo.

A mis padres, ya que sin su soporte no hubiera podido alcanzar esta meta. Por los principios que sabiamente han tratado de inculcarme, algunos de los cuales son parte importante en mi forma de ver la vida.

# CAPÍTULO 1

## DISIPACIÓN DE ENERGÍA

### 1.1 BALANCE DE ENERGÍA.

Desde hace tiempo, el diseño sismorresistente de las estructuras se ha basado en el hecho de que la resistencia lateral que debe proveerse a una estructura para que sobreviva niveles mayores de excitación sísmica, disminuye conforme aumenta la capacidad de deformación plástica de la misma. Con base en lo anterior, el diseño sísmico de las estructuras estándar contempla la posibilidad de proporcionarles una capacidad importante de deformación plástica, como una forma de mantener su resistencia lateral de diseño dentro de un intervalo de valores que hagan que su diseño sea asequible desde un punto de vista económico.

La incursión de una estructura en su intervalo de comportamiento plástico implica la presencia de disipación de energía plástica. Actualmente, los planteamientos de diseño especificados en los reglamentos no contemplan directamente la energía disipada, pero se ha encontrado que una forma racional de diseñar estructuras sismorresistentes consiste en tomar en cuenta la energía que la excitación sísmica introduce en la estructura y las diferentes formas en que se disipa en ella, sobre todo con el fin de controlar el fenómeno de fatiga de bajo ciclaje (Terán, 1996).

La ecuación del balance de la energía en la estructura sismorresistente, y en general los conceptos energéticos, permiten un entendimiento de lo anterior. De manera simple, podría decirse que existe un incremento significativo en la capacidad de disipación de energía de la estructura cuando esta tiene la posibilidad de incurrir de manera importante en su intervalo plástico de comportamiento; y que esta disipación se constituye en un amortiguamiento adicional en la estructura que favorece el control de su respuesta sísmica. Considere la ecuación de movimiento de un sistema de un grado de libertad (S1GL) con amortiguamiento viscoso y sujeto a una excitación sísmica:

$$m\ddot{v} + c\dot{v} + f_s = 0 \quad (1.1)$$

En la ecuación (1.1),  $m$  es la masa del S1GL,  $c$  es el coeficiente de amortiguamiento,  $f_s$  es fuerza restauradora,  $v$  es el desplazamiento de la masa relativo al terreno,  $v_g$  es el desplazamiento del terreno y  $v_t = v + v_g$  es el desplazamiento absoluto de la masa. Integrandó la ecuación (1.1) con respecto a  $v(t)$  es posible obtener la siguiente ecuación (Uang y Bertero, 1990)

$$\frac{m(\dot{v}_t)^2}{2} + \int c\dot{v}dv + \int f_s dv = -\int m\dot{v}_t dv_g \quad (1.2)$$

La ecuación (1.2) puede expresarse, término a término, de la siguiente forma:

$$E_K + E_{H\xi} + E_a = E_I \quad (1.3)$$

En la ecuación (1.3), el término  $E_K$  representa la energía cinética en el sistema para un tiempo dado  $t$ ; y  $E_{H\xi}$  la energía disipada por mecanismos viscosos desde el inicio de la excitación hasta el tiempo  $t$ . El término  $E_a$  puede expresarse a su vez como la suma de la energía plástica disipada por el sistema desde el inicio de la excitación hasta el tiempo  $t$  ( $E_{H\mu}$ ) y la energía elástica de deformación almacenada en el sistema en el tiempo  $t$  ( $E_{ES}$ ). De tal manera que la ecuación (1.3) puede expresarse como:

$$E_I = E_K + E_{ES} + E_{H\xi} + E_{H\mu} \quad (1.4)$$

Las ecuaciones (1.2) y (1.3) dejan ver que el término  $E_I$  tiene un significado físico bien definido, ya que es el trabajo realizado por el cortante basal en la cimentación del sistema con respecto al desplazamiento del terreno (Uang y Bertero, 1990). Si la ecuación de movimiento se expresa en términos del desplazamiento relativo, la ecuación (1.2) se transforma en (Uang y Bertero, 1990):

$$\frac{m(\dot{v})^2}{2} + \int c\dot{v}dv + \int f_s dv = -\int m\dot{v}_g dv_g \quad (1.5)$$

y la ecuación (1.3) en:

$$E'_I = E'_K + E_{ES} + E_{H\xi} + E_{H\mu} \quad (1.6)$$

donde  $E'_I$  y  $E'_K$  se definen como las energías de entrada y cinética relativas, respectivamente. Desde un punto de vista físico,  $E'_I$  representa el trabajo realizado por la fuerza estática equivalente sobre la estructura de base fija; es decir, este planteamiento no considera el movimiento de cuerpo rígido del sistema. El término  $E'_I$  pudiera utilizarse durante el diseño sísmico de una estructura, ya que los desplazamientos de cuerpo rígido de la misma no se ven reflejados en daño estructural. Se ha encontrado que para un intervalo de periodos que cubre a la mayoría de las estructuras (0.3 a 5.0 segundos), los valores de  $E_I$  y  $E'_I$  resultan ser prácticamente iguales (Uang y Bertero, 1990).

Las ecuaciones (1.4) y (1.6) permiten plantear que parte de la energía que entra en un sistema estructural durante una excitación sísmica se almacena en él ( $E_{ES} + E_K$ ), y que parte se disipa y sale del sistema ( $E_{H\mu} + E_{H\xi}$ ). Considerando la igualdad planteada en las ecuaciones (1.4) y (1.6), puede plantearse que para una  $E_I$  constante, un aumento en la energía que disipa el sistema estructural permite una reducción en el valor de la energía que el mismo debe almacenar durante la excitación sísmica. Dado que la energía que puede almacenarse en un sistema estructural depende, entre otras cosas, de su resistencia lateral,

puede concluirse que un aumento en la capacidad de disipación de energía, permite la reducción la resistencia lateral necesaria para lograr cierto nivel de comportamiento preestablecido. Aunque lo anterior se complica por el hecho de que  $E_f$  cambia de valor con una variación en las propiedades del sistema estructural, el planteamiento anterior provee un entendimiento general al por qué un aumento en la capacidad de deformación plástica de la estructura puede verse reflejada en una disminución de su capacidad resistente necesaria para lograr un comportamiento sísmico adecuado.

Una de las consecuencias de aumentar la capacidad de disipación de energía de las estructuras mediante su incursión en el intervalo plástico de comportamiento, es la aparición de daño estructural importante cuando se les sujeta a niveles mayores de excitación sísmica. Ilustrando esto para estructuras de concreto reforzado, podría plantearse que el ingreso de una estructura de este tipo en su intervalo plástico de comportamiento implica, por lo general, la fluencia del acero longitudinal de los elementos estructurales. La fluencia importante del acero longitudinal a tensión implica la formación de grietas importantes en el concreto, lo que se refleja en una degradación importante de las características mecánicas de los elementos estructurales, particularmente ante la presencia de varios ciclos y reversiones de carga.

Aunque el diseño sísmico se plantea de manera que el nivel de daño en la estructura no resulte en un colapso estructural, este daño puede conducir a elevados costos de reparación y/o a la necesidad de reforzar la estructura después de que ésta se vea sujeta a niveles mayores de excitación sísmica. Por otro lado, permitir que una estructura incurra de manera excesiva en su intervalo de comportamiento plástico puede reflejarse en daño importante en los elementos no estructurales (muros divisorios, elementos de fachadas, etc.) y elementos estructurales, y resultar en deformaciones permanentes excesivas que no fomenten el correcto funcionamiento de la estructura.

Durante eventos sísmicos recientes tales como Northridge (1994) en E.U. y Kobe (1995) en Japón, se observó un nivel significativo de daño en un gran número de edificios estructurados con base en sistemas estructurales tradicionales. Aunque en la mayoría de los casos, la magnitud de daño no fue tal que resultara en colapsos estructurales, este daño se reflejo en altos costos de reparación o reconstrucción de las estructuras (Northridge Reconnaissance Team 1996, Mitchell *et al.* 1996, Bruneau y Yoshimura 1996). A partir de lo anterior, se ha planteado la posibilidad de dar un nuevo enfoque a la disipación de energía dentro del contexto del diseño sismorresistente.

## **1.2 MECANISMOS ADICIONALES DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA**

Recientemente, se ha planteado que una capacidad importante de disipación de energía no necesariamente debe estar ligada a la aparición de daño estructural importante en las estructuras sismorresistentes. Dentro del contexto planteado por las ecuaciones (1.4) y (1.6), se ha discutido la posibilidad de aumentar el amortiguamiento de la estructura, de tal manera que el término  $E_{H\xi}$  tenga un papel más importante en lo que se refiere a su capacidad de disipación de energía. El aumento de  $E_{H\xi}$  lleva a la posibilidad de reducir el

término  $E_{H\mu}$ , y por tanto a la posible reducción del nivel de daño estructural que se presenta en la estructura después de una excitación sísmica intensa. Esto ha dado lugar a la concepción de elementos y sistemas disipadores de energía, lo que a su vez ha dado lugar a nuevas propuestas en el planteamiento de sistemas estructurales innovadores, cuyo objetivo es complementar e incluso sustituir a los sistemas sismorresistentes tradicionales.

Durante el sismo de Northridge (1994), el buen desempeño de estructuras con elementos y sistemas disipadores de energía puso en manifiesto que estos sistemas son una buena opción para mejorar el comportamiento y desempeño sísmico de las estructuras (Northridge Reconnaissance Team 1996). Actualmente, existe una amplia variedad de sistemas disipadores de energía. En este tipo de sistemas se busca que la disipación de energía se concentre en ciertos dispositivos estructurales con alta capacidad de disipación de energía, con lo cual se limita el nivel de daño en los demás elementos del sistema estructural. En caso necesario, estos dispositivos pueden ser reparados o reemplazados fácil y económicamente después de un evento sísmico.

Una forma de clasificar estos dispositivos es de acuerdo a los medios por los que generan la disipación de energía; en el caso de disipadores viscosos y viscoelásticos la disipación de energía se debe al comportamiento mecánico de materiales viscosos o viscoelásticos bajo la excitación sísmica, en cuanto a los disipadores histeréticos la disipación de energía es debido al comportamiento plástico en ciertos elementos, generalmente placas de acero, y finalmente en los disipadores de fricción la disipación de energía se debe al deslizamiento entre juntas de ciertos mecanismos; cada uno de estos tipos de disipadores tiene diferentes características estructurales e intervalo de aplicabilidad. Otra clasificación de los disipadores de energía es de acuerdo a su comportamiento mecánico; los dispositivos cuyo comportamiento depende principalmente de la velocidad y aquellos cuyo comportamiento depende principalmente del desplazamiento, los disipadores viscoelásticos y viscosos quedan clasificados dentro del primer grupo, mientras que los disipadores de histeréticos y de fricción corresponden al segundo grupo.

Se han realizados estudios, tanto experimentales como teóricos, que sugieren que el uso correcto de estos dispositivos resultan en un mejor desempeño sísmico de las estructuras (Aiken *et al.* 1993, Hanson 1993, Tena y Vergara 1997, Badillo 2000). Aunque este tipo de sistemas ya han sido implantados en algunos edificios, todavía es necesario llevar a cabo estudios que permitan su incorporación a la práctica diaria de los despachos de cálculo. En particular, es necesario aumentar el conocimiento que se tiene sobre su comportamiento sísmico, establecer claramente su intervalo de aplicabilidad, y plantear una metodología de diseño que pueda integrarse a los códigos actuales de diseño sismorresistente.

Uno de los aspectos fundamentales en el desarrollo de una metodología moderna de diseño sísmico es establecer espectros de resistencia que permitan estimar las fuerzas sísmicas para el diseño de estos dispositivos y de la estructura que los contiene. Esto lleva, dentro del contexto de la normatividad actual, a la necesidad de plantear factores de reducción que permitan reducir el espectro elástico de resistencia para determinar el espectro de resistencia de diseño. Aún con la implantación de sistemas disipadores de energía es difícil pensar que una estructura estándar pueda permanecer elástica durante el evento sísmico de diseño, ya que el nivel de amortiguamiento requerido para que dicha estructura

permaneciera elástica podría requerir un alto costo económico que no justificara esta condición. Por tanto, resulta conveniente dejar que la estructura incurra un poco dentro de su intervalo de comportamiento no lineal, lo que implica que en algunos casos será necesario establecer una combinación razonable de capacidad de disipación de energía plástica y disipación de energía viscosa a fin de obtener una estructura con un comportamiento sísmico adecuado y que su construcción sea factible desde un punto de vista económico.

En las figuras 1.1 y 1.2 se muestran los espectros de resistencia para acelerogramas representativos de suelo firme (El Centro NS) y de suelo blando (SCT EO). Dado que un espectro de diseño para un sitio dado debe ser representativo de una familia de eventos sísmicos que pueden presentarse en dicho sitio, y que se plantea para un periodo de retorno dado y una probabilidad de excedencia uniforme los espectros mostrados en las figuras 1.1 y 1.2 no pueden considerarse espectros de diseño. Sin embargo, dichas figuras proporcionan una idea del nivel de las demandas de resistencia que pueden presentarse en sitios de suelo firme y de suelo blando, para estructuras con diferentes combinaciones de  $\mu$  y de  $\xi$ . Se muestran los espectros para  $\xi$  de 0.05, 0.10, 0.20 y 0.30.

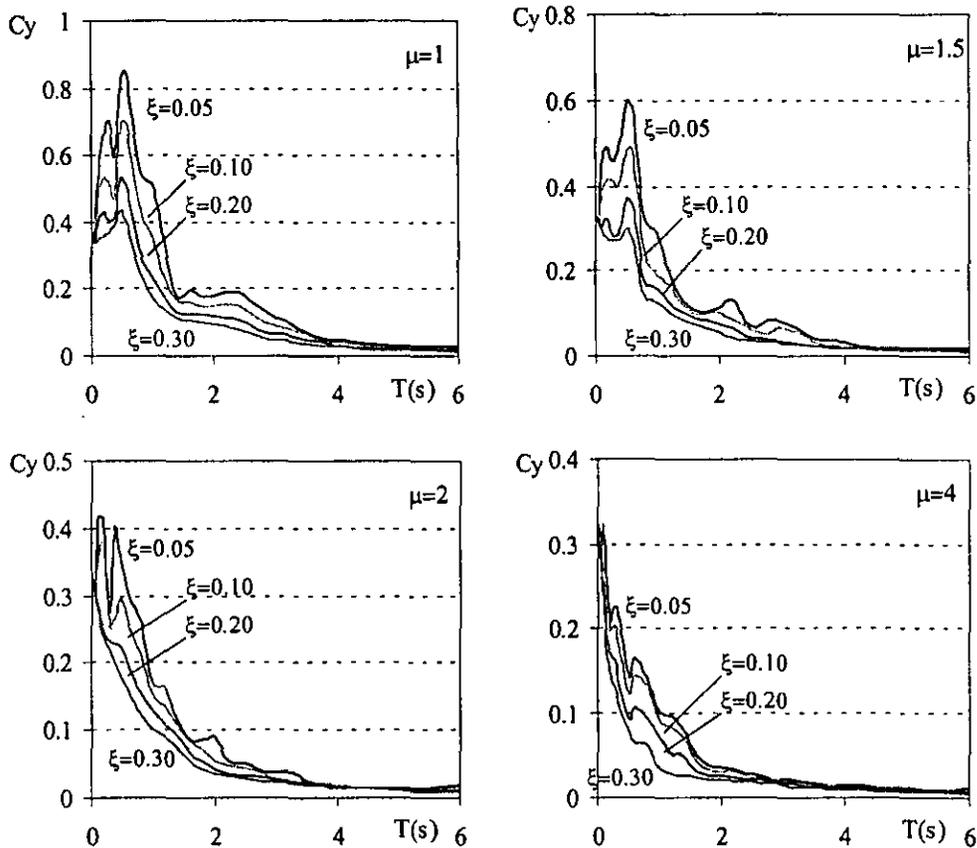


Figura 1.1 Espectros de resistencia para diferentes combinaciones de  $\mu$  y  $\xi$ , acelerograma El Centro NS

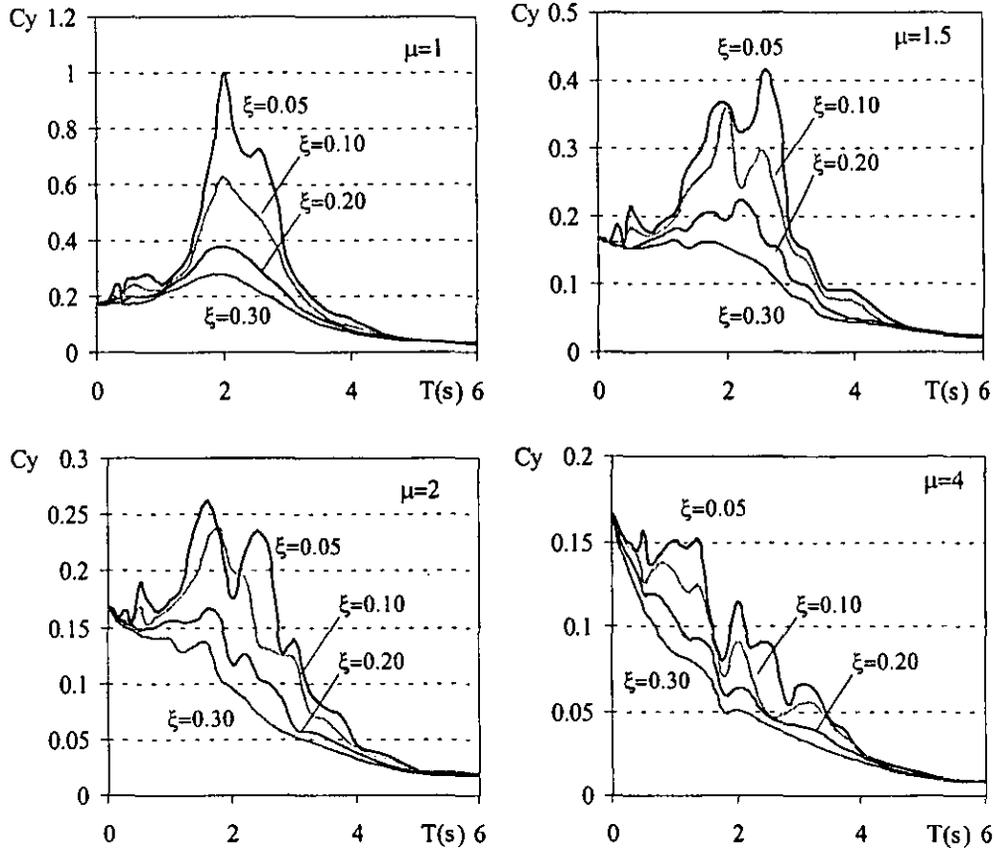


Figura 1.2 Espectros de resistencia para diferentes combinaciones de  $\mu$  y  $\xi$ , acelerograma SCT EO

En las figuras 1.1 y 1.2 se observa que para el caso elástico y un  $\xi$  de 0.20 se tienen valores de resistencia relativamente elevados, particularmente para periodos cercanos al valor de  $T_g$ . Si se deja entrar a los sistemas en su intervalo de comportamiento no lineal ( $\mu$  de 1.5 ó 2) se observa que para un  $\xi$  de 0.20 se obtienen valores de resistencia mucho más razonables desde un punto de vista práctico. También se observa, que para el caso elástico aumentar el valor de  $\xi$  hasta 0.30 conduce a niveles aceptables de resistencia, en un amplio intervalo de valores de  $T$ ; sin embargo puede no resultar económicamente viable dar a un sistema tal valor de  $\xi$ , particularmente en estructuras muy rígidas. Es claro que aún para el caso de sistemas con valores de  $\mu$  alto, aumentar el amortiguamiento conduce a reducciones importantes en la demanda de resistencia, especialmente para periodos cercanos al valor del periodo predominante del terreno. También puede observarse que para valores de  $T$  muy pequeños o muy grandes un aumento en el amortiguamiento no tiene un efecto significativo en la demanda de resistencia.

Con base en los razonamientos expuestos en los párrafos anteriores se puede afirmar que el planteamiento de factores de reducción de resistencia debe contemplar diferentes combinaciones de  $\mu$  y de  $\xi$ , de tal forma que pueda plantearse el diseño de estructuras con diferentes combinaciones de capacidad de deformación plástica y de disipación viscosa de

energía que resulten en un comportamiento sísmico adecuado a un costo económico razonable.

### 1.3 USO DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA

Como en el caso de cualquier sistema estructural, el uso de la disipación de energía por medio de dispositivos especiales tiene ventajas y desventajas (tanto técnicas como económicas), por lo que su posible uso como parte de un sistema estructural sismorresistente requiere de un entendimiento claro del efecto que la disipación de energía tiene en la respuesta sísmica de la estructura. Las figuras 1.3 y 1.4, muestran el efecto que un incremento en el amortiguamiento de la estructura (y por tanto de su capacidad de disipación de  $E_{H\xi}$ ) tiene en las demandas de resistencia elástica de sistemas de un grado de libertad sujetos a excitaciones sísmicas características de suelo firme y suelo blando, respectivamente; se grafica periodo ( $T$ ) contra resistencia normalizada ( $C_y$ ) definida por la relación entre la resistencia de fluencia del sistema ( $F_y$ ) y el peso del sistema ( $W$ ) de acuerdo a la ecuación (1.7). Se muestran espectros para  $\xi=0.02, 0.05, 0.10, 0.20$  y  $0.30$ . En las tablas 4.1 y 5.1 se identifican los acelerogramas utilizados y algunas de sus características más relevantes. (más adelante se discute en detalle dichas características).

$$C_y = \frac{F_y}{W} \quad (1.7)$$

Como puede apreciarse en las figuras 1.3 y 1.4, un aumento en el nivel de amortiguamiento resulta en un decremento importante de la demanda de resistencia elástica impuesta por las excitaciones sísmicas. Para el caso de suelo firme se observa en general que las demandas de resistencia elástica para amortiguamientos del 10%, 20% y 30% son del orden del 80%, 60% y 50%, respectivamente, de la demanda de resistencia elástica para un amortiguamiento del 5%. Esta tendencia se presenta en casi todo el intervalo de periodos considerado, excepto para periodos muy cortos o extremadamente largos, en los que un incremento en el amortiguamiento tiene un impacto mucho menor en las demandas de resistencia elástica.

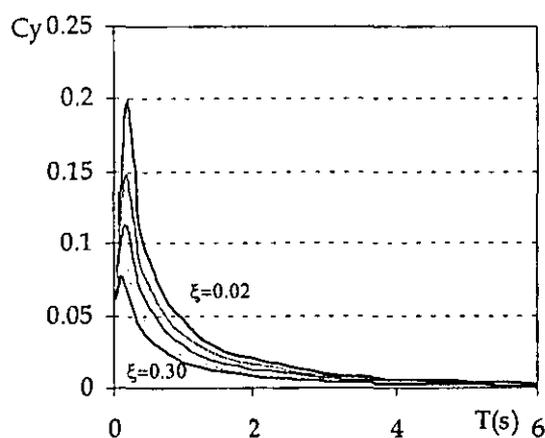


Figura 1.3. Efecto del amortiguamiento en la demanda de resistencia elástica promedio para acelerogramas reales de suelo firme

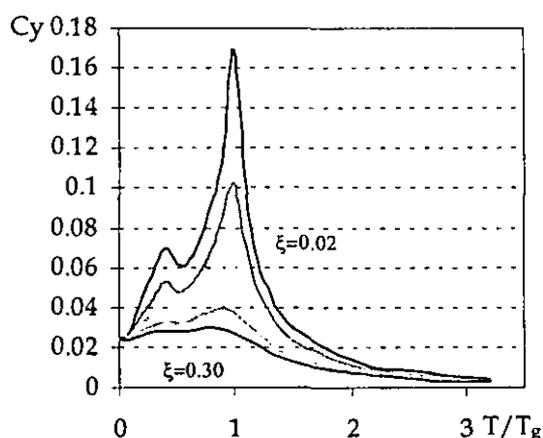


Figura 1.4. Efecto del amortiguamiento en la demanda de resistencia elástica promedio para acelerogramas reales de suelo blando

Dado lo anterior es posible afirmar que para el caso de sistemas sismorresistentes en suelo firme, el uso de sistemas disipadores de energía resultaría en una disminución importante de las fuerzas de diseño, excepto para sistemas con periodos muy cortos (sistemas sumamente rígidos) o sistemas con periodos demasiado largos (sistemas altamente flexibles).

Para el caso de suelo blando, se observa que la reducción en la demanda de resistencia elástica con un incremento en el nivel de amortiguamiento puede ser bastante mayor que la observada para suelo firme. Los sistemas con valores de  $T/T_g$  (donde  $T$  es el periodo de la estructura y  $T_g$  es el periodo dominante de la excitación) igual a uno y amortiguamientos del 10%, 20% y 30% tienen demandas de resistencia elástica que son del orden del 60%, 35% y 25%, respectivamente, del valor de la demanda de resistencia elástica para un amortiguamiento del 5%. Otra diferencia importante respecto al caso de suelo firme es que la efectividad del amortiguamiento disminuye rápidamente cuando los sistemas tienen valores de  $T/T_g$  alejados uno. Dado lo anterior, resulta evidente que en el caso de suelo blando el uso de dispositivos disipadores de energía tendría efectos más favorables en sistemas sismorresistentes con periodos cercanos al periodo predominante del terreno.

Puede concluirse a partir de lo discutido en los párrafos anteriores que la disipación de energía no siempre resulta una opción atractiva como mecanismo sismorresistente, sino que como todos los sistemas estructurales, tanto tradicionales como innovadores, tiene sus ventajas, desventajas e intervalos de aplicabilidad. Por tanto, es necesario poseer un entendimiento claro del efecto que tiene la disipación de energía en el desempeño sísmico de las estructuras, de tal forma que pueda integrarse como una opción más entre las diferentes estrategias de diseño de estructuras sismorresistentes que se usan actualmente.

#### **1.4 COMPORTAMIENTO DE SISTEMAS DISIPADORES DE ENERGÍA**

Como se mencionó en la sección 1.2 de este Capítulo, es posible clasificar a los sistemas de disipación de energía en aquellos que dependen de la velocidad y en los que dependen del desplazamiento, los disipadores de tipo viscoso y viscoelástico quedan comprendidos en la primera categoría mientras que los histeréticos y de fricción corresponden a la segunda categoría. Desde el punto de vista del planteamiento matemático que se hace para el análisis de la respuesta dinámica de sistemas estructurales, los disipadores viscosos y viscoelásticos son los que tienen las características que más se acercan a la hipótesis de considerar amortiguamiento lineal de tipo viscoso, por lo que es posible incorporar de una manera más o menos sencilla los efectos que tienen las propiedades de los elementos disipadores de energía en las propiedades del sistema completo (Hanson 1993).

Una forma considerar el amortiguamiento adicional que los disipadores de energía introducen a un sistema es mediante la obtención de un coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente. Considere la ecuación de equilibrio dinámico para un *SIGL* elástico:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + kx = -m\ddot{u}_g \quad (1.8)$$

Una forma de entender las fuerzas que se generan y actúan en el *SIGL*, así como la cantidad total de energía que se almacena y disipa en el sistema, consiste en considerar simultáneamente las componentes de la fuerza que se genera debido al cambio de su desplazamiento y de su velocidad, como se muestra en la figura 1.5.

Se observa que la fuerza de amortiguamiento y el desplazamiento no están en fase, ya que el máximo en la fuerza de amortiguamiento se presenta antes del máximo en el desplazamiento.

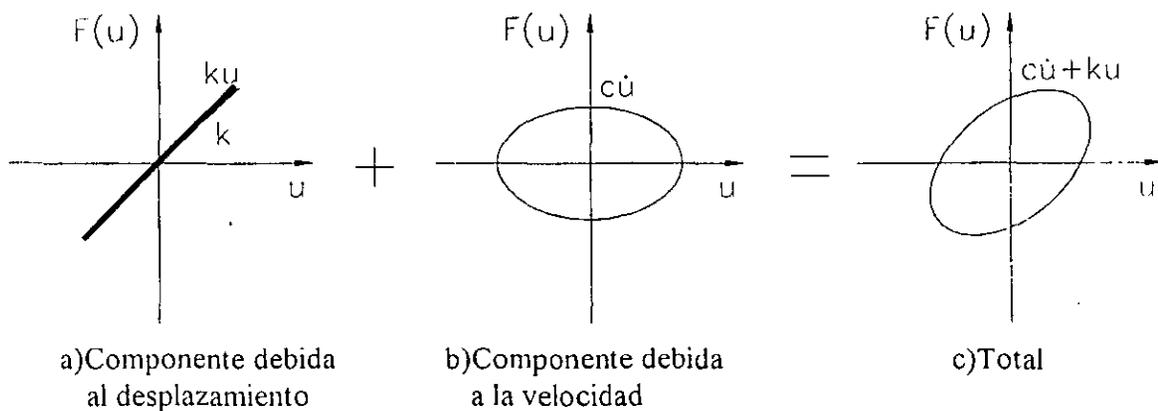


Figura 1.5. Diagrama característico Fuerza-Desplazamiento de un *SIGL* con amortiguamiento viscoso

El valor del coeficiente equivalente de amortiguamiento viscoso para un sistema disipador de energía, se obtiene igualando la energía disipada por ciclo en el dispositivo y la energía disipada por ciclo en un disipador viscoso equivalente (Hanson, 1993), es decir que el área del ciclo histérico en el disipador debe ser igual a el área de un ciclo de histéresis en el disipador viscoso equivalente, como se ilustra en la ecuación (1.9).

$$c_{eq} = \frac{W_D}{\pi \omega u_{max}^2} \quad (1.9)$$

En esta ecuación  $W_D$  es la energía disipada por ciclo en el dispositivo,  $\omega$  es la frecuencia del sistema y  $u_{max}$  es el desplazamiento máximo en consideración. Es claro que el denominador en la ecuación (1.9), que representa a la energía disipada por el sistema viscoso equivalente, solamente sería válido para sistemas sujetos a excitaciones armónicas.

Entre los dispositivos de disipación de energía que existen actualmente pueden encontrarse diferentes tipos de comportamiento histérico que no necesariamente se asemejan al comportamiento histérico mostrado en la figura 1.5, por lo que la ecuación (1.9) no debe considerarse como un planteamiento exacto sino como un modelado razonable de la

capacidad de disipación de energía a través de un nivel de amortiguamiento equivalente. (esta aproximación será mejor mientras el comportamiento histerético de los disipadores se asemeje mas al comportamiento histerético de amortiguamiento viscoso)

Aunque las excitaciones sísmicas a las que realmente puede verse sujeta una estructura no son excitaciones armónicas, se ha encontrado que la ecuación (1.9) conduce a una estimación razonable de la respuesta del sistema (Hanson 1993, Bergman y Hanson 1993). Resulta evidente que:

$$\xi = \frac{c_{eq}}{2\sqrt{km}} \quad (1.10)$$

Con la ecuación anterior es posible obtener un coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente con base en la energía disipada por ciclo en un dispositivo de disipación de energía ya sea viscoso, viscoelástico, histerético o de fricción. Se debe tomar en cuenta que las propiedades del sistema utilizadas en las expresiones 1.4 y 1.5 deben considerar los cambios que la implantación de los disipadores de energía puedan inducir en las propiedades originales del sistema.

Se ha observado que las propiedades de los dispositivos viscosos y viscoelásticos son dependientes de la temperatura, de la frecuencia de la excitación, y de la amplitud de la deformación (Chang *et al.* 1993), por lo que no es fácil establecer una metodología de diseño razonable para este tipo de sistemas. Debe ponerse especial cuidado en el control de la magnitud y el número de ciclos que se imponen en este tipo de dispositivos, ya que bajo ciertas condiciones, cada ciclo se refleja en un aumento importante de temperatura en el disipador y por tanto, en una degradación significativa de su capacidad de disipación de energía.

Las figuras 1.5 y 1.6 ilustran lo anterior con resultados experimentales en disipadores viscoelásticos obtenidos por Bergman y Hanson (1993). En la figura 1.5 se observa estabilidad en las propiedades del disipador, mientras que en la figura 1.6 se observa una degradación importante en la capacidad de disipación de energía debida al incremento en la temperatura provocada por el número de ciclos histeréticos. Por tanto, dentro de una metodología de diseño para este tipo de sistemas disipadores de energía debe tenerse especial atención en el control de la amplitud y del número de ciclos histeréticos a los que pueden verse sujetos.

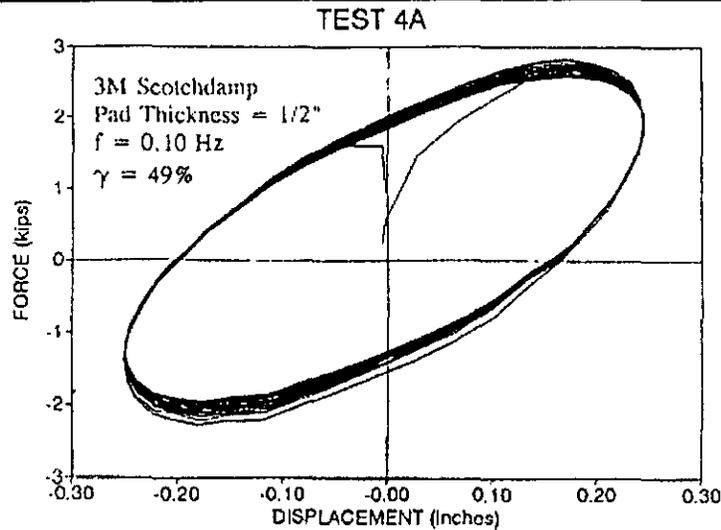


Figura 1.5 Respuesta de un dispositivo viscoelástico de disipación de energía sin degradación de sus propiedades (Bergman y Hanson 1993)

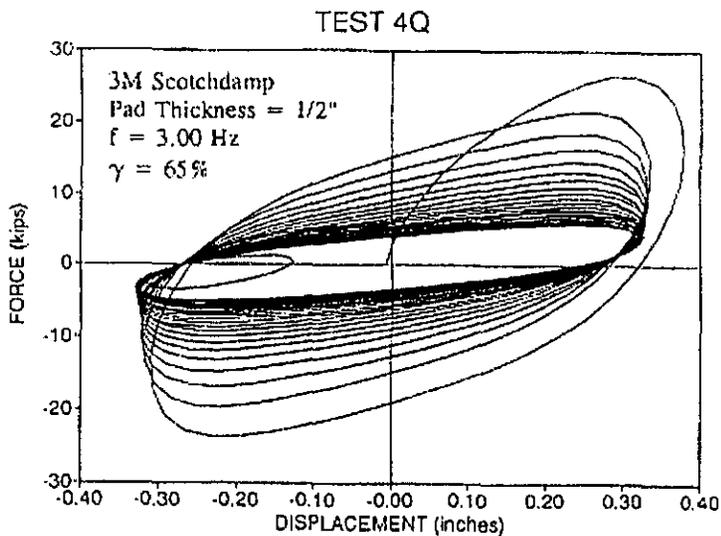


Figura 1.6 Respuesta de un dispositivo viscoelástico de disipación de energía con degradación de sus propiedades (Bergman y Hanson 1993)

Chang *et al.* (1993) han propuesto una metodología de diseño con base en ciertas consideraciones. Las consideraciones más importantes son que se propone que para el diseño de estos sistemas se tomen las propiedades correspondientes a una deformación de 20% de la deformación máxima en el disipador y que se calcule el amortiguamiento equivalente para cada modo de la estructura con el método de la energía modal de deformación, definido por la ecuación (1.11) (Chang *et al.* 1993).

$$\xi_i = \frac{\eta}{2} \left( 1 - \frac{\Phi_i^T K \Phi_i}{\Phi_i^T K_S \Phi_i} \right) \quad (1.11)$$

Donde  $\eta$  es el factor de pérdida, y es una propiedad del disipador utilizado,  $\Phi_i$  es el vector de forma del modo  $i$  de la estructura con disipadores,  $K$  es la matriz de rigidez de la estructura sin disipadores y  $K_S$  es la matriz de rigidez de la estructura con disipadores.

Como se ha discutido anteriormente, uno de los factores que afectan las propiedades del disipador es la amplitud de la deformación, por lo que establecer cuáles son las propiedades que se deben considerar en el diseño conlleva implicaciones importantes dentro del desarrollo de una metodología de diseño. Considerar las propiedades correspondientes a la deformación máxima impuesta por la excitación sísmica pudiera resultar demasiado conservador, ya que dicha deformación máxima no se presenta durante toda la respuesta sino en un intervalo de tiempo, el cual puede ser pequeño en comparación con la duración de la respuesta total. Chang *et al.* (1993) proponen el valor de las propiedades al 20% de la deformación máxima, con base en los resultados observados en su estudio, pero resulta evidente la necesidad de realizar investigaciones encaminadas a establecer de una manera más racional las propiedades mecánicas que deben considerarse en el diseño de sistemas disipadores de energía.

Si no se considera el cambio de la forma modal al incluir disipadores, como en el caso en que la distribución de los disipadores se hace de acuerdo a la rigidez de cada entrepiso de la estructura original, la ecuación (1.11) se simplifica a:

$$\xi_i = \frac{\eta}{2} \left( 1 - \frac{\omega_i^2}{\omega_{Si}^2} \right) \quad (1.12)$$

Donde  $\omega_i$  y  $\omega_{Si}$  son las frecuencias correspondientes al modo  $i$  de la estructura sin disipadores y con disipadores respectivamente. De acuerdo a la ecuación (1.12) si el sistema de disipadores es muy rígido la disipación de energía aumenta considerablemente, ya que dicho sistema disipa cantidades importantes de energía aún para desplazamientos pequeños.

Con base en estos razonamientos Chang *et al.* (1993) , proponen la siguiente metodología de diseño para sistemas viscoelásticos. Cabe mencionar que la evaluación de una metodología de diseño está fuera del alcance de la presente tesis, por lo que únicamente se presenta a manera de justificar y presentar el contexto bajo el cual las expresiones propuestas en esta tesis resultarían útiles dentro de una metodología de diseño.

- 1.- Obtención de las propiedades dinámicas de la estructura.
- 2.- Determinar el nivel de amortiguamiento deseado.
- 3.- Seleccionar la localización de los disipadores.
- 4.- Seleccionar el valor del  $\eta$  y de la rigidez del sistema disipador.
- 5.- Calcular  $\xi$  equivalente
- 6.- Realizar análisis estructural

Las expresiones propuestas en esta tesis pueden ser aplicables en el segundo punto de esta metodología para seleccionar una combinación del nivel de capacidad de deformación

plástica y de amortiguamiento deseado para el diseño (ver discusión incluida al final de la sección 1.2)

Recientemente, las recomendaciones conocidas como FEMA 273 establecen criterios para el diseño de estructuras con dispositivos disipadores de energía, donde se proponen métodos de análisis y requerimientos que se deben cumplir en el diseño de este tipo de sistemas estructurales. A continuación se presenta una breve descripción del planteamiento del FEMA 273 para calcular el coeficiente de amortiguamiento equivalente. Para una revisión más detallada de los procedimientos de análisis y diseño se puede consultar la sección 9.4 “Passive Energy Dissipation Systems” del documento FEMA 273 (1999).

La sección 9.3.3 “Modeling of Energy Dissipation Devices” clasifica a los sistemas disipadores de energía, en aquellos en los que la respuesta depende del desplazamiento relativo entre sus extremos, y aquellos en los que la respuesta depende de la velocidad relativa.

En cuanto a los métodos de análisis, la sección 9.3.2 “Implementation of Energy Dissipation Devices” limita los análisis lineales a sistemas en los que todos los elementos estructurales, excepto los que formen parte de los dispositivos de disipación de energía, permanezcan en el intervalo de comportamiento elástico y no establece ninguna limitante al uso de métodos de análisis no lineales.

En los análisis lineales las fuerzas laterales son distribuidas entre los diferentes elementos del sistema estructural de acuerdo a su rigidez relativa elástica. Estos análisis pueden ser estáticos, en los que las fuerzas sísmicas son modeladas como cargas estáticas equivalentes aplicadas en cada entrepiso, o dinámicos. Las fuerzas laterales aplicadas en la estructura pueden ser determinadas mediante un análisis paso a paso utilizando una familia de acelerogramas de diseño, un análisis espectral o un método estático simplificado.

Los análisis no lineales permiten una evaluación directa de los niveles de las demandas inelásticas en los elementos estructurales. Se permiten dos tipos de análisis; análisis estático no lineal y análisis dinámico no lineal. El análisis estático no lineal consiste en un análisis no lineal de la estructura sujeta a desplazamientos laterales monotónicamente crecientes. El análisis dinámico no lineal consiste en un análisis no lineal paso a paso de la respuesta de una estructura sujeta a una familia de acelerogramas de diseño.

Para el caso de análisis estático lineal de sistemas disipadores de energía que dependen del desplazamiento o de la velocidad, el coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente se calcula conforme a lo siguiente.

$$\beta_{eff} = \beta + \frac{\sum_j W_j}{4\pi W_k} \quad (1.13)$$

Donde  $\beta$  es el amortiguamiento del sistema estructural sin disipadores,  $W_j$  es el trabajo realizado por el disipador  $j$  durante un ciclo correspondiente a un desplazamiento de

entrepiso  $\delta_i$ , y  $W_K$  es la energía máxima de deformación en el marco, definida por la ecuación (1.14).

$$W_K = \frac{1}{2} \sum_i F_i \delta_i \quad (1.14)$$

En la ecuación 1.14  $F_i$  es la fuerza de inercia en el entrepiso  $i$ .

El trabajo realizado por un disipador viscoso lineal en un ciclo completo de carga se determinará con la ecuación (1.15)

$$W_j = \frac{2\pi^2}{T} C_j \delta_{ij}^2 \quad (1.15)$$

En donde  $T$  es el periodo fundamental de la estructura incluyendo el efecto de los disipadores de energía,  $C_j$  es la constante de amortiguamiento en el disipador  $j$  y  $\delta_{ij}$  es el desplazamiento relativo entre los extremos del disipador  $j$ . Para dispositivos con amortiguamiento viscoso lineal se podrá calcular el valor del coeficiente de amortiguamiento equivalente mediante la ecuación (1.16).

$$\beta_{eff} = \beta + \frac{T \sum_j C_j \cos^2 \theta_j \phi_{ij}^2}{4\pi \sum_i \left( \frac{w_i}{g} \right) \phi_i^2} \quad (1.16)$$

En la ecuación (1.16)  $\theta_j$  es el ángulo de inclinación del disipador  $j$  con la horizontal,  $\phi_{ij}$  es el desplazamiento relativo debido al primer modo entre los extremos del disipador  $j$ ,  $w_i$  es el peso reactivo del piso  $i$  y  $\phi_i$  es el desplazamiento debido al primer modo en el piso  $i$ .

Para el caso de análisis dinámicos lineales para disipadores que dependen de la velocidad, el coeficiente de amortiguamiento equivalente para el modo  $m$  se calculará con la ecuación (1.18).

$$\beta_{eff-m} = \beta_m + \frac{\sum_j W_{mj}}{4\pi W_{mK}} \quad (1.18)$$

Donde  $\beta_m$  es el amortiguamiento del modo  $m$  den el sistema estructural sin disipadores,  $W_{mj}$  es el trabajo realizado por el disipador  $j$  durante un ciclo correspondiente a un desplazamiento modal de entrepiso  $\delta_{mi}$ , y  $W_{mK}$  es la energía máxima de deformación en el marco en el modo  $m$ , definida por la ecuación (1.19).

$$W_{mK} = \frac{1}{2} \sum_i F_{mi} \delta_{mi} \quad (1.19)$$

En la ecuación (1.19)  $F_{mi}$  es la fuerza de inercia horizontal del modo  $i$  en el entrepiso  $i$ . Mientras que el término  $W_{mj}$  se determina con la ecuación (1.20).

$$W_{mj} = \frac{2\pi^2}{T_m} C_j \delta_{mj}^2 \quad (1.20)$$

Donde  $T_m$  es el periodo del modo  $m$  incluyendo el efecto de los disipadores de energía,  $C_j$  es la constante de amortiguamiento en el disipador  $j$  y  $\delta_{mj}$  es el desplazamiento modal relativo entre los extremos del disipador  $j$ .

Cabe mencionar que debe tenerse cuidado si se desea aplicar los requerimientos que establece el FEMA 273 a el caso de estructuras situadas en el D.F., ya que como ha sido ampliamente reconocido, las propiedades de los disipadores de energía dependen de la frecuencia de la excitación, de la amplitud de la deformación en el disipador y de la temperatura (Chang *et al.* 1993, Bergman *et al.* 1993). Dado que en la mayoría de los estudios realizados para proponer las expresiones del FEMA se han utilizado acelerogramas registrados en suelos firmes, dichas expresiones pudieran no ser directamente aplicables a estructuras ubicadas en suelos blandos, los cuales presentan duraciones y contenidos de frecuencias muy diferentes. Es necesario realizar estudios que tomen en cuenta las condiciones se presentan en suelos blandos para permitir el desarrollo de una metodología de diseño, que pueda ser incorporada a los códigos de diseño nacionales.

En los criterios de modelación de disipadores de energía descritos en este Capítulo el efecto de los sistemas de disipación de energía se toma en cuenta mediante un amortiguamiento viscoso equivalente. Esta no es la única forma existe de resolver el problema, Esteva y Veras (1998) han propuesto un criterio de diseño para sistemas de disipación histeréticos en la que el efecto de los disipadores se considera mediante una ductilidad equivalente. Cabe mencionar que bajo ese contexto, las expresiones propuestas en esta tesis no serían aplicables.

## CAPÍTULO 2 FACTORES DE REDUCCIÓN

### 2.1. NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO POR SISMO

Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTS-95) del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal especifican en su Sección 4, titulada REDUCCIÓN DE FUERZAS SÍSMICAS, lo siguiente: “Con fines de diseño las fuerzas sísmicas para análisis estático y las obtenidas del análisis dinámico modal empleando los métodos que fijan estas normas se podrán reducir dividiéndolas entre el factor reductor  $Q'$ .”

El factor  $Q'$ , que es siempre mayor que uno, se estima en función del factor de comportamiento sísmico  $Q$ , que entre otras cosas, refleja la capacidad de deformación plástica de la estructura. A través de los factores  $Q$  y  $Q'$ , las NTS-95 adoptan una filosofía de diseño que contempla la posibilidad de proporcionar una menor resistencia lateral a la estructura conforme mayor es su capacidad de deformación plástica. Las especificaciones de las NTS-95 contemplan la reducción de las fuerzas sísmicas mínimas requeridas para mantener a la estructura en su intervalo elástico de comportamiento durante el sismo de diseño, dividiéndolas entre el factor de reducción  $Q'$ , para obtener las fuerzas sísmicas de diseño. Considerando que las fuerzas sísmicas elásticas están asociadas a  $Q$  de 1 y a un factor equivalente de amortiguamiento ( $\xi$ ) de 5%, y que las fuerzas reducidas de diseño están asociadas a un  $Q$  mayor que 1 y a ese mismo valor de  $\xi$ , el criterio de la NTS-95 puede expresarse como:

$$FS(Q > 1, \xi = 0.05, T) = FS(Q = 1, \xi = 0.05, T) / Q' (T, Q) \quad (2.1)$$

En la ecuación (2.1), FS denota fuerza sísmica, y  $T$  el periodo fundamental de vibración de la estructura. Note que tanto FS como  $Q'$  son función, además de lo discutido en el párrafo anterior, del valor de  $T$ . Con base en lo anterior, puede definirse el factor  $Q'$ , dentro del contexto de las NTS-95, conforme a lo siguiente:

$$Q'(T_o, Q_o) = FS(Q=1, \xi=0.05, T_o) / FS(Q_o, \xi=0.05, T_o) \quad (2.2)$$

donde  $T_o$  y  $Q_o$  son los valores específicos de  $T$  y  $Q$  asociados a la estructura. Es importante señalar que dentro del contexto de las NTS-95, el factor  $Q'$  no sólo contempla la reducción de las fuerzas sísmicas debido al comportamiento plástico de la estructura, sino que está calibrado para que, a juicio de quienes han elaborado el reglamento, resulte en resistencias

laterales que lleven a las estructuras a un desempeño estructural adecuado. Dado que en el cuerpo de las normas estas consideraciones se hacen de una manera no explícita y poco racional, puede considerarse que la ecuación (2.2) provee una definición razonable del factor  $Q'$  dentro del contexto de las NTS-95.

Recientemente, la propuesta de modificación al reglamento en el Apéndice A toma en cuenta, explícitamente, el efecto de la sobrerresistencia (Ordaz *et al.* 2000). En dicha propuesta el espectro de diseño elástico es reducido por capacidad de deformación plástica, mediante el factor  $Q'$ , y por la sobrerresistencia, mediante un factor  $R$ . Cabe mencionar que en esta tesis los factores de reducción no consideran el efecto de la sobrerresistencia.

## 2.2 DEFINICIÓN

En este trabajo el factor de reducción se definirá con base en la ecuación (2.2). Sin embargo, dicho factor se planteará de manera que considere explícitamente la capacidad de deformación plástica de la estructura y su nivel de amortiguamiento viscoso equivalente. La capacidad de deformación plástica de la estructura se caracterizará por medio de su ductilidad última ( $\mu$ ), definida como el cociente entre el desplazamiento lateral máximo que puede alcanzar cuando se le sujeta a un estado de deformación lateral monotonamente creciente, y su desplazamiento lateral de fluencia. El nivel de amortiguamiento de la estructura se caracterizará por medio del valor de  $\xi$  asociado a ella. Con base en lo anterior, el factor de reducción,  $R_{\mu\xi}$ , se define como:

$$R_{\mu\xi}(\mu_o, \xi_o, T_o) = FS(\mu=1, \xi=0.05, T_o) / FS(\mu_o, \xi_o, T_o) \quad (2.3)$$

donde  $\mu_o, \xi_o, T_o$  son los valores específicos de  $\mu, \xi$  y  $T$  asociados a la estructura para la cual se determina el valor de  $R_{\mu\xi}$ . Aunque la definición de  $R_{\mu\xi}$  adopta el enfoque resumido en la ecuación (2.2), existen dos diferencias fundamentales: primero, el factor  $R_{\mu\xi}$  considera el efecto de  $\xi$ ; y segundo, el factor  $R_{\mu\xi}$  no hace consideración alguna acerca de la sobrerresistencia de la estructura.

## 2.3 ESTUDIOS PREVIOS

Hasta el momento, varios investigadores han planteado expresiones para estimar los factores de reducción asociados a las estructuras sismorresistentes (Wu y Hanson 1989, Rosas *et al.* 1989, Nassar y Krawinkler 1991, Miranda 1993, Riddell 1995, Ordaz y Perez 1998). Normalmente estos estudios se han concentrado en sistemas de un grado de libertad (S1GL), con comportamiento elastoplástico y  $\xi$  de 0.05, sujetos a excitaciones sísmicas características de suelo firme. Dentro de los estudios hechos para excitaciones sísmicas características de suelo blando destacan los de Miranda (1993) y los de Ordaz y Pérez (1998); estos últimos investigadores han estudiado el efecto del valor de  $\xi$  en el valor del factor de reducción. Wu y Hanson (1989) también han estudiado el efecto de  $\xi$  en el valor del factor de reducción. En cuanto a recomendaciones de diseño, el FEMA 273 establece criterios para estimar espectros de resistencia para sistemas con valores de amortiguamiento equivalente diferente a 0.05.

A continuación se presenta una breve revisión de los resultados obtenidos por los investigadores mencionados anteriormente.

**Wu y Hanson (1989)**

Con base en el estudio de la respuesta de *SIGL* con comportamiento elastoplástico perfecto sujetos a un grupo de diez acelerogramas proponen expresiones para estimar la resistencia en sistemas con diferentes combinaciones de ductilidad y amortiguamiento. Cabe mencionar que no se estudia el efecto del tipo de suelo y que en la muestra se incluyeron una mayoría de acelerogramas de suelo firme. La resistencia elástica e inelástica se obtienen conforme a lo siguiente.

$$R_E = \Psi_E G \tag{2.4}$$

$$R_I = \Psi_I G \tag{2.5}$$

En donde  $R_E$  y  $R_I$  son la resistencia elástica e inelástica respectivamente,  $G$  es un parámetro que depende del acelerograma y de la región espectral y  $\Psi$  es un factor que es función de la ductilidad y del amortiguamiento equivalente, definido por la ecuación (2.6).

$$\Psi(\beta, \mu) = p \ln(q\beta) [r\mu - (r-1)]^s \tag{2.6}$$

Donde  $\beta$  es el amortiguamiento equivalente y  $\mu$  es la ductilidad y los valores de  $p$ ,  $q$ ,  $r$  y  $s$  están definidos en la tabla 2.1 y fueron obtenidos mediante un análisis de regresión estadístico.

Tabla 2.1 Valores de  $p$ ,  $q$ ,  $r$  y  $s$  para la ecuación (2.6)

$T(s)$	$p$	$q$	$r$	$s$
0.1	-0.35	0.10	2.9	-0.24
0.5	-0.55	0.42	1.8	-0.56
0.5-3	-0.47	0.52	1.5	-0.70
3	-0.48	0.48	1	-1.0
10	-0.29	0.05	1	-1.0

Con base las definiciones anteriores es posible determinar el factor de reducción, bajo el mismo contexto definido por la ecuación (2.3), dividiendo el valor de  $\Psi$  para amortiguamiento de 0.05 y ductilidad de uno entre valores de  $\Psi$  para diferentes combinaciones de ductilidad y amortiguamiento. La figura 2.1 muestra los valores del factor de reducción obtenidos con las expresiones de Wu y Hanson, para  $\xi$  de 0.05 y de 0.30 y  $\mu$  de 1, 1.5, 2, 3 y 4. Dichas gráficas sugieren que aumentar el nivel de  $\xi$  conduce a un aumento en el valor del factor de reducción, aún para valores altos de ductilidad.

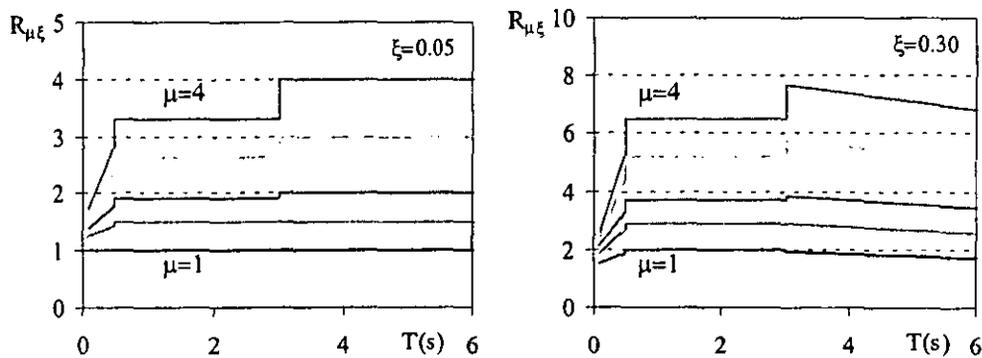


Figura 2.1 Factores de reducción de acuerdo a Wu y Hanson

### Nassar y Krawinkler (1991)

Basados en el estudio de respuesta de *SIGL* sujetos a acelerogramas registrados en el oeste de Estados Unidos propusieron expresiones para estimar el valor del factor de reducción, ecuación (2.7), para sistemas con 5% de amortiguamiento. Se consideraron diferentes parámetros tales como la distancia epicentral, el periodo del sistema, ductilidad y tipo de comportamiento histerético. Se encontró que la distancia epicentral no tiene un efecto significativo en el factor de reducción de resistencia. No se hace referencia explícitamente al efecto de las condiciones de suelo en el factor de reducción, los acelerogramas utilizados en este estudio fueron registrados en sitios de suelo firme y aluvial.

$$R_{\mu} = [c(\mu - 1) + 1]^{1/c} \quad (2.7)$$

Donde  $\mu$  es la capacidad dúctil del sistema y  $c$  es función del periodo del sistema ( $T$ ) y de la relación entre la rigidez de postfluencia y la rigidez inicial del sistema ( $\alpha$ ), y queda definido por la ecuación (2.8)

$$c(T, \alpha) = \frac{T^a}{1 + T^a} + \frac{b}{T} \quad (2.8)$$

Los valores de los factores  $a$  y  $b$  son los que se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Valores de los factores  $a$  y  $b$  en función de la relación entre la rigidez de postfluencia y la rigidez inicial del sistema

$\alpha$	$a$	$b$
0.00	1.00	0.42
0.02	1.00	0.37
0.10	0.80	0.29

En la figura 2.2 se muestran los factores de reducción obtenidos mediante la ecuación (2.7)

para valores de  $\mu$  de 1.5, 2, 3 y 4 y sistemas con comportamiento elastoplástico ( $\alpha=0$ ), líneas continuas, y sistemas con una rigidez de postfluencia de 0.10 de la rigidez inicial, líneas discontinuas. Se observa que el efecto de la rigidez de postfluencia es poco significativo, especialmente para valores bajos de  $\mu$ .

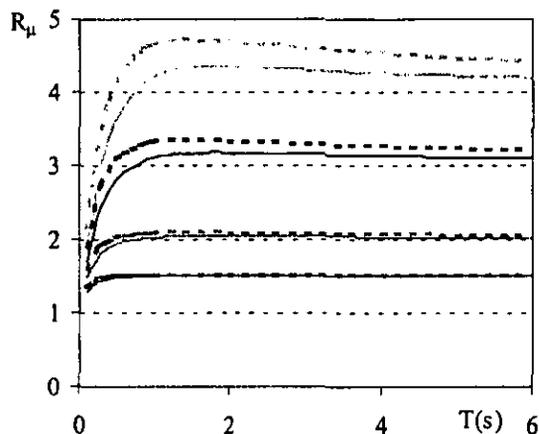


Figura 2.2 Factores de reducción de acuerdo a Nassar y Krawinkler

### Miranda (1993)

Basado en el estudio de la respuesta de S1GL con comportamiento elastoplástico sujetos a un grupo de 124 acelerogramas registrados en diferentes tipos de suelo (roca, suelo blando y depósitos aluviales) propuso expresiones, ecuación (2.9), para determinar el factor de reducción de resistencia para sistemas con 5% de amortiguamiento. Encontró que las condiciones de suelo tienen un efecto importante en la forma de los factores de reducción, por lo que propone expresiones diferentes dependiendo de cada tipo de terreno. Hace notar que en el caso de suelo blando la relación entre el periodo del sistema y el periodo predominante de la excitación tiene un efecto notable en el valor de los factores de reducción, y que la distancia epicentral no tiene un efecto significativo en los factores de reducción.

$$R_{\mu} = \frac{\mu - 1}{\phi} + 1 \geq 1 \quad (2.9)$$

Donde  $\mu$  es la capacidad dúctil del sistema y  $\phi$  es un factor que depende de las condiciones del suelo y está dado por las ecuaciones (2.10) para sitios en roca, (2.11) para sitios en depósitos aluviales y (2.12) para sitios en suelo blando.

$$\phi = 1 + \frac{1}{10T - \mu T} - \frac{1}{2T} \exp \left[ -\frac{3}{2} \left( \ln T - \frac{3}{5} \right)^2 \right] \quad (2.10)$$

$$\phi = 1 + \frac{1}{12T - \mu T} - \frac{2}{5T} \exp \left[ -2 \left( \ln T - \frac{1}{5} \right)^2 \right] \quad (2.11)$$

$$\phi = 1 + \frac{T_g}{3T} - \frac{3T_g}{4T} \exp \left[ -3 \left( \ln \frac{T}{T_g} - \frac{1}{4} \right)^2 \right] \quad (2.12)$$

En la figura 2.3 se muestran los factores de reducción obtenidos para sitios en roca y suelo blando obtenidos con las ecuaciones (2.10) y (2.12).

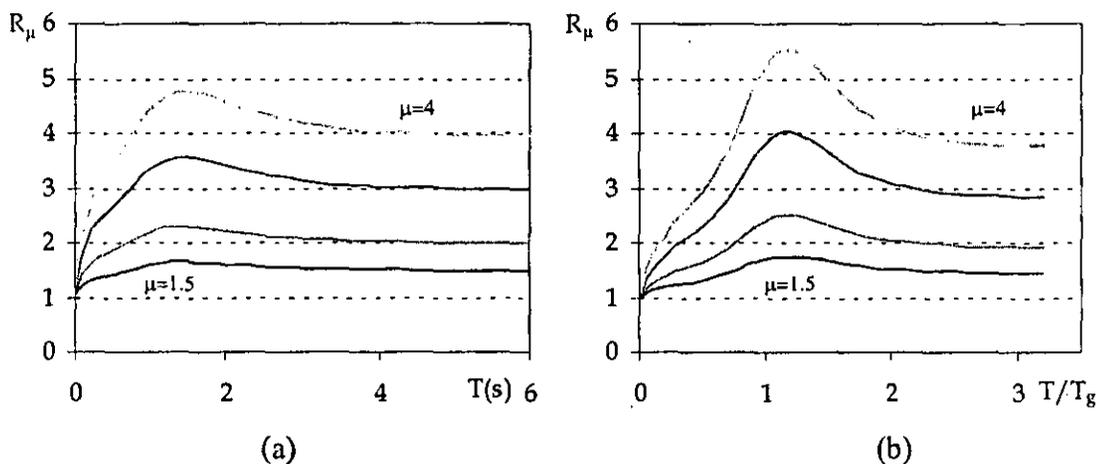


Figura 2.3 Factores de reducción para de acuerdo a Miranda: a)Roca, b)Suelo blando

Cabe mencionar que las expresiones anteriores en el caso de suelo blando, no fueron ajustadas directamente a los valores promedio de los factores de reducción, los valores promedio fueron modificados para tomar en cuenta la incertidumbre en la estimación del periodo del sistema y del periodo predominante de la excitación (Miranda, 1993).

### Ordaz y Pérez (1998)

Basados en el estudio de la respuesta de *SIGL* sujetos a un grupo de 445 acelerogramas registrados en diferentes tipos de terreno proponen una expresión, ecuación (2.13), para estimar el factor de reducción de resistencia. Esta expresión puede ser aplicada a cualquier tipo de suelo y tiene la particularidad de que no depende directamente del periodo del sistema, si no que depende de la relación entre el desplazamiento espectral para el periodo considerado y el desplazamiento máximo del suelo.

$$R_\mu(T) = 1 + \left( \frac{D(T)}{D_{\max}} \right)^{\beta(\mu)} (\mu - 1) \quad (2.13)$$

Donde  $\mu$  es la capacidad dúctil del sistema,  $D(T)$  es el desplazamiento espectral para el

periodo considerado,  $D_{max}$  es el desplazamiento máximo del suelo y  $\beta(\mu)$  es un factor función de  $\mu$  dado por la ecuación (2.14).

$$\beta = 0.388 (\mu - 1)^{0.173} \quad (2.14)$$

En la figura 2.4 se muestran los factores de reducción promedio para  $\xi=0.05$ , obtenidos con la ecuación (2.13), para acelerogramas reales de suelo blando y suelo firme respectivamente. En las tablas 4.1 y 5.1 se identifican los acelerogramas utilizados y algunas de sus características mas relevantes (más adelante se discute en detalle dichas características).

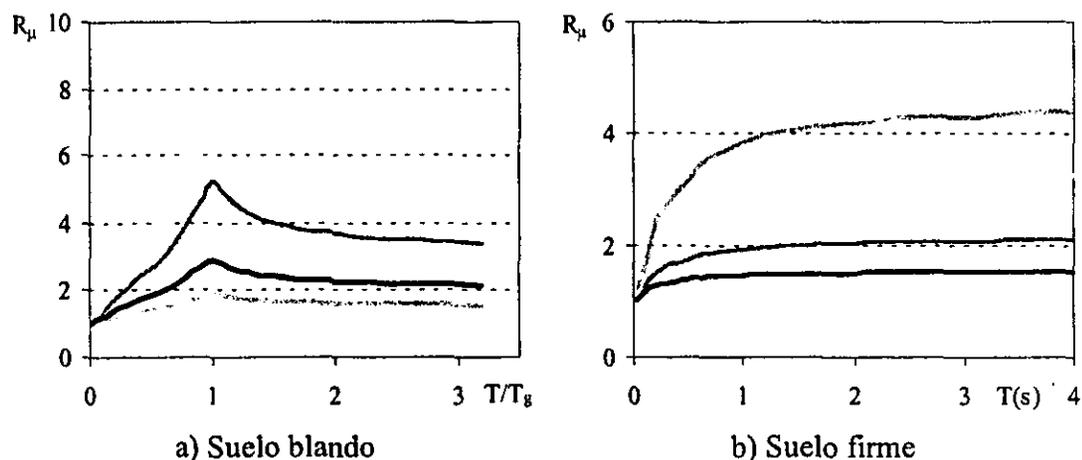


Figura 2.4 Factores de reducción promedio de acelerogramas reales de acuerdo a Ordaz y Pérez,  $\xi=0.05$ .

Las expresiones anteriores pueden ser utilizadas para estimar los factores de reducción de resistencia para valores de amortiguamiento hasta de 10%, calculando los desplazamientos espectrales correspondientes al nivel de amortiguamiento para el cual se desea estimar el factor de reducción.

### FEMA 273

El FEMA 273 en la sección 2.6.1.5 "General Response Spectrum" establece que el espectro elástico de diseño se debe calcular conforme a lo siguiente:

$$S_a = (S_{XS} / B_S) (0.4 + 3T/T_0) \quad (2.15)$$

Para  $0 < T \leq 0.2T_0$

$$S_a = (S_{XI} / (B_1 T)) \quad (2.16)$$

Para  $T > T_0$

En las expresiones anteriores  $S_a$  es la aceleración espectral,  $T$  es el periodo del sistema,  $S_{XS}$

y  $S_{XI}$  son parámetros que dependen de la localización geográfica y del periodo de retorno considerado, los coeficientes  $B_S$  y  $B_I$  son función directa del nivel de amortiguamiento y están definidos en la tabla 2.3, y  $T_0$  se calcula de acuerdo a:

$$T_0 = (S_{XI} B_S) / (S_{XS} B_I) \tag{2.17}$$

Tabla 2.3 Valores de  $B_S$  y  $B_I$  en función del amortiguamiento equivalente

$\beta$ %	$B_S$	$B_I$
<2	0.8	0.8
5	1.0	1.0
10	1.3	1.2
20	1.8	1.5
30	2.3	1.7
40	2.7	1.9
>50	3.0	2.0

En la figura 2.5 se muestran los espectros de aceleración, obtenidos con la expresiones (2.15) y (2.16) para una probabilidad de excedencia de 5% en 100 años y para un sitio de suelo firme en California. Los valores de  $S_{XS}$  y  $S_{XI}$  asociados a este caso son de 1.6g y 0.8 g respectivamente. También se muestran los factores de reducción, calculados dividiendo periodo a periodo la aceleración para el caso de amortiguamiento de 0.05 entre la aceleración para amortiguamientos de 0.10, 0.20 y 0.30.

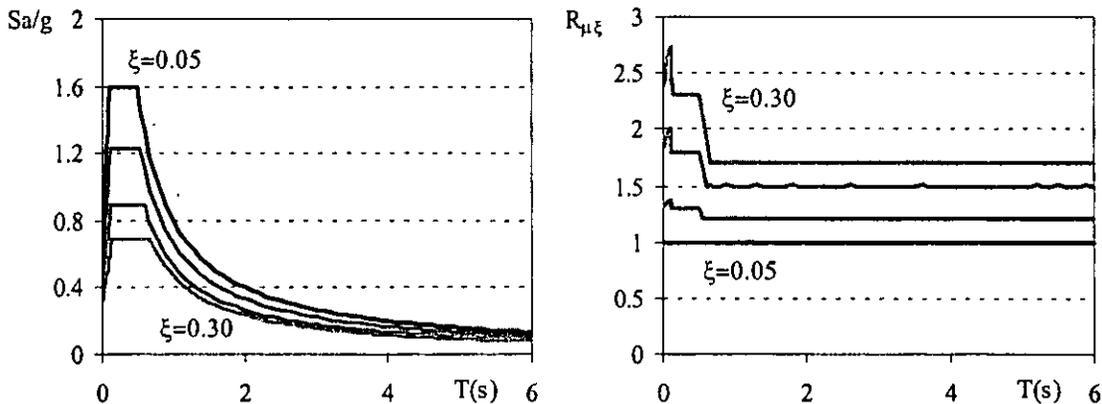


Figura 2.5 Espectros elásticos de aceleración y factores de reducción asociados a dichos espectros para un sitio en suelo firme de acuerdo a expresiones del FEMA 273, probabilidad de excedencia de 5% en 50 años

Las recomendaciones propuestas por el FEMA 273 son una simplificación de los resultados obtenidos por Newmark y Hall en 1982. En la propuesta original se divide el espectro de aceleraciones en tres regiones; en la primera región la respuesta de un sistema está correlacionada con la aceleración del terreno; en la segunda, con la velocidad del terreno; y en la tercera con el desplazamiento del terreno. El límite de dichas regiones varía

dependiendo de las características del sitio, pero se puede decir de manera general que las regiones corresponden a valores de periodo cortos, medios y largos, respectivamente. Es posible obtener el espectro elástico de aceleraciones multiplicando a los factores,  $\alpha_A$ ,  $\alpha_V$  o  $\alpha_D$ , mostrados en la tabla 2.4 por la aceleración, velocidad o desplazamiento máximos del suelo, dependiendo en que región espectral se encuentre el periodo en consideración.

Tabla 2.4 Factores  $\alpha_A$ ,  $\alpha_V$  o  $\alpha_D$  de acuerdo a Newmark y Hall en función de  $\xi$  para estimar espectros elásticos de resistencia (Tomada de: Chopra A. K., "Dynamics of Structures. Theory and applications to Earthquake Engineering", Prentice Hall, 1995.

$\xi$	$\alpha_A$	$\alpha_V$	$\alpha_D$
0.01	3.21	2.31	1.82
0.02	2.74	2.03	1.63
0.05	2.12	1.65	1.59
0.10	1.64	1.37	1.20
0.20	1.17	1.08	1.01

### Discusión

En los estudios mencionados anteriormente se ha encontrado que los factores de reducción dependen significativamente del periodo y ductilidad del *SIGL*, y que existe un efecto notable del tipo de suelo. En particular, el contenido de frecuencias de la excitación tiene una gran influencia en el valor y dependencia con respecto al periodo de los factores de reducción, así como en la magnitud de las reducciones máximas que pueden alcanzarse (Miranda, 1993). Se ha observado que otros factores, como la distancia epicentral y la magnitud del evento sísmico, tienen poca influencia en el factor de reducción de resistencia.

En cuanto al caso de estudios del efecto del amortiguamiento en la resistencia, Wu y Hanson (1989), Ordaz y Pérez Rocha (1998) y recientemente el FEMA 273 han propuesto expresiones para estimar factores de reducción para niveles de amortiguamiento diferentes del 5%. Solamente Ordaz y Peréz (1998) han estudiado el caso de suelo blando. Las expresiones del FEMA 273 solamente contemplan el caso elástico y no se hace mención a espectros inelásticos para diferentes niveles de amortiguamiento.

Independientemente de los parámetros que se involucren en la estimación de los factores de reducción de resistencia, es importante considerar que existen condiciones físicas que establece la dinámica estructural que deben ser consideradas durante dicha estimación. En particular, cuando el periodo del *SIGL* tiende a cero los factores de reducción deben tender a uno. Cuando el periodo del *SIGL* tiende a infinito, el valor del factor de reducción de resistencia debe tender al valor de la ductilidad, ya que en este caso el desplazamiento máximo en los sistemas será igual al desplazamiento máximo del terreno.

En fechas recientes, el uso correcto de los factores de reducción dentro del contexto del diseño sísmico ha adquirido gran relevancia. Al respecto, se han planteado y se están

planteando cambios importantes al formato de los códigos de diseño sísmico de varios países, de manera que sea posible para el diseñador entender y contemplar explícitamente el comportamiento real esperado de la estructura durante su diseño sísmico. Dado que a la fecha no existe un planteamiento adecuado para contemplar los factores de reducción asociados a estructuras con combinaciones de  $\mu$  y  $\xi$  diferentes a las contempladas actualmente en los códigos de diseño sismorresistente, es necesario llevar a cabo estudios que hagan posible el diseño sísmico de estructuras con sistemas disipadores de energía.

## CAPÍTULO 3

# EFECTO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA EXCITACIÓN SÍSMICA Y DE LAS PROPIEDADES ESTRUCTURALES

### 3.1 ALCANCE PARAMÉTRICO

En este capítulo se estudia la influencia que tienen en el valor del factor de reducción las características de la excitación sísmica y las características mecánicas de la estructura sismorresistente. Dentro del primer grupo se consideró la duración de la fase intensa ( $t_d$ ), el periodo predominante del terreno ( $T_g$ ) y el contenido de frecuencias de la excitación sísmica ( $\xi_g$ ); mientras que en el segundo grupo se consideró el periodo ( $T$ ), demanda de ductilidad ( $\mu$ ) y coeficiente equivalente de amortiguamiento ( $\xi$ ) de la estructura.

En esta primera etapa se estudió la respuesta de sistemas de un grado de libertad (*SIGL*) con comportamiento elastoplástico perfecto. El estudio contempló valores de  $T$  de 0.1 a 6 segundos;  $\mu$  de 1 a 3; y  $\xi$  de 0.02 a 0.30. Además, se utilizaron 4500 acelerogramas sintéticos, agrupados en tres grupos de 1500 acelerogramas con  $t_d$  de 10, 20 y 30 segundos, respectivamente. Estos acelerogramas fueron generados filtrando ruidos blancos gaussianos con un filtro Kanai-Tajimi (Tajimi 1960). El uso de este filtro implica la definición de los parámetros  $T_g$  y  $\xi_g$ , que están relacionados con el periodo predominante del terreno y con el contenido de frecuencias de la excitación (Lai 1982, Tung et al. 1992). La tabla 3.1 muestra el valor asignado a los parámetros del filtro Kanai-Tajimi para la generación de los acelerogramas sintéticos. Para cada combinación mostrada y para cada duración se generaron 100 acelerogramas. Cabe aclarar que se eliminaron las frecuencias bajas de las muestras por medio del filtro de Hodder (1982), y que dichas muestras se filtraron en el dominio del tiempo de acuerdo a las indicaciones de Tung et al. (1992), de manera de suministrarles una variación razonable en el tiempo de la intensidad sísmica. La figura 3.1 muestra los espectros elásticos de resistencia promedio para algunas de las familias de acelerogramas sintéticos. Para una descripción más detallada ver Teran-Gilmore (1996).

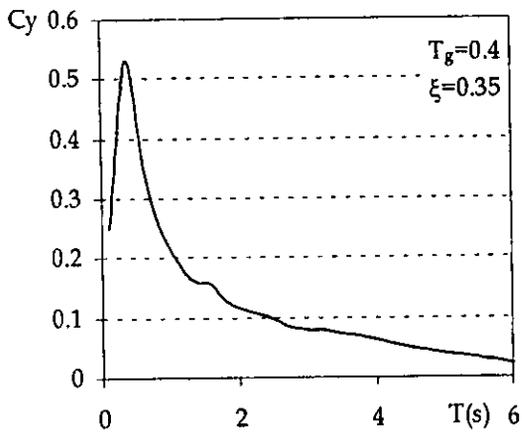
La figura 3.2 muestra valores del factor de reducción,  $R_{\mu\xi}$ , para acelerogramas sintéticos característicos de suelo firme ( $T_g=0.4$  y  $\xi_g=0.35$ ). Dado que la gran mayoría de los estudios hechos hasta la fecha se han hecho para un  $\xi$  de 0.05, aquí se comentarán los resultados resumidos en la figura 3.2 para este valor de  $\xi$ . Puede observarse que para un  $\xi$  de 0.05, el valor  $R_{\mu\xi}$  tiende a uno para  $T$  pequeño, y que conforme  $T$  crece, el valor de  $R_{\mu\xi}$  también se incrementa. Una vez que  $R_{\mu\xi}$  alcanza su máximo, tiende a mantenerse constante para  $T$  mayor que  $T_g$ . Para el caso de  $\xi$  de 0.05,  $R_{\mu\xi}$  alcanza valores ligeramente mayores que  $\mu$ ; sin

embargo, su valor tiende al valor de  $\mu$  para  $T$  grande. Lo anterior concuerda con las observaciones realizadas por Miranda (1993) y Nassar y Krawinkler (1991), de tal manera que se consideró que el uso de acelerogramas sintéticos proporciona una herramienta razonable para estudiar el efecto de las características de la excitación sísmica y de la estructura en el valor de  $R_{\mu\xi}$ .

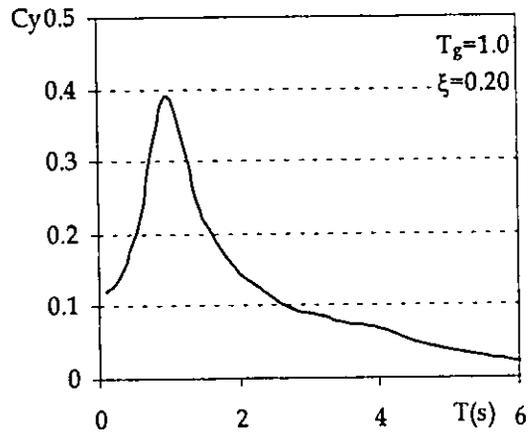
Un incremento en el valor de  $\xi$  resulta en un incremento importante en el valor de  $R_{\mu\xi}$ . Note que para valores intermedios de  $T$ , el valor de  $R_{\mu\xi}$  correspondiente a un  $\xi$  de 0.30 es aproximadamente el doble de aquel correspondiente a un  $\xi$  de 0.05.

Tabla 3.1 Combinaciones de  $T_g$  y  $\xi_g$  consideradas

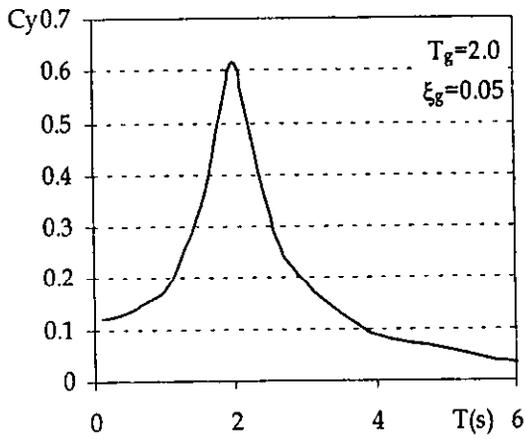
$T_g$	$\xi_g$
0.4	0.20
0.4	0.35
0.4	0.50
0.7	0.20
0.7	0.35
0.7	0.50
1.0	0.20
1.0	0.20
1.0	0.20
1.5	0.05
1.5	0.20
1.5	0.35
2.0	0.05
2.0	0.20
2.0	0.35



a) Suelo Firme



b) Suelo de transición



c) Suelo blando

Figura 3.1 Espectros promedio elásticos de resistencia,  $\xi = 0.05$

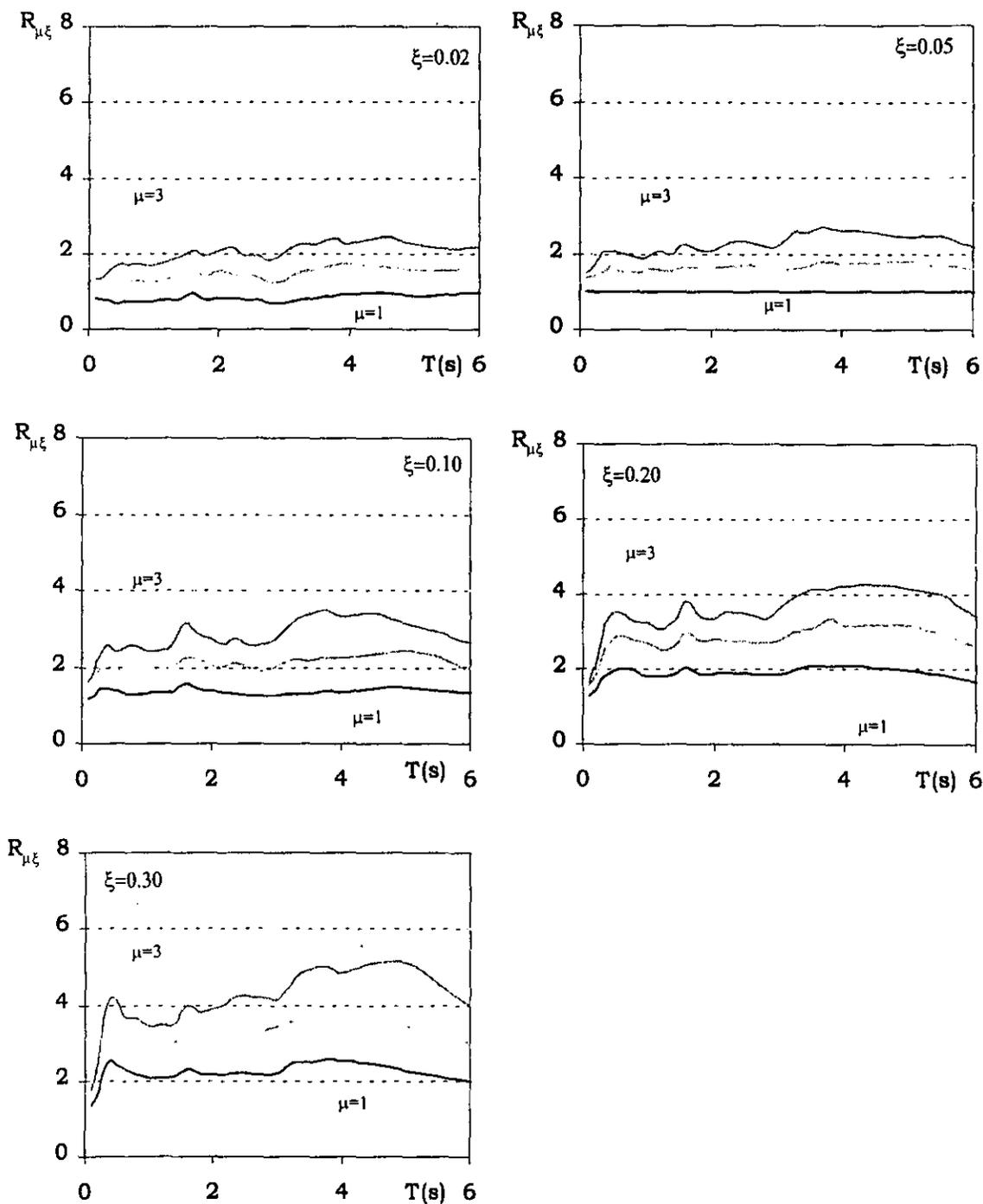


Figura 3.2  $R_{\mu\xi}$  promedio para acelerogramas sintéticos característicos de suelo firme

La Figura 3.3 muestra valores de  $R_{\mu\xi}$  para acelerogramas sintéticos característicos de suelo blando ( $T_g=2.0$  y  $\xi_g=0.05$ ). Puede observarse que para un  $\xi$  de 0.05, el valor  $R_{\mu\xi}$  tiende a uno para  $T$  pequeño, y que conforme  $T$  crece, el valor de  $R_{\mu\xi}$  se incrementa hasta que alcanza un máximo para un  $T$  igual que  $T_g$ . Una vez que  $R_{\mu\xi}$  alcanza su máximo, su valor

tiende a decrecer para  $T$  mayor que  $T_g$ . Para el caso de  $\xi$  de 0.05,  $R_{\mu\xi}$  alcanza valores mucho mayores que  $\mu$ , particularmente para  $T$  cercano a  $T_g$ ; sin embargo, su valor tiende al valor de  $\mu$  para  $T$  grande. Lo anterior concuerda con las observaciones realizadas por Miranda (1993), de tal manera que se confirmó el hecho de que el uso de acelerogramas sintéticos proporciona una herramienta razonable para el estudio de  $R_{\mu\xi}$ . Una vez más se observa que un incremento de  $\xi$  resulta en un incremento importante en el valor de  $R_{\mu\xi}$ .

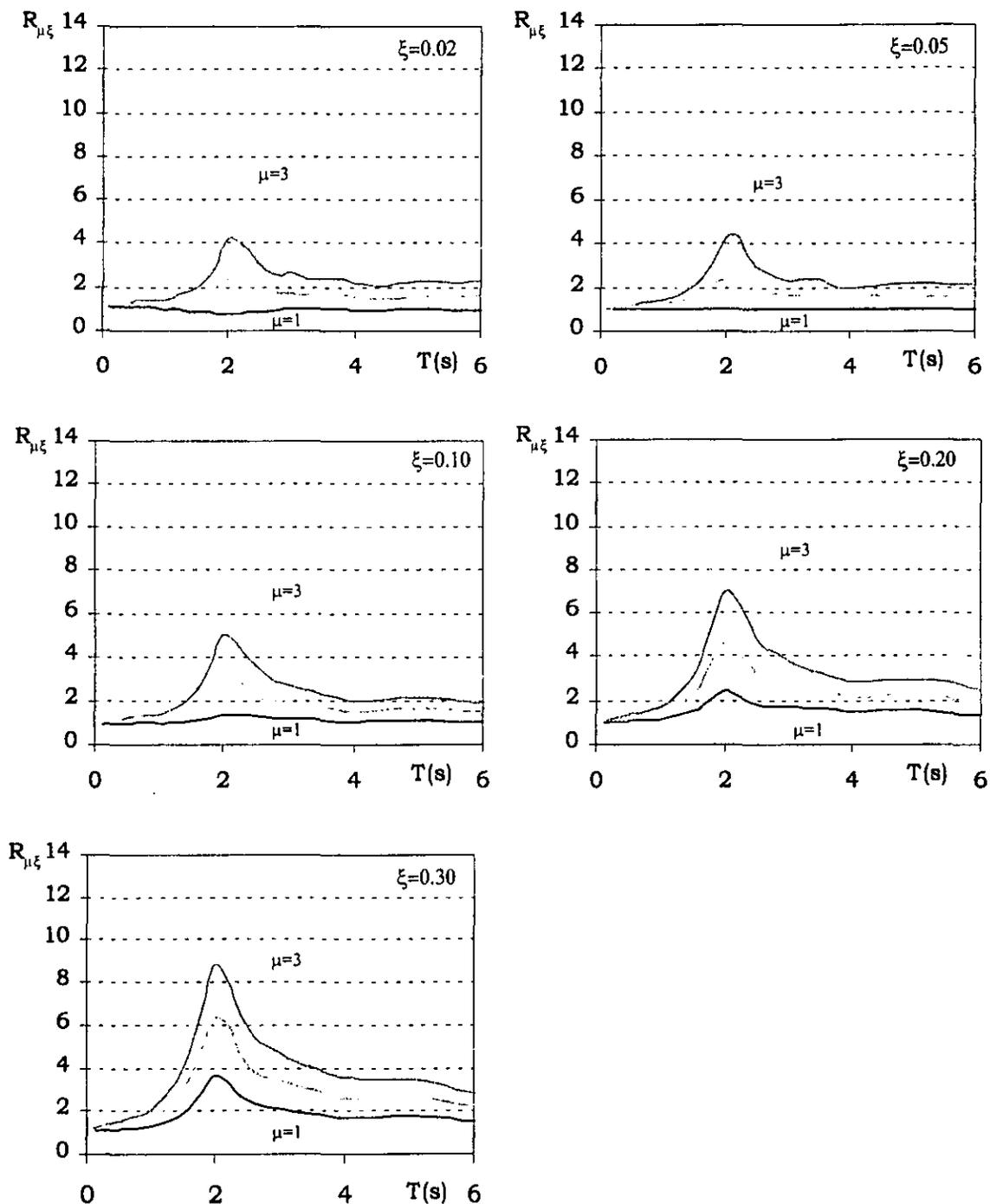


Figura 3.3  $R_{\mu\xi}$  promedio para acelerogramas sintéticos característicos de suelo blando

### 3.2 EFECTO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA EXCITACIÓN SÍSMICA

Las figuras 3.4 y 3.5 muestran el efecto de la duración del acelerograma en el valor de  $R_{\mu\xi}$  para suelo firme y suelo blando, respectivamente. En estas figuras se grafica el valor de  $t_d$  contra el valor de  $R_{\mu\xi}$  para SIGL con diferentes combinaciones de  $\mu$ ,  $\xi$  y  $T$ . Puede notarse que el valor de  $t_d$  tiene poca influencia en el valor de  $R_{\mu\xi}$ , de tal manera que esta variable no se consideró en las regresiones presentadas en los Capítulos 4 y 5 de esta tesis.

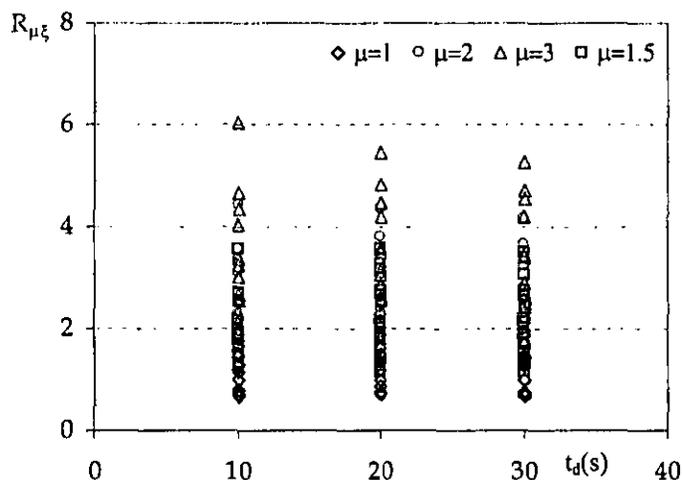


Figura 3.4 Efecto de la duración en el valor de  $R_{\mu\xi}$  para suelo firme

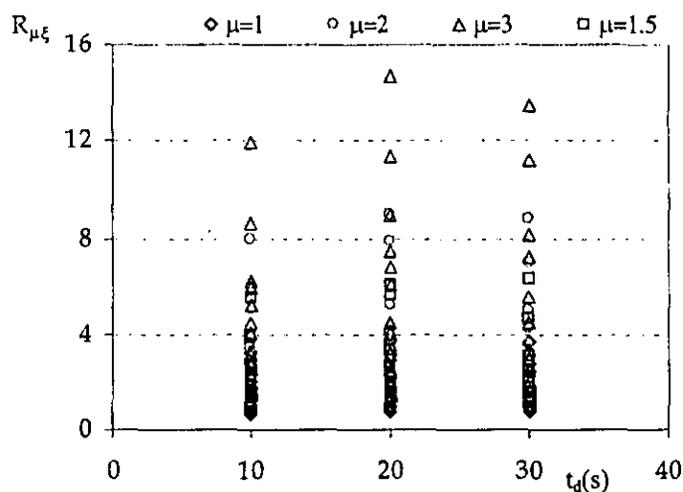


Figura 3.5 Efecto de la duración en el valor de  $R_{\mu\xi}$  para suelo blando

El efecto del contenido de frecuencias de la excitación puede estudiarse a partir de la comparación de las figuras 3.4 y 3.5, así como de la observación directa de la figura 3.6. Note que, un incremento del valor de  $T_g$  de la excitación normalmente se ve acompañado con un decremento en su valor de  $\xi_g$ , tal como lo sugieren las combinaciones de estos parámetros resumidas en la tabla 3.1. Esto implica que un incremento en el periodo

predominate de la excitación, se ve reflejado en una reducción de la banda de frecuencias alrededor de dicho periodo. La figura 3.4, que muestra resultados para excitaciones típicas de suelo firme fue obtenida para  $T_g$  de 0.4 seg; mientras que la figura 3.5, correspondiente a excitaciones típicas de suelo blando se obtuvo para un  $T_g$  de 2.0. Los valores máximos de  $R_{\mu\xi}$  en la Figura 3.5 son mucho mayores que aquellos mostrados en la Figura 3.4., lo que sugiere que un incremento de  $T_g$  acompañado por una reducción del contenido de frecuencias se refleja en un incremento importante en el valor máximo de  $R_{\mu\xi}$ . La figura 3.6 muestra directamente el efecto que el contenido de frecuencias tiene en el valor de  $R_{\mu\xi}$ . Claramente se aprecia que una disminución en el ancho de banda de la excitación sísmica se ve reflejado en un aumento significativo de  $R_{\mu\xi}$ . Puede concluirse que un incremento de  $T_g$  acompañado con un decremento en el valor de  $\xi_g$ , puede resultar en algunos casos en un incremento muy importante en el valor máximo de  $R_{\mu\xi}$ . Lo anterior concuerda con lo observado por Miranda(1993), donde en el caso de suelos blandos los valores de  $R_{\mu\xi}$  son bastante mayores a los que se presentan en suelos firmes.

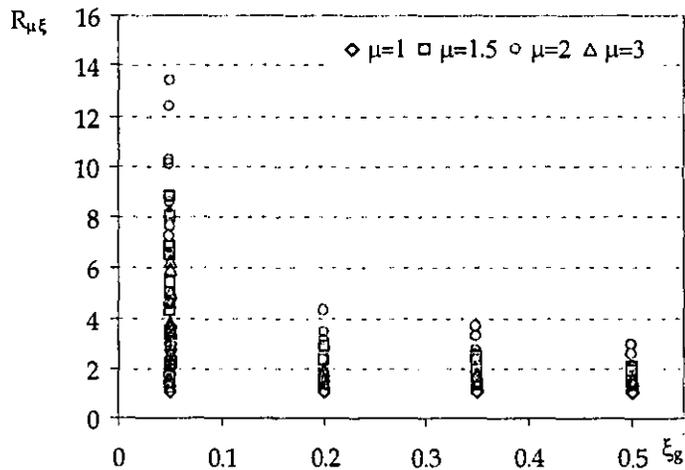


Figura 3.6. Efecto del contenido de frecuencias en el valor de  $R_{\mu\xi}$

### 3.3 EFECTO DE LAS PROPIEDADES ESTRUCTURALES

Las figuras 3.7 y 3.8 muestran el efecto de  $T$  en el valor de  $R_{\mu\xi}$  para suelo firme y suelo blando, respectivamente. En estas figuras se grafica el cociente  $T/T_g$  contra el valor de  $R_{\mu\xi}$  para *SIGL* con diferentes combinaciones de  $\mu$ ,  $\xi$ . Puede notarse que  $T/T_g$  tiene una influencia importante en el valor de  $R_{\mu\xi}$ . En particular, el valor de  $R_{\mu\xi}$  para un  $T/T_g$  igual a uno es considerablemente mayor que para otros valores de  $T/T_g$ . Destaca el caso de suelo blando, donde los valores de  $R_{\mu\xi}$  para  $T/T_g$  igual a uno pueden llegar a ser bastante mayores a los que se presentan en el caso de suelo firme. En las gráficas 3.7 y 3.8 se observa que para suelos firmes las reducciones más grandes se presentan para valores de  $T/T_g$  mayores o iguales a uno, mientras que para el caso de suelo blando las reducciones máximas se presentan para valores de  $T/T_g$  menores a uno. Con base en lo anterior y considerando que a juicio del autor, para suelos blandos la normalización  $T/T_g$  proporciona una mejor descripción de las tendencias de los factores de reducción, en el Capítulo 4 se decidió hacer

el análisis de regresión suelo firme en función de  $T$ ; mientras que en el Capítulo 5 para suelo blando la regresión se planteó en función de la relación  $T/T_g$ .

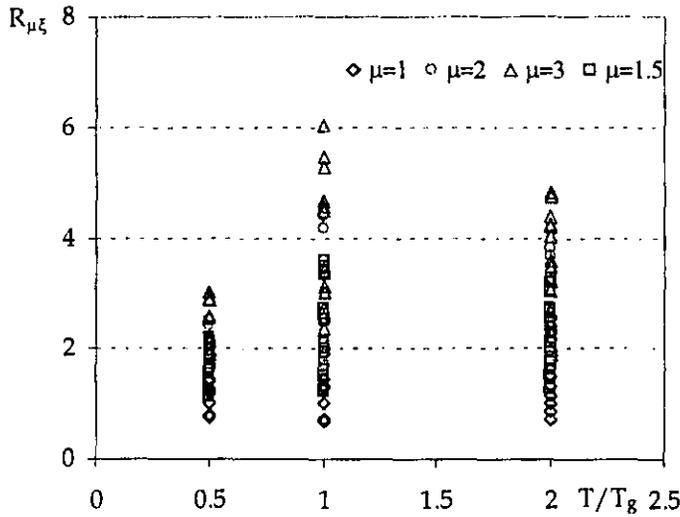


Figura 3.7 Efecto de  $T/T_g$  en el valor de  $R_{\mu\xi}$  para suelo firme

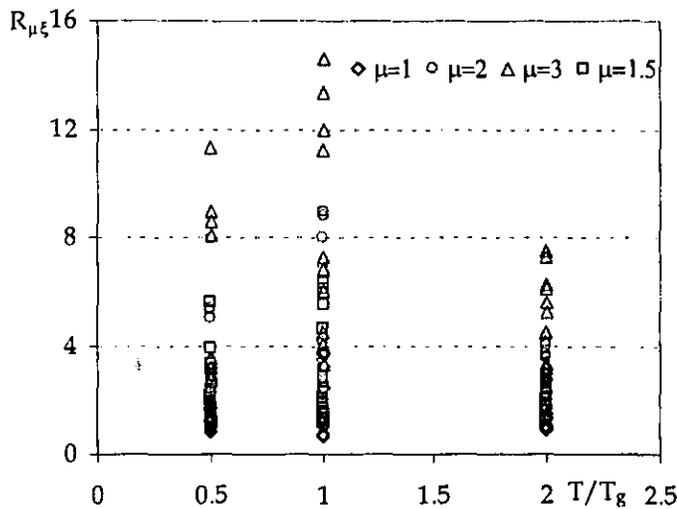


Figura 3.8 Efecto de  $T/T_g$  en el valor de  $R_{\mu\xi}$  para suelo blando

Las figuras 3.9 y 3.10 muestran el efecto de  $\xi$  en el valor de  $R_{\mu\xi}$  para suelo firme y suelo blando, respectivamente. En estas figuras se grafica  $\xi$  contra el valor de  $R_{\mu\xi}$  para SIGL con diferentes combinaciones de  $\mu$ ,  $\xi$  y  $T$ . Puede notarse que un incremento en el valor de  $\xi$  se refleja en un incremento notable en el valor de  $R_{\mu\xi}$  para los diferentes valores de  $\mu$  considerados en las gráficas. También puede notarse que un incremento de  $\xi$  es efectivo aún para estructuras que desarrollan  $\mu$  importante. En otras palabras, la efectividad de  $\xi$  no se ve disminuida significativamente por el hecho que la estructura exhiba comportamiento plástico.

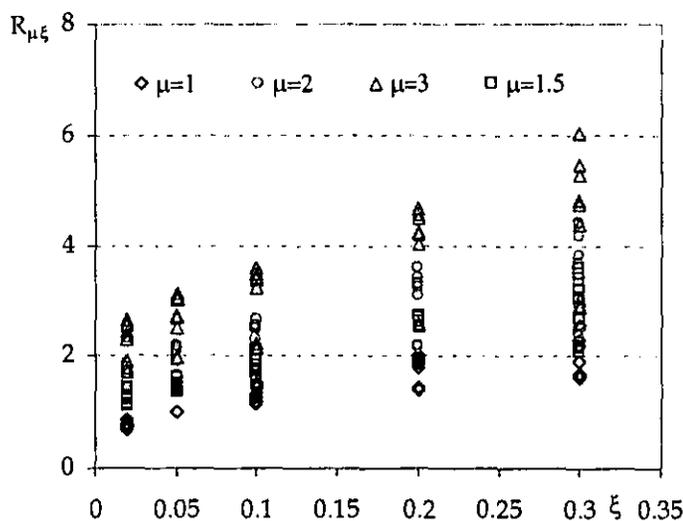


Figura 3.9 Efecto de  $\xi$  en el valor de  $R_{\mu\xi}$  para suelo firme

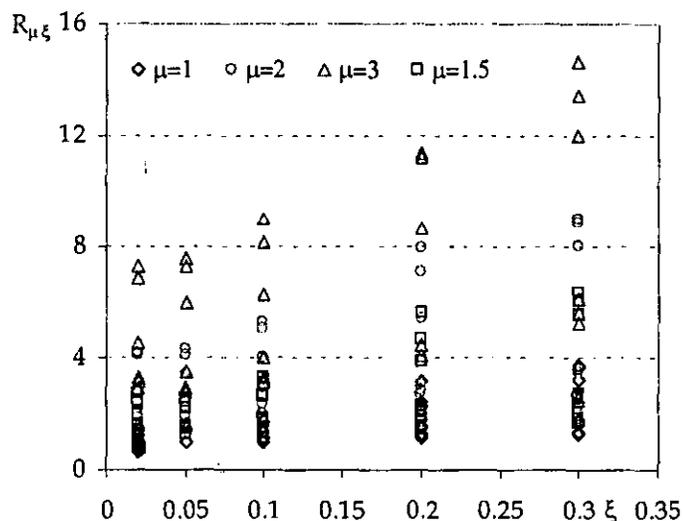


Figura 3.10 Efecto de  $\xi$  en el valor de  $R_{\mu\xi}$  para suelo blando

Finalmente, las figuras 3.11 y 3.12 muestran el efecto de  $\mu$  en el valor de  $R_{\mu\xi}$  para suelo firme y suelo blando, respectivamente. En estas figuras se grafica  $\mu$  contra el valor de  $R_{\mu\xi}$  para *SIGL* con diferentes combinaciones de  $\mu$ ,  $\xi$  y  $T$ . Puede notarse que un incremento en el valor de  $\mu$  se refleja en un incremento importante en el valor de  $R_{\mu\xi}$  para los diferentes valores de  $\xi$  considerados en las gráficas. Se puede observar que aún para un valor de  $\xi$  alto, un incremento de  $\mu$  reduce considerablemente la respuesta. Es decir, para el diseño de una estructura se pueden considerar diferentes combinaciones de capacidad de deformación plástica y capacidad de disipación viscosa de energía a fin de lograr un desempeño sísmico adecuado. Por ejemplo, en el caso de que seguir aumentando el amortiguamiento para controlar la respuesta de una estructura ya no resulte justificable desde el punto de vista económico puede plantearse que la estructura incurra un poco en su intervalo de comportamiento plástico a fin de obtener una solución razonable.

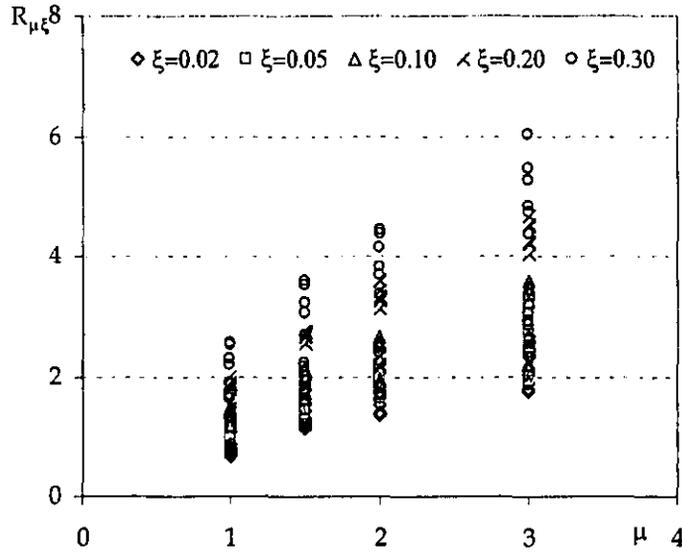


Figura 3.11 Efecto de  $\mu$  en el valor de  $R_{\mu,8}$  para suelo firme

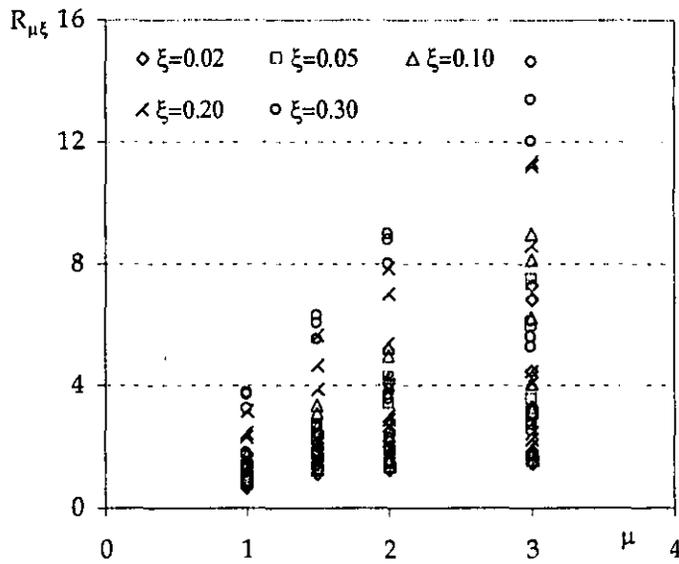


Figura 3.12 Efecto de  $\mu$  en el valor de  $R_{\mu,\xi}$  para suelo firme

## CAPÍTULO 4

# FACTORES DE REDUCCIÓN PARA SUELO FIRME

### 4.1 ALCANCE PARAMÉTRICO

Los resultados que aquí se reportan se obtuvieron a partir del estudio de la respuesta de sistemas de un grado de libertad (*SIGL*) con comportamiento elastoplástico perfecto. Para obtener expresiones para el factor de reducción asociado a excitaciones típicas de suelo firme, se consideró un intervalo de periodos de 0.1 a 4 segundos, intervalo que incluye a la mayoría de las estructuras comunes.

En el estudio se consideraron ductilidades ( $\mu$ ) de 1 a 4 y se utilizaron valores del coeficiente de amortiguamiento ( $\xi$ ) de 0.02 a 0.30, intervalos de valores que cubren las combinaciones que generalmente pueden presentarse para sistemas tradicionales y sistemas con disipadores de energía.

En cuanto a las excitaciones sísmicas utilizadas, se utilizaron 152 acelerogramas reales registrados en diferentes sitios ubicados en la costa del Pacífico mexicano. La tabla 4.1 resume las estaciones y correspondientes aceleraciones máximas del terreno de los registros utilizados. Los acelerogramas utilizados fueron sometidos a un proceso de filtrado para eliminar las frecuencias bajas y corregir problemas de línea base; el filtrado se realizó a partir de una frecuencia de 0.10 Hertz. Cabe mencionar que este proceso se realizó mediante el programa Degtra 2000 (Ordaz y Montoya, 2000). En la figura 4.1 se muestra el espectro elástico de resistencia promedio de los acelerogramas utilizados para  $\xi=0.05$ .

Como podrá apreciarse en la tabla 4.1, la muestra incluye acelerogramas cuyas aceleraciones máximas oscilan entre 0.005g y 0.45g; dicha muestra incluye una gran cantidad de movimientos menores del terreno, y un número limitado de movimientos de alta intensidad. La figura 4.1 muestra que el promedio de las aceleraciones máximas del terreno fue de aproximadamente 0.06g. La amplificación máxima se presenta para un T cercano a 0.3 segundos y es del orden de 2.5. El espectro incluido en esta figura sugiere que el periodo dominante de las excitaciones sísmicas está ubicado alrededor de 0.3 segundos, que es consistente con los valores de periodo dominante reportado en la literatura para excitaciones generadas en suelo firme (Tung et al. 1992). Se observa que dado que en la muestra se incluyeron una mayoría de acelerogramas registrados durante sismos de baja magnitud, el valor de las aceleraciones promedio no corresponden a las que se podrían esperar durante el evento sísmico de diseño. Lo anterior no implica que los factores de reducción promedio que se obtuvieron no sean representativos de los que realmente

podrían presentarse, ya que como se mencionó en el Capítulo 2 se ha encontrado que la magnitud del evento sísmico no tienen un efecto significativo en el valor de  $R_{\mu\xi}$

De igual manera se decidió incorporar en la muestra acelerogramas con diferentes duraciones ya que se ha encontrado que la duración no tiene un efecto notable en el valor del factor de reducción.

## 4.2 FACTORES DE REDUCCIÓN PROMEDIO

Como se mencionó en el Capítulo 2 el factor de reducción, utilizado en este estudio, se definirá con base en la ecuación (2.3). En dicha ecuación la capacidad de deformación plástica de la estructura se caracterizará por medio de su ductilidad última ( $\mu$ ), definida como el cociente entre el desplazamiento lateral máximo que puede alcanzar cuando se le sujeta a un estado de deformación lateral monótonicamente creciente, y su desplazamiento lateral de fluencia. El nivel de amortiguamiento de la estructura se caracterizará por medio del valor de  $\xi$  asociado a ella.

$$R_{\mu\xi}(\mu_o, \xi_o, T_o) = FS(\mu=1, \xi=0.05, T_o) / FS(\mu_o, \xi_o, T_o) \quad (2.3)$$

donde  $FS(\mu_o, \xi_o, T_o)$  es la fuerza sísmica asociada a los valores específicos de  $\mu$ ,  $\xi$  y  $T$  asociados a la estructura para la cual se determina el valor de  $R_{\mu\xi}$ , y  $FS(\mu=1, \xi=0.05, T_o)$  es la fuerza sísmica para un sistema elástico con periodo  $T_o$  y un valor de  $\xi$  de 0.05. Cabe mencionar que no se hace consideración alguna acerca de sobrerresistencia.

La figura 4.2 muestra los valores de  $R_{\mu\xi}$  para diferentes combinaciones de  $\mu$  y  $\xi$ . Estas curvas muestran tendencias típicas de excitaciones sísmicas generadas en terreno firme. El valor de  $R_{\mu\xi}$  tiene un valor de uno para un  $T$  de cero, y crece paulatinamente hasta alcanzar un valor máximo para un  $T$  que oscila entre 0.5 y 0.7. A partir de este máximo el valor de  $R_{\mu\xi}$  disminuye ligeramente con un incremento de  $T$ . El valor de  $R_{\mu\xi}$  crece tanto con un incremento de  $\mu$  como con un incremento de  $\xi$ .

La tendencia de  $R_{\mu\xi}$  a disminuir después de alcanzar su valor máximo es más pronunciada conforme se incrementa el valor de  $\xi$ , y puede notarse que para  $T$  grande, el valor de  $R_{\mu\xi}$  tiende al valor de  $\mu$  para valores pequeños de  $\xi$  (0.02 y 0.05). Para un  $\xi$  de 0.30, el valor de  $R_{\mu\xi}$  tiende a un valor cercano a  $1.7 \mu$  para  $T$  de cuatro segundos.

Resulta interesante comentar que los factores de reducción mostrados en la figura 4.2 proporcionan una mejor descripción física del fenómeno en estudio que aquellos mostrados en la figura 3.2, ya que mientras que los factores incluidos en la figura 4.2 tienden a  $\mu$  para valores grandes de  $T$ , los factores mostrados en la figura 3.2, correspondientes a acelerogramas sintéticos, no siguen tan claramente esta tendencia. Se puede concluir que el uso de acelerogramas reales suele resultar una mejor opción para estudiar tendencias en la respuesta de *SIGL*.

Tabla 4.1 Acelerogramas utilizados en la regresión de suelo firme

Reg	Fecha	Mc	Comp	Dur (s)	A <sub>máx</sub> (cm/s <sup>2</sup> )	Est
s1	02/05/89	5.1	EW	15.00	16.3	Copala
s2	02/05/89	5.1	NS	15.00	19.1	Copala
s3	02/05/89	5.1	EW	16.41	13.4	Coyuca
s4	02/05/89	5.1	NS	16.41	17.2	Coyuca
s5	02/05/89	5.1	EW	18.21	49.8	Cerro de Piedra
s6	02/05/89	5.1	NS	18.21	45.9	Cerro de Piedra
s7	02/05/89	5.1	EW	20.82	24.8	Las Mesas
s8	02/05/89	5.1	NS	20.82	27.8	Las Mesas
s9	02/05/89	5.1	EW	29.50	31.6	El Ocotito
s10	02/05/89	5.1	NS	29.50	35.4	El Ocotito
s11	02/05/89	5.1	EW	12.06	28.1	El Paraíso
s12	02/05/89	5.1	NS	12.06	21.5	El Paraíso
s13	02/05/89	5.1	EW	14.76	57.8	San Marcos
s14	02/05/89	5.1	NS	14.76	64.4	San Marcos
s15	02/05/89	5.1	EW	16.36	48.4	Las Vigas
s16	02/05/89	5.1	NS	16.36	111	Las Vigas
s17	02/05/89	5.1	EW	25.20	14.5	Xaltianguis
s18	02/05/89	5.1	NS	25.20	13.5	Xaltianguis
s19	08/02/88	5.0	EW	26.50	49.2	Atoyac
s20	08/02/88	5.0	NS	26.50	61	Atoyac
s21	08/02/88	5.0	EW	21.20	28.7	Aeropuerto Zihuatanejo
s22	08/02/88	5.0	NS	21.20	23	Aeropuerto Zihuatanejo
s23	08/02/88	5.0	EW	23.10	33.5	El Balcón
s24	08/02/88	5.0	NS	23.10	33.5	El Balcón
s25	08/02/88	5.0	EW	26.20	15.7	La Comunidad
s26	08/02/88	5.0	NS	26.20	8.4	La Comunidad
s27	08/02/88	5.0	EW	20.40	17.2	Coyuca
s28	08/02/88	5.0	NS	20.40	26.8	Coyuca
s29	08/02/88	5.0	EW	46.40	216	La Llave
s30	08/02/88	5.0	NS	46.40	291	La Llave
s31	08/02/88	5.0	EW	15.85	57.9	Los Magueyes
s32	08/02/88	5.0	NS	15.85	102	Los Magueyes
s33	08/02/88	5.0	EW	39.90	338	Papanao
s34	08/02/88	5.0	NS	39.90	435	Papanao
s35	08/02/88	5.0	EW	35.90	226	Petatlán
s36	08/02/88	5.0	NS	35.90	140	Petatlán
s37	08/02/88	5.0	EW	19.90	30.5	El Suchil
s38	08/02/88	5.0	NS	19.80	36.4	El Suchil
s39	08/02/88	5.0	EW	58.65	6.94	Tonalapa
s40	08/02/88	5.0	NS	58.65	7.86	Tonalapa

Tabla 4.1 Continua, Acelerogramas utilizados en la regresión de suelo firme

Reg	Fecha	Mc	Comp	Dur(s)	$A_{m\acute{a}x}$ (cm/s <sup>2</sup> )	Estación
s41	08/02/88	5.0	EW	13.30	8.03	La Unión
s42	08/02/88	5.0	NS	13.30	11.4	La Unión
s43	11/05/90	5.30	EW	23.92	15.1	Atoyac
s44	11/05/90	5.30	NS	23.92	14.0	Atoyac
s45	11/05/90	5.30	EW	43.90	4.92	Filo de Caballo
s46	11/05/90	5.30	NS	43.90	6.24	Filo de Caballo
s47	11/05/90	5.30	EW	36.67	114	La Llave
s48	11/05/90	5.30	NS	36.67	153	La Llave
s49	11/05/90	5.30	EW	27.91	16.5	Los Magueyes
s50	11/05/90	5.30	NS	27.91	16.2	Los Magueyes
s51	11/05/90	5.30	EW	19.77	31.1	Papanao
s52	11/05/90	5.30	NS	19.77	40.6	Papanao
s53	11/05/90	5.30	EW	23.22	15.8	El Paraíso
s54	11/05/90	5.30	NS	23.22	31.9	El Paraíso
s55	11/05/90	5.30	EW	20.92	22.5	Petatlán
s56	11/05/90	5.30	NS	20.92	20.7	Petatlán
s57	11/05/90	5.30	EW	25.66	79.9	San Luis
s58	11/05/90	5.30	NS	25.66	86.9	San Luis
s59	11/05/90	5.30	EW	15.90	7.38	El Suchil
s60	11/05/90	5.30	NS	15.90	13.9	El Suchil
s61	19/09/85	8.1	EW	42.02	59.4	Atoyac
s62	19/09/85	8.1	NS	42.02	53.1	Atoyac
s63	19/09/85	8.1	EW	71.35	161	Aeropuerto Zihuatanejo
s64	19/09/85	8.1	NS	71.35	103	Aeropuerto Zihuatanejo
s65	19/09/85	8.1	EW	48.62	141	Caleta de Campos
s66	19/09/85	8.1	NS	48.62	137	Caleta de Campos
s67	19/09/85	8.1	EW	38.35	35	Coyuca
s68	19/09/85	8.1	NS	38.35	42	Coyuca
s69	19/09/85	8.1	EW	25.05	15.6	Cerro de Piedra
s70	19/09/85	8.1	NS	25.05	26.9	Cerro de Piedra
s71	19/09/85	8.1	EW	59.35	55.8	El Ocotito
s72	19/09/85	8.1	NS	59.35	50.1	El Ocotito
s73	19/09/85	8.1	EW	59.05	117	Papanao
s74	19/09/85	8.1	NS	59.05	162	Papanao
s75	19/09/85	8.1	EW	52.60	89	El Paraíso
s76	19/09/85	8.1	NS	52.60	116	El Paraíso
s77	19/09/85	8.1	EW	59.55	81.4	El Suchil
s78	19/09/85	8.1	NS	59.55	102	El Suchil
s79	19/09/85	8.1	EW	62.30	148	La Unión
s80	19/09/85	8.1	NS	62.30	166	La Unión

Tabla 4.1 Continua, Acelerogramas utilizados en la regresión de suelo firme

Reg	Fecha	Mc	Comp	Dur(s)	$A_{m\acute{a}x}$ (cm/s <sup>2</sup> )	Estación
s81	19/09/85	8.1	EW	63.55	120	Villita margen derecha
s82	19/09/85	8.1	NS	63.55	125	Villita margen derecha
s83	21/09/85	7.5	EW	34.10	74.8	Atoyac
s84	21/09/85	7.5	NS	34.10	79.8	Atoyac
s85	21/09/85	7.5	EW	54.00	153	Aeropuerto Zihuatanejo
s86	21/09/85	7.5	NS	54.00	134	Aeropuerto Zihuatanejo
s87	21/09/85	7.5	EW	15.00	45.8	El Cayaco
s88	21/09/85	7.5	NS	15.00	65.4	El Cayaco
s89	21/09/85	7.5	EW	44.10	42.1	Coyuca
s90	21/09/85	7.5	NS	44.10	47.8	Coyuca
s91	21/09/85	7.5	EW	63.09	243	Papanao
s92	21/09/85	7.5	NS	63.09	219	Papanao
s93	21/09/85	7.5	EW	40.60	86.1	El Suchil
s94	21/09/85	7.5	NS	40.60	71.8	El Suchil
s95	21/09/85	7.5	EW	59.50	74.3	Zacatula
s96	21/09/85	7.5	NS	59.50	76	Zacatula
s97	25/04/89	4.4	EW	15.20	16	Atoyac
s98	25/04/89	4.4	NS	15.20	19.6	Atoyac
s99	25/04/89	4.4	EW	15.10	22.7	El Cayaco
s100	25/04/89	4.4	NS	15.10	30.4	El Cayaco
s101	25/04/89	4.4	EW	34.80	61.3	Copala
s102	25/04/89	4.4	NS	34.80	105	Copala
s103	25/04/89	4.4	EW	23.30	85.2	Coyuca
s104	25/04/89	4.4	NS	23.30	41.2	Coyuca
s105	25/04/89	4.4	EW	37.80	92.9	Cerro de Piedra
s106	25/04/89	4.4	NS	37.80	103	Cerro de Piedra
s107	25/04/89	4.4	EW	64.45	15.2	Filo de Caballo
s108	25/04/89	4.4	NS	64.45	14.5	Filo de Caballo
s109	25/04/89	4.4	EW	33.75	107	Las Mesas
s110	25/04/89	4.4	NS	33.75	107	Las Mesas
s111	25/04/89	4.4	EW	26.00	35.4	El Ocotillo
s112	25/04/89	4.4	NS	26.00	28.7	El Ocotillo
s113	25/04/89	4.4	EW	36.20	102	El Paraíso
s114	25/04/89	4.4	NS	36.20	117	El Paraíso
s115	25/04/89	4.4	EW	150.00	13.9	Teacalco
s116	25/04/89	4.4	NS	150.00	13.5	Teacalco
s117	25/04/89	4.4	EW	39.95	310	Las Vigas
s118	25/04/89	4.4	NS	39.95	315	Las Vigas

Tabla 4.1 Continua, Acelerogramas utilizados en la regresión de suelo firme

Reg	Fecha	Mc	Comp	Dur(s)	A <sub>máx</sub> (cm/s <sup>2</sup> )	Estación
s119	25/04/89	4.4	EW	22.25	62.3	La Venta
s120	25/04/89	4.4	NS	22.25	28.9	La Venta
s121	25/04/89	4.4	EW	73.50	53.6	Xaltianguis
s122	25/04/89	4.4	NS	73.50	55	Xaltianguis
s123	31/05/90	5.5	EW	29.46	18.1	Atoyac
s124	31/05/90	5.5	NS	29.46	25.2	Atoyac
s125	31/05/90	5.5	EW	16.59	10.8	Aeropuerto Zihuatanejo
s126	31/05/90	5.5	NS	16.59	14.1	Aeropuerto Zihuatanejo
s127	31/05/90	5.5	EW	33.22	18.8	El Balcón
s128	31/05/90	5.5	NS	33.22	15.6	El Balcón
s129	31/05/90	5.5	EW	22.21	18.8	El Cayaco
s130	31/05/90	5.5	NS	22.21	27.1	El Cayaco
s131	31/05/90	5.5	EW	39.87	20.2	La Cominidad
s132	31/05/90	5.5	NS	39.87	12.2	La Cominidad
s133	31/05/90	5.5	EW	62.82	12.1	Filo de Caballo
s134	31/05/90	5.5	NS	62.82	14.8	Filo de Caballo
s135	31/05/90	5.5	EW	40.96	315	La Llave
s136	31/05/90	5.5	NS	40.96	390	La Llave
s137	31/05/90	5.5	EW	29.77	54.3	Los Magueyes
s138	31/05/90	5.5	NS	29.77	29.9	Los Magueyes
s139	31/05/90	5.5	EW	23.16	17	El Ocotito
s140	31/05/90	5.5	NS	23.16	13.4	El Ocotito
s141	31/05/90	5.5	EW	25.74	117	Papanoa
s142	31/05/90	5.5	NS	25.74	205	Papanoa
s143	31/05/90	5.5	EW	35.82	48.2	El Paraíso
s144	31/05/90	5.5	NS	35.82	69.6	El Paraíso
s145	31/05/90	5.5	EW	22.74	28.8	Petatlán
s146	31/05/90	5.5	NS	22.74	39	Petatlán
s147	31/05/90	5.5	EW	28.27	121	San Luis
s148	31/05/90	5.5	NS	28.27	191	San Luis
s149	31/05/90	5.5	EW	18.66	20.2	El Suchil
s150	31/05/90	5.5	NS	18.66	20.7	El Suchil
s151	31/05/90	5.5	EW	79.53	5.07	Teacalco
s152	31/05/90	5.5	NS	79.53	5.9	Teacalco

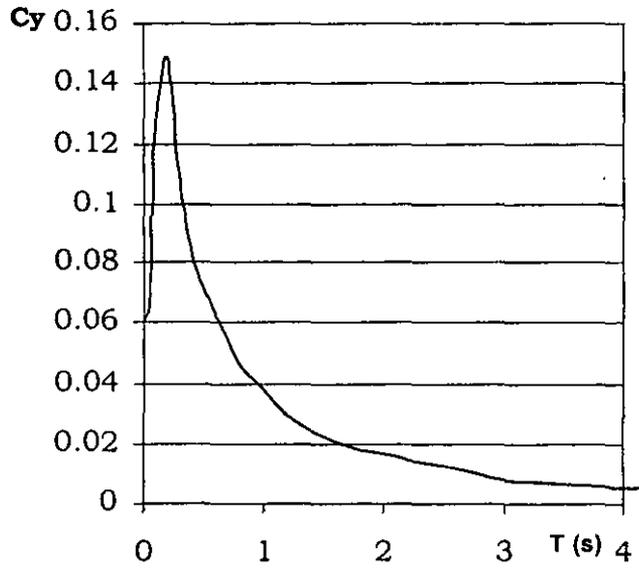


Figura 4.1 Espectro elástico promedio de resistencia para  $\xi=0.05$  y suelo firme

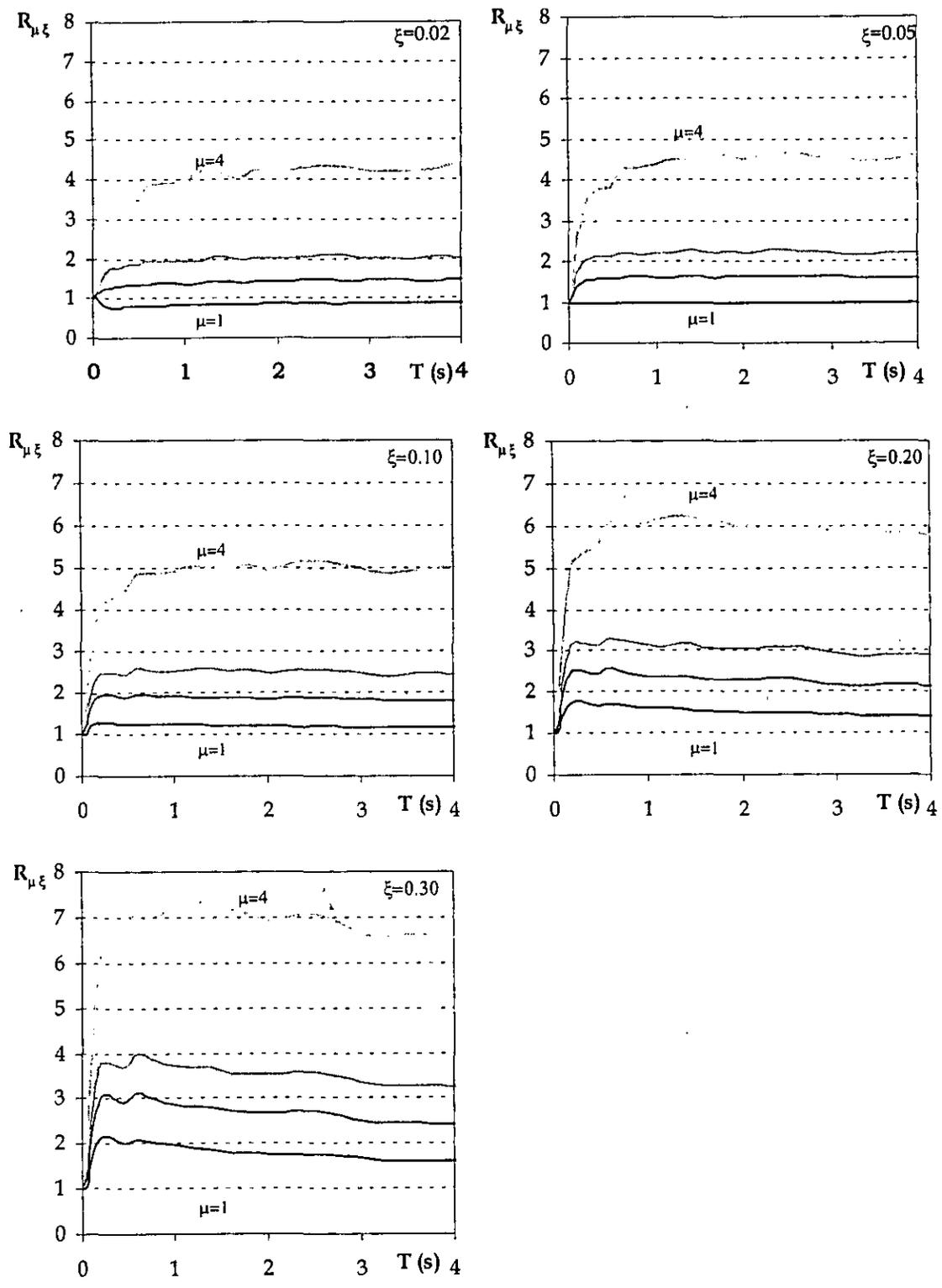


Figura 4.2 Factores de reducción para suelo firme

### 4.3 REGRESIÓN

Se probaron diferentes familias de curvas para aproximar aquellas resumidas en la figura 4.2. Después de varios intentos, se consideró una familia de curvas con la siguiente forma.

$$R_{\mu\xi} = \left[ \phi \left( \frac{T^\alpha}{\beta + T^\alpha} \right) + 1 \right]^\theta \quad (4.1)$$

La forma básica de la ecuación (4.1) está definida por el término  $T^\alpha / (\beta + T^\alpha)$ , dicho término es igual a cero para  $T$  de cero, y tiende al valor de uno conforme se incrementa el valor de  $T$ . El valor del máximo que alcanza la curva depende de los valores de  $\phi$  y  $\theta$ , mientras que el valor del exponente  $\theta$  define la velocidad de caída de  $R_{\mu\xi}$  a partir de ese máximo.

En la figura 4.3 se grafica el valor promedio de  $R_{\mu\xi}$  para periodos largos en función de  $\xi$  y  $\mu$ . Se puede apreciar que la interacción que existe entre estos tres parámetros no podría ser descrita satisfactoriamente por una forma matemática sencilla, por ejemplo un plano. Para determinar la forma que debería tener el factor  $\phi$ , el cual controla el máximo que alcanza la curva, se ajustó para cada valor de  $\xi$  una curva en función de  $\mu$ . En la figura 4.4 se muestran los ajustes para cada valor de  $\xi$ .

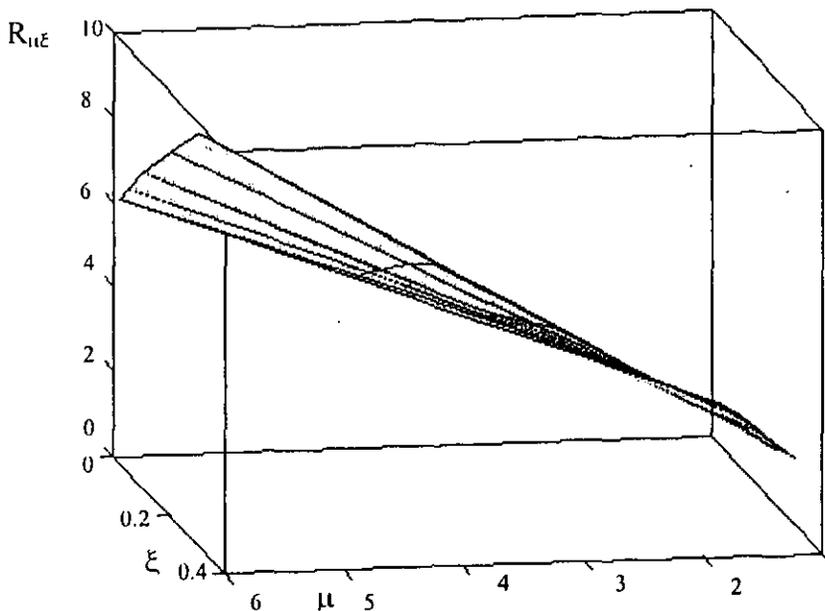


Figura 4.3. Interacción entre  $\mu$ ,  $\xi$  y  $R_{\mu\xi}$

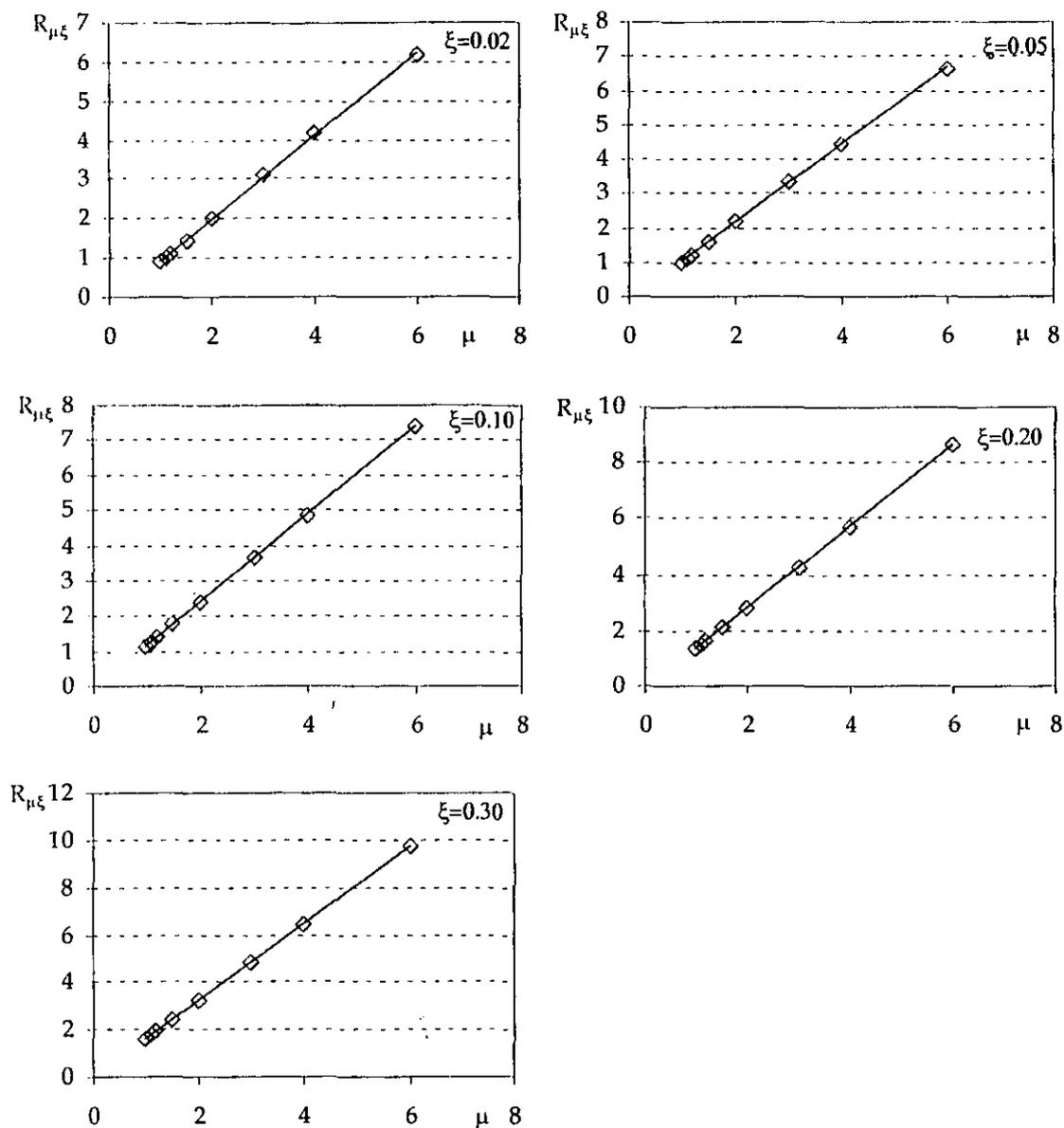


Figura 4.4. Ajustes para valores promedio de  $R_{\mu\xi}$  para valores largos de  $T$  y diferentes valores de  $\xi$

Como puede observarse en la figura 4.4 las curvas ajustadas resultan ser líneas rectas para todos los valores de  $\xi$  considerados. En la figura 4.5 se muestra la variación de los parámetros de ajuste de estas rectas, pendiente ( $m$ ) y ordenada al origen ( $b$ ), con respecto al valor de  $\xi$ . Para plantear la forma del factor  $\phi$  en función de  $\mu$  y  $\xi$ , se decidió ajustar para el parámetro  $m$  una línea recta, mientras que para el valor de  $b$  se decidió ajustar una curva de la forma  $c\xi^Y$

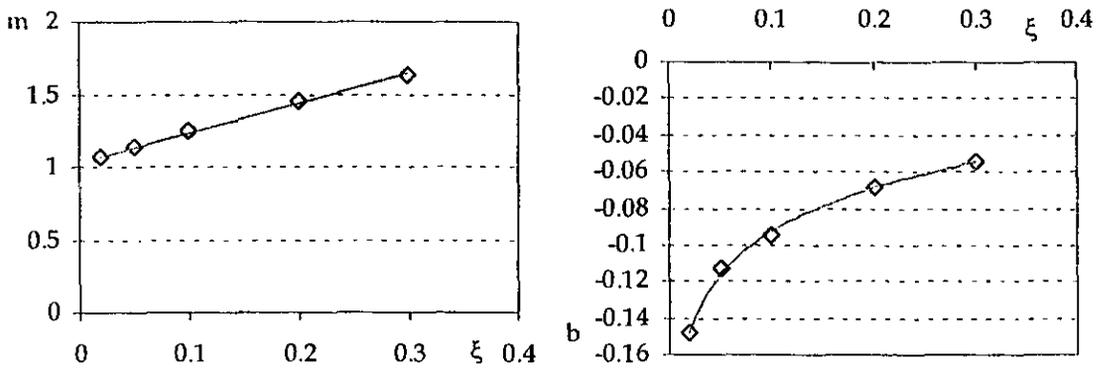


Figura 4.5. Ajuste de los parámetros  $m$  y  $b$  en función de  $\xi$

Para determinar el exponente  $\theta$ , el cual define la velocidad con que la curva de  $R_{\mu\xi}$  disminuye después de alcanzar el máximo, se planteó una expresión que fuera función del valor de  $T$  y de  $\mu$ . Después de varias pruebas y mediante un análisis de regresión utilizando un planteamiento de mínimos cuadrados para reducir el error cuadrático máximo, se encontraron las siguientes expresiones para  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\phi$  y  $\theta$ .

$$\beta = 0.16 \tag{4.2}$$

$$\alpha = 1.2 \tag{4.3}$$

$$\phi = \mu(3.4\xi + 1.4) - 1.2\xi^{-0.1} \tag{4.4}$$

$$\theta = \frac{0.93 - \frac{(\mu - 4)}{67}}{T^{\frac{1}{4\mu}}} \tag{4.5}$$

La figura 4.6 compara las curvas promedio de  $R_{\mu\xi}$  (líneas continuas) con los resultados obtenidos al aplicar las expresiones propuestas (líneas discontinuas). Puede observarse una excelente coincidencia entre los valores arrojados por las expresiones propuestas y los valores reales de  $R_{\mu\xi}$ . Dado que las expresiones propuestas pudieran no resultar sencillas para algunos profesionistas, pudiera plantearse su simplificación en función de la confiabilidad requerida para el diseño y lo que se considere como una complejidad aceptable. Una posible simplificación sería la propuesta por la ecuación (4.6)

$$R_{\mu\xi} = \phi \left( \frac{T^\alpha}{\beta + T^\alpha} \right) + 1 \tag{4.6}$$

En la cual:

$$\beta = 0.002 \quad (4.7)$$

$$\alpha = 1.2 \quad (4.8)$$

$$\phi = \mu(2.2\xi + 1) - 0.75\xi^{-0.1} \quad (4.9)$$

En la figura 4.7 se muestran los valores de  $R_{\mu\xi}$  obtenidos con la ecuación (4.6) (líneas discontinuas) y las curvas promedio (líneas continuas). Aunque al simplificar la expresión se pierde algo de precisión, esta pérdida de precisión no es muy importante en un contexto práctico; las diferencias más notables se presentan para valores de  $\xi$  altos. La expresión (4.6) conduce a valores razonables de  $R_{\mu\xi}$ , sin embargo tiene la desventaja de que no refleja completamente el fenómeno físico, ya que como ha sido identificado por varios estudios (Miranda 1993, Nassar y Krawinkler 1991) el factor de reducción en suelos firmes vale uno para periodos muy cortos y va incrementándose hasta alcanzar un máximo, a partir del cual disminuye gradualmente hasta alcanzar el valor de  $\mu$  para periodos muy largos. El valor de  $R_{\mu\xi}$  acorde a la ecuación (4.6) permanece prácticamente constante después de alcanzar el máximo. A juicio del autor, las expresiones de un reglamento de construcciones además de tomar en cuenta las opiniones de los ingenieros de la práctica también deben reflejar el estado actual del conocimiento, por lo que aunque la expresión simplificada conduzca a valores razonables, podría ser más conveniente la aplicación de la ecuación (4.1), la cual refleja un mejor entendimiento del fenómeno en estudio.

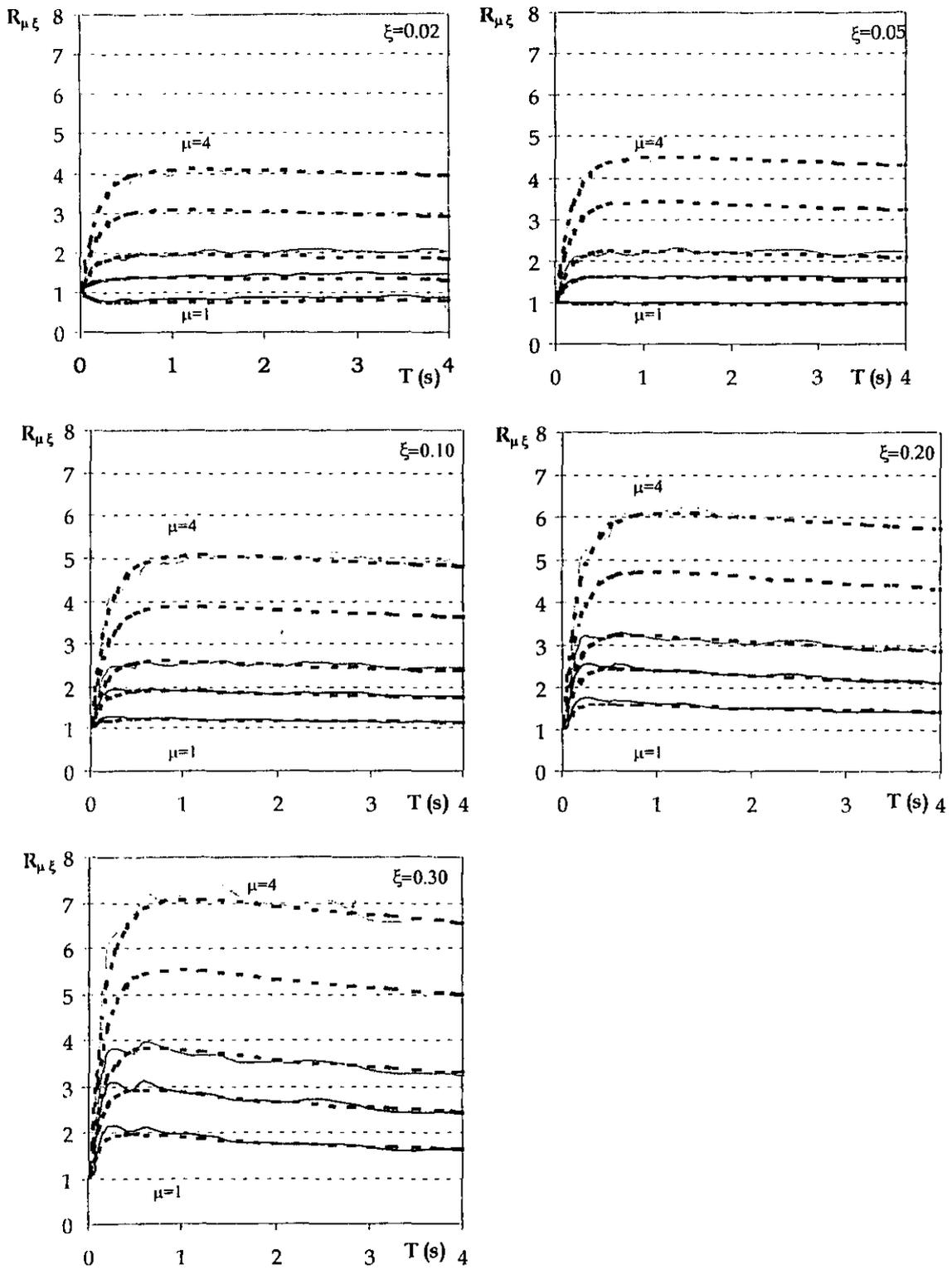


Figura 4.6 Comparación de factor de reducción estimado y promedio para suelo firme

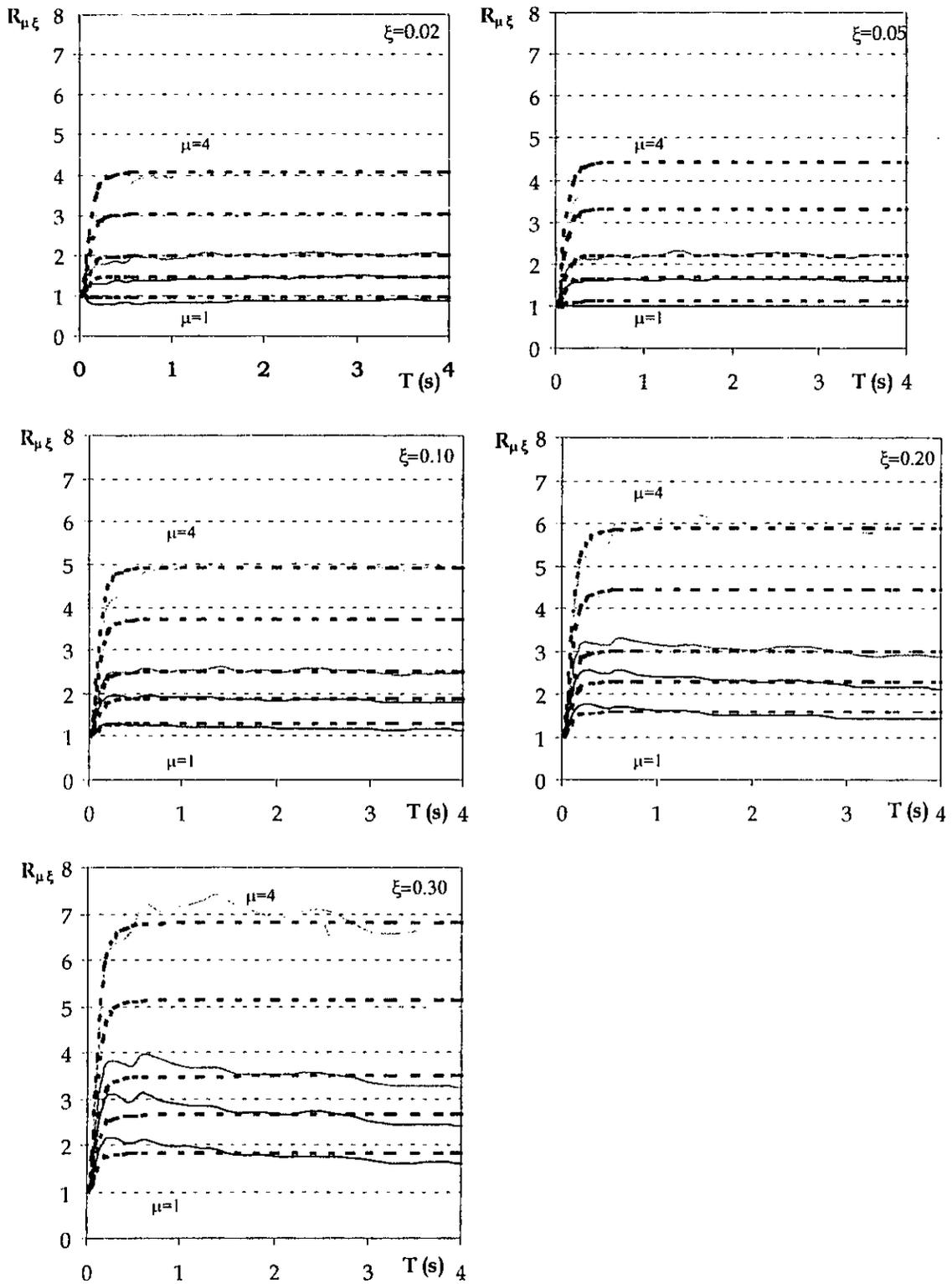


Figura 4.7 Comparación de factor de reducción estimado con la expresión simplificada y el factor de reducción promedio para suelo firme

#### 4.4 COMENTARIOS

Las ecuaciones (4.1) a (4.5) permiten estimar el valor de  $R_{\mu\xi}$  para sistemas situados en suelo firme, en función del periodo, de la capacidad plástica de deformación y del amortiguamiento equivalente. Para hacer posible su aplicación práctica, es importante delimitar su aplicabilidad por medio de revisar que cumplan con las condiciones físicas que define la dinámica estructural.

La primera condición se da cuando el valor de  $T$  tiende a cero, ya que en este caso el valor de  $R_{\mu\xi}$  debe tender a uno independientemente del valor de  $\mu$  y de  $\xi$ . Para sistemas extremadamente rígidos el desplazamiento relativo de la estructura con respecto al suelo es prácticamente cero independientemente de los valores de  $\mu$  y de  $\xi$ , por lo tanto, la aceleración máxima del sistema es prácticamente igual a la aceleración máxima del terreno. La expresión propuesta cumple satisfactoriamente con esta condición, ya que cuando  $T$  tiende a cero, el término  $T^\alpha/(\beta+T^\alpha)$  tiende a cero en la ecuación (4.1), y por tanto,  $R_{\mu\xi}$  tiende al valor de uno.

La segunda condición se da para sistemas altamente flexibles, los cuales tienen altos valores de  $T$ . Para este caso la flexibilidad de las estructuras hace que el desplazamiento relativo de la estructura con respecto al suelo sea prácticamente igual al desplazamiento del suelo, de tal forma que los desplazamientos máximos elásticos e inelásticos son prácticamente iguales (regla de Newmark), independientemente del valor de  $\mu$  y  $\xi$ . Por tanto, el valor de  $R_{\mu\xi}$  para dichos sistemas debe ser igual a  $\mu$ . La expresión propuesta no cumple con esta condición, ya que para  $T=\infty$  la expresión tiende a  $\phi+1$ . Aunque las expresiones propuestas no satisfacen la segunda condición física, es necesario poner en perspectiva esta situación. En particular vale la pena mencionar que durante el análisis de la respuesta de los *SIGL*, se encontró que el valor de  $T$  a partir del cual los desplazamientos máximos elásticos e inelásticos son iguales entre sí y al desplazamiento máximo del suelo, se ve influenciado de manera importante por dos factores: el tipo de filtrado al que se somete el acelerograma y la resistencia del sistema. Por lo general, si se utiliza un filtrado más severo de las frecuencias bajas, los valores de  $T$  para los cuales se cumple esta segunda condición disminuyen con respecto al caso donde se somete al acelerograma a un filtrado menos intenso. Además, para sistemas con resistencias muy bajas respecto a la resistencia elástica, los valores de  $T$  para los cuales los desplazamientos máximos de la estructura y del terreno son iguales entre sí son menores que los que se presentan en sistemas con mayor resistencia.

Se encontró que la segunda condición se empieza a cumplir para sistemas con  $T$  del orden de 15 a 20 segundos. Dado que la regresión aquí presentada se realizó considerando valores de  $T$  de hasta de cuatro segundos, se decidió no modificar la expresión resultante para evitar complicaciones innecesarias, ya que la gran mayoría de las estructuras tienen valores del  $T$  que se encuentran dentro del intervalo considerado para la regresión. Resulta importante remarcar que fueron filtradas las bajas frecuencias a partir de 0.1 Hz.

Dada la forma en que se definió el valor de  $R_{\mu\xi}$  en el Capítulo 2 mediante la ecuación (2.3), debe cumplirse que para el caso de  $\mu=1$  y  $\xi=0.05$ , el valor de  $R_{\mu\xi}$  debe ser igual a uno,

independientemente del valor de  $T$ . La expresión propuesta no cumple con toda rigurosidad esta condición, ya que para esta combinación de  $\mu$  y  $\xi$  se obtienen valores que oscilan entre 0.96 y 1.0; sin embargo, se considera que para fines prácticos estos valores son lo suficientemente aproximados a uno.

Es interesante comparar los resultados obtenidos mediante la expresión propuesta con los estudios realizados por otros investigadores. En la figura 4.7 se muestra la comparación de los valores reales de  $R_{\mu\xi}$  con aquellos obtenidos con la expresión propuesta y otras expresiones sugeridas por otros investigadores para el caso de  $\xi=5\%$ .

Se observa que la expresión propuesta presenta la mejor aproximación a los valores reales de  $R_{\mu\xi}$ , lo que era de esperarse ya que cada investigador utilizó diferentes muestras para realizar su regresión. No puede afirmarse que la expresión propuesta en esta tesis sea mejor que las presentadas por otros investigadores, pero sí puede decirse que tiene la misma validez que otras propuestas para estimar los valores de  $R_{\mu\xi}$  para sistemas tradicionales ubicados en suelo firme.

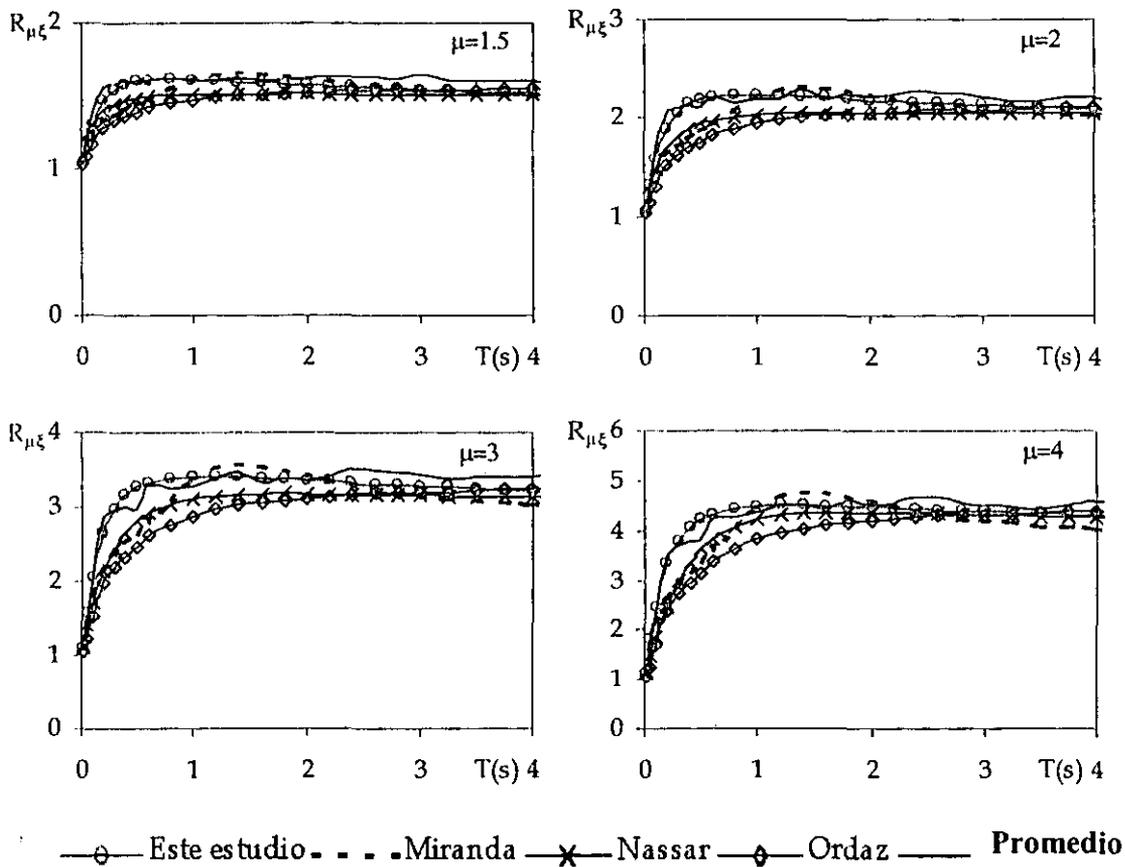


Figura 4.7 Comparación entre propuestas para estimar  $R_{\mu\xi}$ ,  $\xi=5\%$

En la figura 4.8 se presenta la comparación de la expresión propuesta en esta tesis con las

expresión propuesta por Ordaz y Pérez (1998) para el caso de  $\xi=0.10$ . Cabe mencionar que la comparación se realiza utilizando la definición del factor de reducción que introducen Ordaz y Pérez:

$$R_{\mu}(\mu_0, \xi_0, T_0) = FS(\mu=1, \xi=\xi_0, T_0) / FS(\mu_0, \xi_0, T_0) \quad (4.6)$$

Tanto la definición del factor de reducción (ecuación 2.3) así como el valor de  $R_{\mu\xi}$  estimado para los acelerogramas fueron modificados para poder realizar dicha comparación.

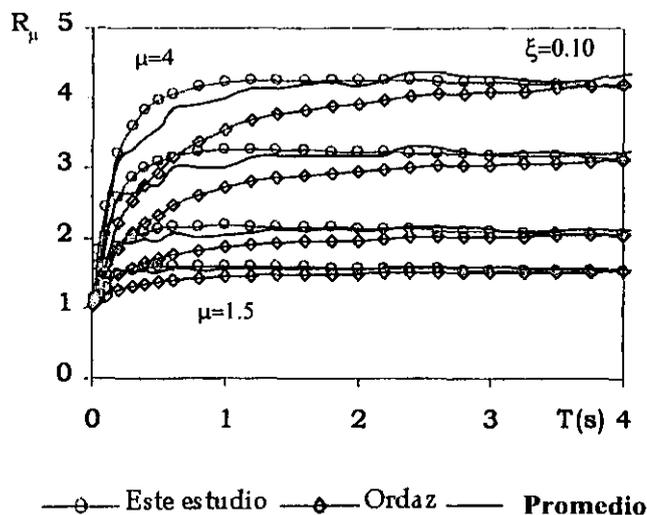


Figura 4.8 Comparación entre expresiones para estimar  $R_{\mu}$ ,  $\xi=10\%$

Como puede observarse en la figura 4.8, la expresión propuesta en este trabajo presenta una mejor aproximación a los valores reales de  $R_{\mu}$ , especialmente para el caso de  $\mu$  mayores a dos y valores de  $T$  menores que uno. Como se mencionó anteriormente, la muestra utilizada tiene influencia en esta comparación; además, se podría pensar que la implantación de dispositivos de disipación de energía busca el control de las demandas máximas de deformación, de tal manera que las diferencias discutidas para  $\mu$  mayor a dos no serían de gran importancia. Lo que sí representa una ventaja de la expresión propuesta es que con ella pueden estimarse las fuerzas sísmicas de diseño para sistemas con diferentes combinaciones de  $\mu$  y  $\xi$ , con base en el espectro elástico de resistencia para 5% de amortiguamiento, que es el espectro que se maneja normalmente en la normatividad de diseño sísmico.

En la figura 4.9 se muestran una comparación entre la ecuación (4.1) con la expresión propuesta por Wu y Hanson para diferentes niveles de amortiguamiento y valores de  $\mu$ . Aunque la expresión propuesta en este trabajo presenta una mejor aproximación a los valores reales de  $R_{\mu}$ , la expresión de Wu y Hanson arroja resultados razonables. Como ya se ha mencionado, la muestra utilizada tiene influencia en esta comparación. Es interesante hacer notar que no se presentan diferencias notables en los valores de  $R_{\mu\xi}$  estimados con estas dos expresiones, lo cual era de esperarse, ya que como se mencionó con anterioridad, factores como la magnitud del evento sísmico, la distancia epicentral y la duración de la

fase intensa no tienen una influencia significativa en el valor de  $R_{\mu\xi}$ .

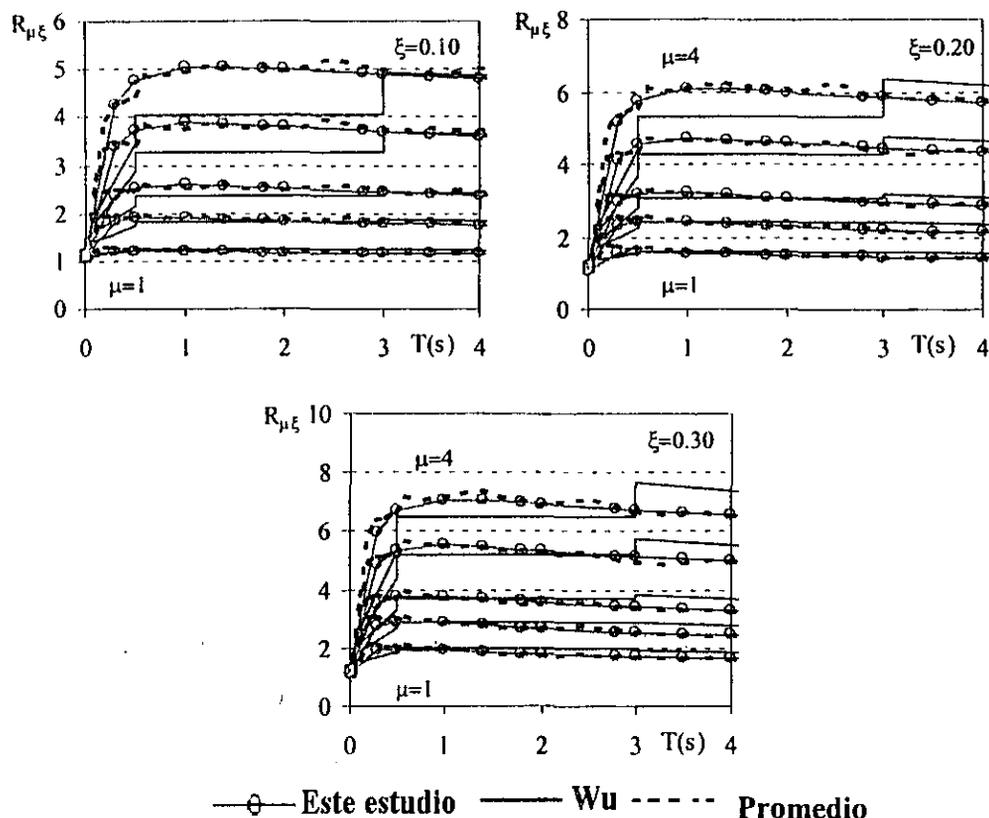


Figura 4.9 Factores de reducción para diferentes valores de  $\mu$  y  $\xi$  de acuerdo a este estudio y de acuerdo a Wu y Hanson

En la figura 4.10 se muestra la comparación de los valores reales de  $R_{\mu\xi}$  con aquellos obtenidos con la expresión propuesta y las expresiones del FEMA 273 para el caso de  $\mu=1$  y amortiguamientos de 0.10, 0.20 y 0.30. Los valores obtenidos con el FEMA 273 corresponden a un sitio en suelo firme ubicado en California.

Se observa que la expresión propuesta presenta la mejor aproximación a los valores reales de  $R_{\mu\xi}$  (ya se ha discutido antes la influencia de la muestra en este hecho). Se observa que las diferencias mayores se presentan para periodos cortos (menores que 0.6 segundos), en los que las expresiones del FEMA parecieran sobrestimar de manera importante el valor de  $R_{\mu\xi}$  para amortiguamientos de 0.30 y 0.20. Note que bajo las expresiones del FEMA 273 se obtienen valores de  $R_{\mu\xi}$  que no tienden a uno cuando el valor de  $T$  tiende a cero.

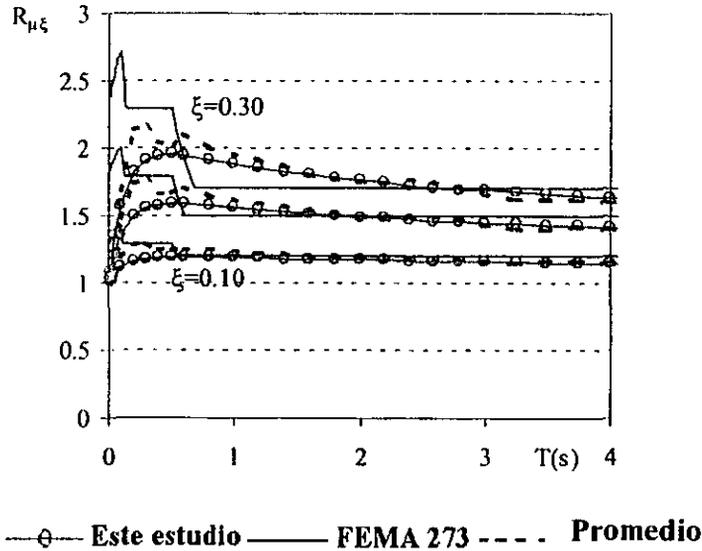


Figura 4.10 Factores de reducción para el caso elástico y diferentes valores de  $\xi$  de acuerdo a este estudio y de acuerdo al FEMA 273

Como se mencionó en el Capítulo 2, el uso correcto de los factores de reducción dentro del contexto del diseño sísmico ha adquirido gran relevancia recientemente. Se han planteado discusiones y se están planteando cambios importantes en el formato de los códigos de diseño sísmico de varios países, de manera que sea posible para el diseñador entender y contemplar explícitamente el comportamiento real esperado de la estructura durante su diseño sísmico. Algunas de estas discusiones y estudios ya se han visto reflejados en algunas normas, como en el caso del FEMA 273 (1999). En México se están planteando cambios a la forma de establecer los espectros de diseño para estructuras situadas en el Distrito Federal, (Ordaz *et al*, 2000). En particular a partir de la investigación realizada en años recientes, se están proponiendo espectros de diseño más realistas, y procedimientos de diseño más transparentes. Resulta interesante comparar dichas propuestas con los resultados obtenidos en este estudio con el propósito de establecer un ambiente de discusión que permita la actualización oportuna de los códigos de diseño sísmico a nivel nacional.

De acuerdo a esta propuesta, los espectros de resistencia elásticos para 5% de amortiguamiento, se determinan de acuerdo con la ecuación (4.10).

$$\frac{S_a(T)}{g} = \begin{cases} a_0 + (c - a_0) \frac{T}{T_a}; & \text{si } T < T_a \\ c; & \text{si } T_a \leq T \leq T_b \\ c \left[ k + (1 - k) \left( \frac{T_b}{T} \right)^2 \right] \left( \frac{T_b}{T} \right)^2 & \text{si } T \geq T_b \end{cases} \quad (4.10)$$

Donde  $S_a(T)$  es la aceleración espectral y los parámetros  $a_0$ ,  $c$ ,  $T_a$ ,  $T_b$  y  $k$  quedan determinados por las ecuaciones (4.11 a 4.15) respectivamente.

$$a_0 = \begin{cases} 0.1 + 0.15(T_s - 0.5); & \text{si } 0.5 \leq T_s \leq 1.5 \text{ s} \\ 0.25; & \text{si } T_s > 1.5 \text{ s} \end{cases} \quad (4.11)$$

$$c = \begin{cases} 0.28 + 0.92(T_s - 0.5); & \text{si } 0.5 \leq T_s \leq 1.5 \text{ s} \\ 1.2; & \text{si } 1.5 \leq T_s \leq 2.5 \text{ s} \\ 1.2 - 0.5(T_s - 2.5); & \text{si } 2.5 \leq T_s \leq 3.5 \text{ s} \\ 0.7; & \text{si } T_s > 3.5 \text{ s} \end{cases} \quad (4.12)$$

$$T_a = \begin{cases} 0.2 + 0.65(T_s - 0.5); & \text{si } 0.5 \leq T_s \leq 2.5 \text{ s} \\ 1.5; & \text{si } 2.5 \leq T_s \leq 3.25 \text{ s} \\ 4.75 - T_s; & \text{si } 3.25 \leq T_s \leq 3.9 \text{ s} \\ 0.85; & \text{si } T_s > 3.9 \text{ s} \end{cases} \quad (4.13)$$

$$T_b = \begin{cases} 1.35; & \text{si } T_s \leq 1.125 \text{ s} \\ 1.2T_s; & \text{si } 1.125 \leq T_s \leq 3.5 \text{ s} \\ 4.2; & \text{si } T_s > 3.5 \text{ s} \end{cases} \quad (4.14)$$

$$k = \begin{cases} 2 - T_s; & \text{si } 0.5 \leq T_s \leq 1.65 \text{ s} \\ 0.35; & \text{si } T_s > 1.65 \text{ s} \end{cases} \quad (4.15)$$

Donde  $T_s$  es el periodo predominante del suelo.

Para tomar en cuenta la reducción en la resistencia debido al comportamiento plástico, los espectros elásticos se reducen por el factor de reducción  $Q'$ , definido en la ecuación (4.16)

$$Q' = \begin{cases} 1 + \frac{Q-1}{\sqrt{k}} \frac{T}{T_a}; & \text{si } T_s \leq T_a \\ 1 + \frac{Q-1}{\sqrt{k}}; & \text{si } T_a \leq T \leq T_b \\ 1 + (Q-1) \sqrt{\frac{p}{k}}; & \text{si } T > T_b \end{cases} \quad (4.16)$$

en donde  $Q$  es la capacidad dúctil y  $p$  se calcula de acuerdo a la ecuación (4.17)

$$p = k + (1 - k) \left( \frac{T_b}{T} \right)^2 \quad (4.17)$$

Para tomar en cuenta el efecto de la sobrerresistencia, los espectros calculados con las

expresiones anteriores deben ser modificados por el factor  $R$ , definido en la ecuación (4.18).

$$R = \begin{cases} \frac{10}{4 + \sqrt{T/T_a}}; & \text{si } T \leq T_a \\ 2; & \text{si } T > T_a \end{cases} \quad (4.18)$$

La figura 4.11 compara los valores reales de  $R_{\mu\xi}$  para suelo firme con las estimaciones obtenidas a partir de la ecuación (4.1) y el apéndice A de las Normas Técnicas Complementarias para el diseño por sismo considerando un  $T_s$  de 0.5 segundos.

Se observa en la figura 4.11 que la expresión (4.16) conduce a resultados ligeramente conservadores en todo el intervalo de periodos considerados, excepto para periodos muy cortos. La nueva propuesta del RCDF es una versión simplificada de la expresión propuesta por Ordaz y Pérez (1998), con el objeto de facilitar su manejo en un contexto práctico. Tomando esto en cuenta las diferencias observadas en la figura 4.10 son razonables, ya que toda simplificación implica una pérdida de exactitud. Note que tal como debería de ser la expresión de diseño conduce a resultados del lado de la seguridad.

Resulta interesante comentar que, como se mencionó en el Capítulo 2, aún para suelos firmes se pueden alcanzar valores de  $R_{\mu\xi}$  mayores a  $\mu$  (Miranda, 1993; Nassar y Krawinkler, 1991). En la figura 4.10 se observa que los valores obtenidos con la nueva propuesta del RCDF son siempre menores a  $\mu$ , pudiendo tomar como máximo  $\mu$  para valores grandes de  $T$ .

En la figura 4.12 se presentan con línea continua, los espectros de aceleración para  $\xi$  de 0.05 obtenidos a partir de las ecuaciones 4.10 y 4.16, y con línea discontinua, espectros correspondientes a un sitio en la Ciudad de México con  $T_g$  de 0.5 segundos. Los últimos espectros se obtuvieron conforme a lo siguiente: para  $\mu=1$  (elástico), se utilizó un espectro de peligro uniforme asociado a un periodo de retorno de 125 años (Ordaz, 2000); mientras que para  $\mu>1$ , se redujo dicho espectro elástico con los factores de reducción promedio encontrados en este estudio. Cabe mencionar que no se incluyó el efecto de la sobrerresistencia en ninguno de los dos casos y que en la comparación no se utilizó el espectro de resistencia mostrado en la figura 4.1, ya que en la muestra utilizada para la regresión se incluyeron acelerogramas registrados durante eventos sísmicos de diferentes magnitudes y asociados a diferentes periodos de retorno.

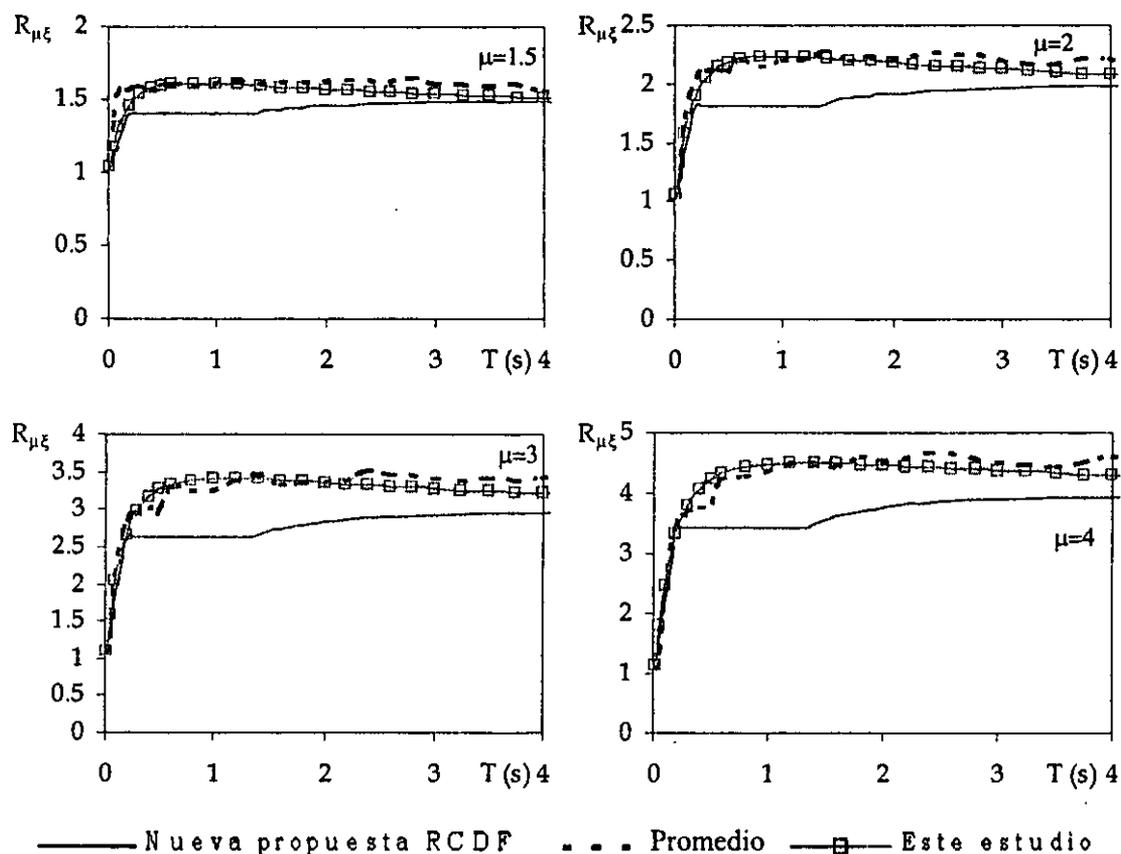


Figura 4.11 Comparación de valores de  $R_{\mu\xi}(T_s=0.5 \text{ s})$

Como se observa en la figura 4.12, las expresiones 4.10 y 4.16 conducen, para el caso de suelo firme, a valores de aceleraciones que están del lado de la seguridad en todo el intervalo de periodos considerados. Era de esperar que se presentaran las variaciones observadas, ya que para poder incorporar los resultados de investigación a los códigos de diseño, es necesario simplificar las expresiones obtenidas para facilitar su manejo con miras a una aplicación práctica. Además, deben considerarse la necesidad de tomar en cuenta la incertidumbre que existe tanto en la estimación de la demanda sísmica como la estimación de las propiedades mecánicas de las estructuras reales. Para periodos mayores a dos segundos se observa una buena correlación entre las aceleraciones obtenidas con las expresiones del reglamento y el nivel de aceleración esperado, mientras que para periodos menores a dos segundos, pareciera que las expresiones del reglamento conducen a niveles de aceleración demasiado conservadores.

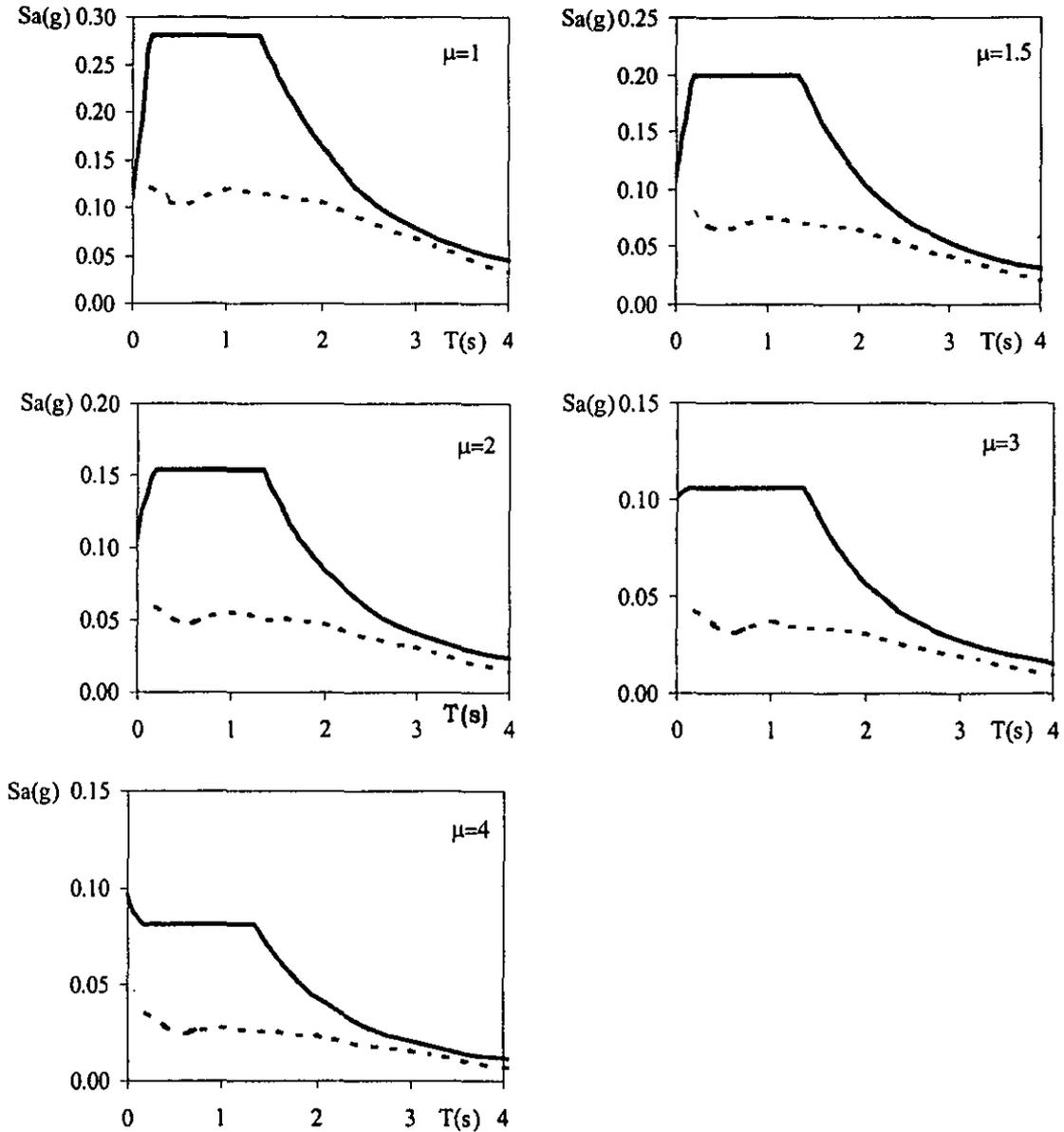


Figura 4.12 Espectros de aceleración para un sitio con  $T_g=0.5$  segundos

Cabe mencionar que existe una variabilidad importante en los valores de  $R_{\mu\xi}$ , para ilustrar esto hecho la figuras 4.13 muestra los valores de la desviación estándar ( $\sigma$ ) del los valores de  $R_{\mu\xi}$  para la muestra de suelo firme utilizada mientras que la figura 4.14 muestra los coeficientes de variación ( $COV$ ) de los valores de  $R_{\mu\xi}$  asociados a la muestra utilizada.

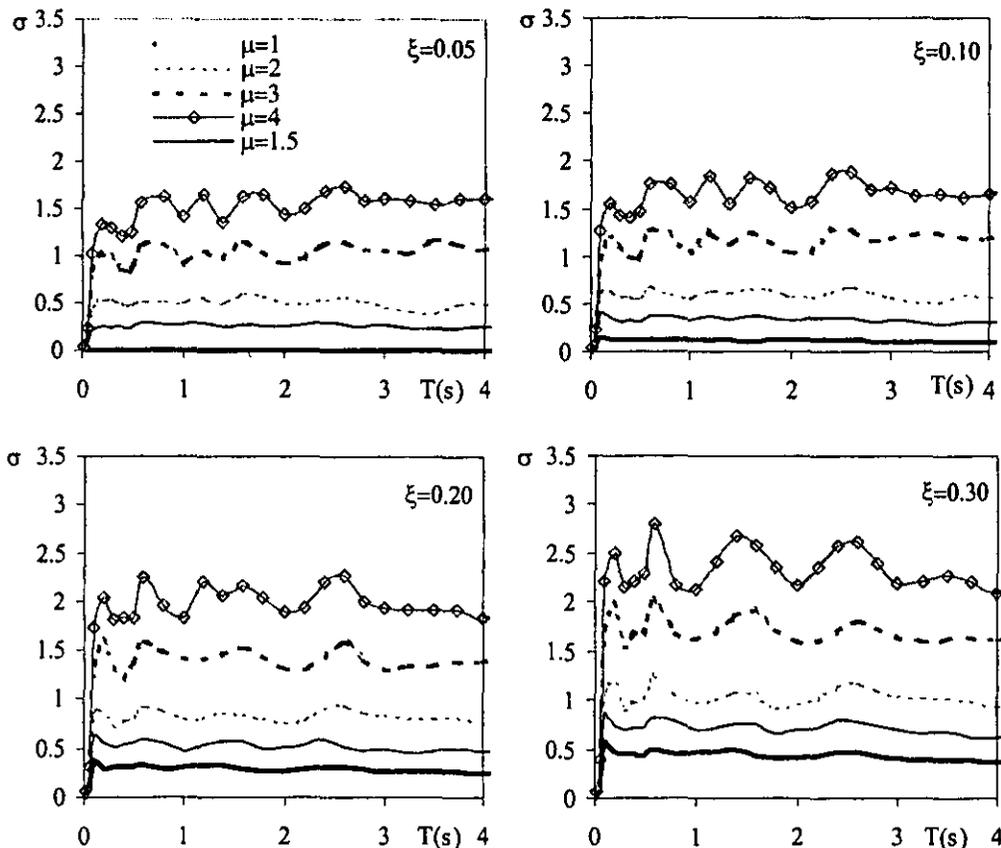


Figura 4.13 Desviaciones estándar de los valores de  $R_{\mu\xi}$  para la muestra de suelo firme utilizada

Se observa que se tienen valores de las  $\sigma$  así como de los  $COV$  mayores al aumentan el valor de  $\mu$ . En cambio, el efecto de  $\xi$  en los valores de  $\sigma$  y de  $COV$  es mucho menos importante que el efecto de  $\mu$ , tal como puede observarse en las figuras 4.13 y 4.14, se pueden llegar a tener variaciones muy importantes en los valores de  $R_{\mu\xi}$  por lo que podría pensarse que para la regresión estadística, realizada en este capítulo, hubiera resultado una mejor opción ajustar no al promedio  $R_{\mu\xi}$  sino al promedio menos una desviación estándar. Resulta interesante discutir al respecto. La finalidad de los factores  $R_{\mu\xi}$  es estimar un espectro de resistencia par diferentes valores de  $\mu$  y de  $\xi$ , a partir de un espectro elástico de diseño para  $\xi=0.05$ , para el caso de diseño resulta conveniente tener un espectro de resistencia promedio más una desviación estándar y no un espectro promedio. En esta tesis se encontró si se reduce el espectro elástico para  $\xi=0.05$  de resistencia más una desviación estándar con los factores de reducción promedio, prácticamente se obtiene el espectro de resistencia promedio más una desviación estándar para un valor de  $\mu$  y  $\xi$  asociados al valor de  $R_{\mu\xi}$  utilizado, por lo que es razonable utilizar los valores de  $R_{\mu\xi}$  promedio. Lo anterior ya había sido observado por Terán (1996), en un contexto diferente, quien estudiando la relación entre la energía de entrada, la energía plástica y el desplazamiento observó que a partir de la energía de entrada más una desviación estándar y mediante factores promedio es posible obtener valores de energía plástica y desplazamiento promedio más una desviación estándar.

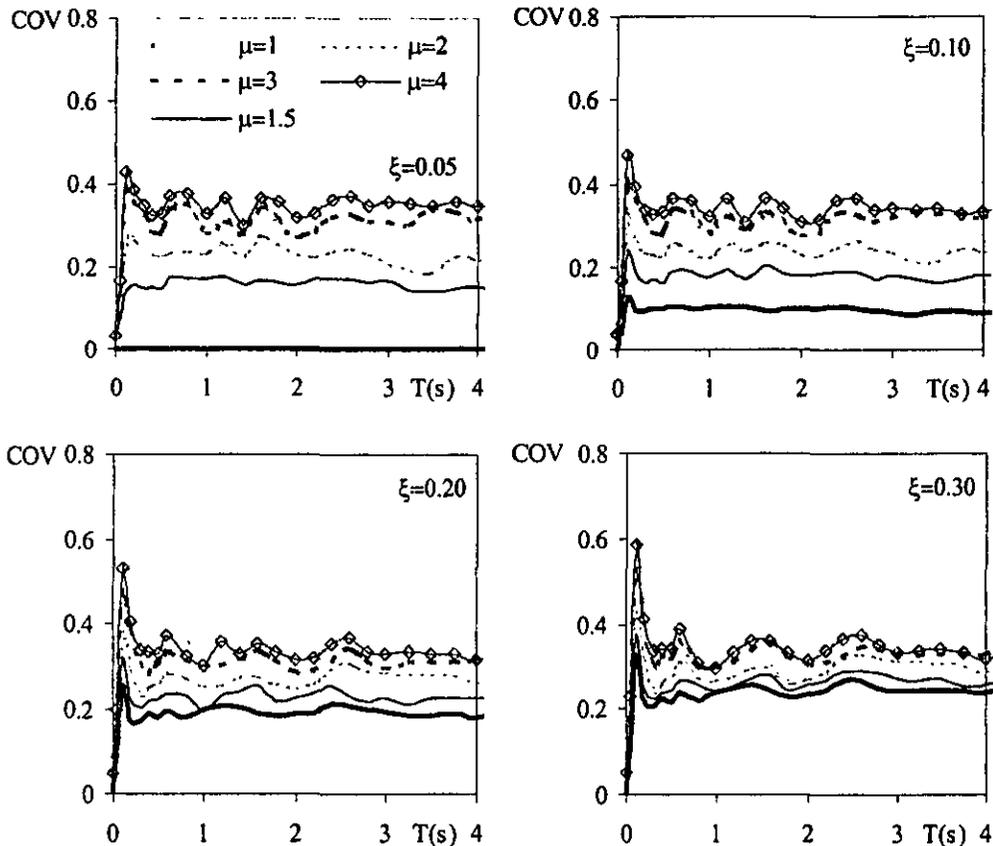


Figura 4.14 Coeficientes de variación de los valores de  $R_{\mu\xi}$  para la muestra de suelo firme utilizada

La figura 4.15 ilustra los discutido en le párrafo anterior, las figuras de la izquierda muestran espectros de resistencia para diferentes valores de  $\mu$  y de  $\xi$ , con línea gruesa se grafican los espectros de resistencia promedio mas una desviación estándar obtenidos con la muestra de acelerogramas de suelo firme utilizados en la regresión, la línea continua corresponde a los espectros de resistencia obtenidos en base a el espectro elástico promedio más una desviación estándar para  $\xi$  de 0.05 y los factores de reducción promedio, finalmente, la línea punteada corresponde a los espectros de resistencia obtenidos en base a el espectro elástico promedio más una desviación estándar para  $\xi$  de 0.05 y los factores de reducción definidos por la expresión propuesta en esta tesis para el caso de suelo firme; en las figuras de la derecha se grafican los cocientes entre el espectro de resistencia promedio mas una desviación estándar obtenidos con la muestra de acelerogramas y el espectro obtenido con los factores de reducción promedio (líneas continuas) y los factores de reducción estimados a partir de la expresión propuesta en esta tesis (líneas discontinuas). Se observa que existe una aproximación razonable al utilizar los factores de reducción promedio y los factores de reducción propuestos.

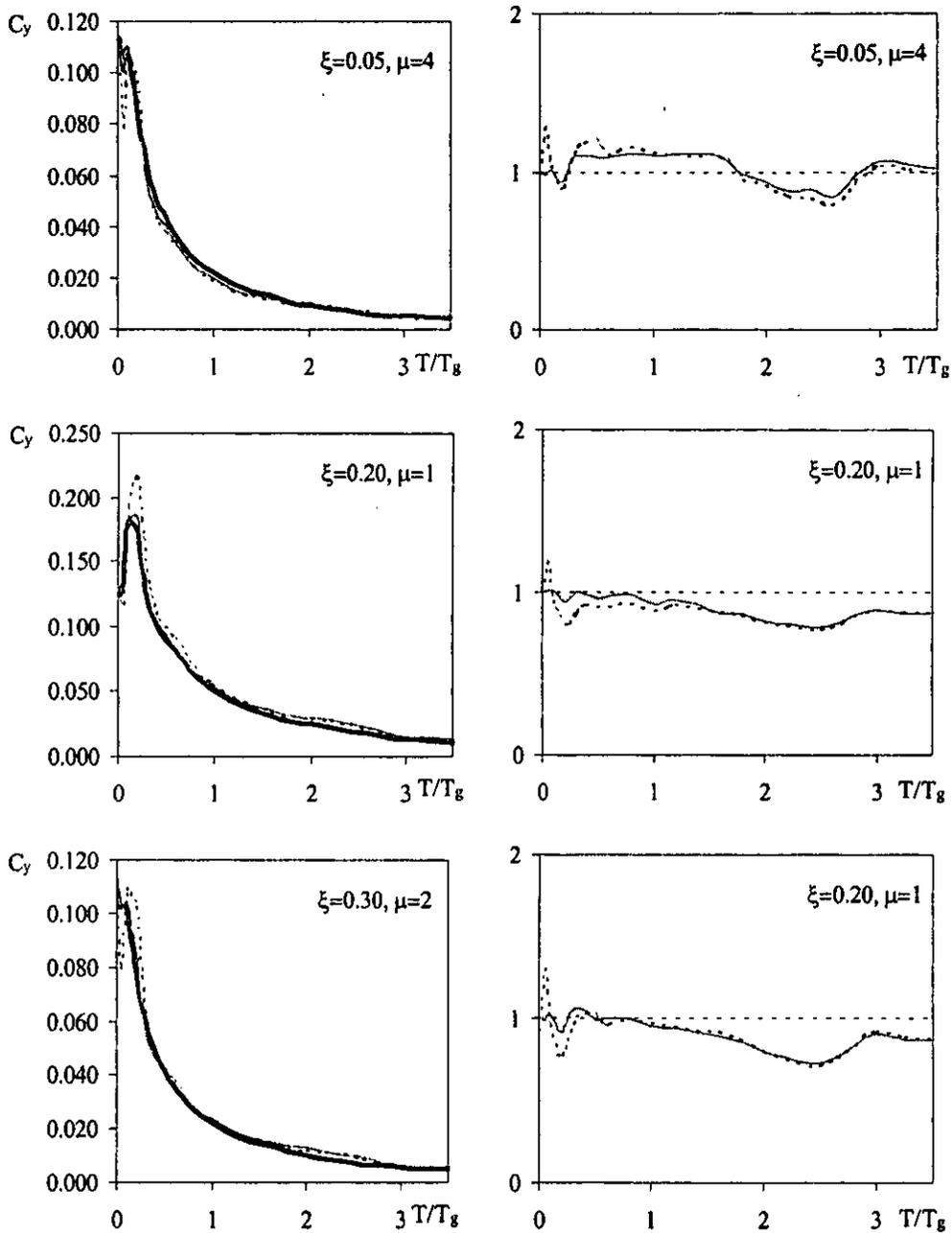


Figura 4.15 Comparación entre espectros de resistencia promedio más una desviación estándar y los espectros estimados a partir de los factores de reducción promedio y los factores de reducción propuestos

Otros parámetros interesantes para cuantificar la variabilidad de las expresiones propuestas son la desviación estándar logarítmica ( $\sigma_{lnR}$ ) y el error logarítmico medio ( $\epsilon_m$ ) definidos por las ecuaciones (4.19) y (4.20) respectivamente.

$$\sigma_{\ln R} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \ln^2 \left( \frac{O_j}{C_j} \right)} \quad (4.19)$$

$$\varepsilon_m = \frac{1}{N} \sum \ln \left( \frac{O_j}{C_j} \right) \quad (4.20)$$

En donde  $N$  es el número de valores estudiados,  $O_j$  es el valor observado y  $C_j$  es el valor estimado. En la figura 4.16 se muestran los valores de la  $\sigma_{\ln R}$  para distintas combinaciones de  $\mu$  y  $\xi$ . Se observan tendencias similares a las mostradas en la figura 4.14; en donde excepto para periodos muy cortos la variabilidad de la expresión propuesta es prácticamente independiente del valor de  $T$ . Además se observa que un aumento de  $\xi$  provoca un aumento poco significativo en el valor de la  $\sigma_{\ln R}$  para una  $\mu$  constante. Las observaciones anteriores permite pensar que modificar la expresión propuesta para tomar en cuenta esta variabilidad no sería complicado.

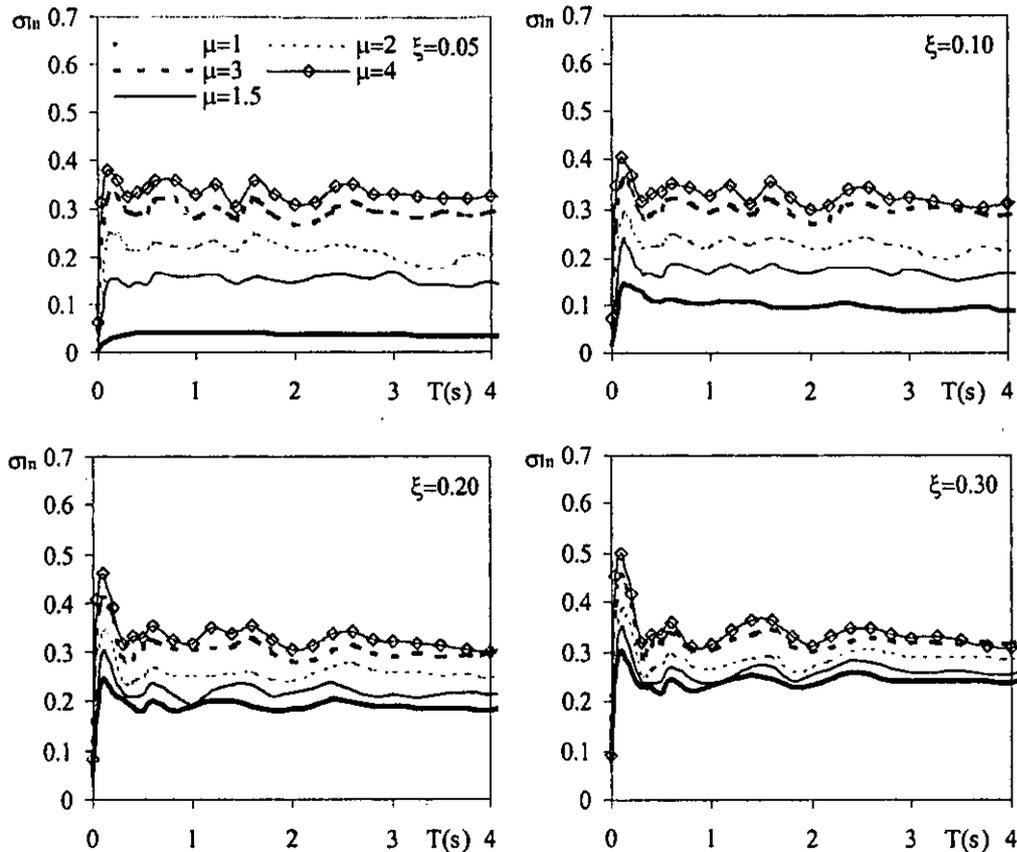


Figura 4.16 Desviaciones estándar logarítmicas para la expresión propuesta

Los valores de  $\sigma_{\ln R}$  obtenidos en este estudio concuerdan con los obtenidos por otros investigadores, tal como se muestra en la figura 4.17 donde se comparan los valores de  $\sigma_{\ln R}$  de la expresión propuesta en este estudio con la expresión propuesta por Ordaz y Pérez (1998) para la muestra considerada en este estudio y valores de  $\mu$  de 2 y 4 y  $\xi$  de 0.05. Se

observa que en general ambas propuestas tienen el mismo grado de variabilidad, las diferencias más notables se presentan para periodos cortos en donde la expresión (4.1) conduce a niveles de variabilidad ligeramente menores a los que se presentan con la expresión propuesta por Ordaz y Pérez (1998), es claro que lo anterior puede ser consecuencia de la muestra utilizada, y para periodos mayores a dos segundos y  $\mu$  de 4 en donde la expresión de Ordaz y Pérez (1998) conduce a niveles de variabilidad ligeramente menores a los que se obtienen con la expresión (4.1).

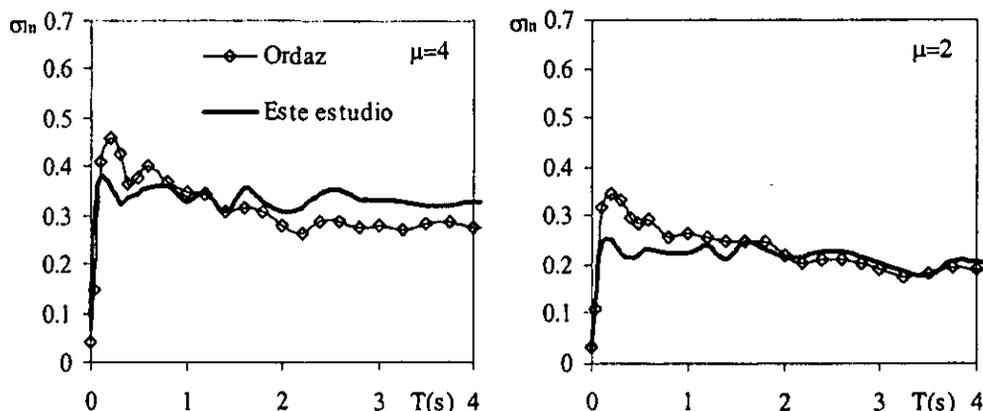


Figura 4.17 Comparación entre valores de  $\sigma_{nR}$  para diferentes propuestas,  $\xi=0.05$

En la figura 4.18 se muestran los valores del  $\varepsilon_m$  que se obtienen con la expresión (4.1), el  $\varepsilon_m$  proporciona una idea del sesgo que tiene la expresión propuesta bajo el siguiente contexto, un valor de  $\varepsilon_m$  igual a cero indica que la expresión es insesgada, un valor positivo de  $\varepsilon_m$  indica que la expresión subestima sistemáticamente a el valor observado, mientras que un valor negativo indica que la expresión sobrestima sistemáticamente al valor observado, lo anterior se puede observar claramente en la ecuación (4.20).

Se observa que excepto para periodos muy cortos se tienen valores pequeños de  $\varepsilon_m$ , lo cual concuerda con lo mostrado en la figura 4.16 en donde se tienen las mayores desviaciones para estos periodos. Puede concluirse que para periodos muy cortos la expresión (4.1) tiende a sobrestimar el valor de  $R_{\mu\xi}$ . Se observa que en general al aumentar  $\xi$  se tienen un ligero aumento en los valores de  $\varepsilon_m$ . Una vez más es notable que el valor de  $\varepsilon_m$  es independiente del valor de  $T$ , excepto para  $T$  muy cortos.

Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 4.2 en donde se muestra el valor de  $\varepsilon_m$  obtenido para cada valor de  $\xi$  y todos los valores de  $T$  y de  $\mu$  considerados en este estudio. De los valores mostrados en la tabla se observa que la expresión (4.1) tiende a sobrestimar sistemáticamente el valor de  $R_{\mu\xi}$ , lo cual podría pensarse que esta del lado de la inseguridad, es necesario comentar un poco al respecto. En la figura 4.18 se observa que los valores de  $\varepsilon_m$  mayores se presentan para  $T$  muy corto que corresponderían a estructuras extremadamente rígidas (i.e. estructuras de mampostería de menos de 3 niveles), es difícil pensar en implantar dispositivos disipadores de energía en este tipo de estructuras, por lo que si estos valores de  $T$  se omitieran en el calculo del los valores de  $\varepsilon_m$  disminuirían considerablemente, además que para el caso de  $\xi=0.05$  es donde se tienen los menores

valores de  $\varepsilon_m$ . Por lo que puede considerarse que la expresión (4.1) provee una estimación razonable del valor de  $R_{\mu\xi}$ .

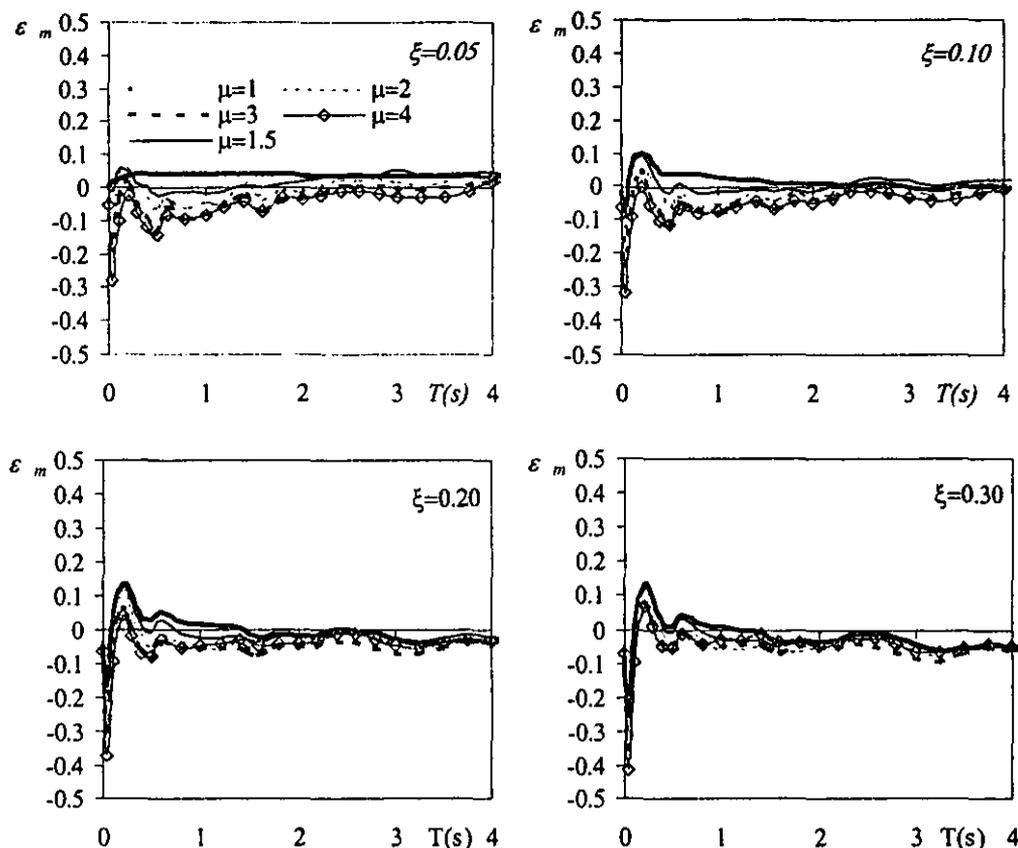


Figura 4.18 Errores logarítmicos medios para la expresión propuesta

Tabla 4.2 Errores logarítmicos medios obtenidos con la expresión propuesta

$\xi$	$\varepsilon_m$
0.05	-0.83142
0.10	-2.54942
0.20	-4.30318
0.30	-4.30318
$\Sigma$	-11.9872

A manera de dar una idea de los valores  $\varepsilon_m$  obtenidos en este estudio la figura 4.19 presenta los valores de  $\varepsilon_m$  que se obtienen con la expresión de Ordaz y Pérez (1998) para el caso de  $\xi=0.05$  para la muestra utilizada en este estudio. Nuevamente se aprecia que los valores mayores de  $\varepsilon_m$  se presentan para periodos cortos. Se observa que los valores de  $\varepsilon_m$  son mayores a los que se obtienen con la ecuación (4.1), es obvio que puede ser consecuencia de la muestra utilizada, y se observa claramente que la expresión de Ordaz y Pérez tiende a subestimar sistemáticamente los valores de  $R_{\mu\xi}$ , lo cual concuerda con lo mostrado en la figura 4.7.

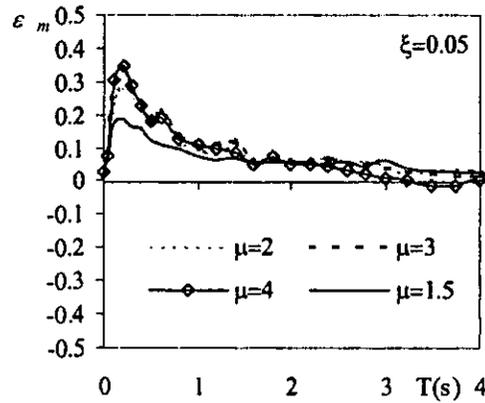


Figura 4.19 Errores logarítmicos medios obtenidos con la expresión de Ordaz y Pérez para la muestra utilizada en este estudio,  $\xi=0.05$

Con base en los razonamientos expuestos los párrafos anteriores puede concluirse que la ecuación (4.1) proporciona una idea razonable de los valores  $R_{\mu\xi}$  que pueden presentarse para sistemas con diferente capacidad de deformación plástica y disipación de energía viscosa, ubicados en suelo firme.

## CAPÍTULO 5

# FACTORES DE REDUCCIÓN PARA SUELO BLANDO

### 5.1 ALCANCE PARAMÉTRICO

Los resultados que aquí se reportan se obtuvieron a partir del estudio de la respuesta de sistemas de un grado de libertad (*SIGL*) con comportamiento elástoplastico perfecto. Miranda (1993) ha observado que en el caso de suelos blandos, la dependencia del factor de reducción ( $R_{\mu\xi}$ ) en el periodo de la estructura ( $T$ ) puede expresarse de una forma más conveniente cuando  $T$  se normaliza con el periodo dominante de la excitación ( $T_g$ ). Para obtener expresiones para el factor de reducción asociado a excitaciones típicas de suelo blando, se consideró un intervalo de  $T/T_g$  de 0.1 a 3.2.

En el estudio se consideraron ductilidades ( $\mu$ ) de 1 a 4 y se utilizaron valores del coeficiente de amortiguamiento ( $\xi$ ) de 0.02 a 0.30, intervalos de valores que cubren las combinaciones que generalmente pueden presentarse para sistemas tradicionales y sistemas con disipadores de energía.

Se utilizó una muestra de 152 acelerogramas registrados durante diferentes eventos sísmicos en diferentes sitios ubicados en la zona de lago de DF. La tabla 5.1 resume las estaciones y las aceleraciones máximas del terreno así como los periodos dominantes de los acelerogramas ahí registrados. Inicialmente,  $T_g$  se definió como el valor de  $T$  en que el espectro de velocidad alcanza su valor máximo para un  $\xi$  de 0.05. Sin embargo, los resultados obtenidos con esta definición no fueron del todo satisfactorios, de manera que  $T_g$  se redefinió como el valor de  $T$  en que el espectro de energía de entrada alcanza su valor máximo para un  $\xi$  de 0.05. Los acelerogramas utilizados fueron sometidos a un proceso de filtrado para eliminar las frecuencias bajas, a partir de una frecuencia de 0.07 Hz, y corregir problemas de línea base. Este proceso se realizó mediante el filtro de Hodder (1983). En la figura 5.1 se muestra el espectro de resistencia elástico promedio de los acelerogramas utilizados.

Como podrá apreciarse en la tabla 5.1, la muestra incluye acelerogramas cuyas aceleraciones máximas oscilan entre 0.01g y 0.10g, y valores de  $T_g$  que oscilan entre 0.8 y 4.7, con un gran número de acelerogramas con valores de  $T_g$  cercanos a dos. La figura 5.1 muestra que el promedio de las aceleraciones máximas del terreno fue de aproximadamente 0.025g. El máximo del espectro incluido en esta figura está ubicado alrededor de  $T/T_g$  igual que 1.0, lo que es típico para excitaciones generadas en suelo blando. La amplificación dinámica máxima es del orden cinco, para un valor de  $T/T_g$  de uno. Es interesante notar que

este espectro incluye un segundo máximo en  $T/T_g$  igual que 0.5, ya que muchos de los acelerogramas utilizados exhibieron varios picos en su espectro de resistencia. Es claro que dado que en la muestra se incluyeron una mayoría de acelerogramas registrados durante sismos de baja magnitud, el valor de las aceleraciones promedio no corresponden a las que se podrían esperar durante el evento sísmico de diseño. Lo anterior no implica que los factores de reducción promedio que se obtuvieron no sean representativos de los que realmente pudieran presentarse durante excitaciones sísmicas intensas ya que como se mencionó en el Capítulo 2, se ha encontrado que la magnitud del evento sísmico no tienen un efecto significativo en el valor de  $R_{\mu\xi}$ . De igual manera se decidió incorporar en la muestra acelerogramas con diferentes duraciones ya que se ha encontrado que la duración no tiene un efecto notable en el valor del factor de reducción.

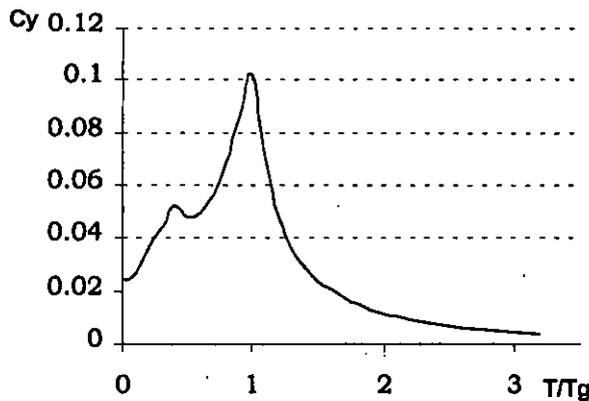


Figura 5.1 Espectro elástico promedio de resistencia para  $\xi=0.05$  y suelo blando

Tabla 5.1 Acelerogramas utilizados en la regresión de suelo blando

Reg	Fecha	Mc	Comp	Dur (s)	Tg(s)	Estación	A <sub>máx</sub> (cm/s <sup>2</sup> )
s1	14/09/95	7.3	EW	213.10	3.8	Unidad Kennedy	20.8
s2	14/09/95	7.3	NS	406.90	3.6	Unidad Kennedy	20.5
s3	24/10/93	6.7	EW	86.50	0.8	IMP	14.7
s4	24/10/93	6.7	NS	76.76	0.8	IMP	12.1
s5	14/09/95	7.3	EW	89.42	1.5	IMP	28.0
s6	14/09/95	7.3	NS	81.40	1.7	IMP	24.9
s7	10/12/94	6.3	EW	98.06	2.2	Roma A	19.4
s8	10/12/94	6.3	NS	114.22	2.2	Roma A	16.6
s9	14/09/95	7.3	EW	280.32	2.2	Roma A	33.42
s10	14/09/95	7.3	NS	280.32	2.2	Roma A	30.15
s11	14/09/95	7.3	EW	210.92	1.6	Zaragoza	32.2
s12	14/09/95	7.3	NS	191.58	1.6	Zaragoza	29.7
s13	09/10/95	7.5	EW	280.20	4.3	Zaragoza	14.3
s14	09/10/95	7.5	NS	298.56	4.2	Zaragoza	12.5
s15	14/09/95	7.3	EW	217.56	2.9	Aeropuerto	30.7
s16	14/09/95	7.3	NS	104.92	2.8	Aeropuerto	34.5
s17	14/09/95	7.3	EW	84.18	3.3	Apatlaco	51.8
s18	14/09/95	7.3	NS	146.58	3.2	Apatlaco	23.1
s19	14/09/95	7.3	EW	200.30	3.8	Aragón	25.2
s20	14/09/95	7.3	NS	174.86	3.4	Aragón	26.9
s21	09/10/95	7.5	EW	157.38	3.7	Aragón	17.4
s22	09/10/95	7.5	NS	152.34	3.4	Aragón	10.5
s23	14/09/95	7.3	EW	179.44	4.2	Cetis 57	29.6
s24	14/09/95	7.3	NS	153.82	4.3	Cetis 57	21.5
s25	10/12/94	6.3	EW	59.82	1.4	Culhuacan	14.8
s26	10/12/94	6.3	NS	86.34	1.4	Culhuacan	14.1
s27	14/09/95	7.3	EW	93.04	1.4	Culhuacan	27.7
s28	14/09/95	7.3	NS	95.24	1.4	Culhuacan	26.5
s29	10/12/94	6.3	EW	90.56	1.9	CUPJ	14.9
s30	10/12/94	6.3	NS	104.02	1.8	CUPJ	10.5
s31	14/09/95	7.3	EW	120.28	2.0	CUPJ	24.8
s32	14/09/95	7.3	NS	110.14	2.0	CUPJ	26.0
s33	10/12/94	6.3	EW	105.30	2.2	Córdoba	17.1
s34	10/12/94	6.3	NS	108.02	2.3	Córdoba	17.6
s35	14/09/95	7.3	EW	110.28	2.2	Córdoba	36.3
s36	14/09/95	7.3	NS	104.84	2.3	Córdoba	40.4
s37	09/10/95	7.5	EW	140.70	2.3	Córdoba	24.7
s38	09/10/95	7.5	NS	116.70	2.3	Córdoba	19.1
s39	14/09/95	7.3	EW	188.30	3.3	Dpvo. Moctezuma	19.4
s40	14/09/95	7.3	NS	144.34	3.7	Dpvo. Moctezuma	23.5

Tabla 5.1 Continua, Acelerogramas utilizados en la regresión de suelo blando

Reg	Fecha	Mc	Comp	Dur (s)	Tg(s)	Estación	A <sub>máx</sub> (cm/s <sup>2</sup> )
s41	09/10/95	7.5	EW	240.60	3.7	Deportivo Moctezuma	14.3
s42	09/10/95	7.5	NS	177.82	3.7	Deportivo Moctezuma	16.1
s43	10/12/94	6.3	EW	101.24	2.1	Garibaldi	13.9
s44	10/12/94	6.3	NS	88.06	2.2	Garibaldi	14.9
s45	14/09/95	7.3	EW	118.62	2.0	Garibaldi	30.5
s46	14/09/95	7.3	NS	121.30	2.1	Garibaldi	26.0
s47	14/09/95	7.3	EW	82.14	1.7	García Campillo	30.8
s48	14/09/95	7.3	NS	88.54	1.8	García Campillo	17.8
s49	10/12/94	6.3	EW	92.18	2.2	Hospital Juárez	14.5
s50	10/12/94	6.3	NS	90.64	2.7	Hospital Juárez	17.1
s51	14/09/95	7.3	EW	121.30	2.1	Hospital Juárez	35.9
s52	14/09/95	7.3	NS	131.10	3.2	Hospital Juárez	25.6
s53	14/09/95	7.3	EW	84.92	1.5	Ibero	21.6
s54	14/09/95	7.3	NS	90.46	1.5	Ibero	25.9
s55	10/12/94	6.3	EW	72.64	1.2	Jardines de Coyoacan	16.3
s56	10/12/94	6.3	NS	84.66	1.1	Jardines de Coyoacan	11.0
s57	14/09/95	7.3	EW	89.98	1.2	Jardines de Coyoacan	24.7
s58	14/09/95	7.3	NS	89.70	1.2	Jardines de Coyoacan	25.9
s59	09/10/95	7.5	EW	133.78	2.1	Liverpool	16.5
s60	09/10/95	7.5	NS	153.34	2.2	Liverpool	11.8
s61	14/09/95	7.3	EW	116.78	4.3	Nezahualcoyotl	34.6
s62	14/09/95	7.3	NS	136.98	4.4	Nezahualcoyotl	19.7
s63	14/09/95	7.3	EW	88.22	2.2	Plutarco Elías Calles	30.9
s64	14/09/95	7.3	NS	82.84	2.3	Plutarco Elías Calles	25.0
s65	09/10/95	7.5	EW	115.28	2.2	Plutarco Elías Calles	19.6
s66	09/10/95	7.5	NS	115.28	2.2	Plutarco Elías Calles	10.4
s67	14/09/95	7.3	EW	143.16	4.2	Palacio de los Deportes	27.9
s68	14/09/95	7.3	NS	154.10	4.2	Palacio de los Deportes	15.5
s69	09/10/95	7.5	EW	173.22	4.2	Palacio de los Deportes	17.8
s70	09/10/95	7.5	NS	157.98	3.9	Palacio de los Deportes	98.1
s71	10/12/94	6.3	EW	81.86	2.2	Rodolfo Menéndez	11.7
s72	10/12/94	6.3	NS	85.48	2.0	Rodolfo Menéndez	11.4
s73	14/09/95	7.3	EW	135.90	3.1	Rodolfo Menéndez	19.5
s74	14/09/95	7.3	NS	115.74	3.0	Rodolfo Menéndez	19.7
s75	07/06/92	7.40	EW	15.20	2.1	Tlatelolco	32.33
s76	07/06/92	7.40	NS	15.20	2.1	Tlatelolco	31.17
s77	10/12/94	6.3	EW	90.10	2.1	Tlatelolco	14.9
s78	10/12/94	6.3	NS	97.92	2.2	Tlatelolco	14.4
s79	14/09/95	7.3	EW	127.44	2.0	Tlatelolco	26.7
s80	14/09/95	7.3	NS	116.84	2.0	Tlatelolco	2.88

Tabla 5.1 Continua, Acelerogramas utilizados en la regresión de suelo blando

Reg	Fecha	Mc	Comp	Dur (s)	Tg(s)	Estación	A <sub>máx</sub> (cm/s <sup>2</sup> )
s81	23/05/94	5.6	EW	50.10	1.1	Unidad Colonia IMSS	14.4
s82	23/05/94	5.6	NS	49.30	1.3	Unidad Colonia IMSS	12.7
s83	24/10/93	6.5	EW	163.38	3.5	Xochimilco	15.8
s84	24/10/93	6.5	NS	195.84	3.4	Xochimilco	20.7
s85	10/12/94	6.3	EW	104.28	2.8	Xochipilli	17.1
s86	10/12/94	6.3	NS	119.04	2.7	Xochipilli	15.4
s87	09/10/95	7.5	EW	165.16	2.7	Xochipilli	15.5
s88	09/10/95	7.5	NS	162.60	2.8	Xochipilli	24.3
s89	14/09/95	7.3	EW	91.68	2.0	Alameda	40.6
s90	14/09/95	7.3	NS	105.6	2.0	Alameda	34.9
s91	14/09/95	7.3	EW	215.74	4.4	Autódromo	33.8
s92	14/09/95	7.3	NS	228.84	4.2	Autódromo	14.3
s93	24/10/93	6.5	EW	167.21	2.7	Buenos Aires	14.4
s94	24/10/93	6.5	NS	167.23	2.9	Buenos Aires	17.3
s95	10/12/94	6.3	EW	140.55	2.7	Buenos Aires	16.5
s96	10/12/94	6.3	NS	142.91	2.6	Buenos Aires	15.9
s97	14/09/95	7.3	EW	26.94	2.9	Buenos Aires	32.1
s98	14/09/95	7.3	NS	22.05	3.0	Buenos Aires	39.3
s99	14/09/95	7.3	EW	101.42	2.7	Buenos Aires	21.6
S100	14/09/95	7.3	NS	119.78	2.7	Buenos Aires	22.8
S101	09/10/95	7.5	EW	170.39	2.8	Buenos Aires	22.9
S102	09/10/95	7.5	NS	179.76	2.7	Buenos Aires	15.4
S103	14/09/95	7.3	EW	128.85	2.2	Balderas	35.0
S104	14/09/95	7.3	NS	127.01	2.4	Balderas	32.5
S105	10/12/94	6.3	EW	120.32	2.7	Bondojito	25.1
S106	10/12/94	6.3	NS	117.85	2.8	Bondojito	25.1
S107	14/09/95	7.3	EW	140.51	2.8	Bondojito	30.8
S108	14/09/95	7.3	NS	144.70	2.8	Bondojito	44.1
S109	09/10/95	7.5	EW	166.59	2.6	Bondojito	22.7
S110	09/10/95	7.5	NS	175.60	2.5	Bondojito	17.1
S111	10/12/94	6.3	EW	149.38	3.0	Candelaria	14.2
S112	10/12/94	6.3	NS	130.00	3.0	Candelaria	14.2
S113	14/09/95	7.3	EW	197.71	3.2	Candelaria	34.1
S114	14/09/95	7.3	NS	154.73	3.1	Candelaria	28.8
S115	14/09/95	7.3	EW	186.44	3.0	Cetis	21.7
S116	14/09/95	7.3	NS	187.14	2.9	Cetis	23.3
S117	09/10/95	7.5	EW	183.56	3.0	Cetis	12.4
S118	09/10/95	7.5	NS	220.24	3.1	Cetis	11.2
S119	10/12/94	6.3	EW	104.10	1.9	C.U. Juárez	14.8
S120	10/12/94	6.3	NS	125.81	1.8	C.U. Juárez	11.1

Tabla 5.1 Continua, Acelerogramas utilizados en la regresión de suelo blando

Reg	Fecha	Mc	Comp	Dur (s)	Tg(s)	Estación	A <sub>máx</sub> (cm/s <sup>2</sup> )
s121	14/09/95	7.3	EW	121.28	2.0	C.U. Juárez	23.2
s122	14/09/95	7.3	NS	110.59	2.0	C.U. Juárez	26.2
s123	14/09/95	7.3	EW	77.30	1.0	Xotepingo	23.8
s124	14/09/95	7.3	NS	100.65	0.9	Xotepingo	16.1
s125	24/10/93	6.5	EW	38.95	2.1	Cibeles	16.6
s126	24/10/93	6.5	NS	38.73	1.6	Cibeles	14.9
s127	14/09/95	7.3	EW	22.42	2.2	Cibeles	37.4
s128	14/09/95	7.3	NS	22.50	2.2	Cibeles	41.6
s129	09/10/95	7.5	EW	188.10	2.0	Cibeles	14.3
s130	09/10/95	7.5	NS	142.17	1.8	Cibeles	10.1
s131	14/09/95	7.3	EW	25.59	1.6	Hangares	29.6
s132	14/09/95	7.3	NS	25.87	1.6	Hangares	26.5
s133	09/10/95	7.5	EW	249.98	4.2	Hangares	12.4
s134	09/10/95	7.5	NS	252.64	4.7	Hangares	11.4
s135	14/09/95	7.3	EW	172.08	3.0	Jamaica	28.1
s136	14/09/95	7.3	NS	145.71	3.1	Jamaica	24.7
s137	10/12/94	6.3	EW	87.12	2.6	Liconsa	23.9
s138	10/12/94	6.3	NS	114.32	2.6	Liconsa	16.0
s139	14/09/95	7.3	EW	107.43	2.1	Liconsa	51.3
s140	14/09/95	7.3	NS	114.47	3.1	Liconsa	33.4
s141	14/09/95	7.3	EW	180.61	3.3	Nezahualcoyotl	34.6
s142	14/09/95	7.3	NS	213.54	2.9	Nezahualcoyotl	33.4
s143	14/09/95	7.3	EW	101.61	2.0	Tlatelolco	29.6
s144	14/09/95	7.3	NS	106.78	1.9	Tlatelolco	19.1
s145	10/12/94	6.3	EW	131.73	2.4	Valle Gómez	19.4
s146	10/12/94	6.3	NS	112.71	2.1	Valle Gómez	15.6
s147	14/09/95	7.3	EW	22.12	2.7	Valle Gómez	38.0
s148	14/09/95	7.3	NS	23.06	2.3	Valle Gómez	2.44
s149	14/09/95	7.3	EW	104.42	2.3	Valle Gómez	36.0
s150	14/09/95	7.3	NS	117.75	2.3	Valle Gómez	8.76
s151	09/10/95	7.5	EW	164.6	2.3	Valle Gómez	17.1
s152	09/10/95	7.5	NS	186.83	2.4	Valle Gómez	13.7

## 5.2 FACTORES DE REDUCCIÓN PROMEDIO

El concepto de factor de reducción utilizado durante el presente Capítulo es el definido por la ecuación (2.3). En dicha ecuación la capacidad de deformación plástica de la estructura se caracterizará por medio de su ductilidad última ( $\mu$ ), definida como el cociente entre el desplazamiento lateral máximo que puede alcanzar cuando se le sujeta a un estado de deformación lateral monótonicamente creciente, y su desplazamiento lateral de fluencia. El nivel de amortiguamiento de la estructura se caracterizará por medio del valor de  $\xi$  asociado a ella.

$$R_{\mu\xi}(\mu_0, \xi_0, T_0) = FS(\mu=1, \xi=0.05, T_0) / FS(\mu_0, \xi_0, T_0) \quad (2.3)$$

donde  $FS(\mu_0, \xi_0, T_0)$  es la fuerza sísmica asociada a los valores específicos de  $\mu$ ,  $\xi$  y  $T$  asociados a la estructura para la cual se determina el valor de  $R_{\mu\xi}$ , y  $FS(\mu=1, \xi=0.05, T_0)$  es la fuerza sísmica para un sistema elástico con periodo  $T_0$  y un valor de  $\xi$  de 0.05. Cabe mencionar que no se hace consideración alguna acerca de sobrerresistencia.

La figura 5.2 muestra valores de  $R_{\mu\xi}$  para diferentes combinaciones de  $\mu$  y  $\xi$ . Estas curvas muestran tendencias típicas de excitaciones sísmicas generadas en terreno blando. El valor de  $R_{\mu\xi}$  tiene un valor de uno para un  $T$  de cero, y crece rápidamente hasta alcanzar un valor máximo para  $T/T_g$  de uno. A partir de este máximo el valor de  $R_{\mu\xi}$  disminuye rápidamente con un incremento de  $T/T_g$ . El valor de  $R_{\mu\xi}$  crece tanto con un incremento de  $\mu$  como con un incremento de  $\xi$ . Tal como lo deja ver la figura 5.2, en el caso de suelo blando se pueden presentar niveles de reducción varias veces mayores a los que se registran en suelo firme, principalmente en el intervalo de valores de  $T/T_g$  cercanos a uno. Se aprecia también que para valores grandes de  $T/T_g$  incrementar el amortiguamiento tiene poco efecto en el factor de reducción.

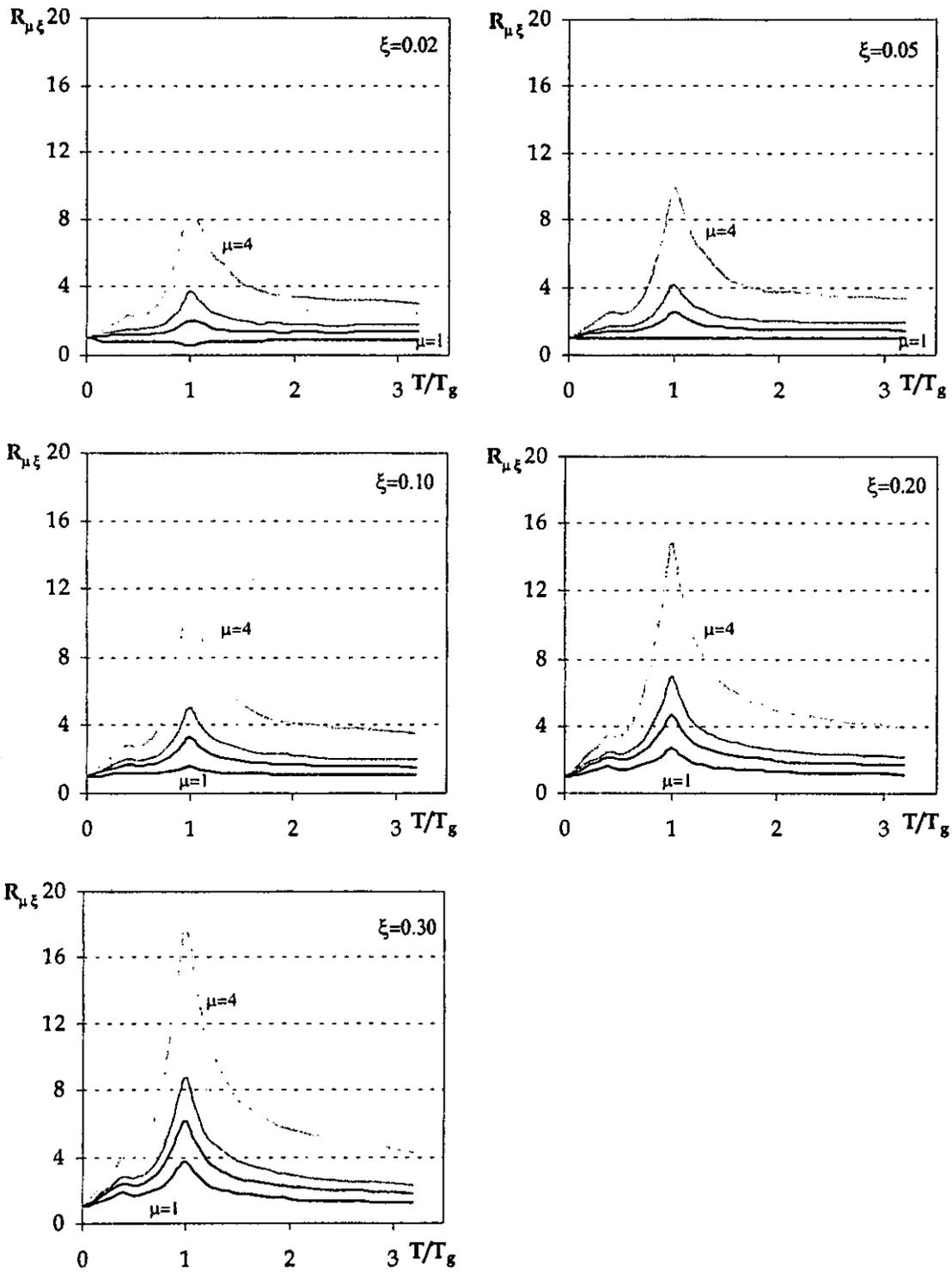


Figura 5.2 Factores de reducción para suelo blando

### 5.3 REGRESIÓN

Se probaron diferentes familias de curvas para aproximar las que se muestran en la figura 5.2. Después de varios intentos, se consideró una familia de curvas con la siguiente forma:

$$R_{\mu\xi} = \frac{\left(\frac{T}{T_g}\right)^\theta}{b + \left|\frac{T}{T_g} - 1\right|} \varphi + 1 \quad (5.1)$$

La forma básica  $(T/T_g) / (b + |T/T_g - 1|)$  se escogió con base en la expresión  $T^\alpha / (\beta + T^\alpha)$  seleccionada para suelo firme. La primera expresión vale cero para  $T$  de cero; sin embargo, a diferencia de la segunda, adquiere valores que pueden llegar a ser considerablemente mayores que los obtenidos con la segunda expresión, cuando  $T/T_g$  se aproxima al valor de uno. El valor del máximo que alcanza la curva depende de los valores de  $b$ ,  $\varphi$  y  $\theta$ , mientras que el valor del exponente  $\theta$  define la caída de  $R_{\mu\xi}$  a partir de ese máximo. El proceso de ajuste que se siguió es similar al utilizado en el caso de suelo firme, descrito en el Capítulo 4. La forma del factor  $\varphi$  se obtuvo con base en los resultados mostrados en la figura 5.3, donde se muestra la dependencia del valor de  $R_{\mu\xi}$ , para periodos largos, con respecto a  $\mu$  y  $\xi$ . Puede apreciarse que no es posible modelar dicha dependencia con una expresión matemática sencilla. Para determinar la forma que debería tener el factor  $\varphi$ , se ajustó para cada valor  $\xi$  una curva de  $R_{\mu\xi}$  en función de  $\mu$ , como se muestra en la figura 5.4.

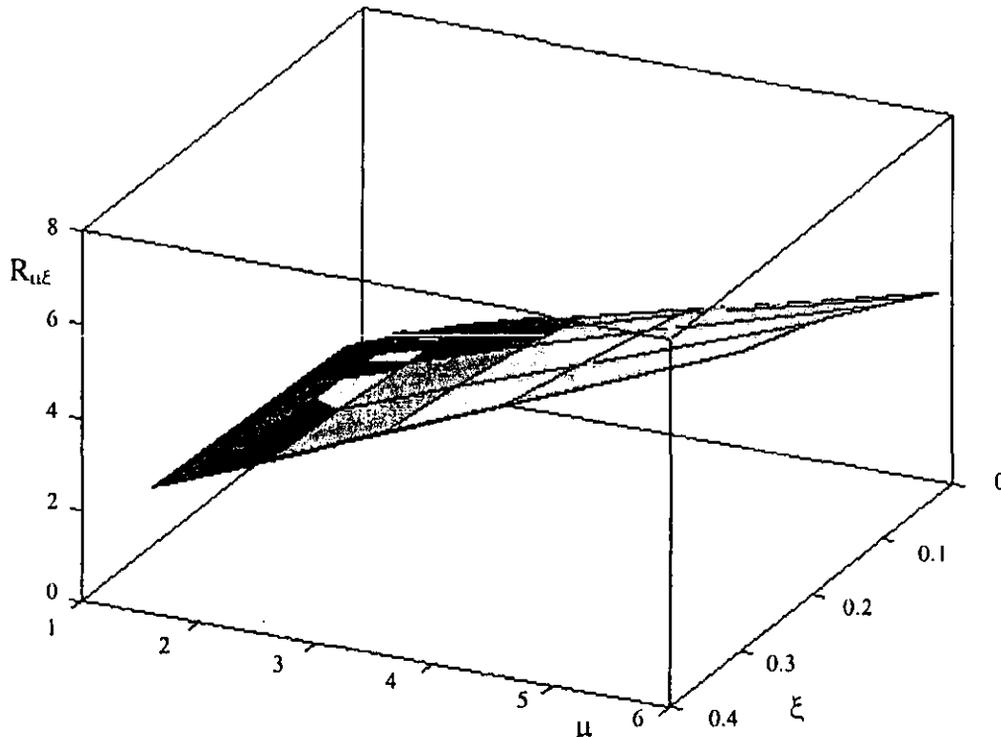


Figura 5.3 Interacción entre  $R_{\mu\xi}$ ,  $\mu$  y  $\xi$  para periodos largos

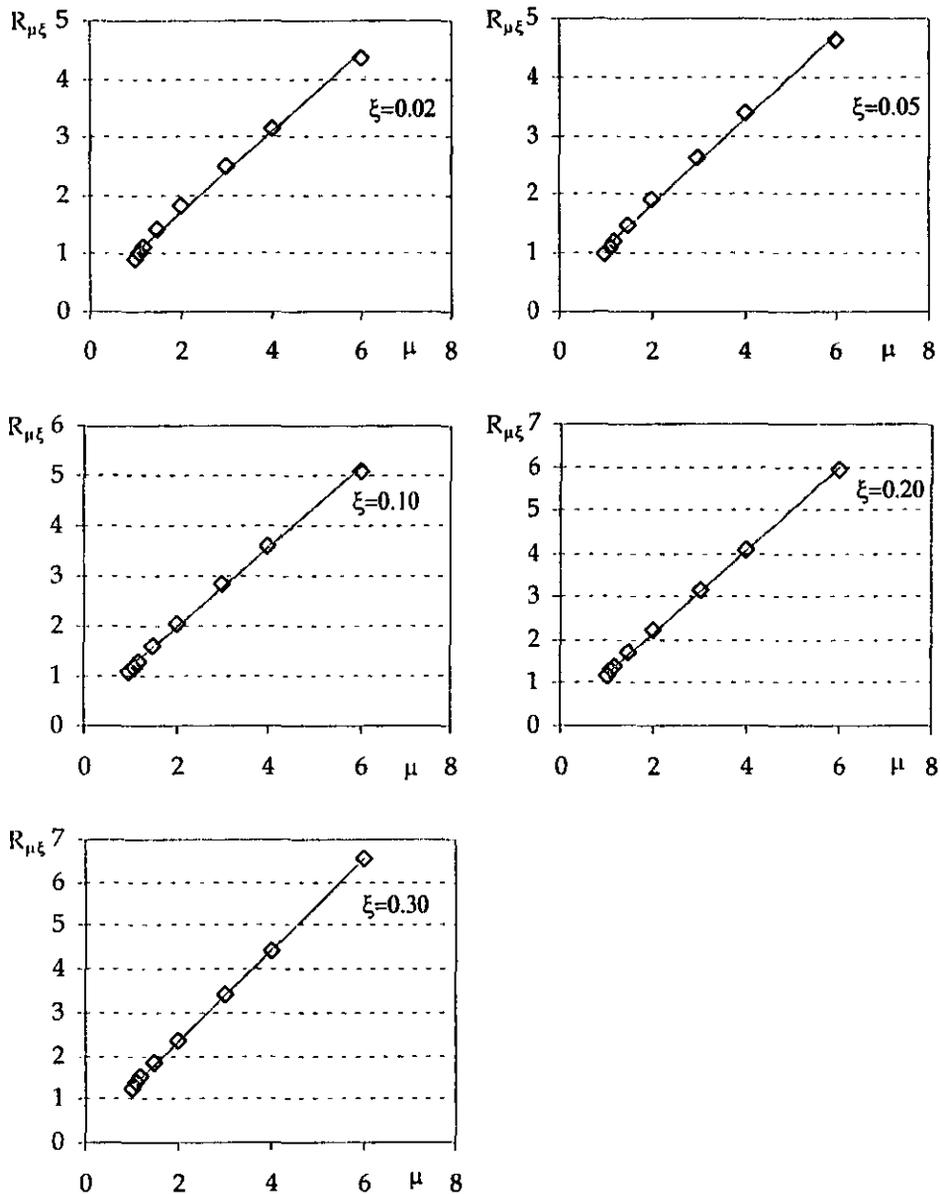
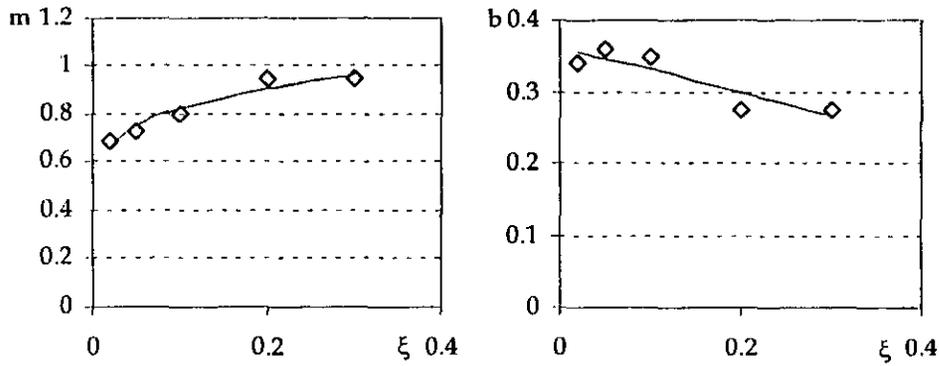


Figura 5.4 Ajustes  $R_{\mu\xi}$  en función de  $\mu$  para diferentes valores de  $\xi$

Como se muestra en la figura 5.4, se decidió ajustar líneas rectas para describir la dependencia de  $R_{\mu\xi}$  con respecto a  $\mu$ . Posteriormente se determinó la variación de los parámetros de ajuste de cada recta, pendiente ( $m$ ) y ordenada al origen ( $b$ ), en función del valor de  $\xi$ , tal como lo muestra la figura 5.5. Acorde a lo mostrado se decidió ajustar para  $m$  una curva de la forma  $c\xi^\theta$ ; mientras que para  $b$  se ajustó una línea recta.

La forma del parámetro  $\theta$ , el cual tiene influencia en el máximo que alcanza la función y en la velocidad de la disminución de la función después del máximo, se obtuvo de manera similar al exponente  $\theta$  en el Capítulo 4.

Figura 5.5 Ajustes de los parámetros  $m$  y  $b$  en función de  $\xi$ 

Con base en los razonamientos expuestos en los párrafos anteriores, y después de llevar a cabo un análisis de regresión utilizando un planteamiento de mínimos cuadrados para reducir el error cuadrático máximo, se encontraron las siguientes expresiones para  $b$ ,  $\varphi$  y  $\theta$ .

$$b = 0.175 \quad (5.2)$$

$$\varphi = 0.92\mu\xi^{0.17} + \xi - 0.6 \quad (5.3)$$

$$\theta = \frac{\mu^4}{2.5 + \mu^4} \quad (5.4)$$

La figura 5.6 compara las curvas reales de  $R_{\mu\xi}$  (líneas continuas) con los resultados obtenidos al aplicar las expresiones propuestas (líneas discontinuas). Puede observarse una excelente coincidencia entre los valores arrojados por las expresiones propuestas y los valores reales de  $R_{\mu\xi}$ . Dado que las expresiones propuestas pudieran no resultar sencillas para algunos profesionistas pudiera plantearse su simplificación en función de la confiabilidad requerida para el diseño y lo que se considere como un grado de complejidad aceptable. Lo anterior se discutió y se ilustró en detalle en el Capítulo 4, para el caso de suelo firme. Note la subestimación que la ecuación (5.1) hace del valor de  $R_{\mu\xi}$  para valores de  $T/T_g$  cercanos a 0.5. Dado que modificar la expresión propuesta para tomar en cuenta este segundo máximo en los valores de  $R_{\mu\xi}$  conduciría a expresiones demasiado complejas se decidió no modificar la expresión propuesta.

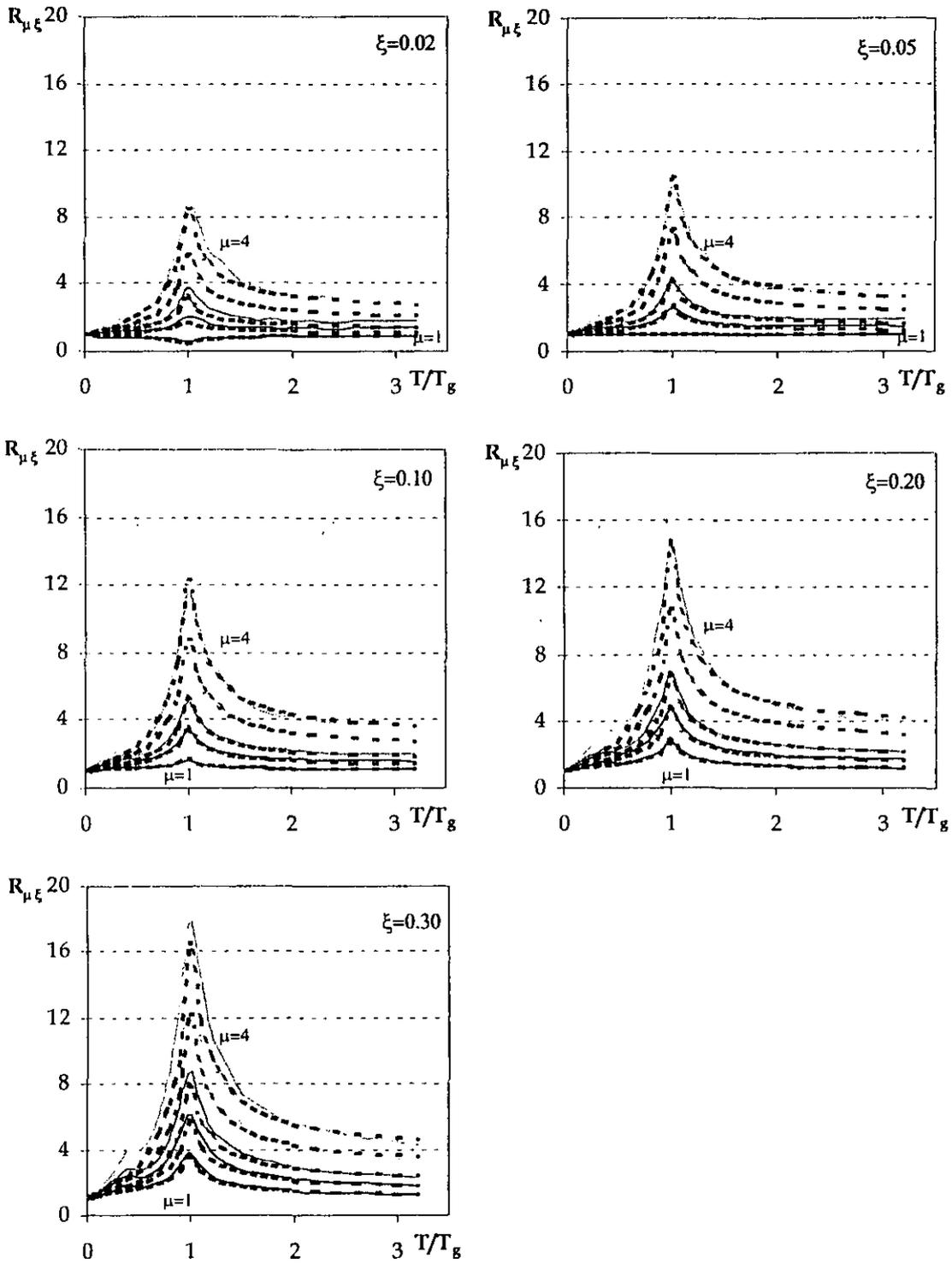


Figura 5.6 Comparación de factor de reducción estimado y real para suelo blando

## 5.4 COMENTARIOS

Las ecuaciones (5.1) a (5.4) permiten estimar  $R_{\mu\xi}$  para sistemas ubicados en sitios de suelo blando, en función de su periodo, su capacidad máxima de deformación plástica y su capacidad de disipación de energía viscosa, así como del periodo predominante de la excitación.

Estas ecuaciones deben satisfacer algunas condiciones de frontera que pueden establecerse a partir de algunos fundamentos de la dinámica estructural. En primer lugar, el valor de  $R_{\mu\xi}$  debe tender a uno, independientemente de los valores de  $\mu$  y  $\xi$  y del tipo de suelo, conforme el valor de  $T$  tiende a cero. Esto se debe a que la aceleración máxima que experimenta un sistema infinitamente rígido durante una excitación sísmica es igual a la aceleración máxima del terreno. Las ecuaciones propuestas cumplen satisfactoriamente con esta condición. En segundo lugar, el valor de  $R_{\mu\xi}$  debe tender a  $\mu$ , independientemente de los valores de  $\mu$  y  $\xi$  y del tipo de suelo, conforme el valor de  $T$  tiende a infinito. Esto se debe a que el desplazamiento relativo máximo para un sistema muy flexible es prácticamente igual al desplazamiento máximo del terreno. Note que las ecuaciones propuestas no cumplen con la última condición, ya han sido planteadas para intervalos de  $T$  cuyo límite superior esta muy lejano de los valores de  $T$  para los cuales se cumple la segunda condición, como se discutió en el Capítulo 4.

Ahondando un poco en lo que se refiere a la segunda condición mencionada en el párrafo anterior, cabe mencionar que se observó que el valor de  $T$  para el cual el desplazamiento relativo de la estructura (ya sea elástico o inelástico) es igual al desplazamiento máximo del terreno depende, de manera importante, de dos factores: el filtrado del acelerograma y la resistencia del sistema sismorresistente. Al respecto, se encontró que por lo general, este valor de  $T$  disminuye conforme se filtre un mayor intervalo de frecuencias bajas, y conforme la resistencia de los sistemas disminuye con respecto a su resistencia elástica mínima. En particular, se encontró que en el caso de suelo blando dicha condición se satisface para  $T/T_g$  entre 8 y 12. Note que estos valores límite están muy por arriba de los valores de  $T$  considerados en las regresiones. Cabe mencionar que los acelerogramas fueron filtrados a partir de una frecuencia de 0.07 Hz.

Una tercera condición que deben cumplir las ecuaciones propuestas, esta última derivada de la definición presentada en la ecuación (2.3), es que  $R_{\mu\xi}$  para  $\mu=1$  y  $\xi=0.05$  debe ser igual a uno para todo  $T$ . Para estas condiciones, las expresiones propuestas dan lugar a valores entre 1.00 y 1.02 para suelo blando, valores que para fines prácticos pueden considerarse aceptables.

La figura 5.7 compara, para  $\xi$  de 0.05, los resultados obtenidos con la ecuación (5.1) con aquellos obtenidos con las ecuaciones propuestas por otros investigadores. Cabe mencionar que algunas de las diferencias identificadas pueden deberse a que las diferentes expresiones han sido obtenidas a partir de distintas muestras de acelerogramas.

Se observa que la ecuación (5.1) tiende a subestimar ligeramente el valor de  $R_{\mu\xi}$  para  $\mu$  pequeña y  $T$  grande, que la expresión propuesta por Ordaz y Pérez (1998) tiende a

subestimar ligeramente  $R_{\mu\xi}$  para  $T$  cercano a  $T_g$  y a sobreestimarlos para  $T$  grande, sobreestimación particularmente importante para  $\mu$  grande; y que la expresión propuesta por Miranda (1993) conduce a una subestimación importante de  $R_{\mu\xi}$  para  $T$  cercano a  $T_g$ . Se aclara que aunque Miranda (1993) ajustó su expresión para suelo blando de manera que tomará en cuenta la incertidumbre en la estimación de  $T$  y  $T_g$ , su expresión no parece reflejar adecuadamente la magnitud del pico encontrado en este estudio para suelos blandos.

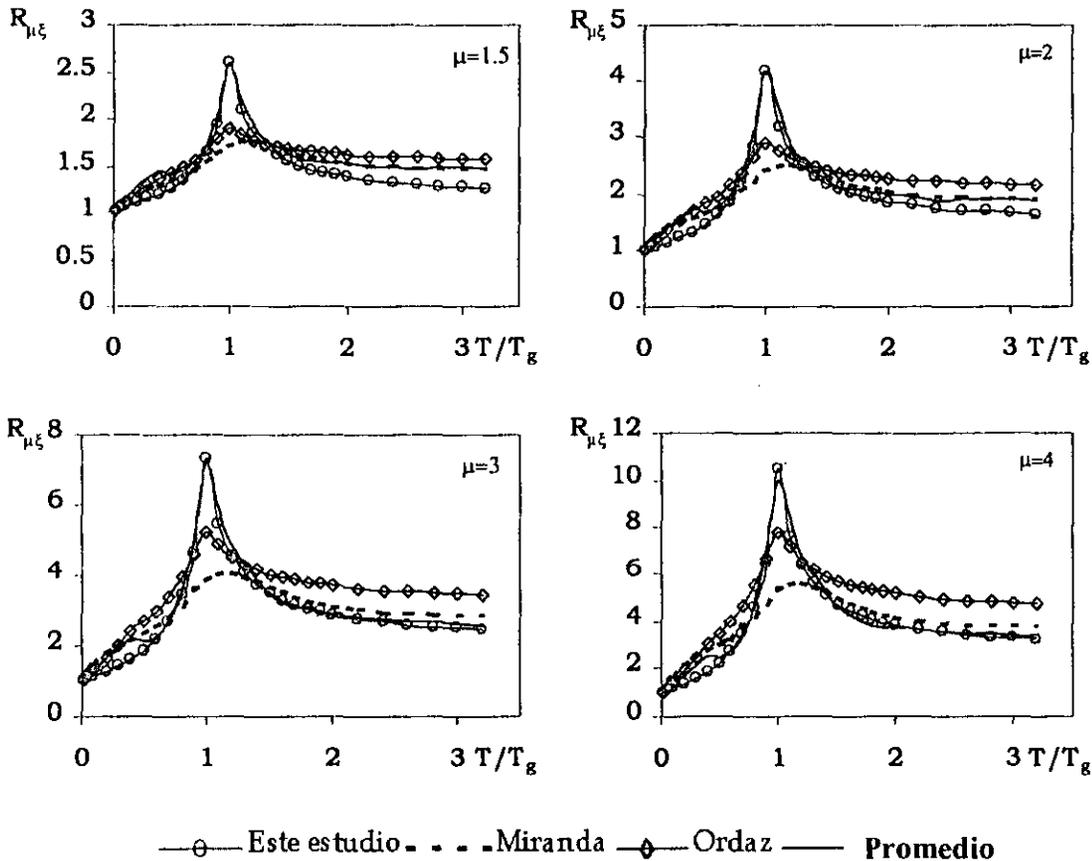


Figura 5.7 Comparación de valores de  $R_{\mu\xi}$  para  $\xi=0.05$

Resulta interesante mencionar que los valores de  $R_{\mu\xi}$  para suelo blando muestran variaciones importantes en función del valor de  $T_g$  y el contenido de frecuencias de los acelerogramas. Para ilustrar esto, la figura 5.8 compara el  $R_{\mu\xi}$  promedio para acelerogramas con  $T_g$  de dos segundos y con  $T_g$  de cuatro segundos. En dicha figura se consideró un  $\xi$  de 0.05 y  $\mu$  de 1.5, 2, 3 y 4. Se aclara que la muestra utilizada para obtener la ecuación (5.1) incluyó acelerogramas registrados en diferentes sitios ubicados en la zona de terreno blando del D.F., y que incluyó una mayoría de acelerogramas con  $T_g$  cercano a dos segundos como indica la tabla 5.1. Se observa que aunque los valores máximos de  $R_{\mu\xi}$  son muy similares para ambos  $T_g$  (ligeramente mayores para  $T_g$  de cuatro segundos), la velocidad de caída del valor de  $R_{\mu\xi}$  para  $T/T_g$  mayor que uno es mayor para  $T_g$  de cuatro segundos. Lo anterior refleja que los sitios con  $T_g$  de cuatro segundos poseen un menor contenido de frecuencias

alrededor de  $T_g$  que aquellos con  $T_g$  de dos segundos.

Las diferencias ilustradas en la Figura 5.8 implican que es necesario tener mucho cuidado para conformar muestras de acelerogramas de suelo blando para llevar a cabo un análisis de regresión. En particular, el uso de los valores de  $R_{\mu\xi}$  mostrados en la figura 5.8.(a) para estimar los valores de  $R_{\mu\xi}$  para  $T/T_g$  ligeramente mayor que uno en suelos blandos con  $T_g$  de cuatro segundos, tendería a sobreestimar el valor de  $R_{\mu\xi}$ , lo que en este caso resultaría no conservador. Una vez más tendría que analizarse cuidadosamente el balance entre la precisión requerida durante el diseño sísmico, el manejo de la incertidumbre involucrada, y la complejidad de la expresión propuesta para estimar  $R_{\mu\xi}$ . En todo caso y de considerarse necesario, sería posible hacer una consideración explícita de los valores de  $T_g$  y  $\xi_g$  en los análisis de regresión.

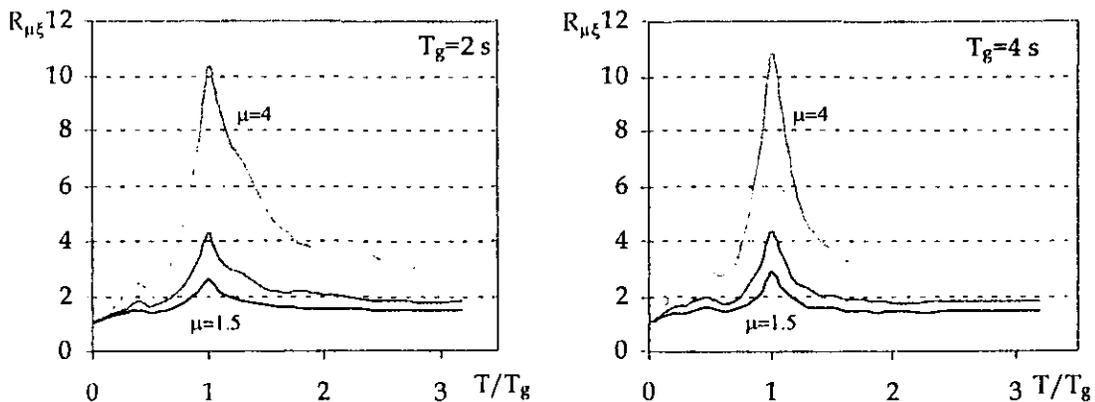


Figura 5.8  $R_{\mu\xi}$  para sitios con diferente  $T_g$ ,  $\xi=0.05$

A diferencia del caso de suelo firme, donde el valor de  $R_{\mu\xi}$  es insensible al valor de  $T$  en un amplio intervalo de valores de  $T$ , en suelo blando existe una variación muy importante de  $R_{\mu\xi}$  con el valor de  $T$ , particularmente cuando éste está cercano al valor de  $T_g$ . En este intervalo de valores, una pequeña variación de  $T$  se ve reflejado en un cambio considerable de  $R_{\mu\xi}$ , lo que refleja la importancia de considerar para este caso la incertidumbre involucrada en la determinación de los valores de  $T$  y  $T_g$ . Miranda (1993) comenta un criterio simple para contemplar en las expresiones para estimar  $R_{\mu\xi}$  dicha incertidumbre. Con base en la confiabilidad implícita en los códigos de diseño sísmico y a la magnitud de la incertidumbre involucrada, será necesario modificar la ecuación(5.1), o en su caso cualquier otra expresión, para su uso práctico.

La figura (5.9) compara los valores de  $R_{\mu\xi}$  obtenidos para  $\xi$  de 0.10 a partir de la expresión propuesta por Ordaz y Pérez (1998) y de la ecuación (5.1). Puede concluirse que la ecuación (5.1) arroja resultados más cercanos a los valores reales de  $R_{\mu\xi}$ . Cabe aclarar que dichas ecuaciones se han planteado para estimar las fuerzas sísmicas de diseño para sistemas con diferentes combinaciones de  $\mu$  y  $\xi$ , a partir del espectro elástico de resistencia para un  $\xi$  de 5%; mientras que la propuesta de Ordaz y Pérez (1998) requiere estimar los espectros elásticos de resistencia y desplazamiento para el valor de  $\xi$  para el cual se desea estimar las fuerzas sísmicas de diseño.

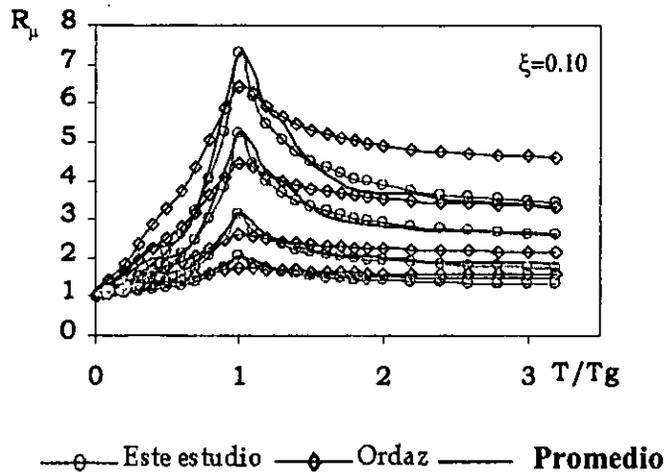
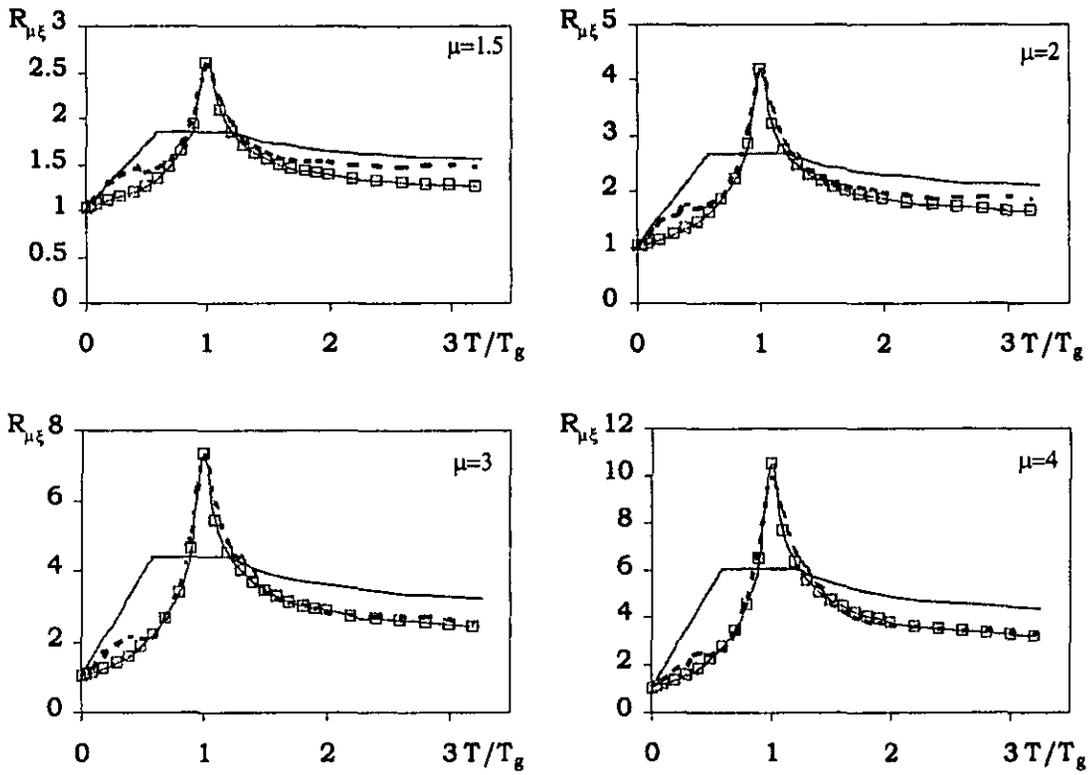


Figura 5.9 Comparación de valores de  $R_{\mu}$  para  $\xi=0.10$

Se observa que con ambas propuestas se obtienen valores similares del valor de  $R_{\mu}$ , las diferencias más importantes se presentan para  $T/T_g$  mayor que uno, donde la propuesta de Ordaz y Pérez sobrestima el valor de  $R_{\mu}$ , (posiblemente debido a las características propias de la muestra que utilizaron estos investigadores y al tipo de filtrado al que se sometieron los acelerogramas). Resulta importante remarcar que durante este estudio se encontró que para valores grandes de  $T/T_g$  el tipo de filtrado puede conducir a diferencias notables en los valores de  $R_{\mu\xi}$ , y que el efecto que tiene el filtrado es difícil de evaluar, ya que un mismo proceso de filtrado puede conducir a resultados muy diferentes en dos acelerogramas distintos.

Al igual que como se hizo en el caso de suelo firme en el Capítulo 4, en este Capítulo se comparan por medio de las figuras 5.10 y 5.11 los valores de  $R_{\mu\xi}$ , para  $\xi$  de 0.05, obtenidos a partir de la expresiones recientemente propuestas en el apéndice A de las Normas Técnicas Complementarios para el Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, con los valores reales de  $R_{\mu\xi}$  encontrados en este estudio y con aquellos arrojados por la ecuación (5.1). En ambas figuras la línea discontinua corresponde al promedio de los acelerogramas considerados en la muestra, que en el caso de la figura 5.10 comprende a excitaciones con  $T_g$  de dos segundos, y en el caso de la figura 5.11, a excitaciones con  $T_g$  de cuatro segundos.



— Nueva propuesta RCDF    - - - Promedio    —□— Este estudio

Figura 5.10 Comparación de  $R_{\mu\xi}$  para un sitio con  $T_g=2$  segundos

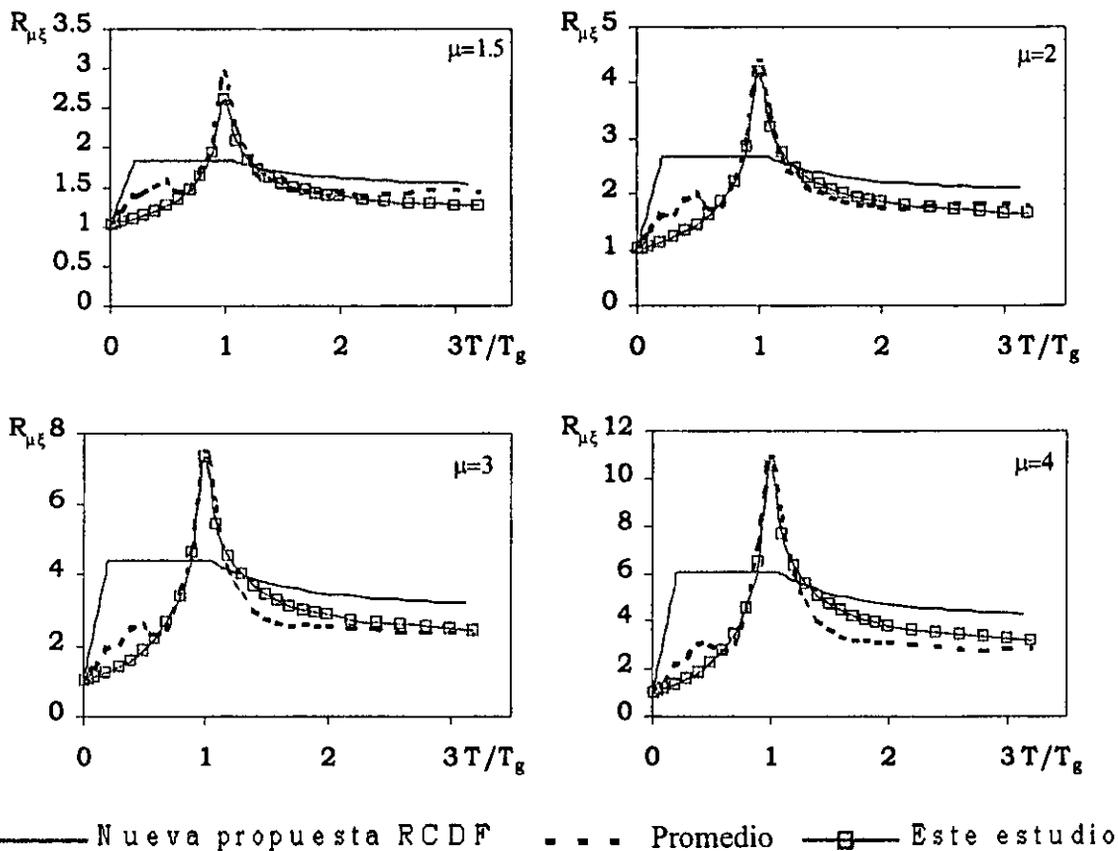


Figura 5.11 Comparación de  $R_{\mu\xi}$  para un sitio con  $T_g=4$  segundos

En el caso de acelerogramas con  $T_g=2$  segundos, se observa que para valores de  $T/T_g$  cercanos a uno la nueva propuesta del RCDF conduce a resultados conservadores, mientras que para valores de  $T/T_g$  alejados de uno dicha propuesta sobrestima el valor de  $R_{\mu\xi}$ . En cuanto al caso de acelerogramas con  $T_g=4$  segundos, se repiten las tendencias anteriores, pero la sobrestimación para valores de  $T/T_g$  menores a uno es mucho más importante.

Para ilustrar las consecuencias que pudieran tener las diferencias mostradas en las figuras 5.10 y 5.11, las figuras 5.12 y 5.13 comparan los espectros reducidos de aceleración obtenidos con el Apéndice A de las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo, y los que se obtendrían al aplicar los valores reales de  $R_{\mu\xi}$  obtenidos en este estudio a un espectro de peligro uniforme asociado a un periodo de retorno de 125 años (Ordaz 2000).

En la figura 5.12 se muestra la comparación de los espectros de aceleración correspondientes a un  $\xi$  de 0.05, para diferentes valores de  $\mu$  y un sitio con  $T_g=2$  segundos, mientras que en la figura 5.13 corresponde a un sitio con  $T_g=4$  segundos. En ambas figuras se muestra con línea continua, los espectros obtenidos según la nueva propuesta del RCDF y con línea discontinua los espectros de peligro uniforme obtenidos a partir de los factores de reducción reales.

Para el caso del sitio con  $T_g=2$  segundos, las expresiones del reglamento conducen a valores de aceleración espectral del lado de la seguridad, se observa una buena correlación entre el las aceleraciones obtenidas de acuerdo al Apéndice A y las aceleraciones que pudieran presentarse bajo el evento sísmico de diseño.

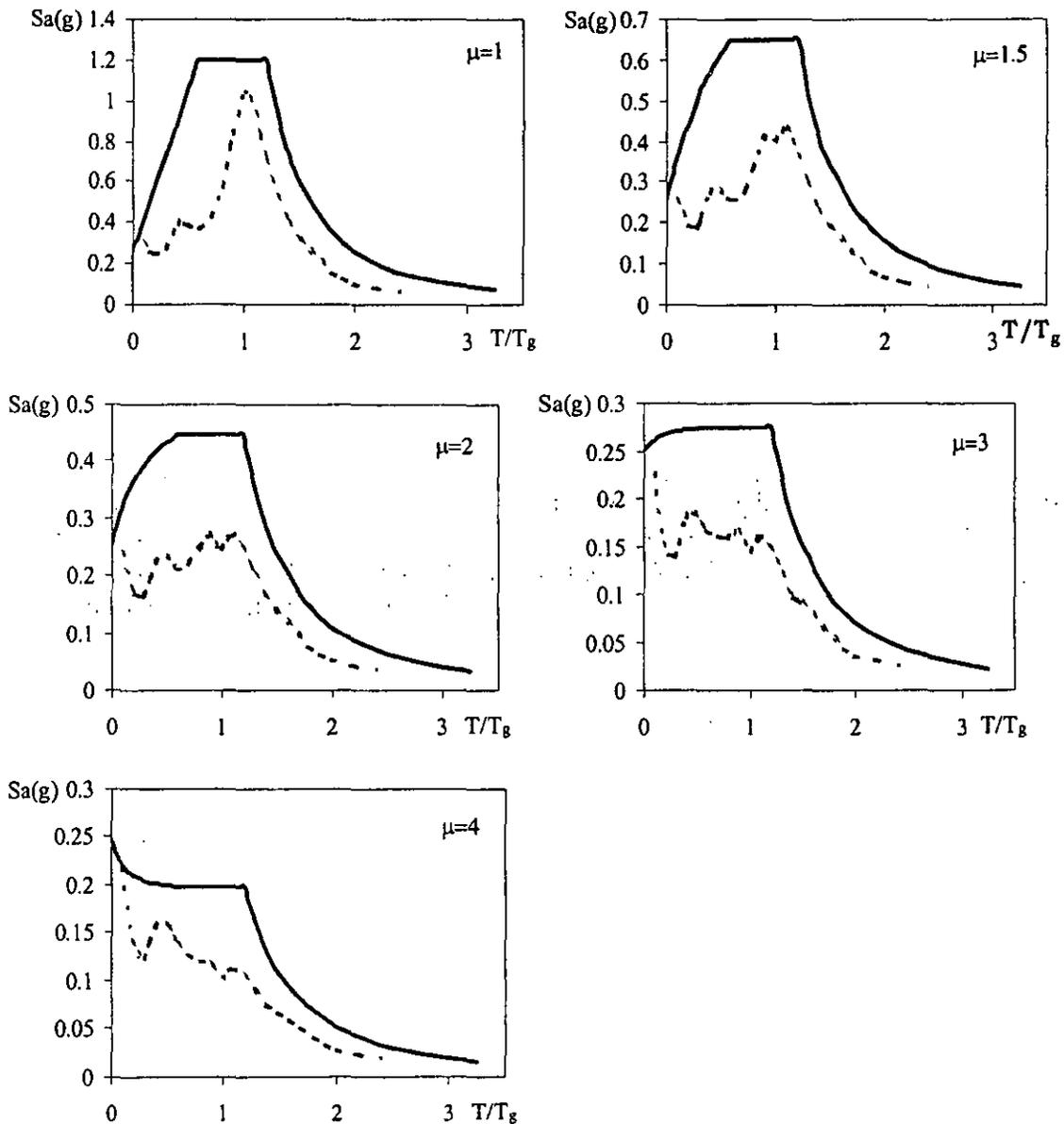


Figura 5.12 Espectros de aceleración para  $T_g=2$  segundos

Mientras que para el caso elástico, el espectro para el sitio con  $T_g=4$  segundos obtenido con el Apéndice A resulta verdaderamente conservador; para  $\mu$  de 3 y 4 dichas expresiones están cerca del límite para valores de  $T/T_g$  menores que uno. Lo anterior es consecuencia de la sobrestimación que las expresiones de la nueva propuesta del RCDF hacen del factor de reducción para  $T_g=4$  segundos y  $T/T_g$  menores que uno.

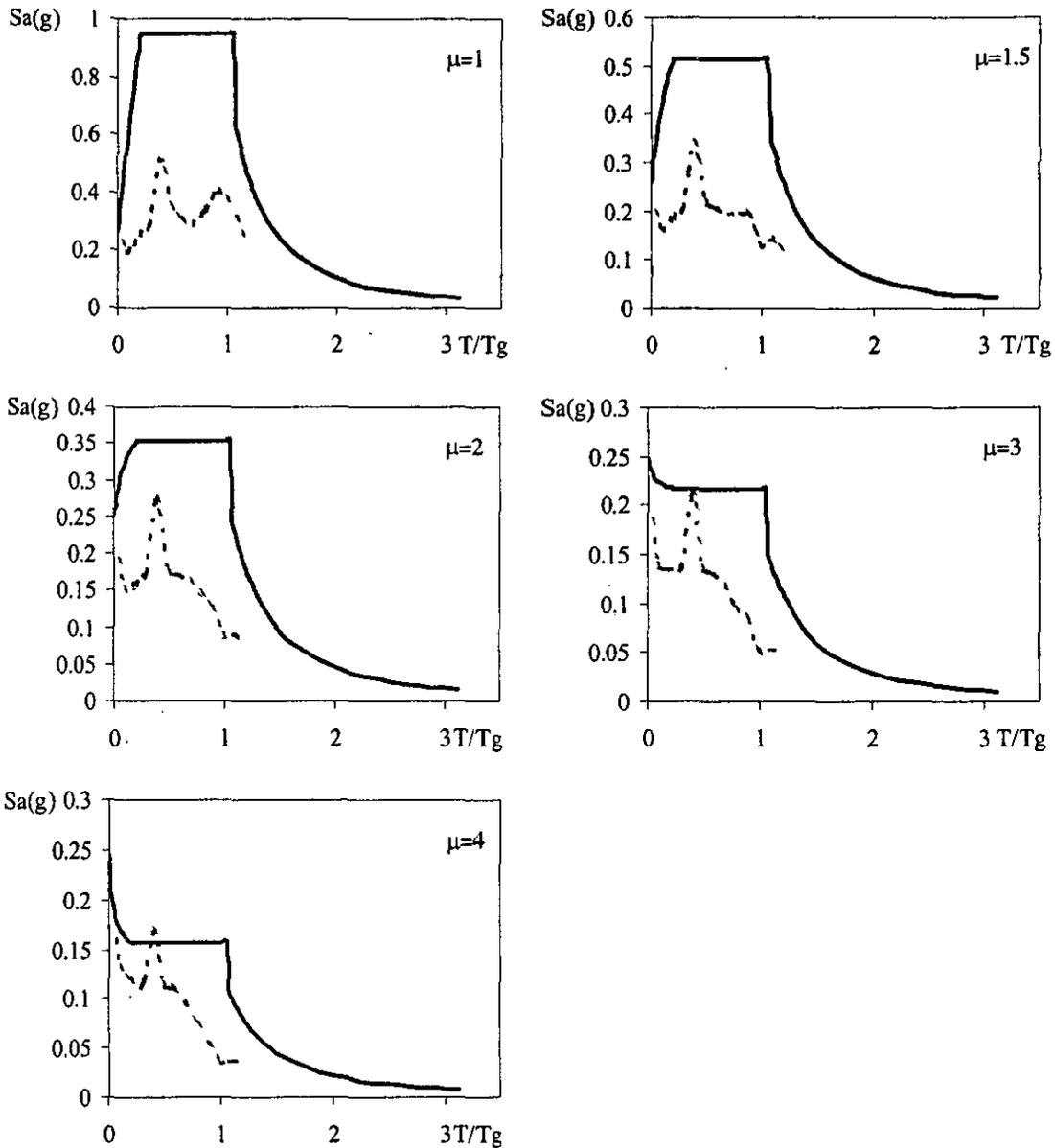


Figura 5.13 Espectros de aceleración para  $T_g=4$  segundos

Desde el punto de vista de ductilidad máxima las expresiones del Apéndice A conducen a valores adecuados de aceleración. Si se consideran los efectos de deformación plástica acumulada, las expresiones del Apéndice A particularmente para sitios con  $T_g$  de 4 segundos, conducen a resultados con diferente grado de confiabilidad dependiendo esto de la  $\mu$  desarrollada por la estructura sismorresistente. Los sistemas con  $T/T_g$  menor a uno y valores de  $\mu$  de 3 y 4 se verán sujetos a un mayor número de ciclos histeréticos que los que se presentarían en sistemas con igual valor de periodo pero con valores menores de  $\mu$ . Es necesario que las expresiones del Apéndice A sean revisadas para tratar de obtener un grado de confiabilidad uniforme en todos los casos y evitar problemas asociados con el fenómeno de falla por fatiga de bajo ciclaje.

En este Capítulo se ha propuesto una expresión que permite estimar, en función de  $\xi$ ,  $\mu$ ,  $T$  y  $T_g$ , el valor del factor de reducción para sistemas tradicionales así como para sistemas con dispositivos de disipación de energía. A diferencia del caso de suelo firme, en donde las curvas presentaban tendencias suavizadas, con respecto al valor de  $T$ , para el caso de suelo blando existe una variación importante del valor de  $R_{\mu\xi}$  con el valor de  $T$  y  $T_g$ , es decir, una pequeña variación en el valor de la relación  $T/T_g$  se puede ver reflejado en un cambio considerable en el valor de  $R_{\mu\xi}$  para suelos blandos. Debido a lo anterior, la incorporación de la ecuación (5.1) a una reglamentación de diseño debe contemplar modificaciones para tomar en cuenta las incertidumbres que existen en la estimación de  $T$  y  $T_g$ . Una forma de tomar en cuenta la incertidumbre sería como lo hace Miranda (1993), quien fija una incertidumbre 10% en la estimación del valor de  $T$  y asigna al factor de reducción correspondiente a  $T$  el mínimo valor encontrado para dicho factor en el intervalo de  $(0.9T$  a  $1.1T)$ . En todo caso, es necesario basar estas modificaciones en un estudio probabilista y ajustar el factor de reducción de acuerdo a cierta probabilidad de excedencia uniforme para todo el intervalo de periodos considerados. Bajo este razonamiento la forma de las expresiones propuestas en esta tesis no cambiaría sustancialmente si no que solo cambiarían algunos de los parámetros involucrados en ellas.

Las figuras 5.14 y 5.15 ilustran la variabilidad que se tiene en el valor de  $R_{\mu\xi}$ , en la figura 5.14 se muestran los valores de la desviación estándar ( $\sigma$ ) de los valores de  $R_{\mu\xi}$  para la muestra utilizada mientras que la figura 5.15 muestra los coeficientes de variación ( $COV$ ) de los valores de  $R_{\mu\xi}$  asociados a la muestra utilizada.

Se observa que se tienen valores de las  $\sigma$  así como de los  $COV$  mayores al aumentan el valor de  $\mu$ . En cambio, el efecto de  $\xi$  en los valores de  $\sigma$  y de  $COV$  es mucho menos importante que el efecto de  $\mu$ , tal como puede observarse en las figuras 5.14 y 5.15. Como lo muestran las figuras 5.14 y 5.15 se pueden llegar a tener variaciones muy importantes en los valores de  $R_{\mu\xi}$  por lo que podría pensarse que para la regresión estadística, realizada en este capítulo, hubiera resultado una mejor opción ajustar no al promedio  $R_{\mu\xi}$  sino al promedio menos una desviación estándar, tal como se discutió en el Capítulo anterior al reducir valores de resistencia promedio más una desviación estándar para el caso de  $\mu=1$  y  $\xi=0.05$ , por factores de reducción promedio es posible obtener valores de resistencia promedio más una desviación estándar para diferentes combinaciones de  $\mu$  y  $\xi$ .

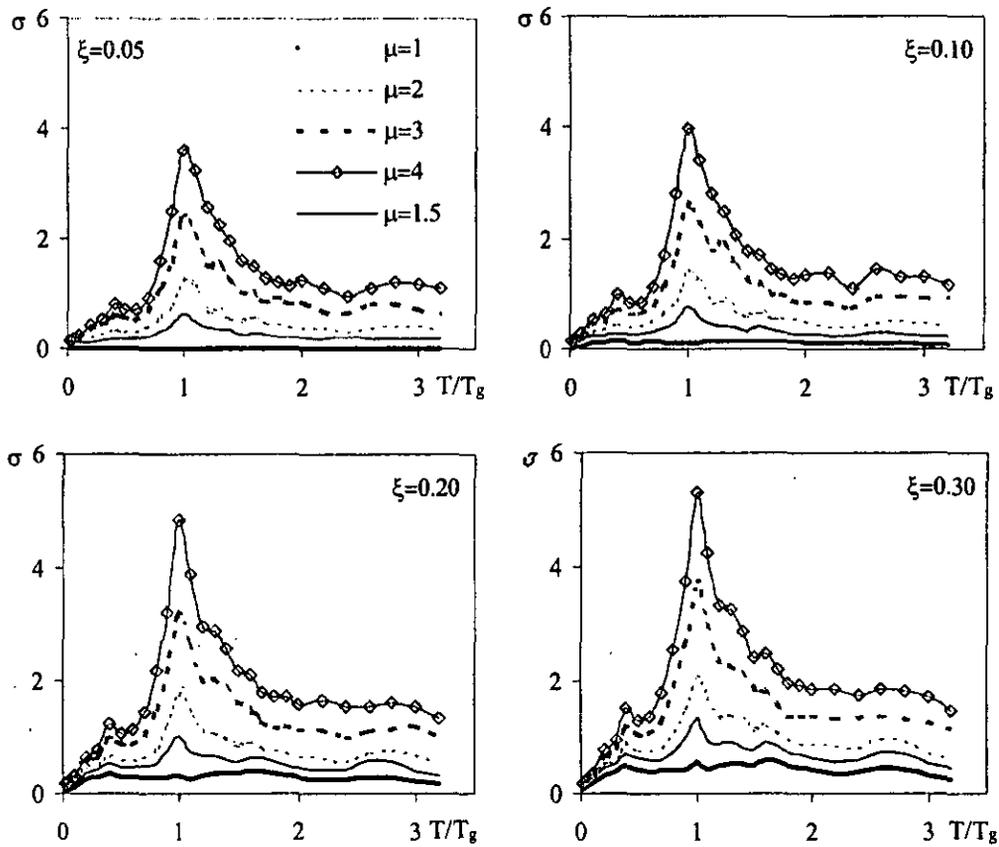


Figura 5.14 Desviaciones estándar de los valores de  $R_{\mu\xi}$  para la muestra utilizada

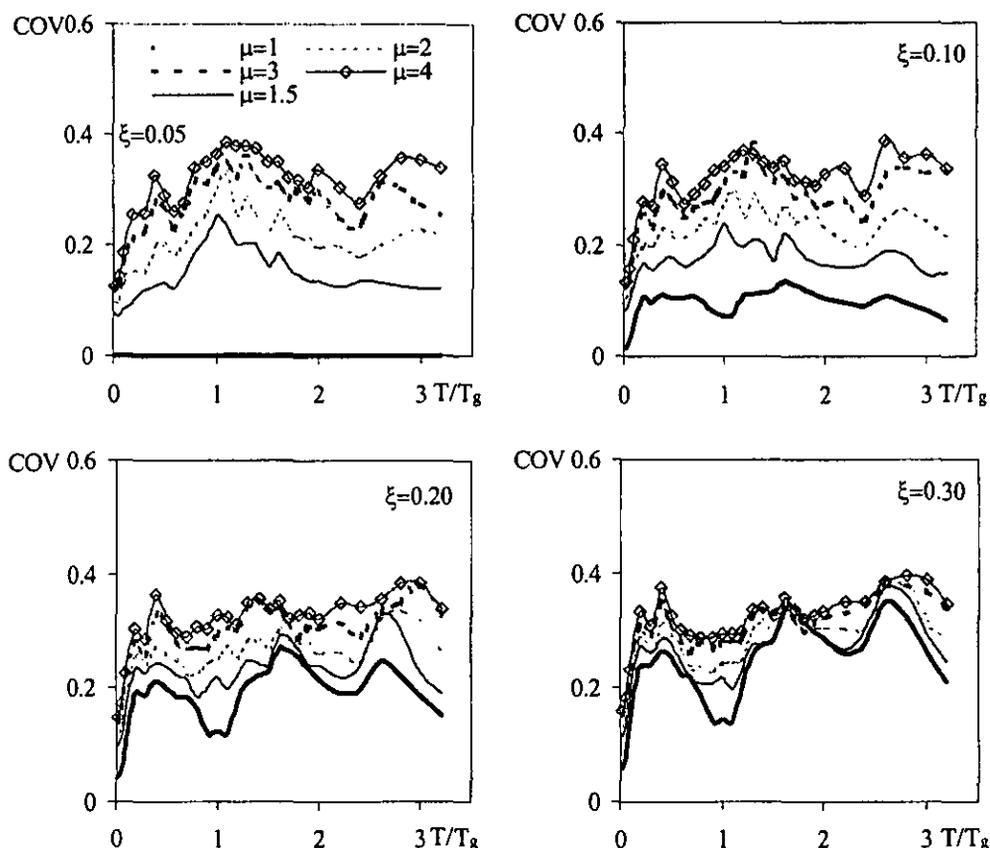


Figura 5.15 Coeficientes de variación los valores de  $R_{\mu\xi}$  para la muestra utilizada

La figura 5.16 ilustra los discutido en le párrafo anterior, las figuras de la izquierda muestran espectros de resistencia para diferentes valores de  $\mu$  y de  $\xi$ , con línea gruesa se grafican los espectros de resistencia promedio mas una desviación estándar obtenidos con la muestra de acelerogramas de suelo blando utilizados en la regresión, la línea continua corresponde a los espectros de resistencia obtenidos en base a el espectro elástico promedio más una desviación estándar para  $\xi$  de 0.05 y los factores de reducción promedio, finalmente, la línea punteada corresponde a los espectros de resistencia obtenidos en base a el espectro elástico promedio más una desviación estándar para  $\xi$  de 0.05 y los factores de reducción definidos por la expresión propuesta en esta tesis para el caso de suelo blando; en las figuras de la derecha se grafican los cocientes entre el espectro de resistencia promedio mas una desviación estándar obtenidos con la muestra de acelerogramas y el espectro obtenido con los factores de reducción promedio (líneas continuas) y los factores de reducción estimados a partir de la expresión propuesta en esta tesis (líneas discontinuas). Se observa que existe una aproximación razonable al utilizar los factores de reducción promedio y los factores de reducción propuestos, en el caso de estos últimos se observa una tendencia a sobrestimar el valor de la resistencia particularmente para el caso de valores de  $T/T_g$  menores a uno. Esta sobrestimación es debida a la subestimación que la ecuación propuesta hace del valor de  $R_{\mu\xi}$ , tal como se puede apreciar en la figura 5.6, en donde puede verse que se presenta un segundo pico en los valores de  $R_{\mu\xi}$ , para  $T/T_g$  cercanos a 0.5, ya se

mencionó anteriormente que se decidió no modificar la expresión propuesta para tratar de modelar este segundo pico para evitar una complicación excesiva en la expresión propuesta.

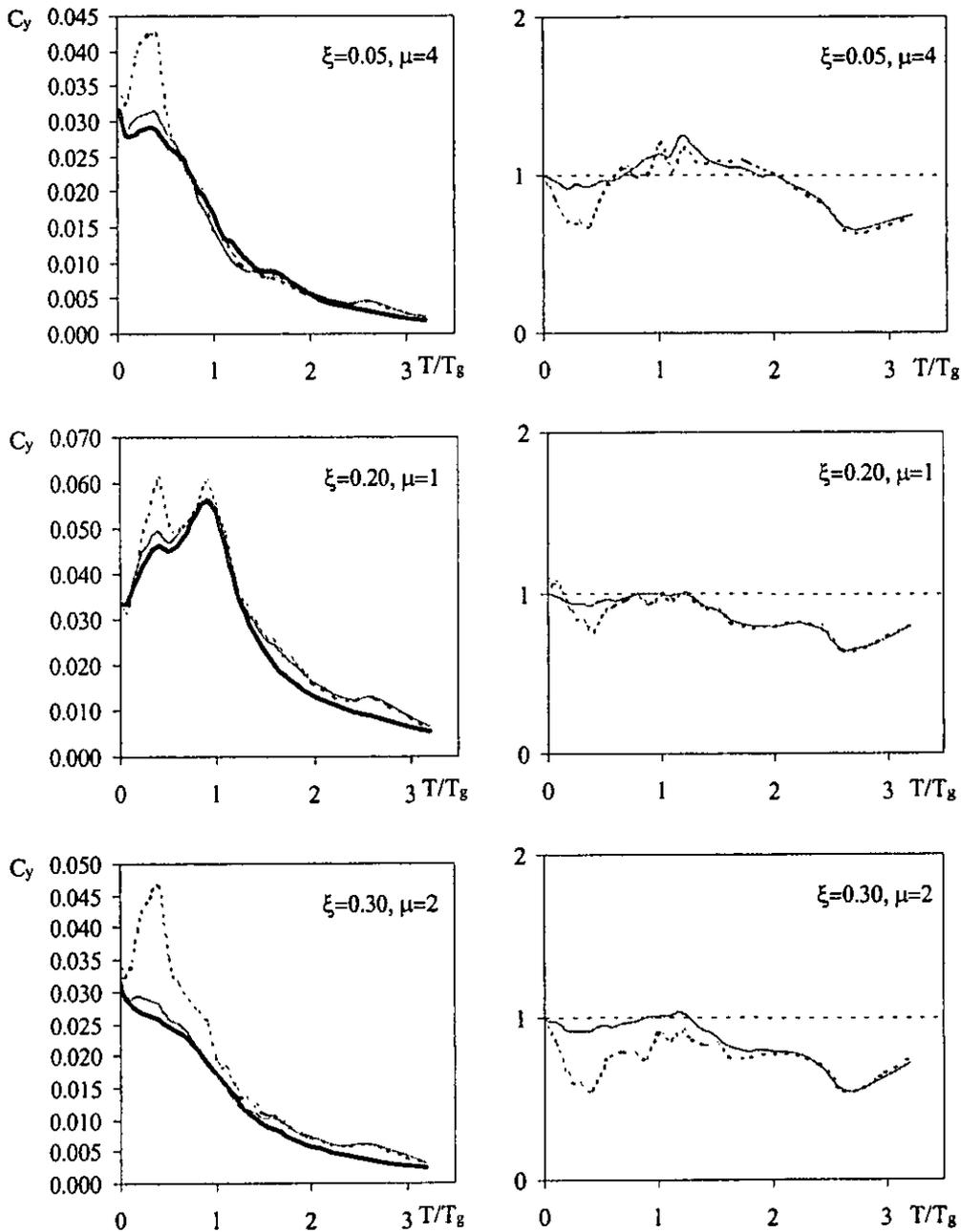


Figura 5.16 Comparación entre espectros de resistencia promedio más una desviación estándar y los espectros estimados a partir de los factores de reducción promedio y los factores de reducción propuestos

Como ya se discutió en el Capítulo anterior otros parámetros interesantes para cuantificar la variabilidad de las expresiones propuestas son la desviación estándar logarítmica ( $\sigma_{lnR}$ ) y el

error logarítmico medio ( $\varepsilon_m$ )

En la figura 5.17 se muestran los valores de la  $\sigma_{lnR}$  para distintas combinaciones de  $\mu$  y  $\xi$ . Se observa un aumento de  $\sigma_{lnR}$  al incrementarse  $\mu$ , mientras que el efecto de  $\xi$  es pequeño en los valores de  $\sigma_{lnR}$  para  $\mu$  altas mientras que el efecto aumenta para valores pequeños de  $\mu$ , tal como se observó en el caso de suelo firme. Además se observa que en la mayoría de los casos el valor de  $\sigma_{lnR}$  es independiente del valor de  $T/T_g$  para una  $\mu$  dada, a excepción del caso de  $\xi$  pequeño particularmente para sistemas con  $\mu$  pequeño en los que se presenta un aumento importante de  $\sigma_{lnR}$  al acercarse al valor de  $T/T_g$  igual a uno, otra excepción es para sistemas con  $\xi$  alto y  $\mu$  pequeño para sistemas con  $T/T_g$  cercanos a uno. A excepción de los casos mencionados anteriormente los valores de  $\sigma_{lnR}$  son similares a los que se presentan en suelo firme.

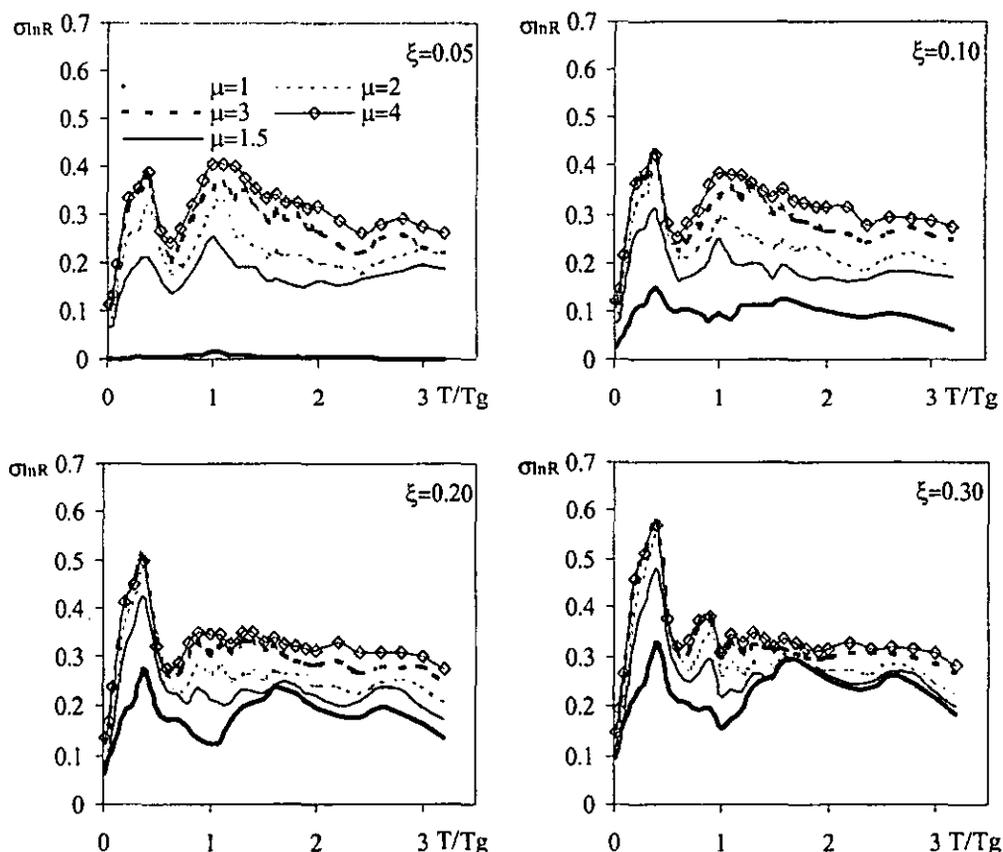


Figura 5.17 Desviaciones estándar logarítmicas para la expresión propuesta

Los valores de  $\sigma_{lnR}$  obtenidos en este estudio concuerdan con los obtenidos por otros investigadores, tal como se muestra en la figura 5.18 donde se comparan los valores de  $\sigma_{lnR}$  de la expresión propuesta en este estudio con la expresión propuesta por Ordaz y Pérez (1998) para la muestra considerada en este estudio y valores de  $\mu$  de 2 y 4 y  $\xi$  de 0.05. Se observa que en general ambas propuestas tienen el mismo grado de variabilidad, las diferencias más notables se presentan para periodos cortos en donde la expresión (4.1) conduce a niveles de variabilidad mayores a los que se presentan con la expresión propuesta por Ordaz y Pérez (1998), y para periodos mayores a dos segundos y  $\mu$  de 4 en

donde la expresión de Ordaz y Pérez (1998) conduce a niveles de variabilidad mayores a los que se obtienen con la expresión (4.1), cabe recordar el efecto de la muestra en las diferencias mostradas.

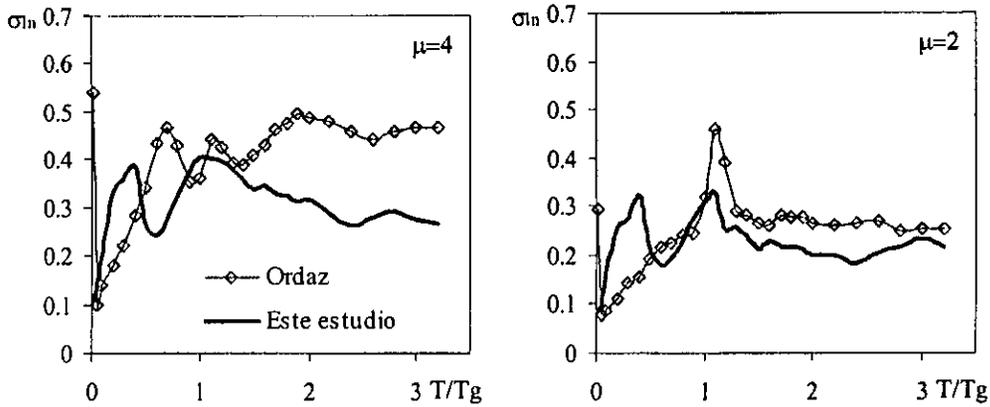


Figura 5.18 Comparación entre valores de  $\sigma_{nR}$  para diferentes propuestas,  $\xi=0.05$

En la figura 5.19 se muestran los valores del  $\varepsilon_m$  que se obtienen con la expresión (5.1), como se mencionó en el Capítulo anterior el  $\varepsilon_m$  proporciona una idea del sesgo que tiene la expresión propuesta bajo el siguiente contexto, un valor de  $\varepsilon_m$  igual a cero indica que la expresión es insesgada, un valor positivo de  $\varepsilon_m$  indica que la expresión subestima sistemáticamente a el valor observado, mientras que un valor negativo indica que la expresión sobrestima sistemáticamente al valor observado.

Se observa que para valores de  $T/T_g$  del orden de 0.5 se presentan los mayores valores positivos de  $\varepsilon_m$  lo cual indica una subestimación del valor de  $R_{\mu\xi}$  lo cual ya había sido discutida anteriormente en donde se mencionó que se presenta un segundo pico en la forma de los  $R_{\mu\xi}$  y que por simplicidad se decidió no modificar la expresión propuesta para tomar en cuenta este segundo pico, tal como puede observarse en la figura 5.6. Es posible apreciar también que un aumento en el valor de  $\xi$  tienen poco efecto en el valor de  $\varepsilon_m$  excepto para el caso de sistemas con  $T/T_g$  cercanos a 0.5 en los cuales al aumentar  $\xi$  se presenta un aumento en el valor de  $\varepsilon_m$ . En general el valor  $\varepsilon_m$  es independiente de  $T/T_g$ , salvo en el caso de valores de  $T/T_g$  muy pequeños en los que el valor de  $\varepsilon_m$  crece al aproximarse a  $T/T_g$  de 0.5

Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 5.2 en donde se muestra el valor de  $\varepsilon_m$  obtenido para cada valor de  $\xi$  y todos los valores de  $T$  y de  $\mu$  considerados en este estudio. De los valores mostrados en la tabla se observa que la expresión (5.1) tiende a subestimar sistemáticamente el valor de  $R_{\mu\xi}$ , es decir la expresión (5.1) es conservadora. Dicha subestimación se debe a que como ya se comentó anteriormente la expresión (5.1) no refleja de manera adecuada el segundo pico que se presenta en los valores de  $R_{\mu\xi}$  para  $T/T_g$  cercanos a 0.5, se discutió anteriormente que esta es una característica de la muestra y que se decidió no modificar la expresión propuesta por simplicidad.

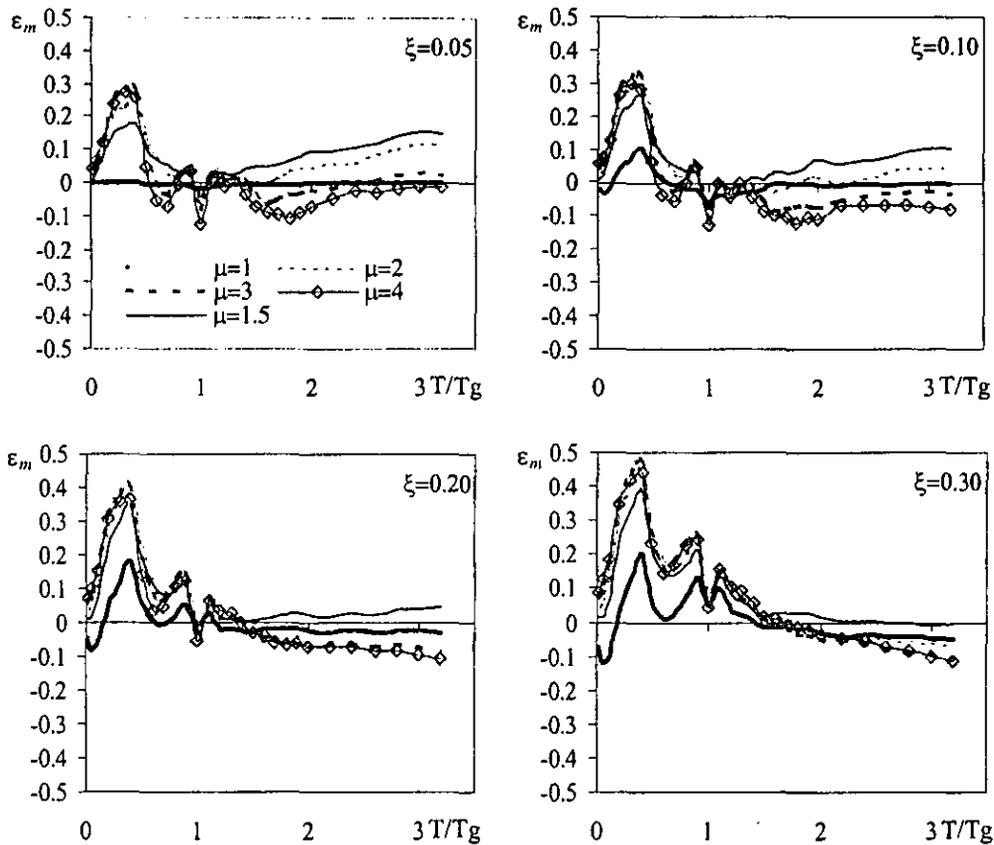


Figura 5.19 Errores logarítmicos medios para la expresión propuesta

Tabla 5.2 Errores logarítmicos medios obtenidos con la expresión propuesta

$\xi$	$\varepsilon_m$
0.05	4.99308
0.10	3.40382
0.20	6.16139
0.30	10.17761
$\Sigma$	<b>24.7359</b>

A manera de dar una idea de los valores  $\varepsilon_m$  obtenidos en este estudio la figura 5.20 presenta los valores de  $\varepsilon_m$  que se obtienen con la expresión de Ordaz y Pérez (1998) para el caso de  $\xi=0.05$  para la muestra utilizada en este estudio se observa que para valores de  $T/T_g$  cercanos menores a uno la expresión de Ordaz y Pérez sobrestima a los valores de  $R_{\mu\xi}$ , para  $T/T_g$  cercanos a uno esta expresión subestima a los valores de  $R_{\mu\xi}$  mientras que para valores mayores a uno la expresión sobrestima a los valores de  $R_{\mu\xi}$ . Para el caso de  $x$  de 0.05 se obtuvo un valor de  $\varepsilon_m$  de (-9.20), lo cual indica que la expresión Ordaz y Pérez tiende a sobrestimar sistemáticamente el valor de  $R_{\mu\xi}$  para  $x$  de 0.05, el valor de  $\varepsilon_m$  obtenido con la ecuación (5.1) es menor al que se obtiene con la expresión de Ordaz y Pérez, lo cual puede ser consecuencia de la muestra utilizada.

Las tendencias observadas anteriormente concuerdan con lo que se muestra en la figura 5.7 en la que se muestra la tendencia a sobrestimar el valor de  $R_{\mu\xi}$  por parte de la expresión de Ordaz y Pérez para valores de  $T/T_g$  altos.

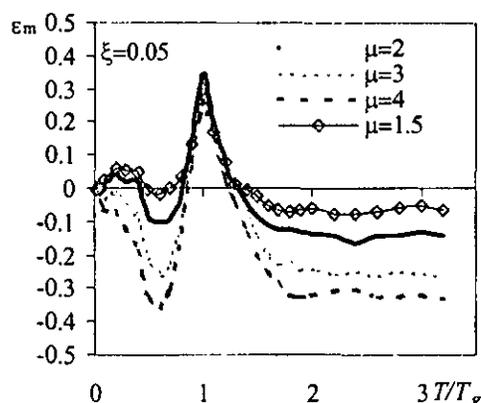


Figura 5.20 Errores logarítmicos medios obtenidos con la expresión de Ordaz y Pérez para la muestra utilizada en este estudio,  $\xi=0.05$

Con base en los razonamientos expuestos los párrafos anteriores puede concluirse que la ecuación (5.1) provee una idea razonable de los valores  $R_{\mu\xi}$  que pueden presentarse para sistemas con diferente capacidad de deformación plástica y disipación de energía viscosa ubicados en suelo blando.

Finalmente, cabe mencionar que las expresiones propuestas no pueden ser incorporadas actualmente a las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones para el D.F. En particular, la forma de los espectros elásticos de resistencia de diseño dentro de estas normas está muy alejada de la forma que exhiben los espectros correspondientes a acelerogramas registrados en diferentes sitios de suelo blando en el D.F.; de tal manera que el uso de las expresiones aquí propuestas en conjunto con los actuales espectros elásticos de diseño llevaría en muchos casos a resultados no conservadores. Para la incorporación racional de expresiones como las aquí propuestas a la normatividad actual, es necesario impulsar un cambio de enfoque en la misma, a partir del cual se promueva la transparencia durante el proceso de diseño sísmico. En este sentido los conceptos que han dado lugar al Apéndice A en la última propuesta de actualización para las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, sientan las bases para un diseño sísmico confiable y transparente, y hacen posible el uso racional de las expresiones aquí propuestas para el diseño sísmico.

## **CAPÍTULO 6**

### **OBSERVACIONES FINALES Y CONCLUSIONES**

En las últimas décadas se ha introducido a la práctica de la ingeniería sísmica una amplia variedad de dispositivos estructurales con alta capacidad de disipación de energía. Su uso racional ha planteado la posibilidad de limitar el nivel de daño en los elementos estructurales de sistemas sismorresistentes tradicionales cuando se sujeta a estos a excitaciones sísmicas de alta intensidad.

El buen desempeño sísmico observado en estructuras con dispositivos disipadores de energía durante eventos sísmicos recientes, plantea la necesidad de estudiar su posible uso en la República Mexicana. En particular, los estudios hechos hasta la fecha sugieren que estos dispositivos podrían ser una alternativa muy eficiente para resistir los efectos sísmicos en algunos edificios construidos en la zona del lago de Ciudad de México (sobre todo para aquellos con periodo muy cercano al periodo predominante del terreno). Una de las bases para el uso racional de estos sistemas es la definición de factores de reducción que permitan estimar sus fuerzas sísmicas de diseño a partir de un espectro elástico de resistencia de diseño.

Aunque a la fecha se han hecho planteamientos importantes para estimar el factor de reducción para diferentes tipos de estructuras, todavía es necesario articular los resultados obtenidos y ampliar su alcance. Al respecto, es necesario enfatizar que no se ha estudiado lo suficiente, particularmente para suelos blandos, la posibilidad de plantear sistemas que con base en una combinación de comportamiento plástico y una capacidad importante de disipación de energía viscosa puedan resistir excitaciones sísmicas intensas.

El valor del factor de reducción depende de una manera importante del contenido de frecuencias de la excitación sísmica, y del periodo, capacidad máxima de deformación plástica y capacidad de disipación de energía viscosa de la estructura. En esta tesis se han propuesto expresiones para estimar, en función de dichos parámetros, el valor del factor de reducción para las zonas de terreno firme y terreno blando del Distrito Federal. Aunque es posible que las expresiones propuestas resulten demasiado complejas para algunos ingenieros de la práctica e investigadores, es posible contemplar su simplificación para permitir su uso en la práctica profesional. Dicha simplificación debe plantearse en función de la confiabilidad requerida para el diseño, la incertidumbre involucrada, y lo que se considere en el medio profesional como una complejidad numérica aceptable para un diseño sísmico práctico.

En este trabajo se encontró que un aumento en el amortiguamiento puede resultar una medida efectiva para reducir la respuesta de un sistema aún para sistemas que desarrollen niveles importantes de deformación plástica. Lo cual sugiere, que es razonable considerar en el proceso de diseño de estructuras con dispositivos disipadores de energía diferentes

combinaciones de capacidad de deformación plástica y amortiguamiento que conduzcan a un desempeño sísmico adecuado y no limitar las posibilidades solamente a el caso elástico.

Las expresiones propuestas para estimar el factor de reducción no pueden aplicarse para estimar las fuerzas sísmicas de diseño a partir del espectro elástico de diseño planteado en el cuerpo de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones para el D.F. El uso de estas expresiones requiere de una representación más realista de los espectros de resistencia correspondientes a los diferentes sitios y zonas del D.F. En este sentido, el Apéndice A de la última actualización propuesta para dichas normas, sienta una base sólida a partir de la cuál pueda plantearse la estimación de las fuerzas sísmicas de diseño a partir de las expresiones propuestas.

El diseño sísmico de dispositivos y sistemas disipadores de energía requiere de consideraciones diferentes a las que normalmente se plantean para el diseño de sistemas estructurales tradicionales. En particular, el desempeño sísmico de algunos de estos sistemas innovadores depende de manera importante de parámetros de respuesta tal como las demandas máximas y acumuladas de desplazamiento y velocidad. Dado lo anterior, la incorporación racional de este tipo de dispositivos y sistemas a la práctica común del diseño sísmico en la Ciudad de México sólo será posible si se invierten esfuerzos importantes de investigación que conduzcan a la actualización de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo.

## REFERENCIAS

- Aiken I. D., Nims D. K., Whittaker A. S. y Kelly J.M.** (1993), "Testing of passive energy dissipation systems", *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No. 3, pp. 335-370.
- Badillo A.** (2000), "Criterio de Diseño Sísmico por Desempeño para Reforzar Edificios con Disipadores de Energía", Tesis de Maestría, UNAM. Mexico.
- Bergman D. M., Hanson R. D.**, (1993), "Viscoelastic Mechanical Damping Devices Tested at Real Earthquake Displacements", *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No. 3, pp. 389-417.
- Bruneau, M.; Yoshimura, K.** "Damage to masonry buildings caused by the 1995 Hyogoken Nanbu (Kobe, Japan) earthquake", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 23, 3, June 1996, pages 797-807.
- Chang K. C., Lai M. L. y Nielsen E. J.**, (1993), "Viscoelastic Dampers as Energy Dissipation Devices for Seismic Applications", *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No. 3, pp. 371-387.
- Chopra A.** (1995) "Dynamics of Structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering" Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey
- Esteva L. y Veras L.**, (1998), "Criterios de ductilidad y desempeño para el diseño sísmico de estructuras con disipadores histeréticos de energía", *Memorias del XI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Monterrey, N. L. 1998.*
- FEMA 273**, (1999), "NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings, ASCE/FEMA 273, 1999.
- Hanson R.D.** (1993), "Supplemental damping for improve the seismic performance", *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No. 3, pp. 319-334.
- Hodder S. B.** (1983), "Computer processing of New Zealand strong-motion accelerograms", Tercer Congreso Regional de Ingeniería Sísmica del Pacífico Sur.
- Lai S. P.** (1982), "Statistical characterization of strong ground motions using power spectral density function", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 72 , N° 1, pp. 259-274.

- Miranda E.** (1993), "Site-dependent strength reduction factors", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 12, pp. 3503-3519.
- Mitchell, D.; et al.** "Damage to concrete structures due to the January 17, 1995, Hyogo-ken Nanbu (Kobe) earthquake", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 23, 3, June 1996, pages 757-770
- Nassar A. y Krawinkler H.** (1991), "Seismic demands for SDOF and MDOF systems", Reporte No. 95, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Universidad de Stanford.
- Northridge Reconnaissance Team** (1996), "Northridge Earthquake Reconnaissance Report", *Earthquake Spectra*, Supplement C to Volume 11.
- Ordaz M.**, (2000), Comunicación personal, Instituto de Ingeniería; Universidad Nacional Autónoma de México. CU 04510.
- Ordaz M., Miranda E y Avilés J.** (2000), "Propuesta de Espectros de Diseño por Sismo para el DF", *Memorias del XII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Leon, Gto. 2000.*
- Ordaz M. y Montoya C.** (2000), "DEGTRA 2000 Ver. 2.0.2", Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ordaz M., y Pérez E.** (1998), "Estimation of strength reduction factors for elastoplastic systems: a new approach", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, pp. 889-901.
- Riddell R.**, (1995), "Inelastic design spectra accounting for soil conditions", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 24, pp. 1491-1510.
- Rosas H, Ruiz E. S. y Díaz O.** (1989) "Construcción de espectros inelásticos a partir de registros en la ciudad de México", *Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Acapulco Guerrero 1989.
- Scholl R.**, (1993), "Fundamental Design Issues for Supplemental Damping Applications", *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No. 3, pp. 627-636.
- Tajimi H.** (1960), "A statical method for determining the maximum response of a building structure during an earthquake", Segundo Congreso Mundial de Ingeniería Sísmica. Vol. 14, No. 3., pp. 501-520.
- Tena-A. y Vergara A.**, "Comparative study on the seismic retrofit of a mid-rise steel building: steel bracing vs energy dissipation", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Volume: 26, Issue: 6, Date: June 1997, Pages: 637-655

**Terán-Gilmore, A.** 1996; "Performance-based earthquake-resistance design of framed buildings using energy concepts"; Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de California en Berkeley.

**Tung A., Wang J. N., Kiremidjian A. S. y Kavazanjian E.** (1992), "Statistical parameters of AM and PSD functions for the generation of site-specific strong ground motions", Décimo Congreso Mundial de Ingeniería Sísmica.

**Uang, C y Bertero, V.V.** 1990; "Evaluation of seismic energy in structures"; *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 19, pp. 77-90.

**Wu, J y Hanson R. D.**, (1989), "Study of Inelastic Spectra with High Damping", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 115, No 6, June 1989.