

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN INGENIERIA

**INFLUENCIA DE LA RIGIDEZ, RESISTENCIA, Y AMORTIGUAMIENTO,
EN LA RESPUESTA DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO CON
DISIPADORES DE ENERGÍA**

T E S I S
P R E S E N T A D A P O R
J E S Ú S J U L I Á N A V I L É S F R A N C O
P A R A O B T E N E R E L G R A D O D E
M A E S T R O E N I N G E N I E R Í A
(E S T R U C T U R A S)

DIRIGIDA POR
DR. OSCAR A. LÓPEZ BÁTIZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE DE 2005

m. 339905



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.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la
UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el
contenido de mi trabajo excepcional.

NOMBRE: José Julián
Avilés Franco

FECHA: 11 Enero 2005

FIRMA: 

2

2005 01 11

El presente trabajo está dedicado a mis padres: Francisco Avilés Vera y María de la Luz Franco Mayoral; a mi esposa, Laura Leticia González Vázquez. También a la Universidad Nacional Autónoma de México.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo brindado al Consejo Nacional de la Ciencia y la Tecnología, CONACYT, para realizar mis estudios de posgrado.

Un agradecimiento especial a todos mis profesores por mostrarme el camino al aprendizaje de la ingeniería civil (estructural).

Agradezco al Dr. Oscar A. López Bátiz, su amistad y comentarios que me brindó para la realización del presente trabajo. De igual forma, agradezco a los miembros de jurado su apoyo: Ing. Neftalí Rodríguez Cuevas, Dr. Roberto Meli Piralla, Dr. José Alberto Escobar Sánchez, M. En I. Octavio García Domínguez

INFLUENCIA DE LA RIGIDEZ, RESISTENCIA, Y AMORTIGUAMIENTO, EN LA RESPUESTA DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO CON DISIPADORES DE ENERGÍA

I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
II. ANTECEDENTES Y CRITERIOS DE ANÁLISIS	5
II.1 ANTECEDENTES	5
II.2 CRITERIOS DE ANÁLISIS	9
II.2.1 REGISTROS CONSIDERADOS	9
II.2.2 MODELO DE ANÁLISIS	14
III. ESPECTROS DE RESISTENCIA A ELÁSTICOS E INELÁSTICOS	21
III.1 ESPECTROS ELÁSTICOS	21
III.2 ESPECTROS INELÁSTICOS	29
IV. EFECTO DEL CAMBIO DE RIGIDEZ POR USO DE DISPOSITIVO DISIPADOR DE ENERGÍA, EN LA DEMANDA DE RESISTENCIA	31
IV.1 REGISTROS DE MOVIMIENTO CON PERIODO DOMINANTE CORTO	36
IV.2 REGISTROS DE MOVIMIENTO CON PERIODO DOMINANTE LARGO	49
IV.3 REGISTROS CON EXCITACIÓN EN SUELO DURO	61
V. EFECTO DEL CAMBIO DE RESISTENCIA POR USO DE DISPOSITIVO DISIPADOR DE ENERGÍA, EN LA DEMANDA DE RESISTENCIA Y DUCTILIDAD	71
V.1 REGISTROS DE MOVIMIENTO CON PERIODO DOMINANTE CORTO	75
V.2 REGISTROS DE MOVIMIENTO CON PERIODO DOMINANTE LARGO	85
V.3 REGISTROS CON EXCITACIÓN EN SUELO DURO	94
VI. EFECTO COMBINADO DEL CAMBIO DE RIGIDEZ Y RESISTENCIA POR USO DE DISPOSITIVO DISIPADOR DE ENERGÍA, EN LOS ESPECTROS DE RESISTENCIA Y DUCTILIDAD	103
VI.1 REGISTROS DE MOVIMIENTO CON PERIODO DOMINANTE CORTO	107
VI.2 REGISTROS DE MOVIMIENTO CON PERIODO DOMINANTE LARGO	116
VI.3 REGISTROS CON EXCITACIÓN EN SUELO DURO	125
VII. EFECTO DEL AMORTIGUAMIENTO VISCOZO EN LA RESPUESTA NO LINEAL	135
VII.1 REGISTROS DE MOVIMIENTO CON PERIODO DOMINANTE CORTO	136
VII.2 REGISTROS DE MOVIMIENTO CON PERIODO DOMINANTE LARGO	143
VII.3 REGISTROS CON EXCITACIÓN EN SUELO DURO	150
VIII. CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECTROS DE RESPUESTA PARA ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO CUANDO SE EMPLEAN DISPOSITIVOS DISIPADORES DE ENERGÍA PASIVOS	159
VIII.1 REGISTROS DE MOVIMIENTO CON PERIODO DOMINANTE CORTO	166
VIII.2 REGISTROS DE MOVIMIENTO CON PERIODO DOMINANTE LARGO	172
VIII.3 REGISTROS CON EXCITACIÓN EN SUELO DURO	176
IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	181
BIBLIOGRAFÍA	185

Nomenclatura utilizada:

a	Aceleración
a	Cociente sísmico (adimensional y expresado en decimal)
ALFC	Relación de la rigidez inicial de agrietamiento a la rigidez al punto de fluencia
ALFU	Relación de la rigidez última, a la rigidez al punto de fluencia
a_{max}	Aceleración máxima instantánea del registro
B0	Parámetro del modelo de Takeda que regula la degradación de la rigidez a la descarga
B1	Parámetro del modelo de Takeka que regula degradación de resistencia
c	Coefficiente de diseño sísmico
CR	Concreto reforzado
Cy	Resistencia lateral. Cortante basal
D	Desplazamiento
d	Distancia del sitio donde se generó el registro, al epicentro en kilómetros
D_c	Desplazamiento al agrietamiento
D_c	Desplazamiento al agrietamiento
DDE	Dispositivo disipador de energía
D_u	Desplazamiento último
D_y	Desplazamiento a la fluencia
D_y	Desplazamiento al punto de fluencia
E	Este
ED	Energía acumulada disipada total
E_H	Energía disipada por amortiguamiento histerético
E_I	Energía incidente debida al sismo
E_K	Energía cinética en la estructura
E_S	Energía de deformación en la estructura
E_ζ	Energía disipada por amortiguamiento viscoso
F	Fuerza
F_c	Fuerza al agrietamiento
F_c	Resistencia al agrietamiento
F_u	Fuerza última
FUFY	Relación de la resistencia al punto de agrietamiento a la resistencia al punto de fluencia
F_y	Fuerza a la fluencia
F_y	Resistencia a la fluencia
G	Aceleración de la gravedad
G	Modulo de cortante (capítulo VIII)
Gal	unidad de medición de la aceleración
H	Altura del sistema
H	Profundidad del estrato (capítulo VIII)
I	Intenciada de Arias
K_0	Rigidez de agrietamiento (rigidez elástica inicial)
K_1	Rigidez inicial sin disipador
K_2	Rigidez del sistema con disipador
K_y	Rigidez al punto de fluencia
M	Magnitud
m	Masa del sistema
M_c	Magnitud
MS	Magnitud
N	Norte
n	Número de pisos
NTCDS	Normas Técnicas Complementarias para diseño por Sismo
PRDY	Periodo a la fluencia
Q	Factor de comportamiento sísmico
R=10%	Incremento de rigidez, relación de resistencia y, rigidez y relación de resistencia, según el capítulo
RCDF	Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal

s	Segundo
S	Sur
SIGL	Sistema de un grado de libertad
Sa	Seudo aceleración
sa _{max}	Seudo aceleración máxima para un amortiguamiento de 2%
Sc	Rigidez al agrietamiento
Sc	Rigidez al agrietamiento
seg	Segundos
Su	Pendiente al desplazamiento último
Sy	Pendiente a la fluencia
T	Periodo
T ₀	Periodo fundamental del sistema
T _d	Intervalo de tiempo del registro, seleccionado para resolver la ecuación de movimiento
T _{0y}	Periodo fundamental del sistema
T _{0y'}	Periodo fundamental referido al sistema original
T _{pmax}	Periodo al cual se presenta la aceleración espectral máxima elástica
T _s	Periodo dominante más largo del estrato
T _y	Periodo al punto de fluencia
u	Deformación
W	Oeste
Wt	Peso del sistema
Δt	intervalo constante de tiempo
α _y	Relación entre rigidez al punto de fluencia y la rigidez inicial
β	Parámetro del método de Newmark
γ	Distorsión de entrepiso
γ	Parámetro del método de Newmark (capítulo II)
μ	Ductilidad
ξ	Cociente de Amortiguamiento
ζ	Amortiguamiento viscoso equivalente
ζ _{eq}	Amortiguamiento viscoso equivalente

I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

INTRODUCCIÓN:

Hoy en día se tiene la necesidad de realizar análisis aproximados que den certidumbre en el comportamiento de estructuras reales, así como, se permita lograr diseños estructurales acorde al avance de la tecnología, por tal motivo han surgido técnicas de estructuración que comprenden la utilización de elementos especiales donde se concentrará el daño; además, se busca que éstos elementos sean fácilmente reparados o cambiados. A uno de estos elementos especiales se le ha dado el nombre de dispositivos disipadores de energía, DDE, el nombre se debe a que liberan parte de la energía absorbida por la estructura, en forma de deformación, calor y daño, dando lugar a un comportamiento inelástico del material que lo forma. Los DDE se pueden utilizar en el diseño de estructuras nuevas y en la reparación de edificios existentes.

Este tipo de dispositivos, para disminuir la respuesta sísmica de las estructuras, se pueden clasificar de acuerdo a su forma de trabajo en dos tipos: de control pasivo y de control activo. Los dispositivos de control pasivo responden únicamente al movimiento de la estructura, estos dispositivos se han presentado de tres formas en función del principio mecánico por el cual disipan energía: disipadores de energía, aisladores de base y osciladores resonantes.

Disipadores de energía

Se colocan generalmente en contravientos, lo cual permite un incremento de la resistencia lateral y rigidez de la estructura original, su finalidad es disipar energía sísmica evitando que los elementos estructurales principales, columnas y trabes, sufran daño o entren a su fase de trabajo de gran demanda de comportamiento inelástico durante un sismo severo. La disipación de energía se logra a través de fenómenos como la fricción, extrucción, por comportamiento viscoelástico o por deformación inelástica de los materiales.

Un dispositivo por fricción desarrollado por Pall y Marsh (1982), se coloca en el centro de contravientos aprovechando la fricción que se genera entre placas colineales. La aparición de fricción se garantiza que exista pues se coloca un tornillo justo en el cruce de los elementos con un apriete adecuadamente graduado.

El dispositivo por extrucción propuesto por Robinson y Greenbank (1975), consiste en un tubo de acero relleno de plomo, el tubo tiene una reducción en su diámetro, por donde se hace pasar el plomo de manera que se logre el efecto deseado.

El dispositivo por comportamiento viscoelástico estudiado por Lin (1988), logra disipar energía al deformar por corte directo un material viscoelástico confinado.

En el dispositivo por deformación inelástica del material, la disipación de energía se presenta cuando el acero sobrepasa el esfuerzo de fluencia. Esto se puede lograr sometiendo al material a esfuerzos de compresión, tensión, torsión, flexión rolado por flexión o cortante.

Aisladores de base

Se utilizan en estructuras de poca altura ubicadas en sitios con ocurrencia de sismos con contenido de frecuencias altas, alargando el periodo fundamental, tienen la desventaja de que pueden producir grandes desplazamientos. El aislador estudiado por Robinson y Tucker (1977) es formado con placas de hule intercalando placas de acero, cuenta en la parte central con un corazón de plomo que disipa energía cuando alcanza la fluencia por corte y también sirve para reducir los desplazamientos.

Osciladores resonantes

Este tipo de dispositivo consiste en colocar un apéndice superior, con ciertas propiedades dinámicas, de tal suerte que se generen fuerzas inerciales, que equilibran las que genera el sismo en la estructura en el apéndice, tratando de minimizar la respuesta de la estructura. (Ancira, 1988; Khachian, 1990)

Para el presente trabajo se consideran estructuras cuyo comportamiento es regido por el primer modo de vibrar, y el aporte de amortiguamiento hysterético equivalente adicional es suministrado principalmente por el DDE. En este estudio el dispositivo puede ser de cualquier tipo de los pasivos mencionados, ya que solo interesa el efecto del incremento en rigidez, resistencia y amortiguamiento en estructuras de concreto, sin importar el tipo de DDE. Las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de DDE no se analizan.

Se presentan los resultados de análisis no-lineales de estructuras que responden principalmente en su primer modo de vibrar, de tal suerte que se puede representar como un oscilador de un grado de libertad. Se utiliza como modelo hysterético, el propuesto por Takeda (Takeda et al, 1970) para representar a una estructura con comportamiento "estable" (comportamiento regido

predominantemente por flexión) producto de la presencia del DDE; y el modelo de Takeda Slip (Shiohara et al, 1980) (con deslizamiento) para representar a una estructura de concreto en su estado original, sin disipadores como elemento de refuerzo.

Se realiza el estudio para comparar las demandas de resistencia, ductilidad y disipación de energía en estructuras de concreto reforzado con y sin disipadores pasivos de energía. Teniendo en cuenta que al colocar los disipadores se incrementa tanto la rigidez como la resistencia de la estructura, se estimaron incrementos de rigidez en 10, 20, 50 y 100% con respecto al valor de la rigidez inicial de la estructura; y para considerar el incremento de resistencia, ésta se aumentó también en 10, 20, 50 y 100%.

Se utilizaron seis registros sísmicos, tratando que fueran representativos de registros en suelo duro, foco cercano y otro en suelo blando de foco lejano, El Centro y SCT85, respectivamente, que son de los más representativos para estudios de comportamiento inelástico y espectros de diseño, también se usaron los registros de Kobe (1995), Lollole (1985), Taft (1952) y Tohoku (1978).

Dentro de los alcances se plantea el estudio de las respuestas de osciladores simples, como modelos representativos de sistemas de múltiples grados de libertad, ante sollicitaciones de tres tipos: registros con periodos cortos, largos y medios. Se revisa el efecto de las variaciones de resistencia, y rigidez producto de la colocación del dispositivo disipador de energía como elemento de refuerzo, y se hace una revisión de la bondad de su uso, principalmente tomando en cuenta su influencia en dos condiciones de desempeño: servicio y falla.

Se considera que el modelo trilineal es representativo de una estructura de concreto reforzado y al asumir que el dispositivo disipador de energía tiene comportamiento elasto-plástico, se considera que el comportamiento global se puede representar por un modelo trilineal, y como una estructura puede ser definida por medio del periodo a la fluencia y por el coeficiente sísmico, se generan varios grupos de sistemas de 1 grado de libertad, con características idénticas entre el mismo grupo, pero con características diferentes entre grupos, esta diferencia se justifica al formar grupos de sistemas con diferentes relaciones de resistencia y rigidez que sirvan para obtener espectros de resistencia lateral, distorsión, y energía.

OBJETIVOS:

Los objetivos del trabajo son estudiar el comportamiento no-lineal de estructuras de concreto reforzado con y sin DDE, como elementos adicionales, sujetos a una excitación en su base, variando la rigidez, resistencia y el nivel de amortiguamiento, para delimitar hasta que nivel de incremento de rigidez y resistencia resulta útil o justificado, desde el punto de vista del máximo aprovechamiento en la reducción de las respuestas máximas, la presencia del amortiguamiento histerético equivalente adicional al de la estructura original proporcionado por el dispositivo disipador.

Se pretende platear intervalos de periodos fundamentales propicios para el uso de DDE, sin dejar de tomar en cuenta las propiedades de los registros de excitación.

Justificación del trabajo

Existen trabajos como los desarrollados por Otani 1981, donde se hace un estudio de los modelos de histéresis de estructuras de concreto para análisis de respuestas sísmicas, donde los alcances del trabajo no permiten que los resultados se consideren como aplicables a estructuras, por ejemplo, del valle de México. Otro tipo de trabajos, como la tesis de Gómez Soberón 1994, donde se hace un estudio paramétrico de estructuras con mecanismos disipadores, pero en el que se consideraron como ejemplo marcos de concreto de nueve y once niveles, no dan luz hacia la obtención de espectros de isoductilidades ni de resistencia. Entonces, al buscar resultados de carácter más general, se planteó este trabajo, en el cual se estudia el efecto de dos tipos de modelos histeréticos (concreto reforzado y concreto con DDE), en sistemas estructurales cuyos periodos fundamentales se ubican en un intervalo de 0 a 5seg, sometidos a una gama de sismos con características dinámicas varias, y con el análisis del efecto del incremento de rigidez y resistencia, producto de la presencia de DDE, como elementos de refuerzo.

II. ANTECEDENTES Y CRITERIOS DE ANÁLISIS

II.1 ANTECEDENTES

En el trabajo de Aguilar Ramírez (1998), se estudia el comportamiento del dispositivo tipo panel de cortante, para tratar de optimizarlo a través del estudio experimental del comportamiento histerético de varios dispositivos de características geométricas distintas. El objetivo era buscar incrementar al máximo los niveles de amortiguamiento histerético de los sistemas estructurales al usar este tipo de dispositivo disipador de energía. Las principales variables que se contemplan en los dispositivos usados en esta investigación son: la relación de esbeltez y de aspecto de la placa del alma, el espesor de las placas de los patines y la contribución de atiesadores transversales o longitudinales en la placa del alma.

Es este trabajo se llega a concluir que la primer causa del inicio de la disminución de la capacidad de disipación de energía es el pandeo elástico de la placa del panel de cortante. El pandeo del panel de cortante se incrementa gradualmente ante ciclos de carga sucesivos, aún para el caso de ciclos de igual amplitud. La colocación de atiesadores en la placa del alma de los paneles de cortante retrasa el inicio del pandeo, debido a la reducción del valor de la relación de esbeltez, por lo que exhiben un mejor comportamiento al retrasar la pérdida de rigidez y resistencia. Sin embargo, tienen poco efecto en el comportamiento del dispositivo antes del pandeo. Se reporta que el espesor de los patines no interviene significativamente en el valor de la rigidez inicial de los dispositivos, en cambio contribuyen en forma importante en la resistencia del mismo, para el cálculo de la resistencia teórica de los dispositivos la condición de placa de alma con borde empotrada es la mejor aproximación a la resistencia experimental.

El disipador ovalado (Aguirre, 1990) exhibe una gran estabilidad de sus lazos de histéresis ante comportamiento cíclico, prácticamente sin degradación de rigidez ni de resistencia aún a deformaciones grandes; no obstante, posee menor capacidad de disipación de energía con respecto a los dispositivos panel de cortante debido principalmente a que su punto de fluencia ocurre a desplazamientos mayores y sus lazos de histéresis muestran mayor pronunciamiento del llamado efecto de Bauschinger.

El marco solo presenta gran estabilidad de lazos de histéresis sin degradación de resistencia en sollicitaciones cíclicas, aún para deformaciones grandes, siendo razonablemente dúctil. Al colocar el conjunto contraviento-dispositivo disipador de energía se incrementó la rigidez y resistencia del marco simple, presentando degradación de rigidez y resistencia después de varios ciclos de carga, ésta se presenta a causa del daño por pandeo y/o fractura que ocurre en la placa del alma del disipador, además se presenta gran capacidad de disipación de energía a niveles de distorsión de entrepiso mucho menores a los requeridos por lograr la “fluencia” del marco solo, debido principalmente a la pronta incursión en el intervalo de comportamiento inelástico de la placa del panel de cortante del disipador, sin que los elementos estructurales del marco solo incursionen en el intervalo no-lineal.

Para el trabajo que ocupa el tema de esta tesis se toma en cuenta la característica observada en el trabajo de Aguilar(1998), de que al colocar al marco el conjunto contraviento dispositivo disipador de energía se incrementa la rigidez y resistencia del marco simple, y al ser sometido a carga cíclica reversible presenta el sistema presenta degradación de rigidez y resistencia después de varios ciclos de carga.

En el trabajo de Efraín Vargas, René Urrutia, Juan Carlos Hernández y Ricardo González, se estudiaron estructuras de dos edificios, uno de concreto de nueve niveles, estudiado previamente por (Jara y col, 1991; Vargas y col, 1992), y una torre de acero de diez niveles, originalmente estudiada por (Filiatralt, 1990; y González, 1990). En estos trabajos se analizaron el efecto de la incorporación de algunos dispositivos de disipación de energía, sistemas de rigidización y aislamiento sísmico, con la respuesta estructural. Dichas estructuras fueron analizadas inelásticamente bajo la acción del acelerograma registrado en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes durante el sismo del 19 de Septiembre de 1985, componente E-W en la ciudad de México ($M_s=8.1$), el cual pertenece a la zona de lago de acuerdo con la zonificación del Reglamento de las Construcciones par el Distrito Federal, tomando en cuenta que se les adicionaron dispositivos disipadores en forma de “U” y ADAS (Added Damping and Stiffness), cables de refuerzo y diagonales de perfiles convencionales de acero. Los marcos originales, sin dispositivos, con periodos fundamentales comprendidos entre 1.0 y 2.5 s, sirvieron como base de comparación. Para el registro seleccionado se observó una disminución importante de la respuesta al incorporar los dispositivos a las estructuras ya mencionadas.

Los sistemas de disipación de energía que se estudiaron, además de cumplir con la función que su nombre indica, incrementan el amortiguamiento y la rigidez inicial del sistema al que se incorporan (Whittaker y col, 1989), y la resistencia lateral.

En el edificio de concreto de los estudios de Jara, al incorporarle sistemas de rigidización y disipación de energía y al analizarlo bajo la acción del registro de SCT, se formó un número de articulaciones plásticas, que provocaron un mecanismo de colapso, por tal razón fue necesario escalar dicho acelerograma a fin de evitar la formación del mecanismo de colapso. Se modificó la masa de los modelos originales hasta obtener periodos fundamentales de vibrar de 1.0, 1.5, 2.0, y 2.5 s. Posteriormente a cada uno de estos modelos se les incorporaron un número de dispositivos tal que incrementen su rigidez lateral en un 25, 50, 75, 100 y 200%, el incremento de 200% en la rigidez de un modelo equivale a que un 33% de las solicitaciones las absorba el marco y el 67% el sistema de rigidización o disipación de energía, debido al número elevado de modelos estudiados y al trabajo que ello representa no se homologaron resistencias.

Como resultado de los modelos para la torre de acero estudiada por Filiatralt, se presentan los niveles de desplazamientos totales, donde se indica que para periodos de 1 y 1.5 s, se alcanzan distorsiones de entrepiso globales de 0.003 y 0.005, de donde se deduce que la estructura exhibe comportamiento elástico. Para las estructuras con periodos de 2 y 2.5 s se alcanzan distorsiones globales de 0.011 y 0.016, siendo que para este nivel de distorsiones no se cumple con las disposiciones del RCDF que como máximo permiten 0.012, además se debe recordar que para los niveles de deformación obtenidos, los efectos $P-\Delta$ y $p-\delta$ son importantes y no se menciona que halla sido tomados en cuenta, quedando la duda de la validez de comparar estructuras con diferentes niveles de masa y/o rigidez, estos comentarios son aplicables a las gráficas de modelos con diagonales de acero y con los cables presforzados. Para los modelos con dispositivos disipadores de solera y con los dispositivos disipadores ADAS, no existe un cambio significativo de la respuesta, desplazamientos totales, por lo tanto aplican los comentarios realizados anteriormente.

Para los modelos representativos del edificio de concreto, cuando se les incorporan los dispositivos disipadores tiende a disminuir las respuestas, además se observa que a medida que se incrementa la rigidez se reduce aún más la respuesta, desplazamientos totales, en este caso.

En general, las estructuras de acero permiten mayores deformaciones que las estructuras de concreto antes de que alguno de sus elementos incurra en el intervalo de comportamiento inelástico, por lo

que el uso de dispositivos disipadores de energía podría mostrar mayores ventajas en este tipo de estructuras, cuando se trata de lograr un incremento adicional de rigidez.

A manera de conclusión, se encontró que todos los modelos experimentaron una reducción importante en su respuesta dinámica al incorporarle los diferentes sistemas de rigidización y disipación de energía, excepto aquellos modelos cuyo periodo fundamental de vibrar era mayor de 2.0 s, donde la colocación de los dispositivos ocasiona un incremento en los cortantes de entrepiso.

En el trabajo de maestría, Gómez Soberón (1994), presenta el comportamiento de un edificio de concreto reforzado de nueve niveles con dispositivos ADAS (Added Damping and Stiffness), ante excitaciones registradas durante el sismo del 19 de septiembre de 1985, en la estación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, zona de lago), Viveros (zona de transición) y Tacubaya (zona dura), todos ellos con la dirección EW. Además, presenta el estudio paramétrico de un marco de un nivel y una crujía reforzado con dichos dispositivos. Para el estudio se varían el periodo fundamental original, el porcentaje de incremento en la rigidez final de los modelos y el desplazamiento de fluencia de los dispositivos. Asimismo se modelan marcos rigidizados con contravientos, empleando algunos de los valores de rigidez utilizados en los modelos con disipadores, comparando las respuestas máximas de los dos sistemas. En todos los modelos se considera un 5% del amortiguamiento crítico. Los autores realizaron un análisis dinámico tridimensional para determinar las propiedades elásticas del edificio, como el periodo fundamental, y posteriormente realizaron el análisis inelástico de un marco plano representativo de la estructura tridimensional con características similares en rigidez y masa. Por medio de la aplicación del análisis inelástico paso a paso se obtuvieron, para cada modelo, los desplazamientos máximos, desplazamientos relativos máximos, envolventes de cortantes en columnas y demandas de ductilidad por entrepiso. Dentro de estos análisis para modelar los elementos ADAS se adoptaron las siguientes hipótesis: Los elementos ADAS se modelaron como elementos equivalentes trabajando a carga axial, al considerar como parámetros, el desplazamiento de fluencia y el esfuerzo para el que se produce la fluencia de los dispositivos; la pendiente de la zona de fluencia de los ADAS es del 7.5% de la pendiente en la zona elástica (Whittaker y col, 1991). Para las diagonales, se utilizó una pendiente en el intervalo de fluencia, del 1% de la correspondiente al intervalo elástico.

De los análisis los autores obtuvieron coeficientes basales, elementos mecánicos máximos, fuerzas cortantes máximas y demandas de ductilidad de las columnas y energía acumulada de los disipadores. De los análisis inelásticos se pudo interpretar que la inclusión de mecanismos disipadores de energía

ADAS, incrementa la rigidez del sistema y la capacidad de disipación de energía de la estructura, por lo que se reduce significativamente la respuesta de estructuras sometidas a acelerogramas registrados en algunos sitios de la Ciudad de México. También se sugiere que su eficiencia está directamente relacionada con el periodo fundamental original y el lugar de desplante de la estructura; ya que según los resultados obtenidos considerando la excitación de SCT-EW, los modelos con disipadores presentaron respuestas mayores que los modelos de marco original, para periodos fundamentales de vibración mayores a 1.8 s.

El reforzar marcos con dispositivos disipadores o diagonales de acero tiende a reducir las respuestas estructurales. Este último tipo de rigidización conduce a respuestas similares o menores respecto a las producidas en sistemas marco-disipador. Sin embargo, al incluir diagonales de acero, se incrementan las fuerzas axiales en las columnas y puede aumentar el costo de la cimentación, por presentarse momentos de volteo mayores. También los marcos rigidizados con contravientos llevan a estructuras con menor capacidad de disipación de energía.

Los resultados son válidos para las estructuras con similares condiciones dinámicas y de hipótesis, lo que sugiere la necesidad de elaborar estudios paramétricos para conocer espectros de resistencia, espectros de ductilidad, espectros de energía, para la estructura original y la estructura con incremento de rigidez y resistencia comparadas al mismo periodo, con diversos registros de características de contenido de frecuencia y magnitudes diferentes.

II.2 CRITERIOS DE ANÁLISIS

II.2.1 REGISTROS CONSIDERADOS.

Los registros se seleccionaron buscando tener una gran gama de contenidos de frecuencia y de aceleraciones, además que generaran espectros de respuesta donde la máxima respuesta se presentara para periodos cortos, medios y largos. Los espectros seleccionados cumplieron con los objetivos planteados.

La influencia de propiedades dinámicas de los sismos se trató de tomar en cuenta empleando seis registros sísmicos con propiedades dinámicas diferentes, los registros seleccionados fueron: **Kobe** (1995, Hyogokennanbu Japan Earthquake), componente Este-Oeste; **Llolleo** (1985, Chile), componente

Norte-Sur; SCT (1985, Caleta de Campos, Michoacán), componente Este-Oeste; Tohoku (1978, Miyagi-ken-oki Earthquake), componente Norte-Sur; El Centro (1940 Imperial Valley Earthquake), componente Norte-Sur; y, Taft (1952, Kem Country Earthquake), componente Este-Oeste.

Los registros se seleccionaron de manera de que cubran un amplio intervalo de periodos dominantes, así como de concentraciones y contenidos energéticos, La duración de cada registro para su uso en el análisis se determinó de manera que se presente al menos el 95% de la energía sísmica incidente, de acuerdo con la definición de la Intensidad de Arias (Arias, 1969).

Tabla 1

Tiempo requerido en (seg)	Kobe	Llolleo	SCT85	Tohoku	El Centro	Taft
	14.4	35.6	31.4	17.6	16.6	34.9
Tiempo utilizado en (seg)	16	40	35	20	18	36

En la tabla 1 se presentan los intervalos de tiempo empleados para cada registro.

En la figura II.1.a se muestra gráficamente el registro de Kobe en su componente EW. En él se alcanzaron aceleraciones del orden de 617 Gal.; se utilizaron los primeros 800 puntos con un incremento de tiempo de 0.02 seg durante 16 segundos; el registro se utiliza para el estudio dado que excita principalmente a las estructuras con periodo de vibración corto; en la figura II.1.b se muestra el espectro elástico del mismo sismo para diferentes niveles de amortiguamiento viscoso.

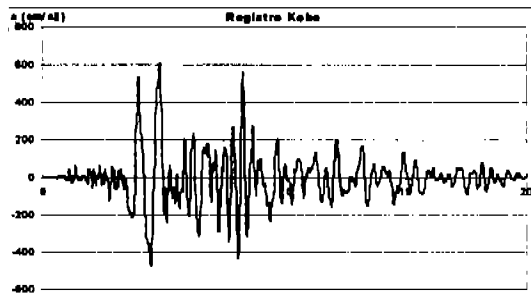


figura II.1.a

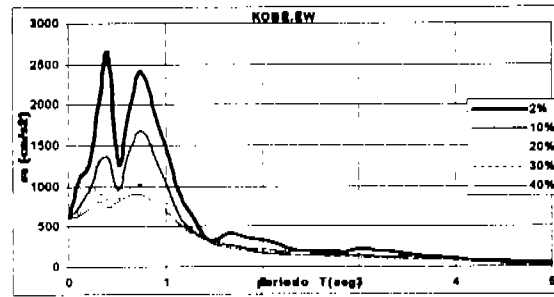


figura II.1.b

Figura II.1 Registro sísmico de Kobe, en su componente EW

En la figura II.2.a se muestra gráficamente el registro de Lolleo; en el que se alcanzaron aceleraciones del orden de 627 Gal., se utilizaron los primeros 2000 puntos con un incremento de tiempo de 0.02 seg

durante 40 segundos, el registro se utiliza para el estudio, dado que excita principalmente a las estructuras con periodo de vibración corto, en la figura II.2.b se muestra el espectro de respuesta elástico del mismo sismo.

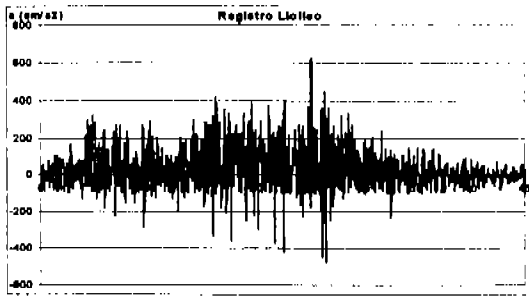


figura II.2.a

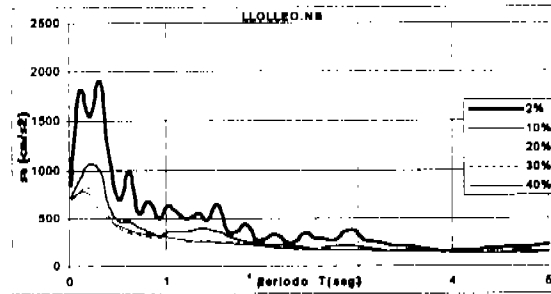


figura II.2.b

Figura II.2 Registro sísmico de Lolloo, en su componente N-S

En la figura II.3.a se muestra gráficamente el registro de Sct85 en su componente EW; en este registro se alcanzaron aceleraciones del orden de 168 Gal.; se utilizaron 1750 puntos con un incremento de tiempo de 0.02 seg. durante 35 segundos. Se usa el registro a partir del segundo 35 hasta el 70. El registro se utiliza para el estudio, dado que excita principalmente a las estructuras con periodo de vibración largo. En la figura II.3.b se muestra el espectro de respuesta elástico para el mismo sismo.

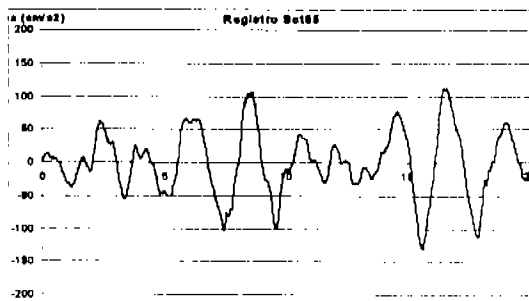


figura II.3.a

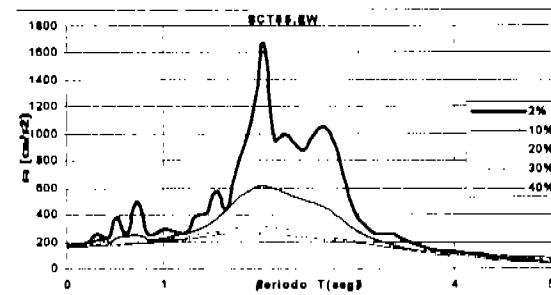


figura II.3.b

Figura II.3 Registro sísmico de Sct85, en su componente EW

En la figura II.4.a se muestra gráficamente el registro de Tohoku en su componente NS; en él se alcanzaron aceleraciones del orden de 258 Gal.; se utilizaron los primeros 1000 puntos con un incremento de tiempo de 0.02 seg, durante 20 segundos, el registro se utiliza para el estudio dado que excita principalmente a las estructuras con periodo de vibración intermedio. En la figura II.4.b se muestra el espectro de respuesta elástico del sismo de Tohoku, en su componente NS.

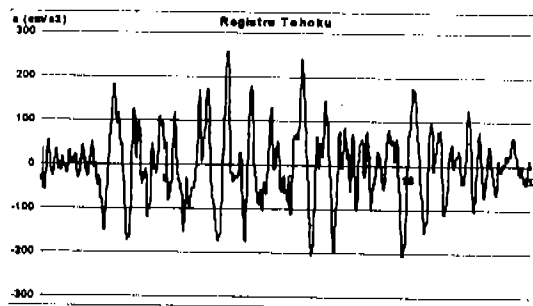


figura II.4.a

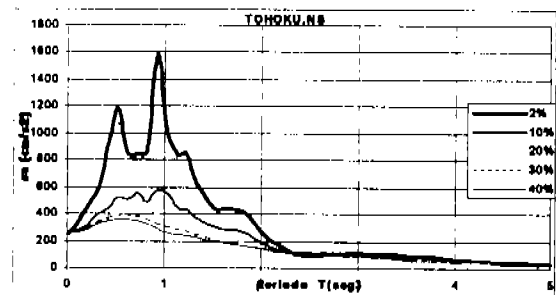


figura II.4.b

Figura II.4 Registro sísmico de Tohoku, en su componente NS.

En la figura II.5.a se muestra gráficamente el registro de El Centro, en su componente NS; en este registro se alcanzaron aceleraciones del orden de 342 Gal. Se utilizaron los primeros 900 puntos con un incremento de tiempo de 0.02 seg, durante 18 segundos. El registro se utiliza por las características de excitación con incidencia energética para un amplio intervalo de periodos. En la figura II.5.b se muestra el espectro de respuesta elástica del registro de El Centro en su componente NS.

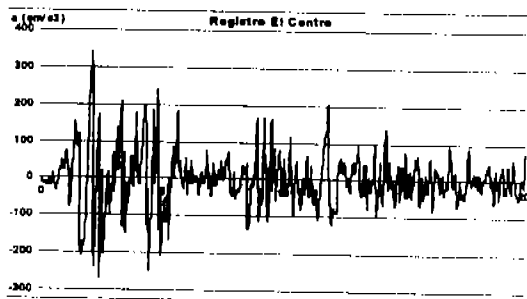


figura II.5.a

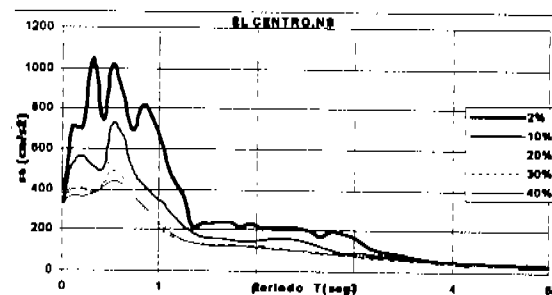


figura II.5.b

Figura II.5 Registro sísmico de El Centro, en su componente NS.

Finalmente, en la figura II.6.a se muestra gráficamente el registro de Taft, en su componente SE; en el cual se alcanzaron aceleraciones del orden de 176 Gal.; se utilizaron los primeros 1800 puntos con un incremento de tiempo de 0.02 seg durante 36 segundos. El registro se utiliza para el estudio dado que excita principalmente a las estructuras con periodo de vibración corto. En la figura II.6.b se muestra el espectro de respuesta elástico del Taft, en su componente SE.

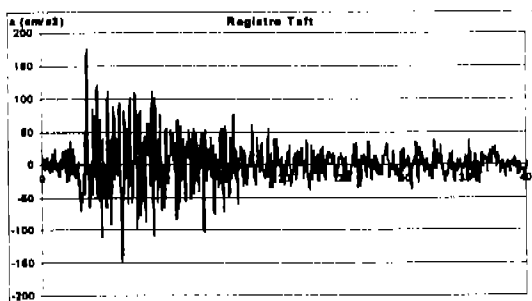


figura II.6.a

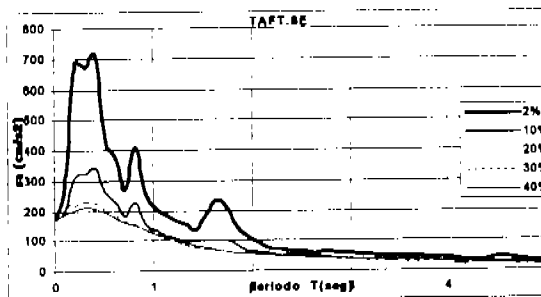


figura II.6.b

Figura II.6 Registro sísmico de Taft, en su componente SE.

Tabla II.1 Resumen de características de los registros sísmicos considerados

Registro	T_{pmax} (s)	T_d (s)	a_{max} (gal)	sa_{max} (gal)	M (°)	I (tm) $\times 10^3$	d (km)	Notas:
Kobe	0.42	0-16	2,637	617	7.2	343	15	Registro de foco cercano "suelo" firme
Llolleo	0.32	0-40	1,908	627	7.8	574	40	Registro de foco cercano "suelo" firme
SCT	2.05	35-70	1,665	168	8.1	140	350	Registro de foco lejano suelo blando
Tohoku	0.93	0-20	1,587	258	7.8	132	150	Registro de foco lejano suelo blando
El Centro	0.32	0-18	1,047	342	7.0	97.7	15	Registro de foco cercano suelo "blando"
Taft	0.42	0-36	713	176	7.3	37.3	10	Registro de foco cercano suelo "blando"

Donde:

T_{pmax} : periodo al cual se presenta la aceleración espectral máxima elástica

T_d : intervalo de tiempo del registro, seleccionado para resolver la ecuación de movimiento

a_{max} : aceleración máxima instantánea del registro

sa_{max} : suerdo aceleración máxima para un amortiguamiento de 2%

d: distancia del sitio donde se generó registro al epicentro en kilómetros

I: Intensidad de Arias

M: Mangitud

II.2.2 MODELO DE ANÁLISIS.

El analizar sistemas de un grado de libertad es correcto, cuando los modelos representan estructuras que responden principalmente ante su primer modo de vibrar; la hipótesis de partida del presente estudio es esa; por lo tanto, el sistema de un grado de libertad se utiliza en todo el desarrollo de este trabajo.

Como se puede observar de la figura II.7 un sistema estructural de concreto con dispositivos disipadores de energía se puede representar como un estructura con comportamiento trilineal. Para lograr que una estructura pueda exhibir el comportamiento descrito por la línea idealizada del marco de concreto se requiere proveer un comportamiento dúctil de la estructura. Para lograr un comportamiento dúctil, la estructura y sus elementos y materiales que la forman, deben exhibir suficiente capacidad de deformación y de resistencia; a esta filosofía de promover comportamiento dúctil en las estructuras se le llama diseño por capacidad.

Para lograr un diseño por capacidad, se debe identificar los modos de comportamiento (falla), que puede ser flexión, pandeo, cortante, torsión o combinaciones de ellos, para jerarquizar los modos de comportamiento. Hasta el momento se a mencionado a la filosofía del diseño por capacidad, sin que esto garantice un buen desempeño estructural. Para lograr un buen desempeño estructural se debe diseñar al sistema estructural, limitando los desplazamientos para reducir o eliminar el daño en los elementos no estructurales, cuidando además que el contenido no sufra aceleraciones y velocidades que pudieran dañar su funcionamiento.

Entonces, se parte de la hipótesis de que tanto la estructura original, como la reforzada con DDE cumplen con los requisitos de la filosofía de diseño por capacidad y no presentarán mecanismos locales de falla de tipo frágil.

Procedimiento de análisis

Los análisis de la respuesta de las estructuras se obtuvieron con el método β de Newmark, con los parámetros $\beta=1/6$ y $\gamma=1/2$, adecuados para lograr la convergencia y aproximación en sistemas de un grado de libertad (Otani, 1981). La ecuación de movimiento se resolvió paso a paso, para intervalos constantes de tiempo Δt , igual al menor de los valores de $T_0/20$ (T_0 =periodo fundamental de las estructuras) o el intervalo de tiempo del registro empleado como excitación incidente.

Para representar gráficamente al conjunto estructura-disipador se utilizó la figura II.7, donde se puede ver el incremento de rigidez y resistencia, de donde se obtienen algunos parámetros de análisis

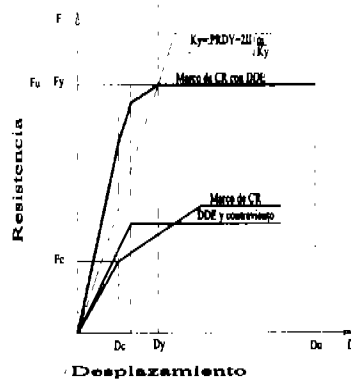


Figura II.7 Representación esquemática del modelo resultante de sumar el Marco de CR con DDE y contravientos

Al considerar que el modelo trilineal es representativo de una estructura de concreto reforzado, y al asumir que el dispositivo disipador de energía tiene comportamiento elasto-plástico, se asume que el trabajo conjunto de los sistemas, el comportamiento global, se puede representar por un modelo trilineal.

Para el modelo de la curva primaria, trilineal, básico para la mayoría de los modelos de histéresis relacionados con el concreto reforzado, se aceptan las siguientes definiciones y relaciones entre variables (ver fig. II.7):

F_c = Resistencia al agrietamiento

F_y = Resistencia a la fluencia

D_c = Desplazamiento al agrietamiento

D_y = Desplazamiento al punto de fluencia

Si $\frac{F_y}{F_c} = 3$; $\frac{K_0}{K_y} = \alpha_y = 3$; entonces $T_y = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K_y}}$ luego, si se tiene que el periodo fundamental se

puede representar por la expresión: $T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K_0}}$ y ya que: $\alpha_y = \frac{K_0}{K_y} = 3$; entonces T_y queda:

$$T_y = 2\pi \sqrt{\frac{\alpha_y m}{K_0}} = \sqrt{\alpha_y} T_0 = \sqrt{3} T_0$$

donde:

T_y = Periodo al punto de fluencia

T_0 = Periodo fundamental del sistema

K_y = Rigidez al punto de fluencia

K_0 = Rigidez de agrietamiento (rigidez elástica inicial)

m = Masa del sistema

α_y = Relación entre rigidez al punto de fluencia y la rigidez inicial

Los valores de relación de resistencia, y rigidez, $\frac{F_y}{F_c} = 3$ $\frac{K_0}{K_y} = \alpha_y = 3$, se adoptaron del trabajo de

Otani (Otani, 1981), donde se estudia el efecto que causan estos parámetros en la respuesta no-lineal de sistemas de un grado de libertad, encontrando que para este estudio, representativo de estructuras de concreto reforzado, resulta adecuado el valor de 3.

Desde otra óptica, se puede decir que el sistema estructura-DDE, puede representarse con un incremento en la energía disipada por amortiguamiento histerético; para ser más claro se presenta la ecuación II.1, que muestra la relación básica de energía en una estructura ante excitación sísmica.

$$E_I = E_K + E_S + E_\xi + E_H \quad \text{II.1}$$

donde:

E_I = Energía incidente debida al sismo

E_K = Energía cinética en la estructura

E_S = Energía de deformación en la estructura

E_ξ = Energía disipada por amortiguamiento viscoso

E_H = Energía disipada por amortiguamiento histerético

La ecuación II.1 ha sido planteada por (Uang, 1988, Filiatrault, 1990), y permite entender el fenómeno de absorción y/o disipación de energía en una estructura. Además se observa que no toma en cuenta la energía reflejada. Si se tiene una E_i dada, ésta deberá ser equilibrada por todas las demás energía mencionadas. Si se incrementa de manera significativa y controlada, por medio de dispositivos disipadores de energía (DDE), la energía disipada por amortiguamiento histerético, al cumplirse la ecuación II.1, resultará menor la demanda de disipar energía por los demás conceptos, dando lugar a un mejor control del daño. El adicionar al marco original un sistema de disipación, origina un marco con mejores características de respuesta, el cual tiene un sistema de disipación de energía, que a su vez sirve como primera línea de defensa, aportándole un incremento importante de amortiguamiento. El marco reforzado tiene entonces como característica peculiar mayor rigidez y resistencia lateral, mayor amortiguamiento y, por tanto, mayor capacidad de disipación de energía, control del nivel y ubicación del daño, con igual peso que el marco original. El sistema, esquemáticamente se puede representar como lo muestra la figura II.8



Figura II.8 sistema completo Marco de CR más DDE

De manera similar a la ecuación II.1, relación básica de energía, se puede plantear una ecuación para la rigidez y resistencia.

Con el sistema completo, la estructura de concreto reforzado y el DDE se obtiene una estructura mejorada con incrementos importantes en rigidez y resistencia con un cambio del periodo fundamental; estos cambios y su influencia en la respuesta, dan origen al presente estudio donde se hacen análisis inelásticos de las respuestas de estructuras que se pueden representar como osciladores, que responden principalmente en el primer modo de vibrar, esto con la finalidad de elaborar espectros de resistencia y espectros de ductilidad. Adicionalmente, los resultados pueden dar luz sobre el tipo y características de los espectros inelásticos de diseño para este tipo de sistemas estructurales.

Metodología

Una estructura puede ser definida por medio del periodo a la fluencia, T_y , y por el coeficiente sísmico, que resulta igual a la fuerza de resistencia lateral, dividida entre el peso de los sistemas.

Para generar un grupo de sistemas de 1 grado de libertad, S1GL, representativo de estructuras de concreto se requiere definir: W_t .- peso del sistema; $PRDY$.- periodo a la fluencia; $SECY$.- coeficiente sísmico; $ALFC$.- relación de la rigidez inicial de agrietamiento a la rigidez al punto de fluencia; $ALFU$.- relación de la rigidez última, a la rigidez al punto de fluencia; y, $FCFY$.- relación de la resistencia al punto de agrietamiento a la resistencia al punto de fluencia. Con estos seis parámetros y únicamente al variar el periodo a la fluencia y su respectivo coeficiente sísmico, se genera un grupo de S1GL con el que se genera el espectro de respuesta.

Los valores de los parámetros utilizados para los S1GL en el presente estudio son: $W_t=1$ ton; se utiliza un valor unitario con la finalidad de simplificar los cálculos; $PRDY$ se hace variar de 0.01 a 5.87 segundos, con incrementos que se generen 36 sistemas; para el parámetro $ALFC$ se elige un valor de 3 representativo de estructuras de concreto; para la variable $ALFU$ toma el valor de 0.05 ya que según algunos autores, la relación de la pendiente de la tercer línea respecto de la segunda línea, generalmente está ente el 5% y 10% para estructuras convencionales de concreto; la relación entre resistencia al agrietamiento y la fluencia, $FCFY$, vale inicialmente para la estructura original 1/3, ya que se ha encontrado que es adecuado para estructuras convencionales de concreto.

El procedimiento para caracterizar las curvas primarias de todos los modelos es el siguiente:

- 1) $F_y=W_t*SECY$ (fuerza a la fluencia)
- 2) $S_y=39.4784*W_t/G/PRDY^2$ ($T_y=2\pi(m/K_y)^{0.5}$ entonces $K_y=4\pi^2m/T_y^2$)
- 3) $D_y=F_y/S_y$ (desplazamiento a la fluencia)
- 4) $S_u=ALFU*S_y$ (pendiente al desplazamiento último)
- 5) $D_u=4*D_y$ (desplazamiento último, tentativo y predeterminado dentro del procedimiento de análisis)
- 6) $F_u=F_y+(D_u-D_y)*S_u$ (fuerza última)
- 7) $S_c=ALFC*S_y$ (rigidez al agrietamiento)
- 8) $F_c=FCFY*F_y$ (fuerza al agrietamiento)
- 9) $D_c=F_c/S_c$ (desplazamiento al agrietamiento)
- 10) $S_c=F_c/D_c$ (rigidez al agrietamiento ó pendiente al agrietamiento)
- 11) $S_y=(F_y-F_c)/(D_y-D_c)$ (rigidez pos agrietamiento o pendiente de la 2° línea)

12) $S_u = (F_u - F_y) / (D_u - D_y)$ (rigidez pos fluencia o pendiente de la 3ª línea)

En la figura II.9 se representa gráficamente los resultados de aplicar el proceso descrito anteriormente, para definir la curva primaria del modelo de histéresis.

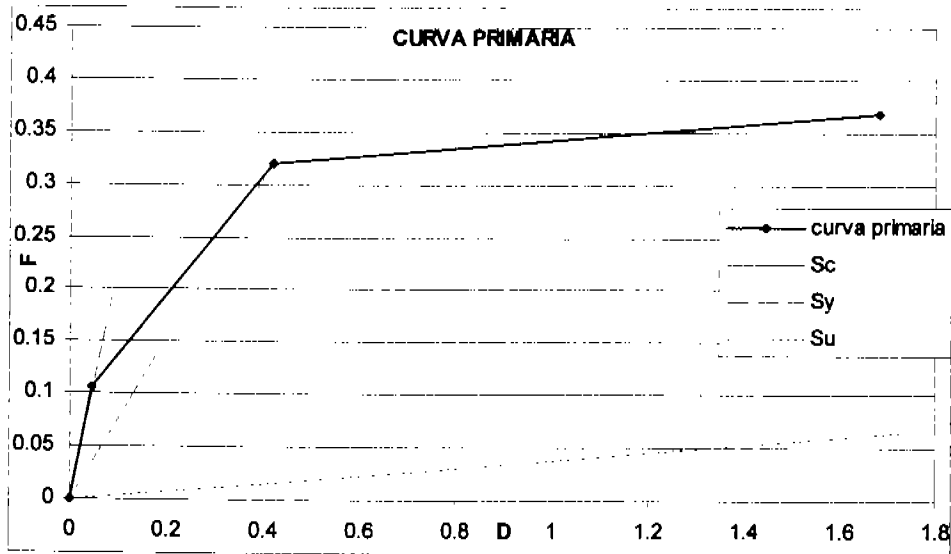


Figura II.9 Curva Primaria

III. ESPECTROS DE RESISTENCIA ELÁSTICOS E INELÁSTICOS

Un espectro de respuesta representa el conjunto de valores máximos de algún parámetro característico alcanzados por un grupo de sistemas de un grado de libertad sujetos a una determinada excitación. En sentido estricto, el espectro de respuesta representa el máximo valor de parámetros como pueden ser: desplazamiento total, desplazamiento relativo, velocidad, aceleración absoluta, pseudo-aceleración, número de ciclos de vibración, cantidad de energía que el sismo introduce al sistema, cantidad de energía disipada por el sistema, ductilidad, etc. para un conjunto infinito de sistemas estructurales representados por su periodo fundamental. El tipo de espectro más conocido es el espectro de aceleración, o espectro de resistencias necesarias, debido a que comúnmente se ha utilizado como base en la especificación de espectros de diseño sísmico; a este tipo de espectro también se le conoce como demanda de resistencia lateral necesaria para mantener al sistema elástico, y generalmente representan una fracción del peso que debe aplicarse lateralmente a la estructura, en el diseño sísmico.

Los espectros de resistencia, proporcionan información importante, tanto de la excitación como de la respuesta. La información que contiene el espectro de resistencia es la siguiente: aceleración máxima del terreno (ordenada correspondiente al periodo igual a cero), nivel de amplificación dinámica máxima de las demandas de resistencia lateral (cociente entre la máxima ordenada espectral a la aceleración máxima del terreno), también permite conocer las regiones espectrales en las cuales las demandas de resistencia son mayores (intervalo de periodos fundamentales o tipos de sistemas estructurales más demandados). Del espectro de resistencia elástico se pueden obtener los espectros de pseudo velocidad y pseudo desplazamiento, al dividir el espectro de aceleraciones o resistencias por w y w^2 respectivamente; esto, para periodos hasta de 3seg. Para bajos niveles de amortiguamiento, esta condición la cumplen la mayor parte de las estructuras, por lo que se puede estimar la demanda de desplazamientos laterales en estructuras con comportamiento elástico, de manera relativamente sencilla.

III.1 ESPECTROS ELÁSTICOS

Los sistemas elásticos se comportan de tal forma que no presentan degradación de rigidez, ni de resistencia, como se puede ver de la ecuación de movimiento para dicho sistema; para simplificar, se

consideran en este tema sistemas elásticos lineales, los cuales presentan ventajas de análisis, se acepta representan adecuadamente a sistemas estructurales para niveles de carga bajos, donde todavía no hay agrietamiento.

La ecuación diferencial de movimiento para sistemas de un grado de libertad, se obtiene de establecer el equilibrio dinámico de las fuerzas para el sistema (masa, resorte):

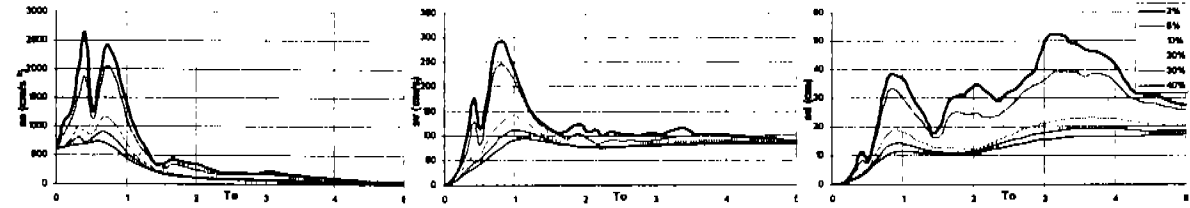
$$my + cy + ky = F(t)$$

En esa ecuación es difícil considerar comportamiento inelástico, debido al, agrietamiento ligero o fuerte de los muros no estructurales, agrietamiento ligero o fuerte de los muros estructurales, desconchamiento del recubrimiento, formación de articulaciones plásticas, pérdida de verticalidad de la estructura, falla del anclaje del refuerzo, pandeo local, por lo que se considera una simplificación, a la cual debe aplicarse factores reductivos por sobrerresistencia y ductilidad, ya que en las estructuras reales es difícil obtener comportamiento elástico lineal, en sismos severos.

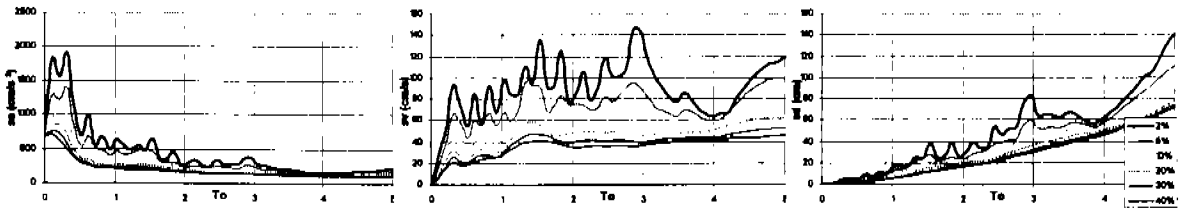
En la figura III.1 se presentan los espectros de respuesta elástica de aceleración, velocidad y desplazamiento para los registros estudiados, donde el eje horizontal de todas las gráficas se presenta T_0 (periodo fundamental en segundos), de los cuales se deduce que el amortiguamiento es benéfico para la reducción de demandas. Se encontró que, en general, el cambio de amortiguamiento de 2% a 5% y a 10%, redundan en una gran reducción de las demandas y que, para el cambio de 30% a 40% la reducción de las demandas resulta menos importante, o poco significativo.

Es necesario hacer la aclaración de que en la figura III.1 se presentan los espectros de aceleración, solo hay que dividir esa ordenada entre el valor de la aceleración de la gravedad, para conocer la resistencia mínima para que el sistema permanezca elástico.

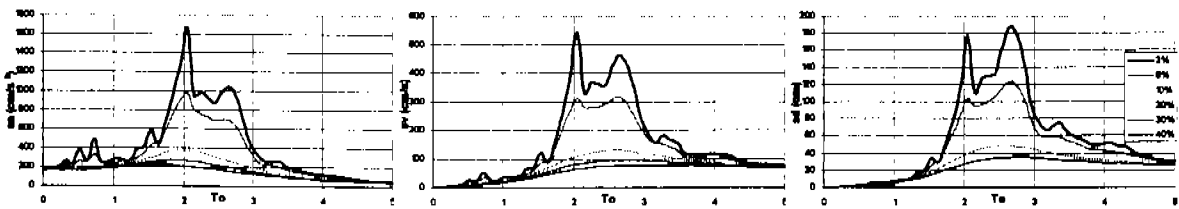
Es importante notar que los espectros se obtuvieron de suponer comportamiento elástico lineal que en una estructura real es difícil de obtener. Por ello, en los siguientes capítulos se elaboran espectros de modelos de estructuras con comportamiento inelástico.



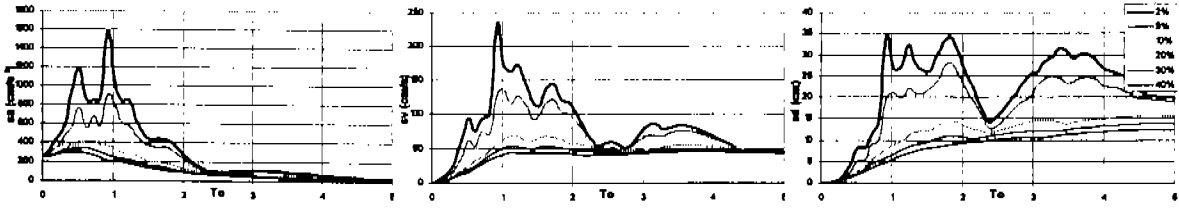
a) Kobe.ew



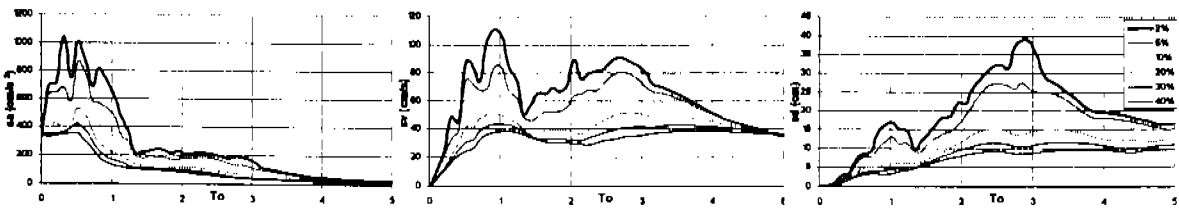
b) Lolloe.ns



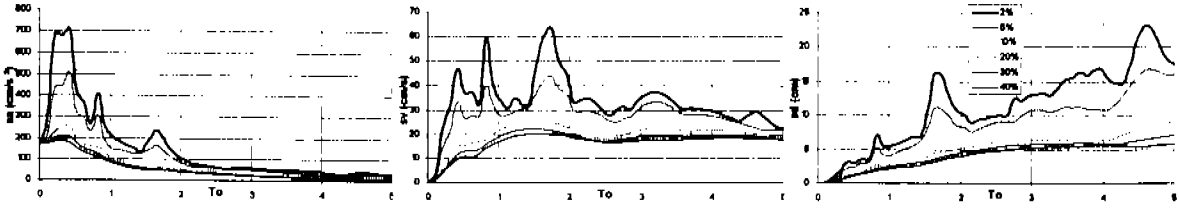
c) SCT85.ew



d) Tohoku.ns



e) El Centro.ns

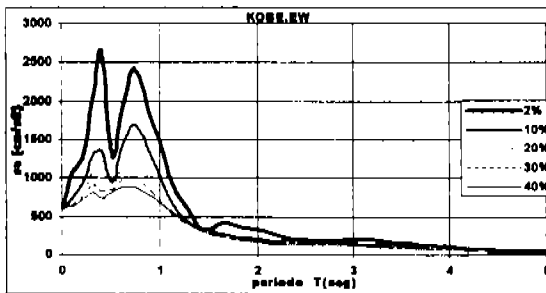


f) Taft.se

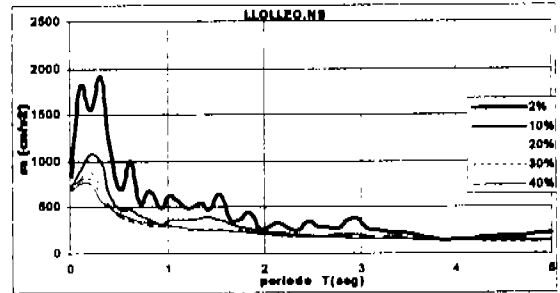
Figura III.1 Espectros elásticos de aceleración, seudovelocidades y seudodesplazamientos, para los registros considerados

Efecto del incremento del amortiguamiento viscoso en los espectros elásticos de aceleración.

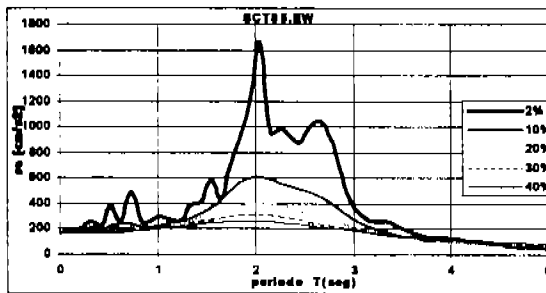
La demanda máxima de resistencia decrece a medida que se incrementa el porcentaje de amortiguamiento viscoso; este efecto se presenta en todos los casos estudiados, independientemente del tipo de registro sísmico. Otra invariante observada es que para periodos lejanos al dominante, sean periodos cortos o periodos largos, el incremento de amortiguamiento no tiene influencia significativa, esta característica se debe tener presente al optar reforzar la estructura con amortiguadores viscosos con la finalidad de bajar la demanda de resistencia. Es también importante notar que el pasar de un amortiguamiento viscoso del 30% al 40%, este efecto no redundará en un abatimiento significativo de la demanda de resistencia. Estas características también se tomarán en cuenta para cuando se estudien respuestas inelásticas.



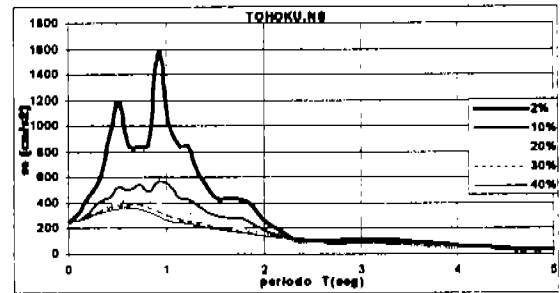
III.2.a



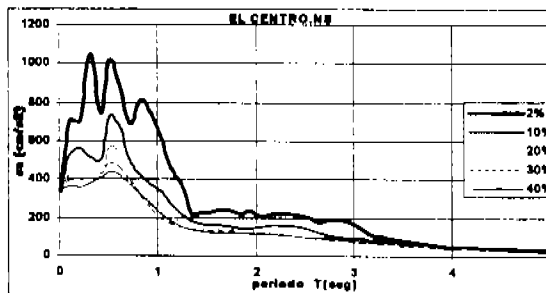
III.2.b



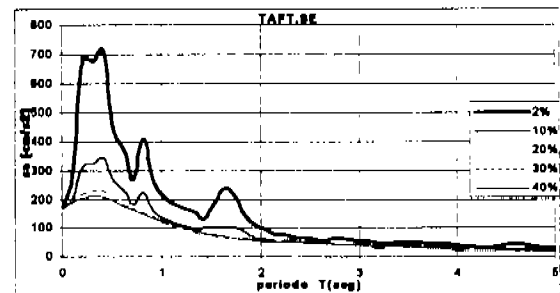
III.2.c



III.2.d



III.2.e



III.2.f

Figura III.2 Espectros Elásticos

La figura III.2 muestra los espectros elásticos de aceleración, o dicho de otra forma, los espectros elásticos de resistencia para un amortiguamiento viscoso de: 2%, 10%, 20%, 30%, y 40%. La figura III.2.a muestra el espectro elástico que se genera, producto de análisis mediante el registro obtenido durante el sismo ocurrido en la ciudad de Kobe Japón en 1995 componente este-oeste; en esta figura se puede ver que el sismo tuvo su mayor demanda de resistencia para estructuras con periodo corto hasta de 1seg. El abatimiento de la demanda de resistencia es considerable a medida en que se incrementa el amortiguamiento del 2% al 10%, siendo menor este efecto para cuando se pasa del 10% al 20%, al pasar del 20% al 30% o al 40% de amortiguamiento viscoso el abatimiento en la demanda de resistencia se reduce tanto, que para efecto prácticos y de diseño, es poco útil el tomar tal nivel de amortiguamiento. Entonces, desde éste punto de vista, resulta de interés el fijarse como niveles máximos de amortiguamiento viscoso valores del orden del 20%, cuando se utilizan dispositivos de amortiguamiento del tipo viscoso, se debe procurar no exceder del 30% de amortiguamiento, ya que un nivel más alto no redundaría en una disminución significativa de la demanda. La figura III.2.b muestra los espectros de resistencia producto del análisis del registro de aceleraciones del sismo de Lolleo, Chile, en el año de 1985 componente norte-sur, donde se presenta el mismo fenómeno descrito anteriormente de abatimiento de la demanda, a medida que se incrementa el amortiguamiento viscoso, aunque en este caso la máxima respuesta se presenta para periodos que van entre 0 hasta 0.5 seg. La figura III.2.c es de especial interés dado que se trata del espectro elástico para el sismo ocurrido en la ciudad de México, el año de 1985, con componente predominante este-oeste; la reducción de la demanda se presenta en un intervalo más grande y además tiene la peculiaridad de que la máxima demanda se presenta para estructuras con periodos de 2seg y la reducción se presenta para periodos de entre 1.6 a 3.0seg. Para todos los demás registros, la tendencia es la misma mencionada para los tres registros anteriores, para porcentajes de amortiguamiento superiores al 20%; el efecto de reducción en las ordenadas espectrales resulta poco significativo.

El efecto del nivel de amortiguamiento viscoso ya ha sido estudiado y publicado en el pasado, como se puede ver en la mayoría de los libros de Dinámica Estructural, pero en este caso es importante obtener específicamente la demanda de resistencia para cada uno de los registros, con la finalidad de definir el intervalo de utilidad del amortiguamiento viscoso equivalente, para el estudio que se desarrolla en este trabajo.

Para abundar más en el tema se describen conceptos de amortiguamiento.

Amortiguamiento

La experiencia indica que no es posible tener un mecanismo que vibre sin llegar al reposo, que oscile indefinidamente con una amplitud constante. Fuerzas llamadas de fricción o de amortiguamiento, están siempre presentes en cualquier sistema en movimiento. Estas fuerzas disipan energía; la presencia inevitable de estas fuerzas de fricción constituyen un mecanismo por el cual, la energía mecánica del sistema, energía cinética o potencial, se transforma en otros tipos de energía, como el calor. El mecanismo de esta transformación o disipación de energía es bastante complejo y en la actualidad no se comprende totalmente. Para considerar estas fuerzas de disipación en el análisis de sistemas dinámicos, es necesario introducir simplificaciones, basadas en técnicas afines como la del sonido.

Amortiguamiento viscoso

Cuando se consideran las fuerzas de amortiguamiento o fricción en el análisis dinámico de estructuras, generalmente se presume que éstas son proporcionales a la magnitud de la velocidad y opuestas a la dirección del movimiento. Este tipo de fricción se conoce como amortiguamiento viscoso; es el tipo de fuerza de fricción que se produce en un cuerpo restringido en su movimiento por un medio viscoso.

Existen situaciones en las cuales la suposición de amortiguamiento viscoso es realista y en las que el mecanismo de disipación es aproximadamente viscoso. Sin embargo, la suposición de amortiguamiento viscoso se hace, a menudo, sin tener en cuenta las diferentes características disipativas de los sistemas reales. La razón principal del uso generalizado de esta suposición, reside en que conduce a un problema matemático simple. En este trabajo se utiliza el amortiguamiento proporcional a la rigidez, en vez del amortiguamiento proporcional a la masa.

Es común representar el nivel de amortiguamiento de las estructuras en función del cociente del coeficiente de amortiguamiento, entre el coeficiente de amortiguamiento crítico. En este trabajo se adopta el cociente del amortiguamiento, entre el amortiguamiento crítico.

Amortiguamiento hysterético

La histéresis es un fenómeno por medio del cual dos, o más propiedades físicas se relacionan de una manera que depende de la historia de su comportamiento previo. Este tipo de amortiguamiento se presenta cuando un elemento estructural es sometido a inversiones en el sentido de la carga aplicada cuando el material del elemento se encuentra en el intervalo inelástico o no lineal. El hecho de que la curva de carga tenga una trayectoria diferente a la curva de descarga, conduce a que no toda la energía de deformación acumulada en el elemento se convierta en energía cinética en el ciclo de descarga. El

tipo de material influye, tanto en la forma de la curva de carga, como la de descarga, esquemáticamente, la figura III.3 muestra el comportamiento, en términos de fuerza-deformación, de un elemento estructural construido con un material inelástico, durante unos ciclos de carga y descarga, que incluye reversión del sentido de las fuerzas aplicadas.

En la figura III.3 se ha marcado la fuerza de fluencia F_y , a partir de la cual hay deformación, sin que presente un aumento en la fuerza. Una vez que se invierte el movimiento, se inicia el ciclo de descarga, y el material reacciona de una manera diferente a cuando fue cargado, hasta cuando llega a la fluencia en el lado opuesto, $-F_y$.

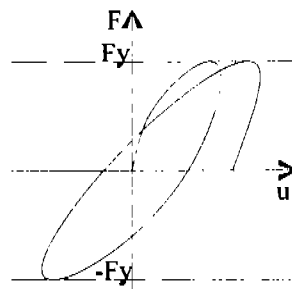


Figura III.3 Curva fuerza-deformación para un material inelástico

Para explicar el concepto de disipación de energía, se utiliza la figura III.4 que muestra la acumulación de energía de deformación corresponde al área bajo la curva de carga, figura III.4(a). Cuando el sistema descarga la energía que el sistema transfiere para convertirse en energía cinética, corresponde al área bajo la curva de descarga, figura III.4(b). La diferencia entre las dos áreas corresponde a la energía disipada por el sistema y que se convierte en calor, ruido u otros tipos de energía, figura III.4(c).

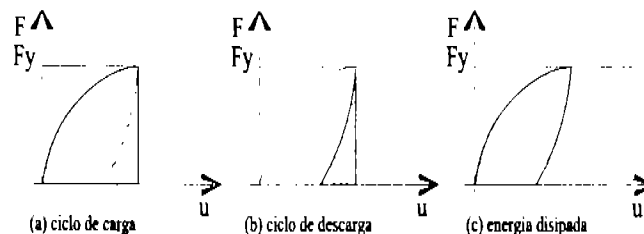


Figura III.4 Disipación de energía en un sistema inelástico

Aunque el comportamiento histerético de algunos elementos estructurales, se puede describir por medio de modelos relativamente simples, como es el modelo elasto-plástico, en la gran mayoría de los problemas hay necesidad de recurrir a modelos matemáticos más complejos. En este trabajo, se decidió utilizar un modelo de Takeda, que usa una curva primaria trilineal para representar a las estructuras estudiadas, y diferentes reglas de comportamiento, que toma en cuenta el cambio de rigidez por agrietamiento, la fluencia, la rigidez pos fluencia y reglas de histéresis internas.

Amortiguamiento viscoso equivalente

El amortiguamiento en estructuras reales generalmente se representa por el amortiguamiento viscoso equivalente. Es la forma más simple de usar el amortiguamiento ya que el manejo de la ecuación diferencial de movimiento es lineal y de fácil solución analítica. Mediante la ecuación lineal de movimiento, se puede manipular la aproximación requerida de amortiguamiento viscoso. Es recomendable utilizar el amortiguamiento viscoso equivalente, para tomar en cuenta todos los mecanismos de amortiguamiento viscoso y no viscosos presentes en una estructura real.

La definición más simple de amortiguamiento viscoso equivalente esta basada en la respuesta moderada de un sistema sujeto a una excitación armónica de frecuencia w igual a la frecuencia natural

w_n del sistema. La proporción de amortiguamiento ζ_{eq} se calcula con la expresión $\zeta = \frac{1}{2} \frac{(u_{st})_0}{(u_0)_{w=w_n}}$ con

valores medidos de u_0 y $(u_{st})_0$. Éste es el amortiguamiento viscoso equivalente, que toma en cuenta todos los mecanismos disipadores de energía que existieron en los experimentos.

Influencia del amortiguamiento en la respuesta de los sistemas.

En la figura III.5 se puede ver la influencia del amortiguamiento en el factor de amplificación dinámico. Esto nos da idea de cómo afecta al espectro de respuesta, sea este de aceleración, velocidad ó desplazamiento. En general, el amortiguamiento cambia la forma y la magnitud de la respuesta de las estructuras, y cambia la forma y tamaño del espectro de respuesta.

El amortiguamiento tiene un papel importante, cuando el periodo del sistema se parece al periodo dominante del suelo, y resulta menos significativo, cuando el periodo del sistema y el periodo dominante del suelo distan.

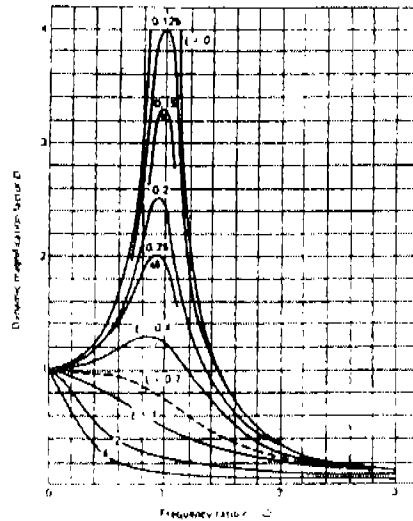


Figura III.5 factor de amplificación dinámica

III.2 ESPECTROS INELÁSTICOS

Los sistemas modelados como sistemas con un grado de libertad, tienen la posibilidad de presentar comportamiento inelástico, es decir se puede alcanzar el punto de fluencia del sistema, cuando se le somete a una determinada excitación. En la curva que describe el comportamiento del sistema, se presenta una porción en la cual se produce comportamiento elástico, después de ese punto, se produce deformación plástica, el modelo más simple es el elastoplástico, el cual tiene una rama elástica lineal hasta el punto de fluencia, después del ese punto, el sistema no tiene capacidad para tomar más carga, esta zona queda descrita por una línea horizontal.

Los espectros inelásticos que se obtuvieron para este capítulo considerando el modelo de comportamiento llamado elastoplástico con 5% de amortiguamiento viscoso son presentados en la figura III.6, en esta se puede ver los espectros de aceleración para los registros seleccionados. De los espectros se deduce que hay una reducción de la aceleración respecto a los espectros elásticos, esto sin considerar ductilidades mayores a 1, por lo que se parte de solicitaciones menores a las elásticas y de ahí hacia menores solicitaciones, a medida que aumenta la ductilidad de los sistemas.

El incremento de ductilidad en los espectros elastoplásticos genera reducción en la aceleración del sistema, de manera similar que en espectros elásticos, con incremento de amortiguamiento.

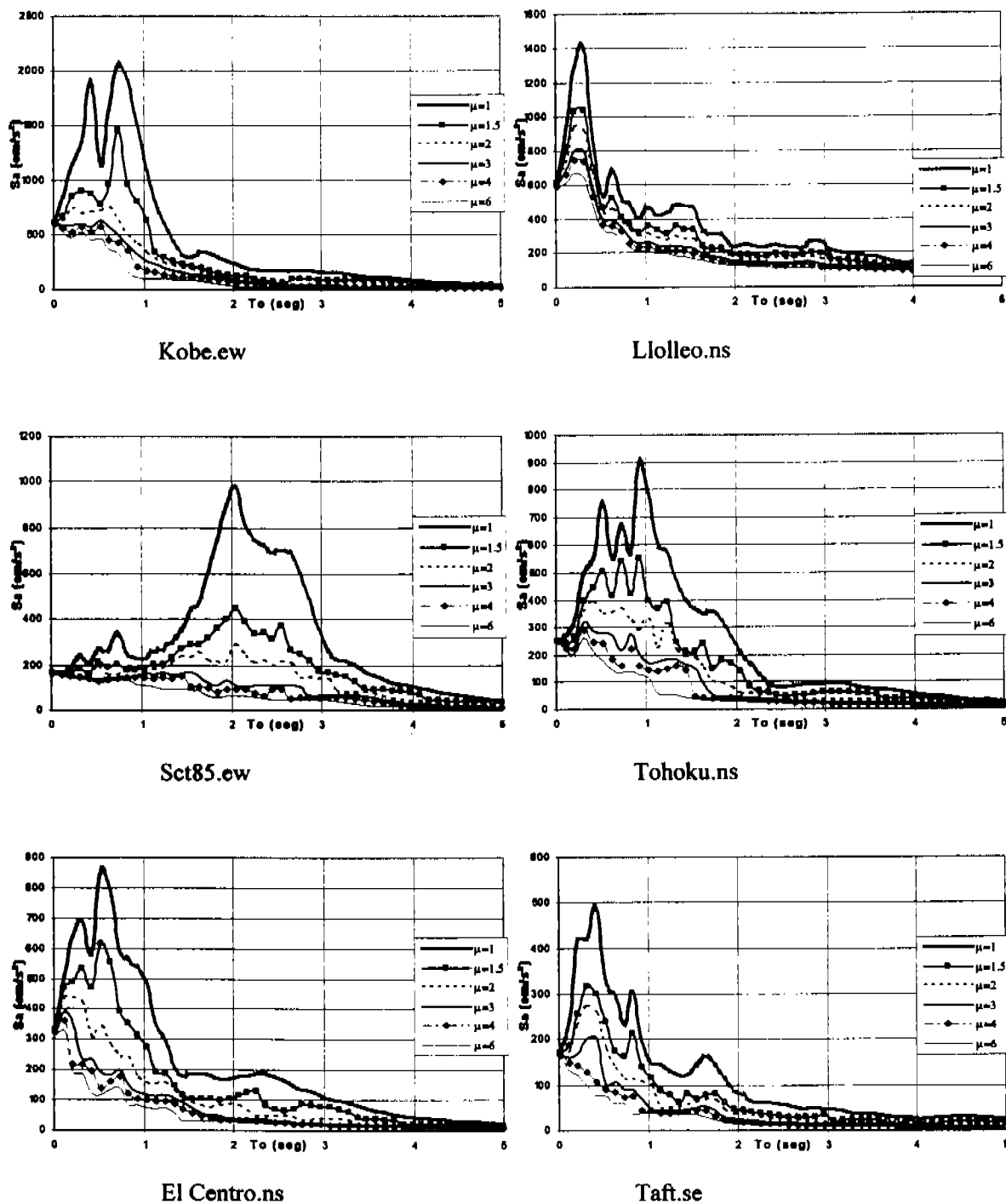


Figura III.6 Espectros elastoplásticos para un amortiguamiento del 5%

IV. EFECTO DEL CAMBIO DE RIGIDEZ POR USO DE DISPOSITIVO DISIPADOR DE ENERGÍA, EN LA DEMANDA DE RESISTENCIA

En este capítulo se estudia el efecto que causa un incremento de rigidez en las estructuras de concreto reforzado, debido a la presencia del dispositivo disipador de energía (DDE), para lo cual se propone incrementar en 10%, 25%, 50%, 100%, y 200% la rigidez, para estructuras con ductilidades globales de 1, 1.5, 2, 3, 4, y 6.

Se parte de una estructura de concreto con buen comportamiento, donde rige el modo de falla a flexión, sin adelgazamiento del lazo histérico, lo que implica proveer de suficiente detalles y resistencia, para que no presente significativo deterioro de su rigidez y resistencia, la cual se puede representar mediante el modelo de histéresis de Takeda. A esta estructura se le adicionan los DDE para controlar la respuesta, al disipar mayor cantidad de energía, debido al comportamiento no lineal del DDE. La presencia del DDE aumenta la rigidez lateral de la estructura y la resistencia lateral, de manera conjunta, en este capítulo se trabaja únicamente con el cambio de rigidez.

Si se tratará de un análisis lineal, entonces para un incremento del 10% en la rigidez correspondería el 91% de fuerzas al marco y el 9% al sistema portante DDE, a continuación se presenta la tabla IV.1 con los porcentajes de fuerza para cada incremento de rigidez.

Incremento en %	Fuerza Marco%	Fuerza DDE%
10	91	9
25	80	20
50	67	33
100	50	50
200	33	67

Tabla IV.1 Relación de la distribución de fuerzas en las estructuras con DDE, considerando sistemas elásticos.

La distribución de fuerzas, en sistemas elásticos, se puede entender mejor cuando se traza en una gráfica, la relación carga desplazamiento, como la mostrada en la figura IV.1 Donde: K_1 es la rigidez inicial sin disipador; K_2 es la rigidez del sistema con disipador.

Para elaborar la gráfica se elige por facilidad que la rigidez original sea 1, $K_1=1$ al incrementarla en 200% se tiene $K_2=3$; para un desplazamiento unitario en ambos sistemas, válido ya que existe compatibilidad de deformaciones. Se tiene que la fuerza que toma el sistema original es de 1 y la fuerza que toma el DDE es de 2, para obtener el porcentaje de contribución, se divide la fuerza absorbida por la estructura, entre la fuerza total multiplicando por 100, lo cual resulta 33%, de manera similar para el DDE con lo que se obtiene 67%. Estos porcentajes sólo son válidos para el intervalo “elástico lineal” de la estructura y del DDE. Posteriormente se analiza el porcentaje de fuerza que toma cada elemento, para el modelo idealizado en este trabajo.

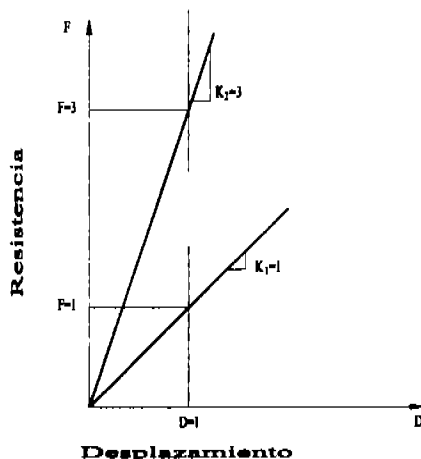


Figura IV.1 Relación carga desplazamiento para sistemas elásticos lineales.

Para revisar el efecto del cambio de rigidez, se considera que los incrementos de rigidez producen un cambio en el periodo de la estructura con DDE, ya que $T_y = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K_y}}$; $T_{y0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K_{y0}}}$ y además se define $\alpha_y = \frac{K_{y0}}{K_y}$; entonces T_y queda $T_y = \sqrt{\alpha_y} T_{y0}$; así se pueden obtener los nuevos periodos a la fluencia T_y para cada incremento de rigidez.

Se observan curvas primarias trilineales para cada incremento de rigidez, en la figura IV.2. Cabe recordar que la estructura tradicional de concreto esta representada por la curva primaria trilineal, al incluir el DDE la curva primaria se ajusta mejor a una curva tetralineal, pero al incluir DDE con poca

rigidez y resistencia respecto a la estructura original, comparativamente hablando, entonces esa curva tetralineal tiende a la curva original; por este motivo y porque el modelo de Takeda esta planteado para una estructura que se pueda representar por medio de una curva primaria trilineal, se ajustan todas las curvas resultantes a curvas trilineales.

En la figura IV.2 se pueden ver las curvas primarias para el análisis del incremento de rigidez, además se indican que características tendrá que presentar el DDE, tal que se de el incremento de rigidez considerado en los modelos; de estas gráficas se deduce que no existen materiales y estructuraciones de DDE que reproduzcan el comportamiento descrito por la gráfica, pero es válido, ya que solo interesa el efecto por incremento de rigidez.

Al retomar la pregunta; ¿cuál es la fuerza que toma la estructura de concreto y cuanta fuerza toma el DDE?, se observa en la figura IV.2, que el DDE toma una fuerza que es variable, y que depende del desplazamiento y a su vez el desplazamiento es función del tiempo y del tipo de excitación; por lo tanto, la fuerza lateral que toma la estructura de concreto es variable.

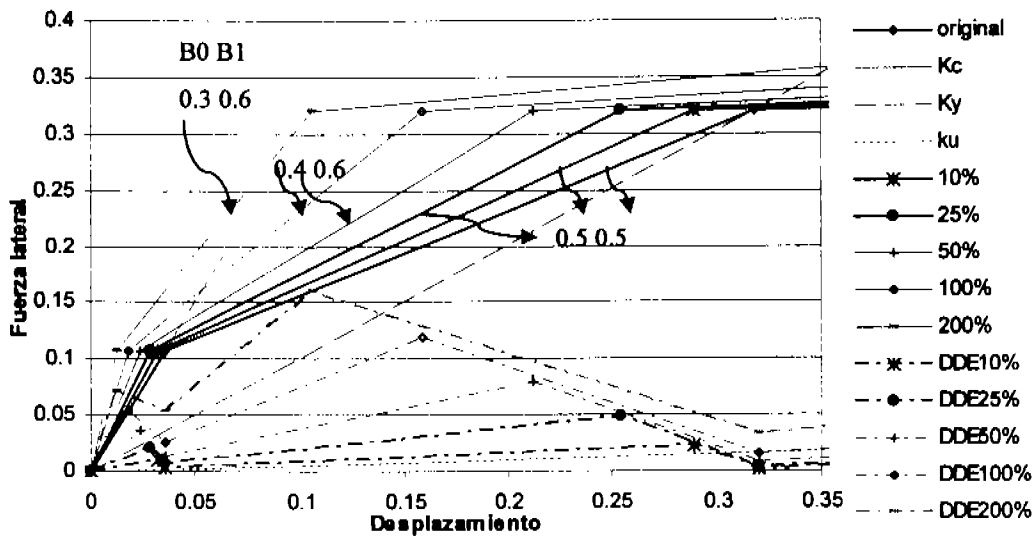


Figura IV.2 Curvas primarias de los diferentes modelos considerados para análisis.

Para observar de manera directa el efecto del incremento de rigidez en los espectros, se grafican en la misma figura, todos los espectro resultantes con referencia al periodo fundamental (T₀) de la estructura, sin DDE; para una rápida identificación de dichos espectros, se colocaron de manera que

ocupen siempre un número de figura impar, para explicar aún más dicha representación, se utiliza la figura IV.3, donde se representa el cambio de resistencia requerida, cuando la rigidez del sistema se incrementa, por ejemplo en 100%. En el programa de análisis se toma en cuenta el cambio de periodo en función del cambio de rigidez, y mediante los conceptos básicos de la dinámica estructural, se tiene:

Si $T_y = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K_y}}$ para cuando se tiene la rigidez inicial $K_{o1} \rightarrow T_o = 1.0s$ por ejemplo. Con un incremento

del 100% en K_o se tiene $T_o = 2\pi \sqrt{\frac{m}{2K_y}} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{T_o} \frac{1}{\sqrt{2}}} = 0.7071T_o$. Para facilitar el trabajo de interpretar

los resultados; las figuras siguientes muestran el efecto de la rigidez para cada incremento de ductilidad; se gráfica al periodo original de la estructura, con lo cual se pueden leer las diferentes demandas de resistencia, para los correspondientes incrementos de resistencia en el mismo periodo fundamental a la fluencia.

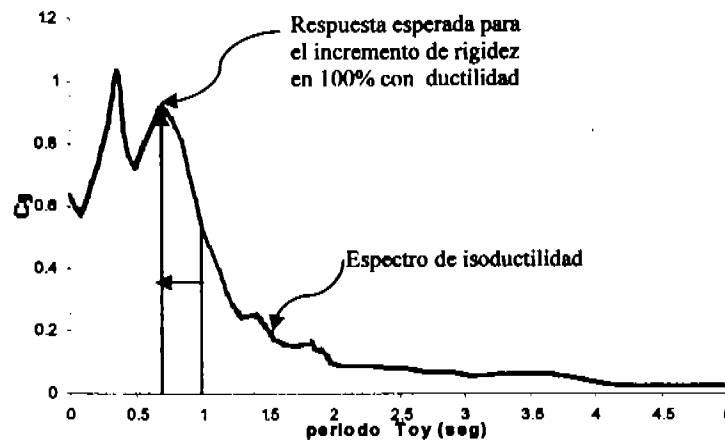


Figura IV.3 Representación del cambio de resistencia lateral debido al cambio de rigidez.

Para tomar en cuenta la influencia del comportamiento del DDE, se variaron los parámetros que regulan el desarrollo de la respuesta, como la degradación de rigidez a la descarga; el factor de degradación de resistencia. Como se considera en este estudio la ausencia de pérdida de rigidez, al cambio de sentido de la fuerza, o dicho apropiadamente, efecto Bauchinger y el adelgazamiento por fenómeno de adherencia y cortante, sólo será necesario manipular los valores de los parámetros mencionados, para definir el comportamiento del modelo de Takeda.

El parámetro de la degradación de rigidez a la descarga puede variar entre 0 y 1; un valor de 0 indica que en la descarga se presenta una rigidez ligeramente mayor que la rigidez de fluencia, K_y , y no se degrada la rigidez al incrementar el número de ciclos; un valor de 0.5 para este parámetro indica que la rigidez a la descarga, será igual a la rigidez de fluencia, con una ligera pérdida de rigidez con el aumento del número de ciclos de carga y descarga; el valor de 1, indica que para el primer ciclo de descarga, se descargue con la rigidez de fluencia, igual que para el caso de 0.5, solo que para un valor de 1, ciclo a ciclo se pierde rigidez a la descarga de manera importante.

Al analizar el parámetro de degradación de resistencia, este puede tomar valores entre 1 y 0, lo que indica para un valor de 1, no existirá adelgazamiento del lazo histerético; para un valor de 0.5, resulta en un adelgazamiento ligero y progresivo; para un valor de 0 (cero) el adelgazamiento del lazo histerético es grande.

A continuación, se presenta una tabla con los valores y respectivos efectos para los parámetros del modelo de Takeda; además, valores recomendados para estructuras convencionales, y los valores utilizados para revisar el efecto del incremento de rigidez.

Degradación de la rigidez a la descarga	Factor de degradación de resistencia
0 Rigidez a la descarga con un valor más grande que K_y y no se degrada	1 No degrada la resistencia
0.5 La rigidez a la descarga es igual a K_y y no degrada	0.5 Degrada gradualmente la resistencia
1.0 La rigidez a la descarga es igual a K_y y se degrada rápidamente	0 Degrada mucho la resistencia
Valores recomendados para estructuras tradicionales de concreto	
0.5-1.0	0.7-1.0
Valores utilizados en este capítulo	
0.3-0.5	0.5-0.6

Tabla IV.2 Valores para los parámetros del modelo de histéresis de Takeda.

La tabla IV.2 aplica sólo para los sistemas analizados en este capítulo, y permite tomar decisiones respecto al tipo de lasos de histéresis que deban formar los modelos, para que sean representativos de estructuras reales.

IV.1 REGISTROS DE MOVIMIENTO CON PERIODO DOMINANTE CORTO

Como ya se mencionó, se considera que el registro sísmico de Kobe (1995, Hygoken Nanbu Japan Eartquake), y Llolleo (1985, Chile Earthquake), son registros que generan respuestas con máxima sollicitación para periodos cortos. Los espectros de isoductilidad o de resistencia lateral que se muestran en las figuras IV.4, IV.5, IV.6 y IV.7, provienen de tales registros, donde: R , representa el incremento en la rigidez; μ , es la ductilidad deseada u objetivo; C_y , coeficiente sísmico o la resistencia lateral requerida para lograr la ductilidad objetivo; y T_{0y} , representa al periodo fundamental de los sistemas definidos por C_y y su respectivo periodo a la fluencia.

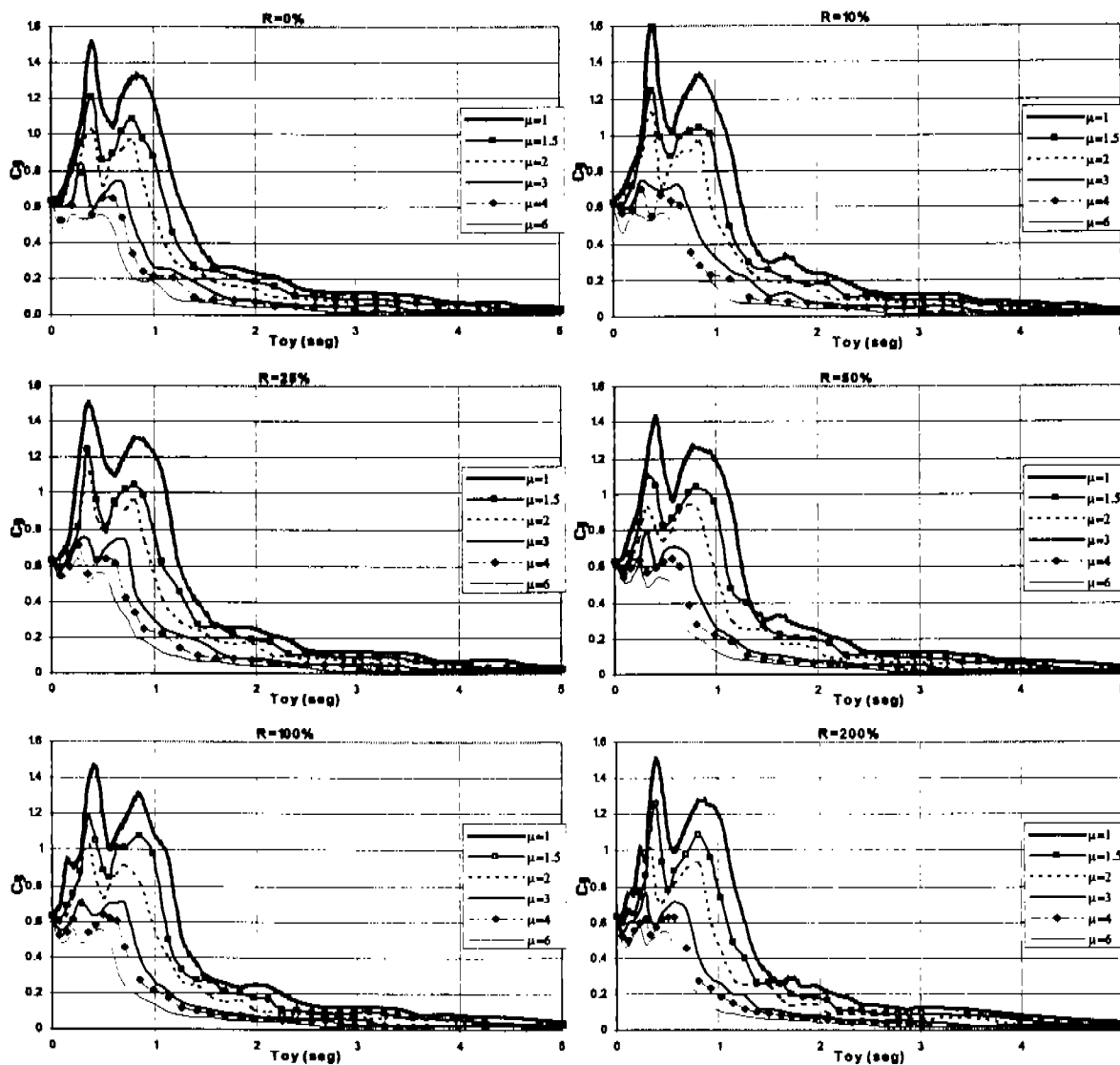


Figura IV.4 Efecto de la ductilidad para cada incremento de rigidez (Kobe)

De los espectros de isoductulidad, figura IV.4, generados para los sistemas con incremento de rigidez, se aprecia una tendencia donde a mayor incremento en la rigidez, las demandas o resistencia laterales requeridas para mantener el mismo nivel de demanda de ductilidad presentan, en la mayoría de las condiciones, valores ligeramente menores; al presentarse esta tendencia, se puede considerar que no es necesario colocar todos los espectros obtenidos, pero cuando se revisen los espectros de distorsión, se justificará su presencia; además, hay que recordar que aparte del incremento de rigidez, se modificaron los parámetros que controlan la forma de los lasos de histéresis, para emular el efecto del incremento de rigidez en el comportamiento de los sistemas.

Para un incremento de rigidez fijo, como el mostrado en la figura IV.4, al incrementar la ductilidad se reduce la respuesta significativamente en el intervalo de periodos de 0.2-2seg., siendo mayor el efecto para periodos de 0.3-1.2seg., en el resto de periodos se genera una reducción de menor importancia, es decir, que para periodos mayores a 2 seg., el cambio de la ductilidad objetivo pierde sentido, ya que la reducción en la resistencia lateral se minimiza hasta ser cero, para periodos grandes.

El incrementar la ductilidad, permite optar por incrementar la capacidad de deformación de la estructura para reducir la demanda de respuesta, sin tomar en cuenta, el efecto del incremento de rigidez, ya que, como se verá más adelante el incremento de rigidez juega un papel importante en la demanda de resistencia lateral y en los niveles de distorsiones.

Cada conjunto de espectros de un determinado incremento de rigidez, representa a un grupo de sistemas que tienen las mismas características entre sí, en cuanto a relación de rigidez y resistencia, pero cada grupo de sistemas difiere de otros grupos, que definen diferentes incrementos de rigidez; con tal condición, se deduce que independientemente de la relación de rigidez, al fijar una ductilidad objetivo, se alcanza la misma resistencia lateral.

El efecto observado es válido para estructuras convencionales, con excelente capacidad de deformación, sin pérdida importante de rigidez y resistencia, cuyo comportamiento esté regido por flexión y, para sistemas con DDE.

Se aclara que los espectros de resistencia (resistencia lateral) para este caso, son equiparables con los espectros de isoductulidades; además, la resistencia lateral para lograr una ductilidad objetivo, es igual a la aceleración normalizada respecto a la aceleración de la gravedad (A/g); en este trabajo resulta ser

igual al cortante basal resistido, de aquí su nomenclatura C_y donde la "y" hace referencia que los sistemas fueron definidos a partir del periodo a la fluencia y del coeficiente basal a la fluencia.

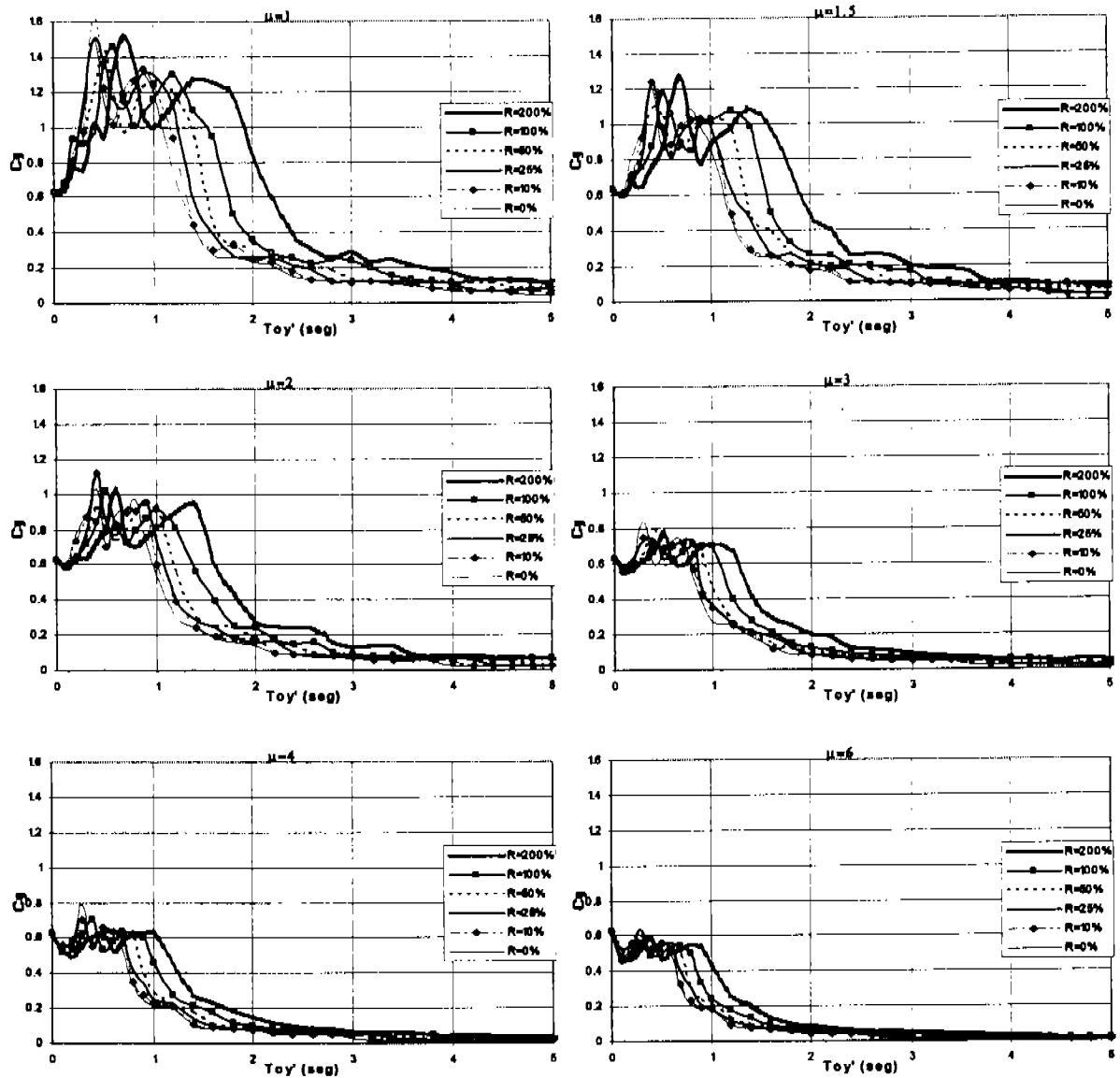


Figura IV.5 Efecto de la rigidez para cada ductilidad (Kobe)

De los espectros de la figura IV.5, se observa que a mayor ductilidad, se demandan menores resistencias laterales para generar la misma ductilidad.

Para una ductilidad dada, al incrementar la rigidez, se incrementa la demanda de resistencia lateral, principalmente para periodos comprendidos entre 1.2 y 2.7seg. de una ductilidad objetivo de 1, para periodos mayores a 2.7seg. el aumento en las demandas es menos significativo, para periodos menores

a 1.2seg. no hay influencia del incremento de rigidez. Para estructuras que se encuentren en la rama descendente del espectro, estructuras con periodos comprendidos entre 1.2 y 2.7seg. el incremento de rigidez redonda en un incremento importante en la demanda de resistencia, principalmente para sistemas que no desarrollan ductilidad. El efecto observado es válido para estructuras con buen comportamiento a flexión y para estructuras con DDE.

De representar los espectros al periodo modificado se obtendrían espectros casi empalmados en todo el intervalo de periodos, con una pequeña variación; por lo tanto se graficaron los espectros, con referencia al periodo original, T_{0y} , de la estructura convencional, sin DDE.

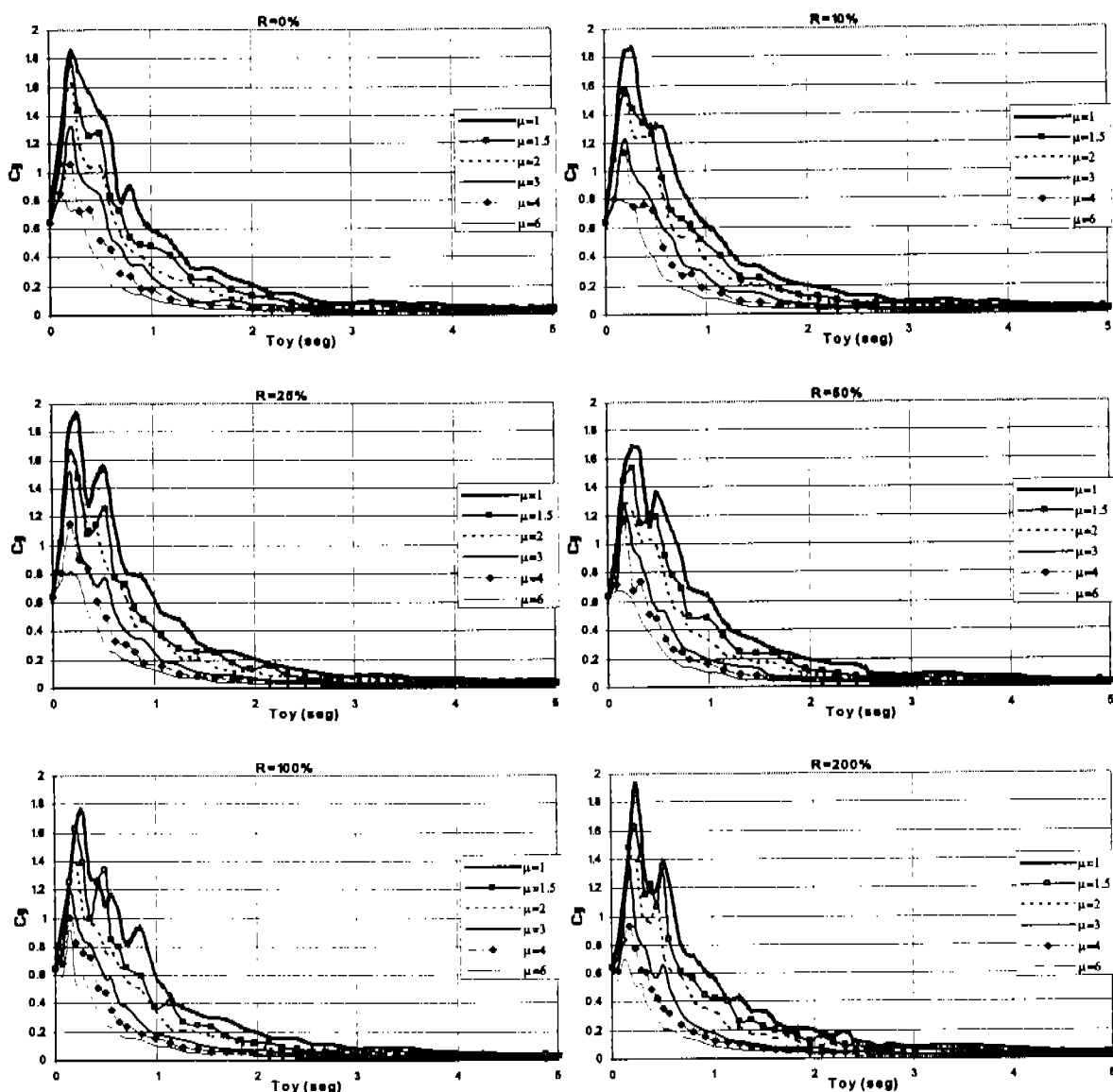


Figura IV.6 Efecto de la ductilidad para cada incremento de rigidez (Llolleo)

Del análisis con el registro de Llole se obtienen las figuras IV.6 y IV.7. En la figura IV.6 se puede ver una tendencia que muestra que a mayor incremento en la rigidez, se demandan menores resistencias laterales.

Para un incremento de rigidez fijo, al incrementar la ductilidad se reduce la respuesta de manera importante en el intervalo de periodos de 0.1-2seg., con mayor efecto en periodos de 0.2-1.2seg.; en el resto de periodos, se genera una reducción de menor importancia, hasta volverse nulo. El efecto descrito es válido para sistemas sin DDE con buena capacidad de deformación y con DDE.

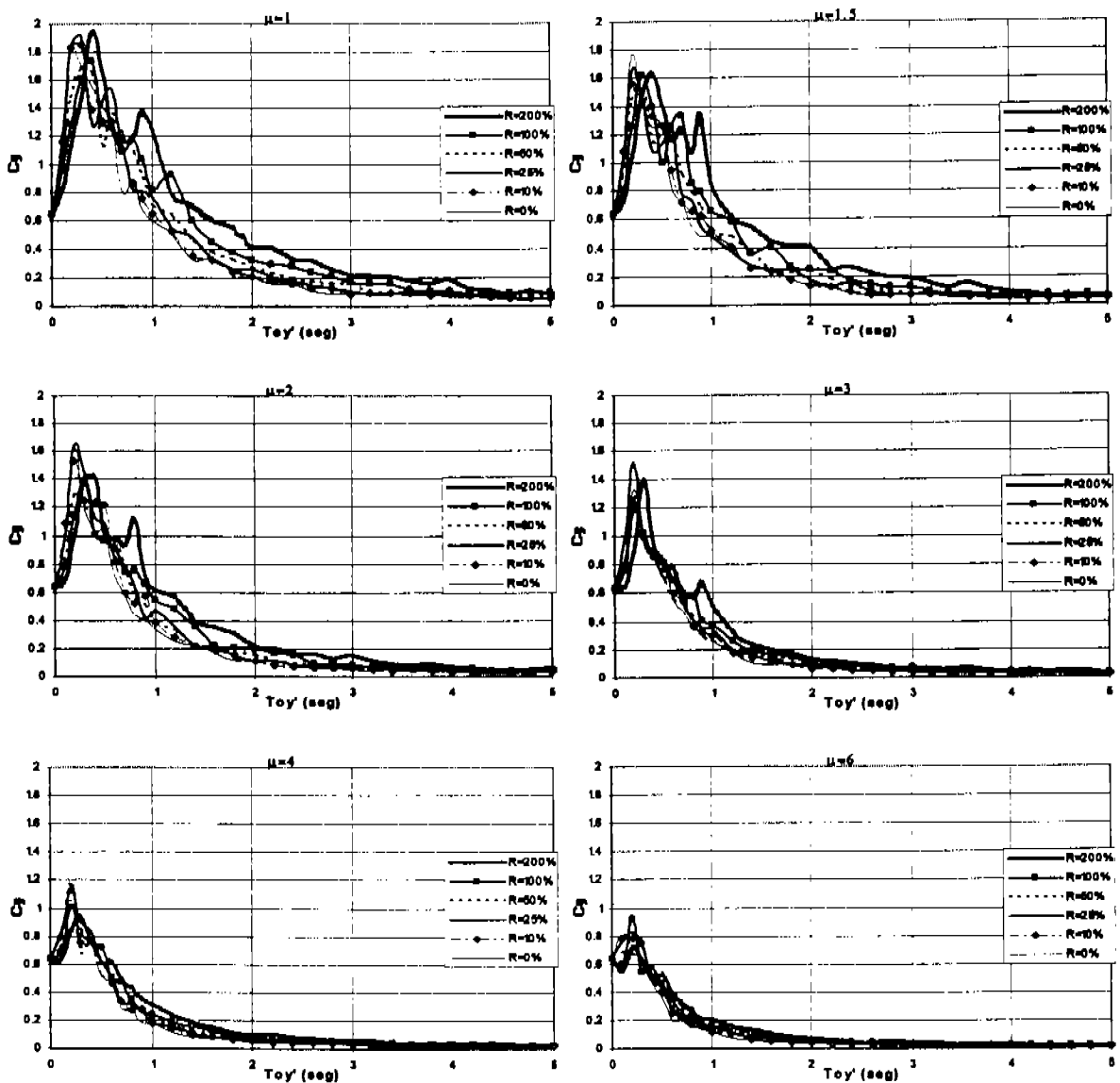


Figura IV.7 Efecto de la rigidez para cada ductilidad (Llole)

Al revisar la figura IV.7 se deduce que a mayor ductilidad, se requiere de menor resistencia lateral para alcanzar la ductilidad objetivo. De la misma figura, se encuentra que para una ductilidad fija, al incrementar la rigidez, se incrementa la demanda de resistencia, principalmente para periodos mayores a 0.6seg. en ductilidades de 1 y 1.5, aunque tiene a anularse el efecto, para periodos grandes mayores a 4seg., mientras que para ductilidades de 2 y 3 para periodos mayores a 0.5seg. se presenta el incremento y el efecto se reduce, para periodos mayores a 3seg. Para ductilidades mayores a 4, se puede despreciar el efecto, sin cometer error considerable.

La razón de generar espectros referidos al periodo fundamental de la estructura original es leer de manera directa, las demandas de resistencia requeridas al modificar la rigidez, esto si tener que desplazarse en los periodos.

Espectros de distorsión de entrepiso

De los enfoques de diseño basados en resistencia, se tiene que basta con conocer la resistencia lateral para resistir el sismo de diseño y únicamente hacer una revisión de los desplazamientos de manera indirecta vía la distorsión, pero en los reglamentos vigentes, no se aclara que condición de servicio se establece.

De los enfoques de diseño basados en desplazamientos a nivel de propuesta, se le concede vital importancia a los desplazamientos para diferentes condiciones de servicio, por tal motivo y por considerar que los espectros de distorsión pueden dar luz sobre el diseño de las estructuras, se procede a calcular los espectros de desplazamientos, con los cuales se estimarán los espectros de distorsión, que conducen más información tangible y comparable, con los valores establecidos por la normatividad correspondiente.

Para conocer las alturas de los sistemas, se recurre a expresiones que relacionan al periodo con el numero de niveles y al periodo directamente con la altura. La más popular es la que estima el periodo, en segundos, como una décima parte del numero de pisos (n) del edificio, $T=0.1n$; el coeficiente 0.1, puede tomar diversos valores en un intervalo muy grande. En edificios reales, sujetos a vibraciones de poca amplitud se han medido periodos que corresponden a un coeficiente que va desde 0.05 a 0.20 para estructuras rígidas, con abundancia de muros de concreto o contravientos y estructuras muy flexibles. La expresión $T=0.1n$ fue obtenida de manera empírica, con fines prácticos a partir de cálculos

preliminares rápidos de estructuras reales localizadas en suelo firme. Para estructuras desplantadas en suelo blando, como el de la zona de lago del Distrito Federal, el valor del coeficiente aumenta hasta en 30 por ciento, para edificios altos.

Existen expresiones más refinadas, que toman en cuenta el tipo de sistema estructural y hacen depender el periodo de la altura del edificio, una de las más usadas es (NHRP,1988): $T = \alpha H^{3/4}$, donde el coeficiente α toma los valores de: 0.085 para edificios a base de marcos de acero; 0.075 para edificios a base de marcos de concreto; 0.05 para edificios con muros de rigidez o contravientos.

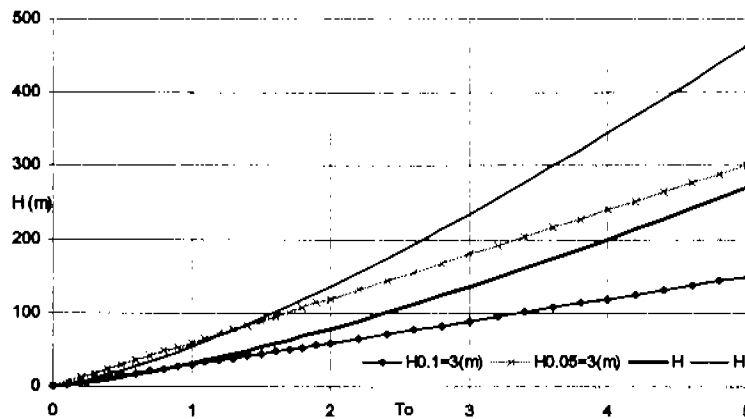


Figura IV.8 Comparación de resultados entre expresiones

La figura IV.8 permite deducir que ambas expresiones, para efectos prácticos, coinciden en el intervalo de periodos de 0 a 1.5, con lo cual se pueden hacer buenas predicciones en estructuras de hasta 15 y 30 niveles, según el tipo de estructuración. Si se utiliza la primer expresión; hasta 15 niveles, con una altura típica de 3 metros, tendría 45 metros de altura, para edificios a base de marcos de concreto; y hasta 30 niveles, que corresponden a edificios de 90 metros de altura, para edificios con muros de rigidez o con contravientos, para alturas de entrepiso de 3 metros. De utilizar la segunda expresión, se estiman alturas de 54 y 93 metros, según las respectivas estructuraciones con periodo de 1.5 segundos.

La primera expresión tiene un inconveniente, dado que se tiene que suponer una altura de entrepiso y los resultados directos son entrepisos; además, para estructuras con periodos mayores a 1.5 seg. se pierde precisión y, adicionalmente, es complejo programar el calculo de la altura para periodos con variaciones en centésimas de segundo, por lo que se descarta.

La segunda expresión, proporciona mejores estimaciones para periodos grandes y es fácil de programar, adicionalmente la expresión se asemeja a la obtenida con masa unitaria, inercia, modulo de elasticidad y condición de frontera. $T_0 = \sqrt{\frac{m}{K_0}} \Rightarrow T_0 = \frac{1}{\sqrt{K_0}}$ y $K_0 = \frac{\alpha EI}{H^3} \Rightarrow K_0 = \frac{1}{H^3}$; al sustituir

la rigidez en la relación del periodo, se tiene $T_0 = H^{\frac{3}{2}}$ por tanto, se utiliza la segunda expresión con $\alpha=0.075$ para los sistemas sin DDE y $\alpha=0.05$ para los sistemas con 200 por ciento de incremento de rigidez; para valores intermedios, α es proporcional al incremento de rigidez.

Por efecto de la interacción suelo estructura, ISE, causada por las deformaciones relativas entre la estructura y el suelo, el periodo fundamental de la estructura cambia, reduciéndose el periodo, respecto al obtenido en estructuras desplantadas en suelo duro. La interacción suelo estructura no se toma en cuenta para elaborar el presente trabajo. De requerir hacer intervenir el incremento del periodo por efecto de las deformaciones relativas entre el suelo y la estructura, solo se debe tomar en cuenta en estructuras desplantadas en suelo blando.

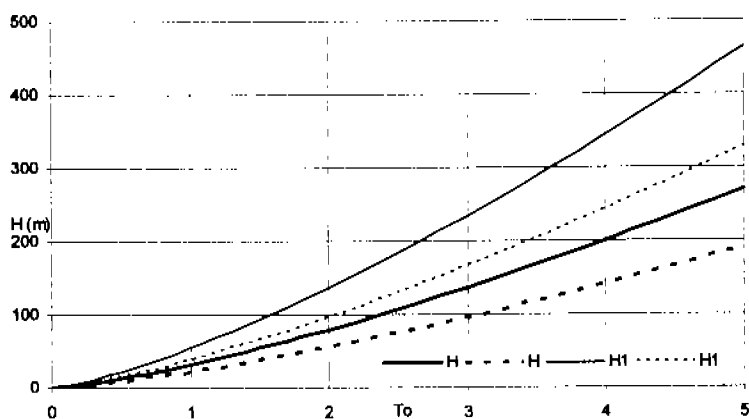


Figura IV.9 Efecto de las deformaciones relativas entre el suelo y la estructura en el periodo y la altura

En la figura IV.9, la línea continua gruesa representa la relación de periodo fundamental con la altura, sin ISE y la línea gruesa punteada toma en cuenta la ISE; ambas líneas representan estructuras a base de marcos de concreto; mientras que las líneas delgadas representan edificios con marcos de concreto contraventeado y/o con muros; la diferencia radica en que la línea continua estima la altura de edificios desplantados en suelo duro y la línea punteada estima la altura de edificios desplantados en suelo blando.

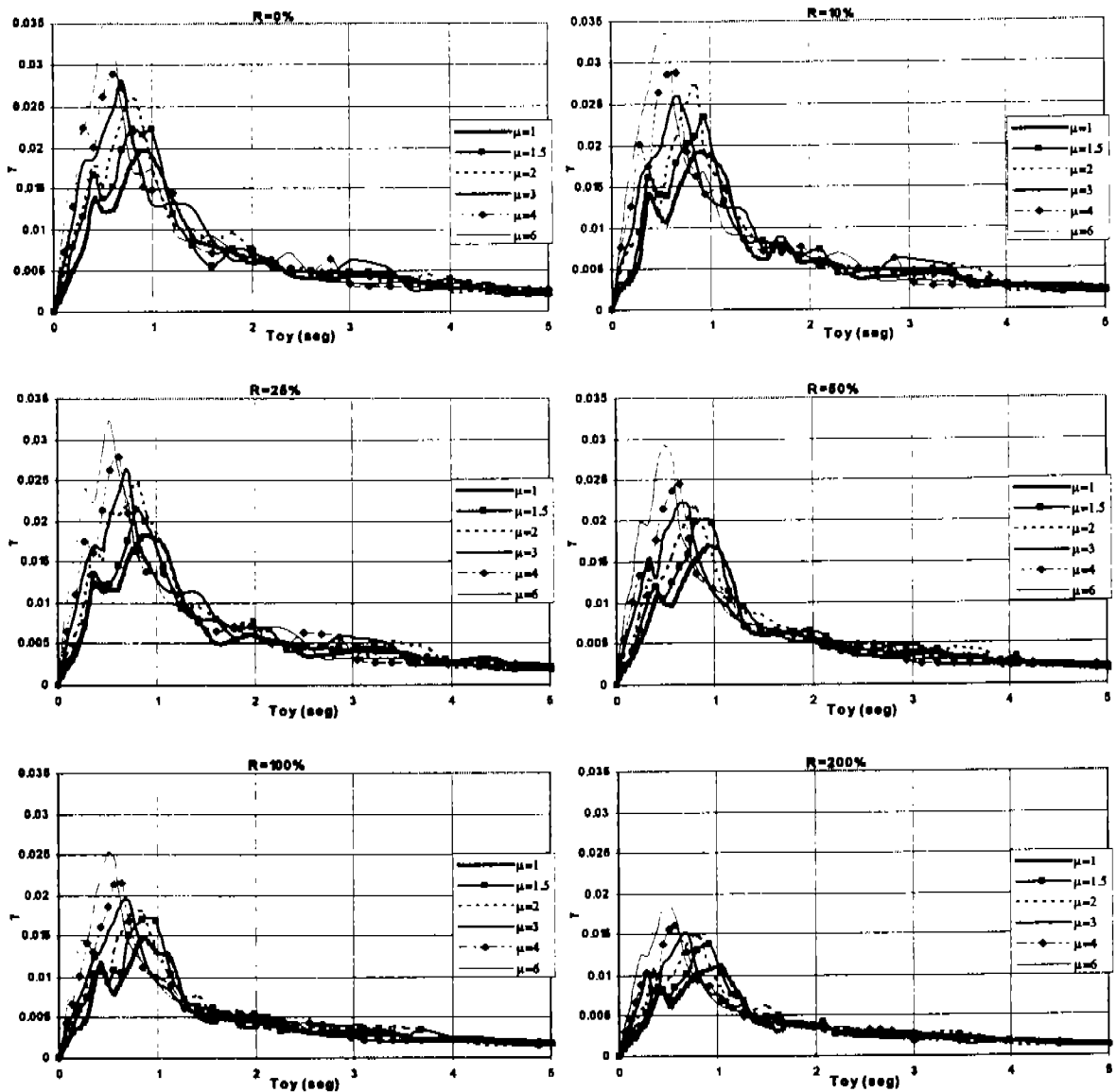


Figura IV.10 Espectro de distorsión (Kobe)

De la figura IV.10 se observa que a mayor incremento de rigidez, las distorsiones disminuyen aún que el sistema tenga la misma resistencia lateral; además se encuentra que a mayor ductilidad, mayores distorsiones para periodos comprendidos entre 0.1 y 0.9, mientras que para periodos entre 0.9 y 1.2, a mayor ductilidad menor distorsión y para periodos mayores a 1.2 no hay efecto por cambio en la ductilidad. Los sistemas representados en estos espectros, pueden ser estructuras con buen comportamiento regido por flexión con o sin DDE siempre y cuando la curva primaria que las represente, sea congruente con los valores utilizados en este trabajo.

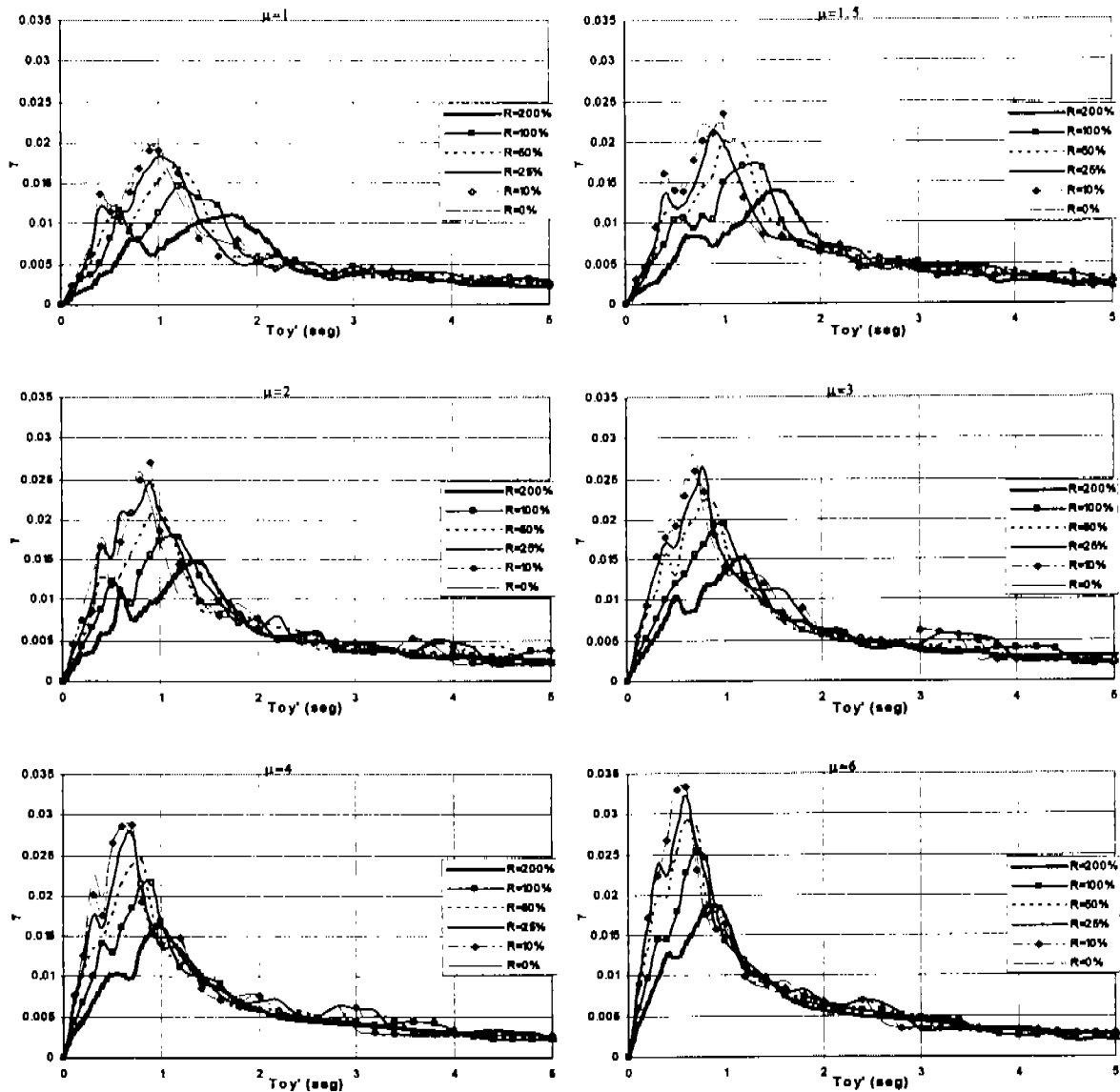


Figura IV.11 Espectros de distorsión referidos al periodo de la estructura original (Kobe)

De la figura IV.11 se deduce que a mayor ductilidad, se presentan mayores distorsiones en los sistemas, debido a que se aporta menor resistencia lateral al sistema, para que se pueda generar una ductilidad dada. Al comparar el sistema sin DDE, $R=0$, con el sistema que tiene 200 por ciento de incremento de rigidez, $R=200\%$ se presenta una reducción de las distorsiones, para periodos cortos comprendidos de 0 a 1.4seg. para el sistema que es capaz de generar una ductilidad unitaria y de 0 hasta 1.25, 1.1, 1.0, 0.9 y 0.8 para ductilidades de 1.5, 2, 3, 4, y 5 respectivamente, con lo cual se nota la dependencia del beneficio del incremento de la rigidez con la ductilidad, para periodos cortos y hasta periodos de máxima respuesta. Para periodos mayores a 1.4, 1.25, 1.1, 1.0, 0.9, y 0.8 correspondientes

a ductilidades de 1, 1.5, 2, 3, 4, y 6 respectivamente, no existe cambio en la distorsión presentada por los diferentes grupos de sistemas. De capacitar a los sistemas con la resistencia lateral mínima y someterlos al registro de Kobe, se tendrían daños considerables para la estructura sin DDE, ya que sobrepasa cualquier distorsión máxima permitida por cualquier reglamento para periodos comprendidos en la zona de máxima respuesta; para periodos mayores a 2.4, 2, 1.0, 0.9, y 0.8 para ductilidades de 1, 1.5, 2, 3, 4, y 6 respectivamente, no hay variación en la distorsión por cambio de rigidez; además, para estos sistemas, las distorsiones tienden a 0.005 independientemente de la ductilidad y de las características de los diferentes sistemas.

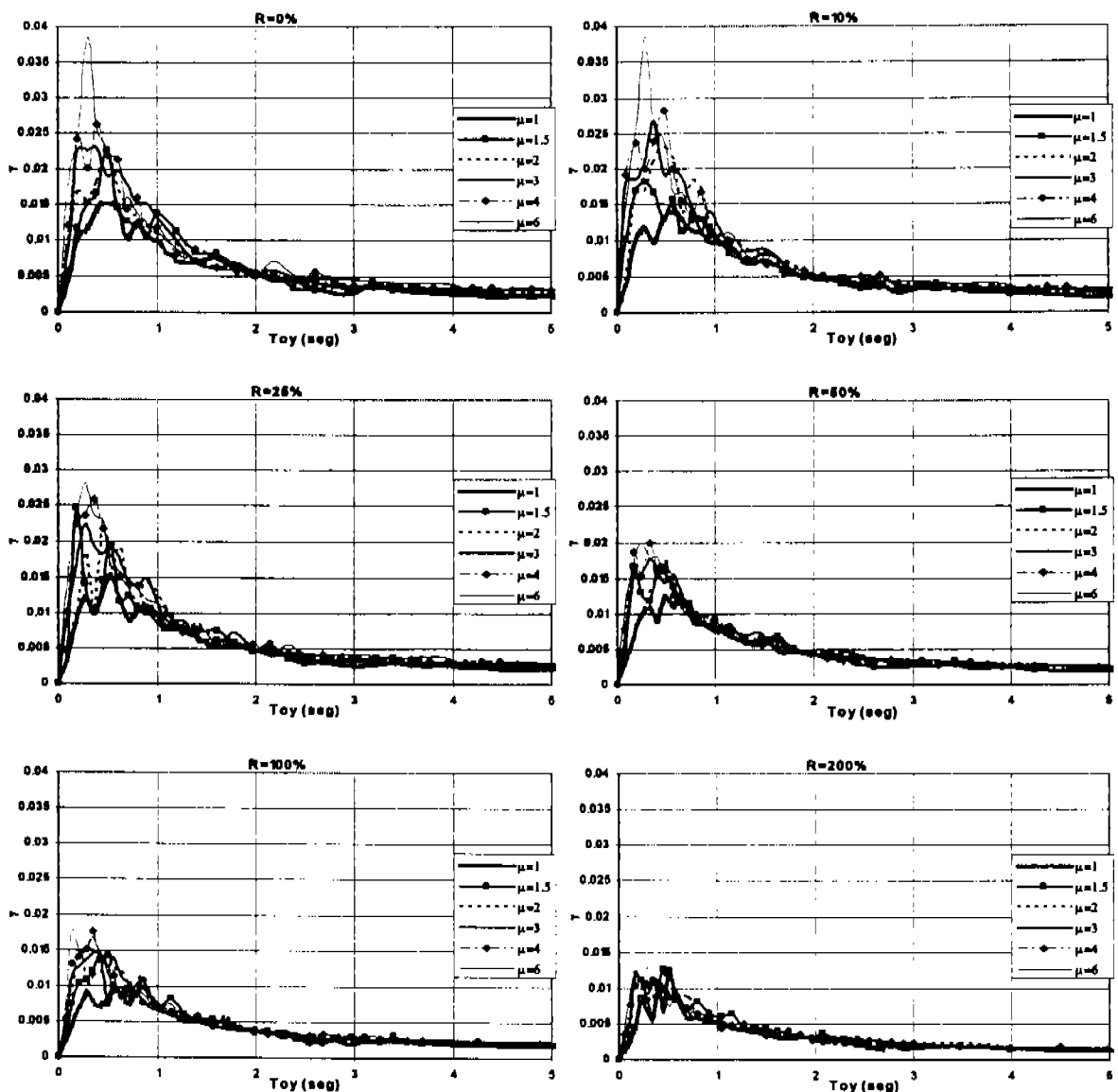


Figura IV.12 Espectro de distorsión (Llolleo)

De los espectros de la figura IV.12 se observa que al incrementar la rigidez, se reducen las distorsiones hasta el nivel en el cual el cambio de ductilidad no genera cambio significativo en las distorsiones. Para todos los incrementos de rigidez, con excepción del espectro para un incremento de rigidez de 200 por ciento, no se cumpliría con la distorsión permisible, esto si solo se le proporciona la mínima resistencia lateral, para alcanzar la ductilidad objetivo.

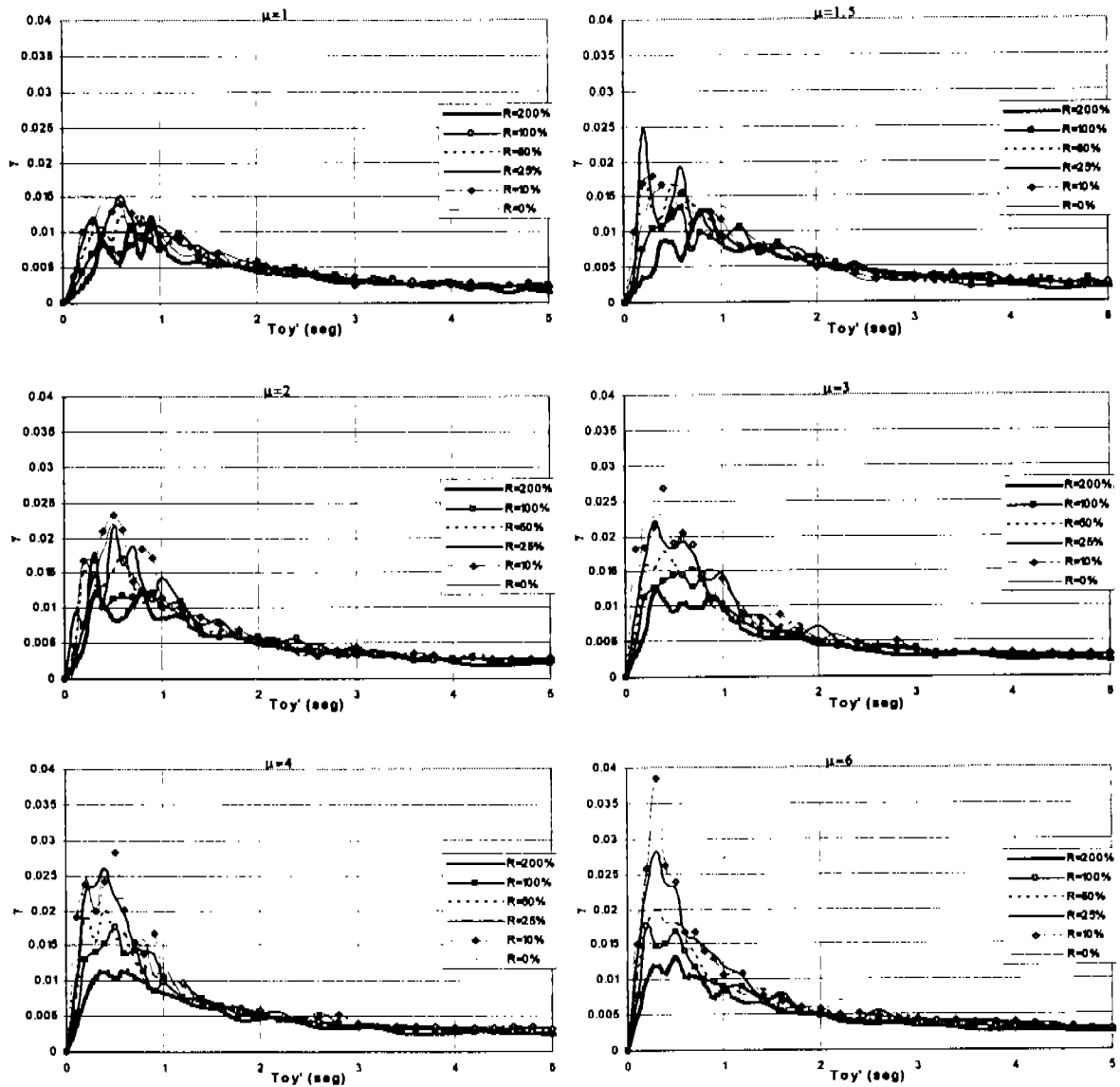


Figura IV.13 Espectros de distorsión referidos al periodo de la estructura original (Llolleo)

Un fenómeno interesante se puede ver en los espectros de la figura IV.13 el cual consiste en la reducción de las distorsiones en la zona del periodo fundamental de máxima respuesta, la reducción es más grande, a medida que se incrementa la ductilidad del sistema.

Espectros de energía

Los espectros de energía disipada total acumulada que aquí se presentan son en resumen las respuestas máximas de energía acumulada del conjunto de sistemas en estudio, que incluyen la energía de deformación elástica e inelástica. Cada sistema al oscilar producto de la carga cíclica reversible generada por la inercia del sistema ante un movimiento de su base provoca la formación de ciclos de carga y descarga conocida como histéresis del sistema; siendo así se deduce que la capacidad de los sistemas se encuentra relacionada con la forma de los lasos de histéresis, que en este estudio de definieron en el capítulo II al definir la curva primaria y en los capítulos IV, V y VI al definir los parámetros que controlan la historia del comportamiento de los lazos, los cuales definen un área que precisamente es la energía disipada por ciclo, que al sumar todas las áreas dan como resultado la capacidad de disipación de energía del sistema ante tales solicitaciones.

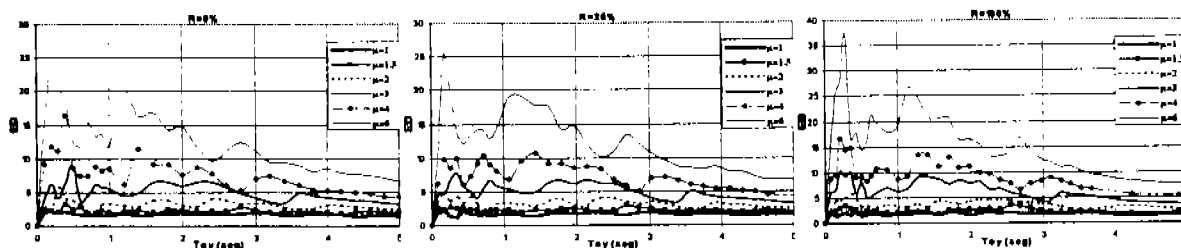


Figura IV.14 Espectro de energía disipada total acumulada (Kobe)

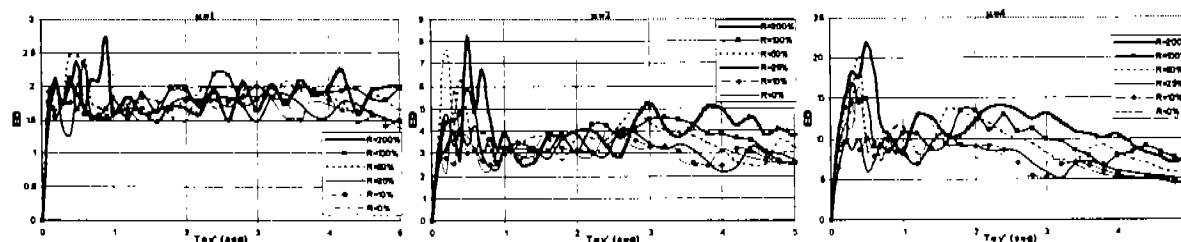


Figura IV.15 Espectro de energía disipada total acumulada referida al periodo fundamental del sistema original, sin DDE, (Kobe)

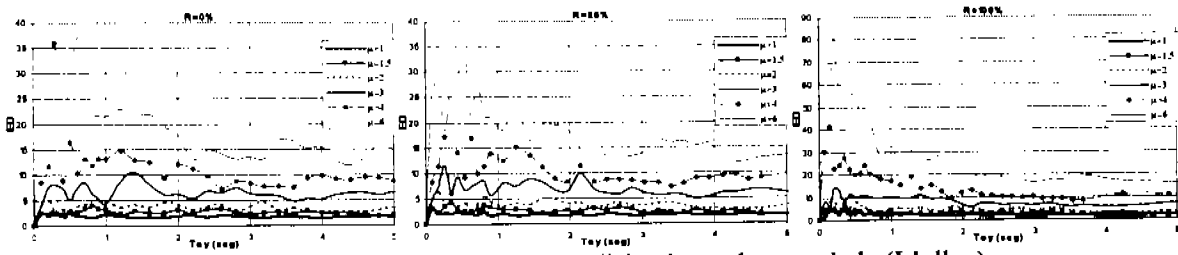


Figura IV.16 Espectro de energía disipada total acumulada (Lolloe)

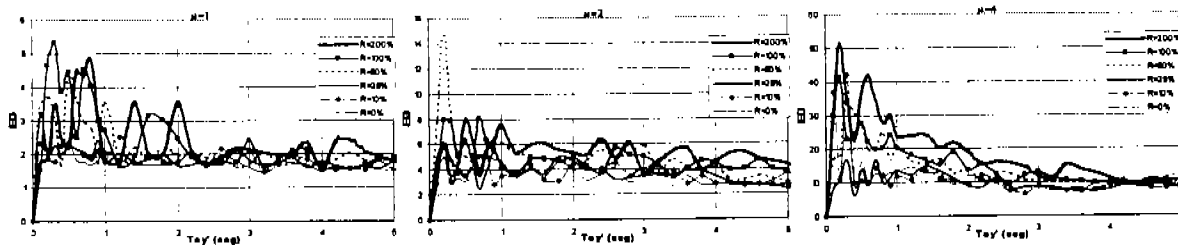


Figura IV.17 Espectro de energía disipada total acumulada referida al periodo
fundamental del sistema original, sin DDE, (Lolloe)

De los espectros de energía disipada, figuras IV.14 y IV.15 para el registro de Kobe y; IV.16 y IV.17 para el registro de Lolloe se comprueba que para una misma demanda de ductilidad se obtiene la misma capacidad de disipación de energía, dado que al conjunto de sistemas para un mismo incremento de rigidez tiene los mismos valores que controlan el comportamiento de los lazos de histéresis y, que a mayor ductilidad mayor energía disipada, además a medida que se incrementa la ductilidad el incremento de rigidez provoca una mayor disipación de energía en los sistemas. La tendencia descrita, como ya se mencionó, aplica para los dos de registro.

La diferencia en magnitud de la energía disipada depende de la energía incidente por el sismo. El registro de Lolloe contiene más energía que el registro de Kobe como se puede ver en la tabla II.1 donde se estimó por medio de la Intensidad de Arias, la energía contenida en los registros.

IV.2 PARA REGISTROS DE MOVIMIENTO CON PERIODO DOMINANTE LARGO

Se considera que el registro de SCT (1985, Caleta de campos, Michoacán Earthquake), y Tohoku (1978, Miyagi-ken-oki Earthquake) generan espectros donde la sollicitación máxima se da en periodos largos.

Los espectros obtenidos para registros de movimientos con periodo dominante largo como los de SCT85 y Tohoku deberían de tomar en cuenta el efecto de ISE que en este trabajo se ignora por no estar al alcance de los objetivos y en virtud de que se trata de un problema que no es trivial se deja para otros trabajos como los realizados por el Dr. Avilés, además que de tomarlo en cuenta, aún de manera burda, se cometerían errores y haría más difícil la interpretación de los resultados.

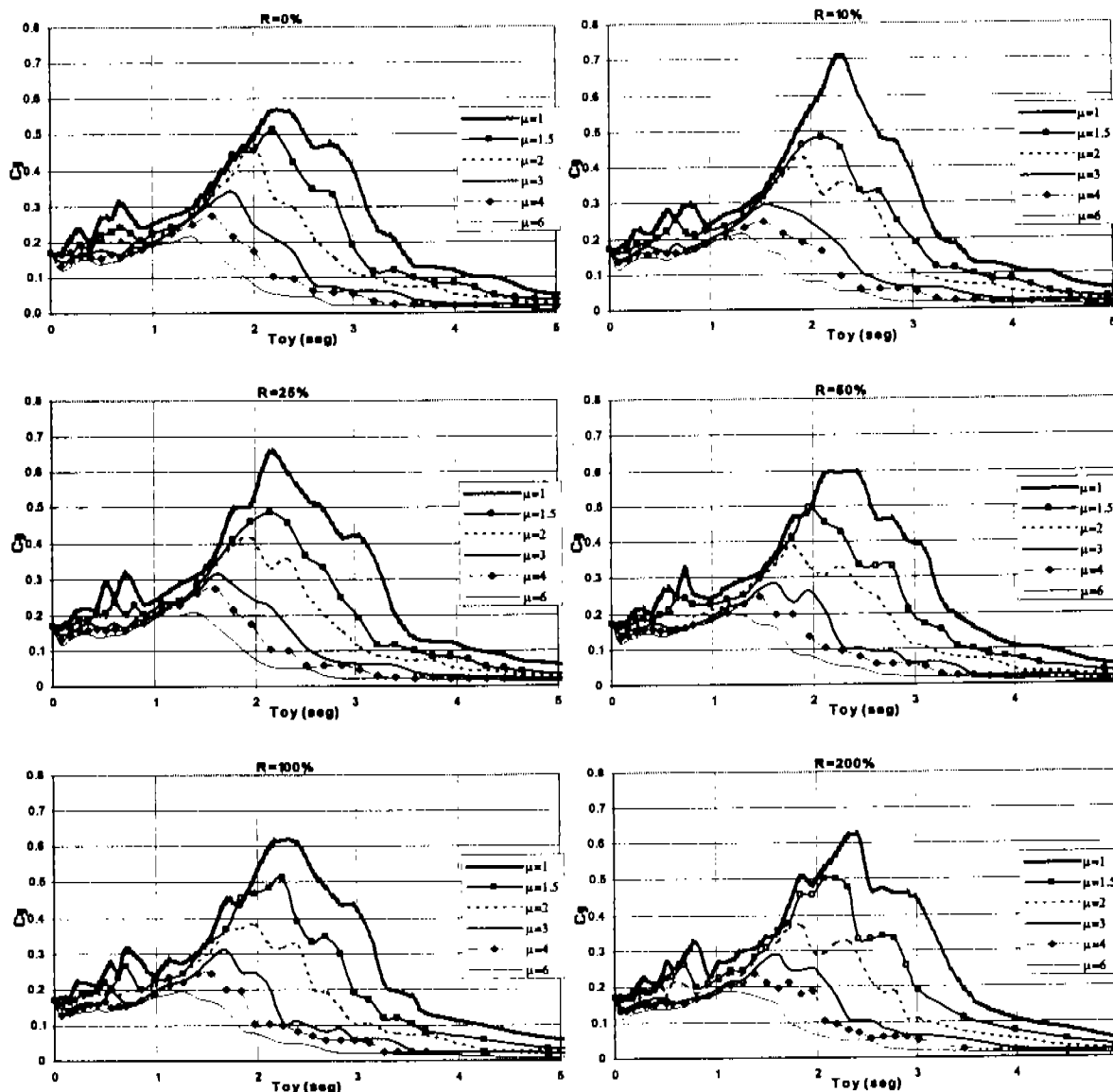


Figura IV.18 Efecto de la ductilidad para cada incremento de rigidez (SCT85)

Para comprender el efecto del cambio de ductilidad y el incremento de rigidez en los espectros de resistencia lateral (A/g) o coeficiente basal de resistencia lateral se construyen los espectros mostrados

en la figura IV.18 de donde se confirma, lo que resulta obvio, que a mayor ductilidad la resistencia lateral disminuye, sin que tenga participación significativa el cambio de rigidez y el cambio en los parámetros que controlan el comportamiento de los lazos de histéresis; por lo tanto, la historia de comportamiento de los sistemas. Además, la máxima reducción en la resistencia lateral por incremento de ductilidad, se da para periodos cercanos al periodo de máxima respuesta que toma diferentes valores, siempre reduciéndose, a medida que la ductilidad crece; este efecto de cambio de periodo dominante se da para todos los registros estudiados, solo que en los espectros generados por el registro de SCT85 son más grandes los cambios, siempre con la misma tendencia de reducción: el periodo, a medida que crece la ductilidad. En estos espectros van de 2.2 seg. para una ductilidad de 1 hasta 1.4 seg. para una ductilidad de 6.

El efecto descrito anteriormente permite optar por incrementar la capacidad de deformación de la estructura, para reducir la demanda de respuesta sin tomar en cuenta, el efecto del incremento de rigidez, pero como se verá más adelante, en los espectros de distorsión, el incremento de rigidez juega un papel importante.

Resulta importante analizar los resultados y darse cuenta que son válidos para estructuras convencionales, con excelente capacidad de deformación, sin pérdida importante de rigidez y resistencia cuyo comportamiento esté regido por flexión y, estructuras con DDE. Por tanto, se puede decir que los espectros de la figura IV.18 son prácticamente iguales; dada la condición de lograr una ductilidad objetivo, se requiere la misma resistencia lateral para sistemas con diferentes curvas primarias y con diferentes parámetros que definen la historia de comportamiento histerético.

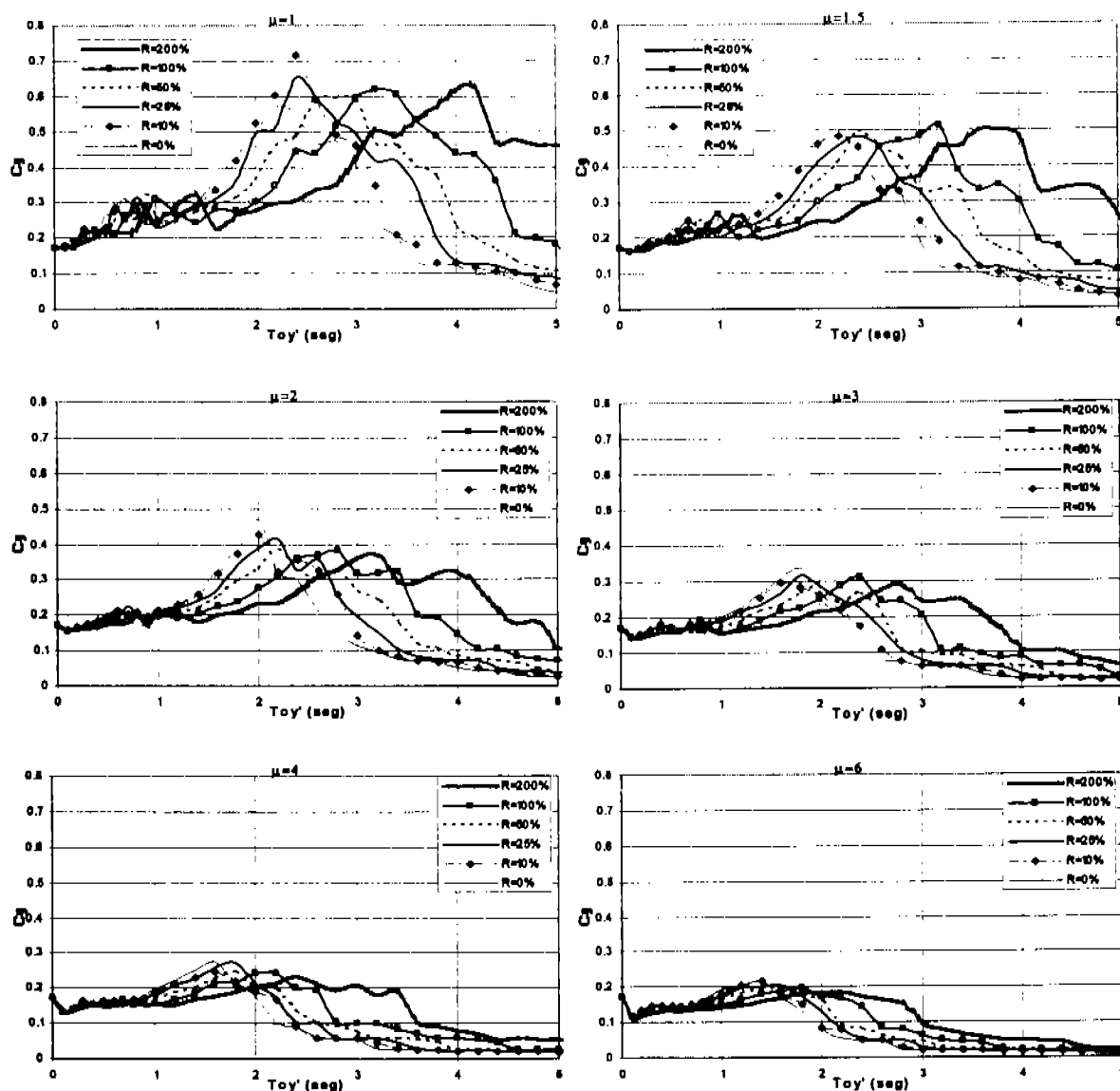


Figura IV.19 Efecto de la rigidez para cada ductilidad (SCT85)

De los espectros de la figura IV.19 se pueden definir tres zonas en los espectros de ductilidad unitaria, donde además, las tres zonas magnifican sus características; la primera será una zona de periodos de 0 a 1.5 seg. donde las estructuras con incremento de rigidez, con consiguiente reducción del periodo fundamental, demandarían la misma resistencia lateral, independientemente del incremento de rigidez; la siguiente zona comprende periodos entre 1.5 y 3seg. que contiene dos subzonas la primera con periodos de 1.5 a 2.1, donde independientemente del nivel de incremento de rigidez, se produce una reducción en la demanda de resistencia lateral y la segunda zona, con periodos fundamentales comprendidos entre 2.1 y 3seg., donde se puede presentar una reducción o incremento de la demanda

de resistencia lateral, según sea el incremento de rigidez; a partir de 3 seg de periodo a más de 5 seg. se presenta una zona clara e importante de incremento de la demanda de resistencia lateral. Los valores de periodos son validos para una ductilidad de 1, a medida que crece la ductilidad las zonas, se recorren y se minimizan al grado en el que, para una ductilidad de 6, todas las demandas de resistencia se dan por abajo del cociente sísmico de la aceleración en la base, al nivel del desplante. Con este tipo de representación se puede, para la misma abscisa, saber la ordenada correspondiente, según el incremento de rigidez.

Al representar los espectros al periodo modificado, se obtendrían espectros casi empalmados en todo el intervalo de periodos, con una pequeña variación, por lo tanto, se decide graficar los espectros con referencia al periodo original de la estructura convencional, sin DDE, por lo que surgen las figuras que se identifican con una terminación con número impar.

Como se puede ver, de los espectros generados, la demanda de resistencia lateral, las distorsiones y, la energía disipada, cambian según el registro y el periodo fundamental, que se esté revisando, por lo que se hace necesario analizar otros registros, para observar el efecto en las respuestas, al cambiar el registro y en este capítulo, la rigidez.

Se analizan los efecto que causa el incremento de rigidez para el registro obtenido en Llolleo, Chile, el 3 de Marzo de 1985, con la componente norte-sur; el sismo tuvo una magnitud de 7.8°, con epicentro en 33.135° de latitud sur y 71.871° de longitud oeste, a 40 Km del sitio de registro.

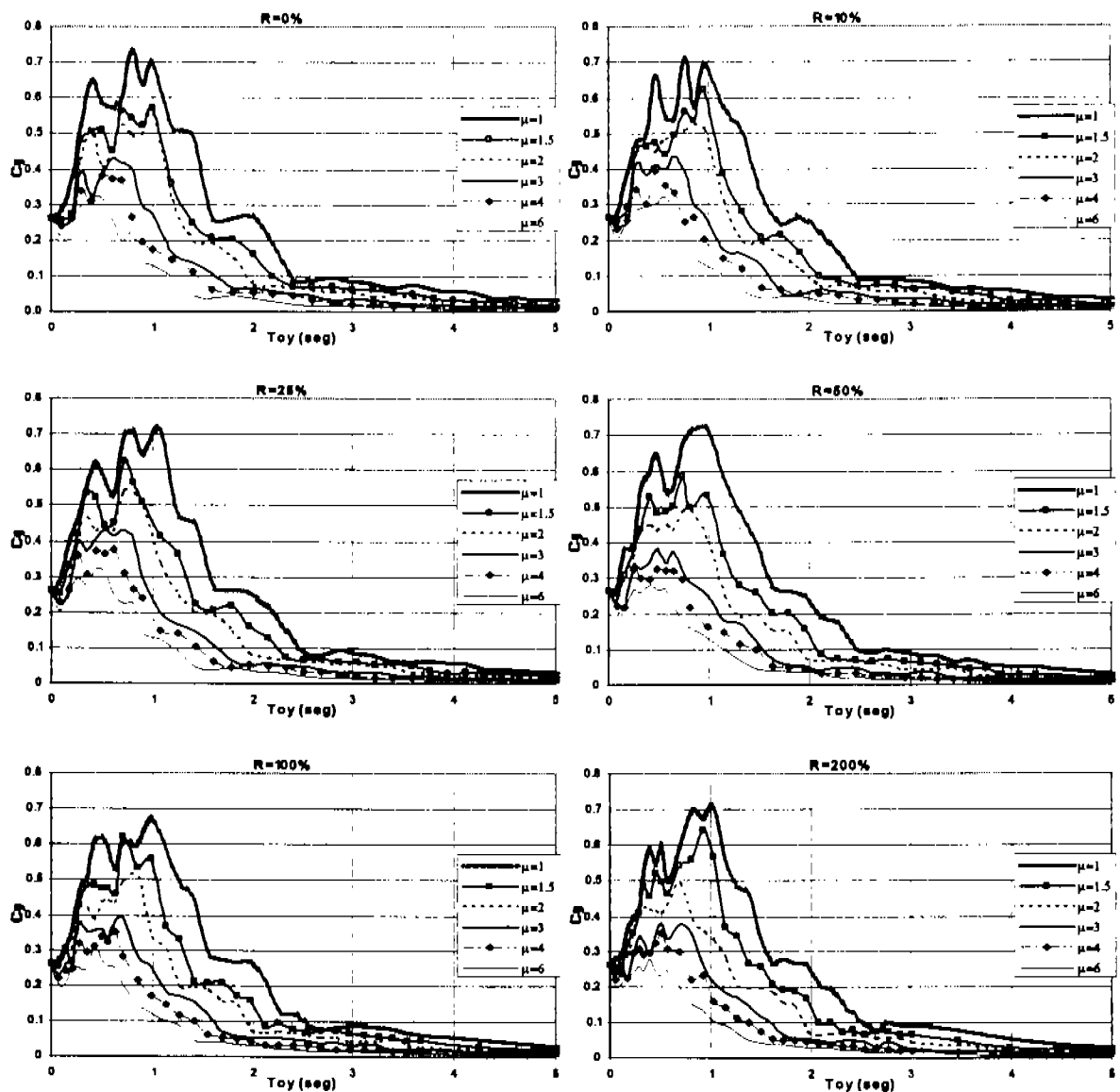


Figura IV.20 Efecto de la ductilidad para cada incremento de rigidez (Tohoku)

En los espectros para el registro de Tohoku, se utiliza la figura IV. 20 para mostrar que no hay cambio significativo en la resistencia lateral requerida para lograr una ductilidad dada, y aún así se muestran los espectros respectivos, para los diferentes incrementos de rigidez, debido a que de ser posible graficarlos al periodo de la estructura sin DDE, se aprecia mayor diferencia. En el estudio de los espectros de deformación, se debe tener presente un estudio para cada incremento de rigidez.

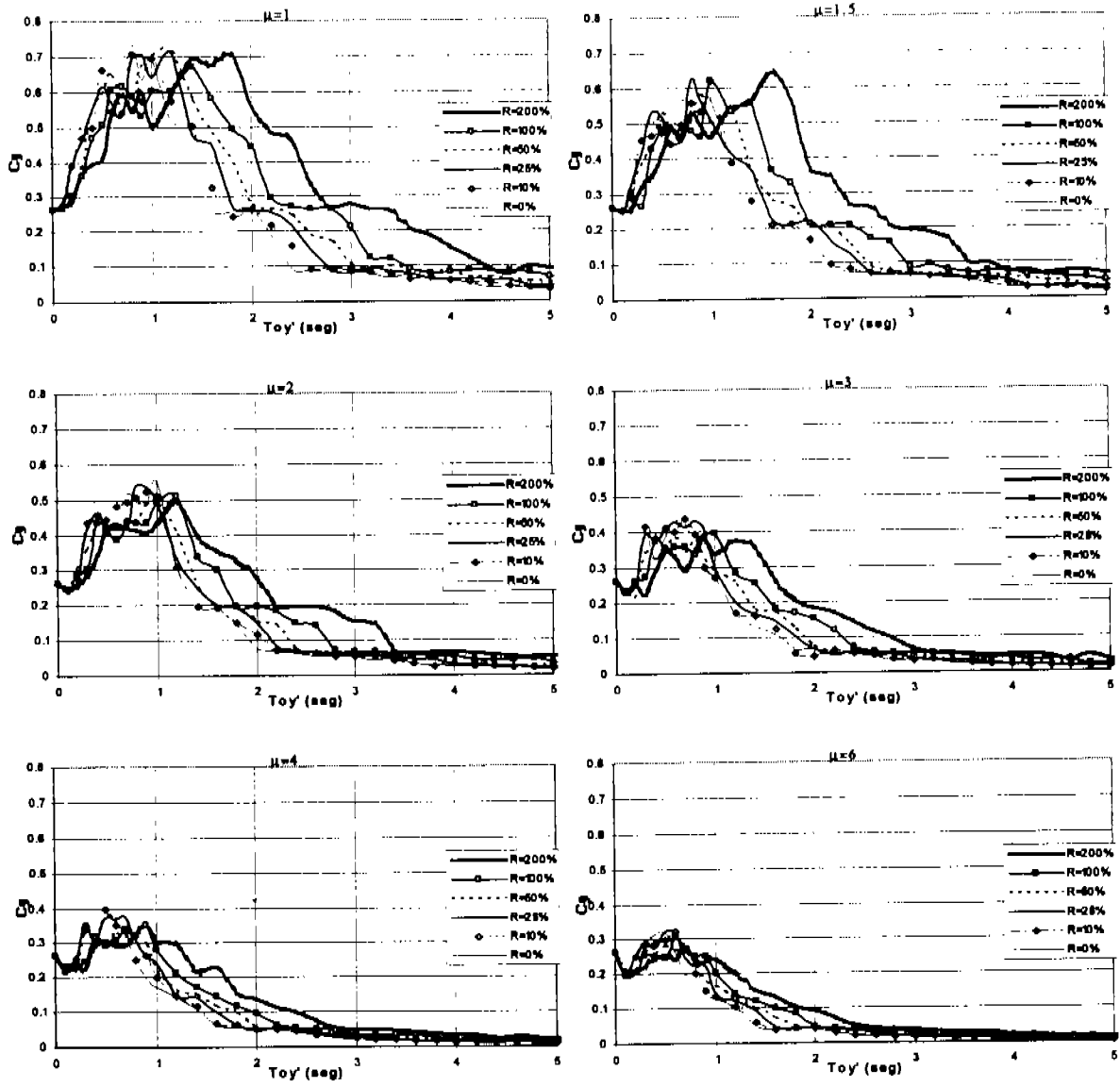


Figura IV.21 Efecto de la rigidez para cada incremento de ductilidad (Tohoku)

De la figura IV.21 se puede decir que existen dos zonas del espectro; la primera, para periodos cortos de 0 a 1seg., por ejemplo de los espectros con una ductilidad unitaria, donde existe un relativo beneficio, al incrementar la rigidez y otra zona donde a mayor incremento de rigidez la demanda de resistencia lateral crece, esta zona comprende periodos de 1 a 5 seg. En el espectro para una ductilidad de 6, el considerar dos zonas puede ser poco práctico numéricamente, pero la ventaja o desventaja es real.

Espectros de distorsión de entrepiso

Ahora se revisa el efecto del incremento de rigidez en los espectros de distorsión para los mismos sistemas estudiados en el caso de resistencia lateral.

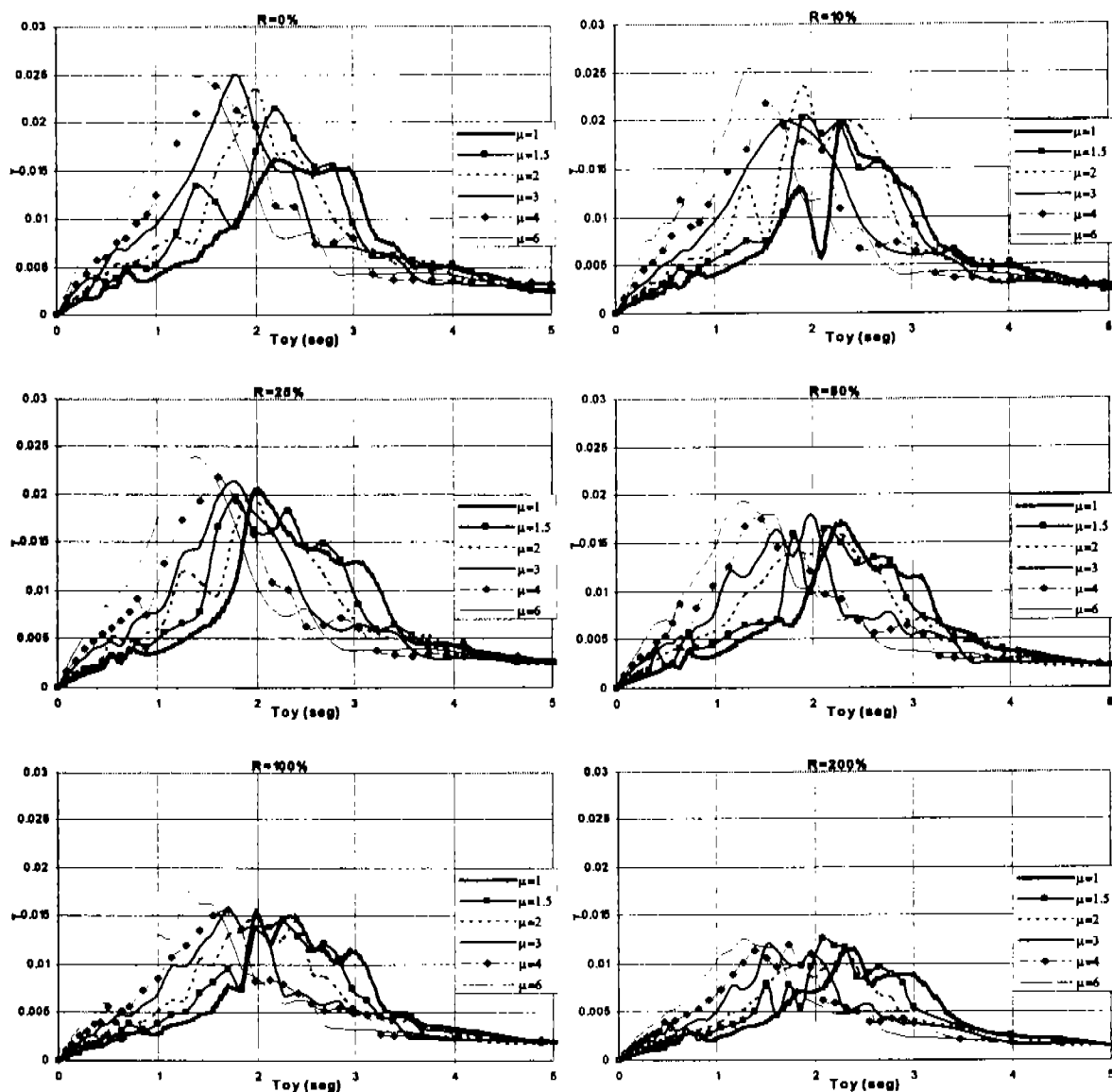


Figura IV.22 Espectro de distorsión (SCT85)

De la figura IV.22 se deduce que el incremento de rigidez produce una reducción en los desplazamientos y distorsiones, otro motivo de reducción en las distorsiones es el decremento de la ductilidad. Al proveer a los sistemas de la resistencia mínima para lograr la ductilidad deseada se provoca que las distorsiones sobrepasen la especificación de las normas, sea cuales quiera.

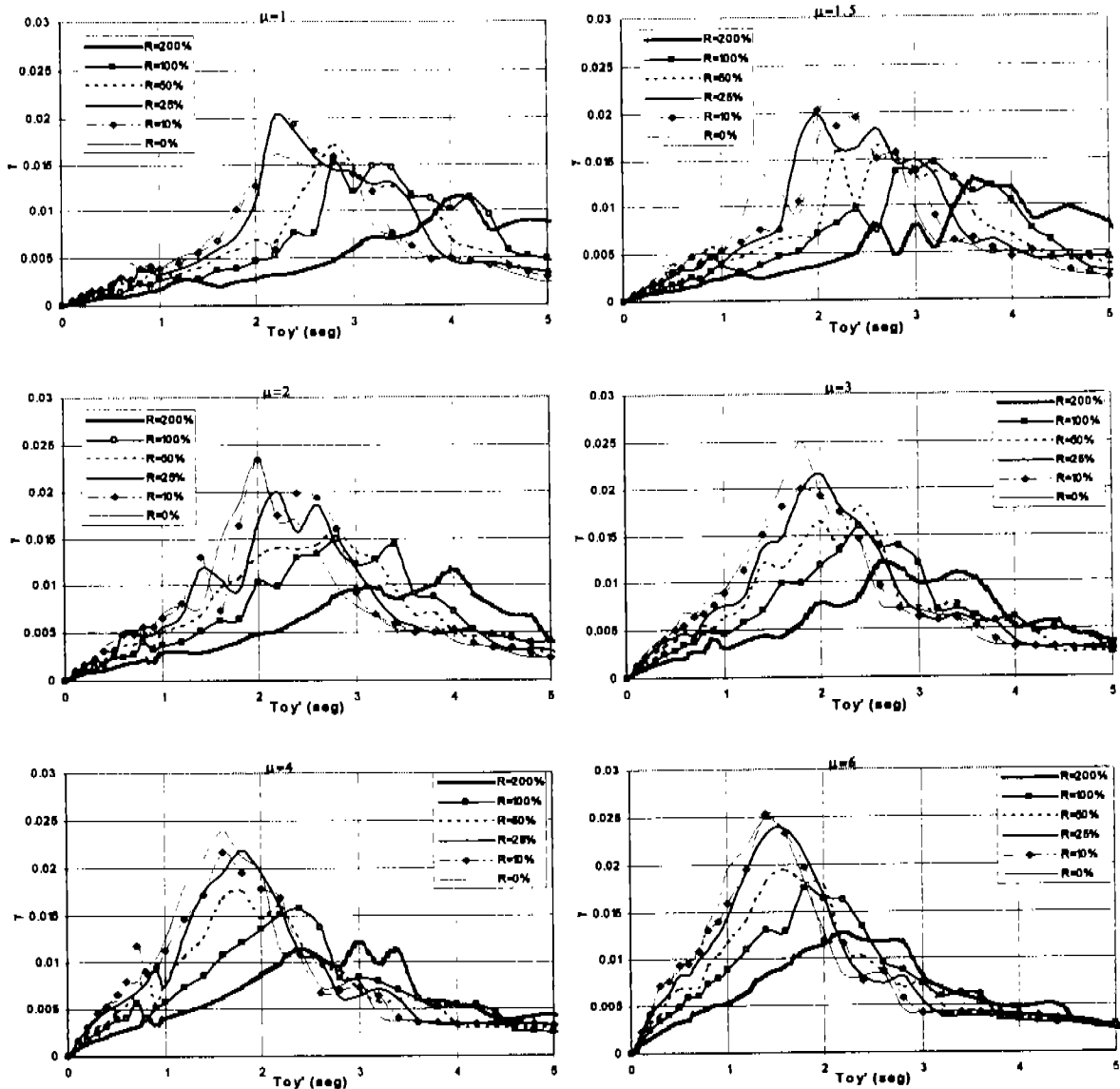


Figura IV.23 Espectros de distorsión referidos al periodo de la estructura original (SCT85)

En esta figura IV.23 se puede ver que a mayor ductilidad se presentan mayores distorsiones, además de que para periodos comprendidos entre 0 y 2.5 seg., por ejemplo de los espectros de ductilidad de 6, el incrementar la rigidez reduce significativamente las distorsiones, mientras que para periodos mayores a 2.5 l cambio de rigidez no cambia significativamente el nivel de distorsiones. Esta figura tiene además un sentido práctico ya que en poco espacio, se puede representar mucha información, tendencias y valores, que de manera escrita sería complejo detallar.

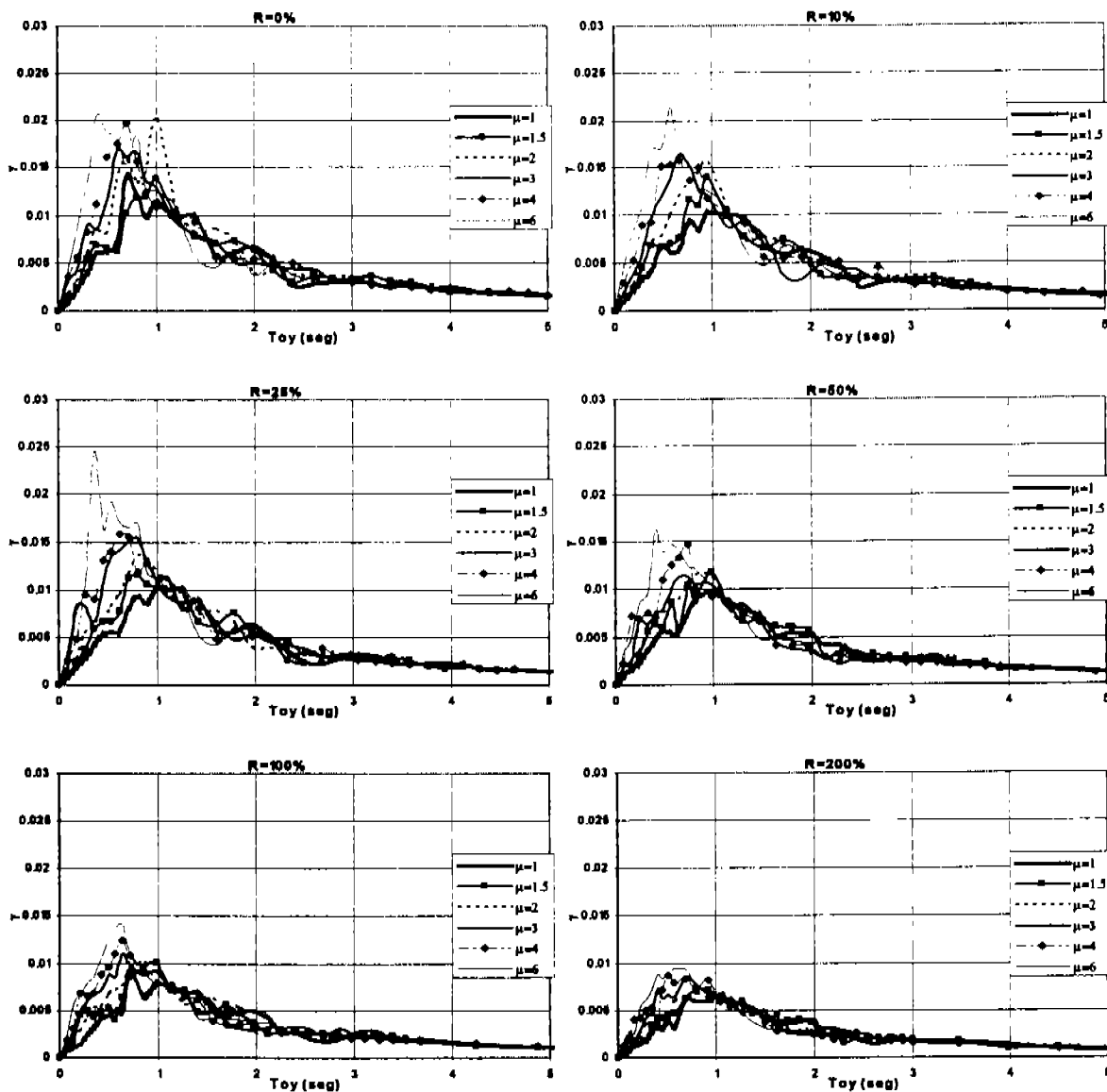


Figura IV.24 Espectro de distorsión (Tohoku)

La figura IV.24 permite entender que a mayor incremento de rigidez se logran menores distorsiones, situación que resulta obvia al sentido común pero cuando se trata de entender a partir de espectros de diseño toma un camino diferente al que se tendría de un espectro de sitio, elástico, siendo ambos diferentes a los resultados obtenidos en este trabajo, que no son todos los resultados interpretados de manera escrita ni que se encuentren descritas todas las características en cada una de las figuras, esto porque se tendría que repetir muchas veces los mismos nombres, tecnicismos y valores que rebasan el objetivo del trabajo, pero si tomó precaución de incluir todos los resultados considerados importantes.

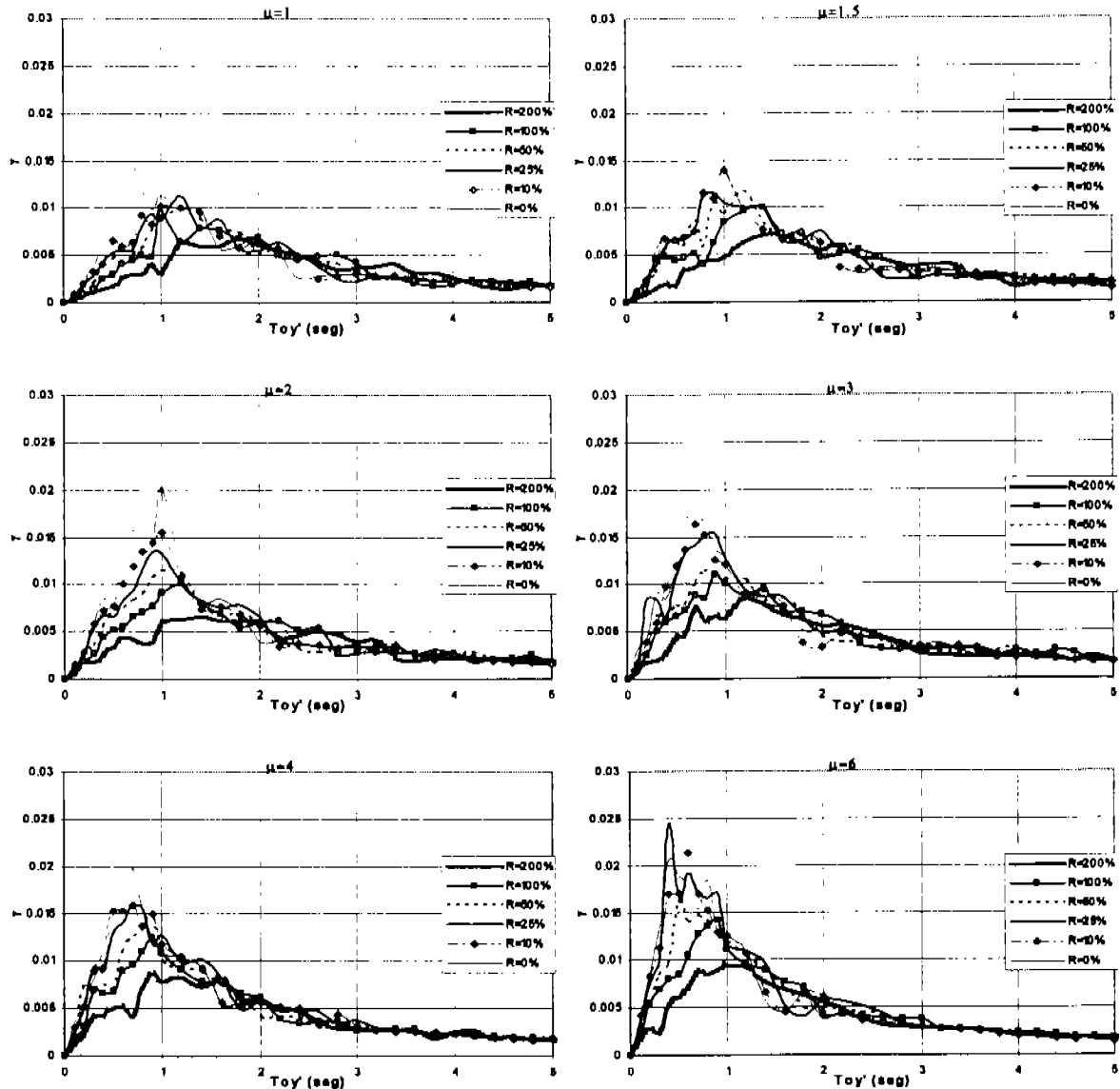


Figura IV.25 Espectros de distorsión referidos al periodo
de la estructura original (Tohoku)

Una vez más se tiene la oportunidad de observar el efecto del cambio de rigidez en los espectros de distorsión mostrados en la figura IV.25 que muestra los resultados de analizar los mismos sistemas ahora con el registro obtenido en Tokoku. Se encuentra que para periodos cortos entre 0 y 1 seg. hay menores distorsiones para ductilidades de 1, mientras que para periodos mayores a 1 seg. no hay efecto significativo del cambio de ductilidad, ni efecto del cambio de rigidez, ni efecto del cambio de periodo. Situación interesante que diverge de lo observado para otros registros lo que lleva a la conclusión de que se debe estudiar cada tipo de registro y hacer observaciones para cada uno de ellos.

Espectros de energía

La forma de los espectros de energía disipada total acumulada es igual para las figuras IV.26 a IV.29, y a los anteriormente presentados, lo que las hace diferentes es la cantidad de energía disipada, la cual tiene relación directa con la intensidad de Arias, por lo tanto no se detalla más sobre dichos espectros.

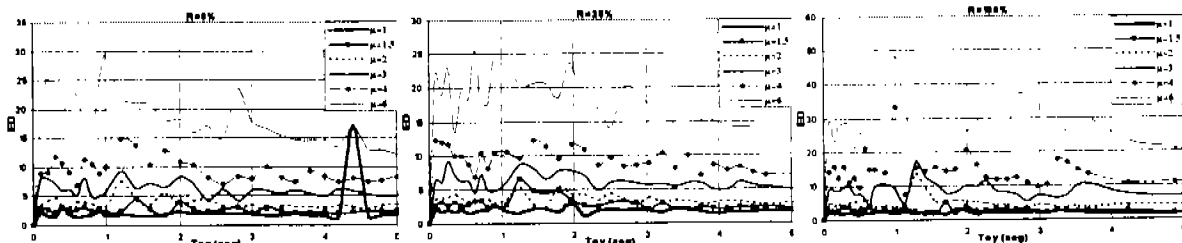


Figura IV.26 Espectro de energía disipada total acumulada (SCT85)

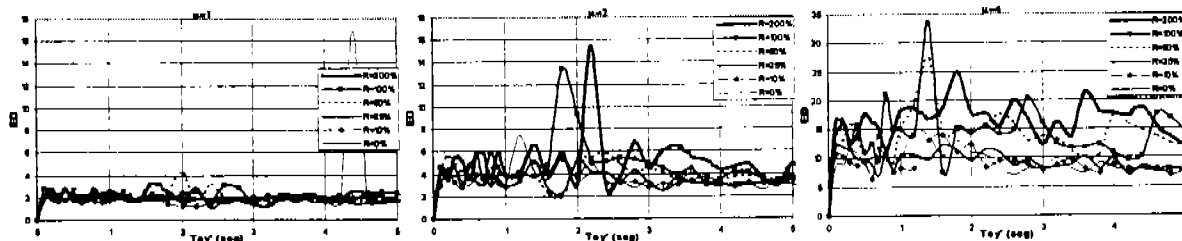


Figura IV.27 Espectro de energía disipada total acumulada referida al periodo Fundamental del sistema original, sin DDE, (SCT85)

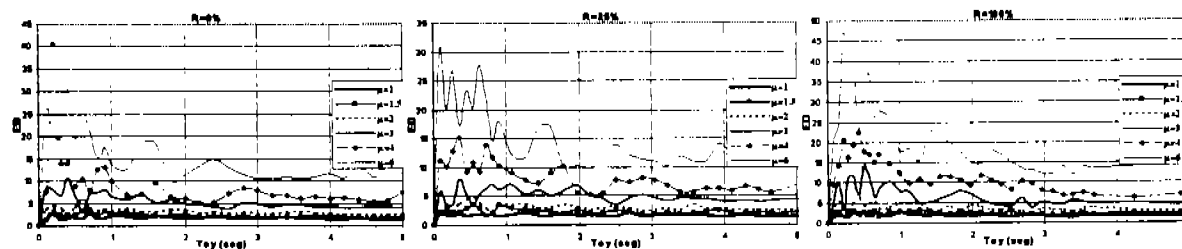


Figura IV.28 Espectro de energía disipada total acumulada (Tohoku)

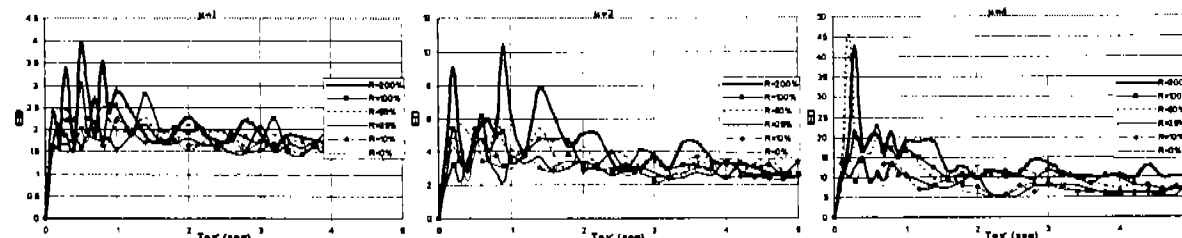


Figura IV.29 Espectro de energía disipada total acumulada referida al periodo fundamental del sistema original, sin DDE, (Tohoku)

IV.3 PARA REGISTROS CON EXCITACIÓN EN SUELO DURO

Se considera, aunque no sea rigurosamente verdadero, que los registros El Centro (1940, Imperial Valle Earthquake) y Taft (1952, Kem Country Earthquake) presentan excitación tipo "ruido blanco", con la aclaración de que estos registros presentan menor capacidad de producir daño, (según la definición de Intensidad de Arias, 1969, es una medida de la demanda o capacidad de producir daño de los sismos), que los estudiados anteriormente, según se puede ver en la tabla II.1

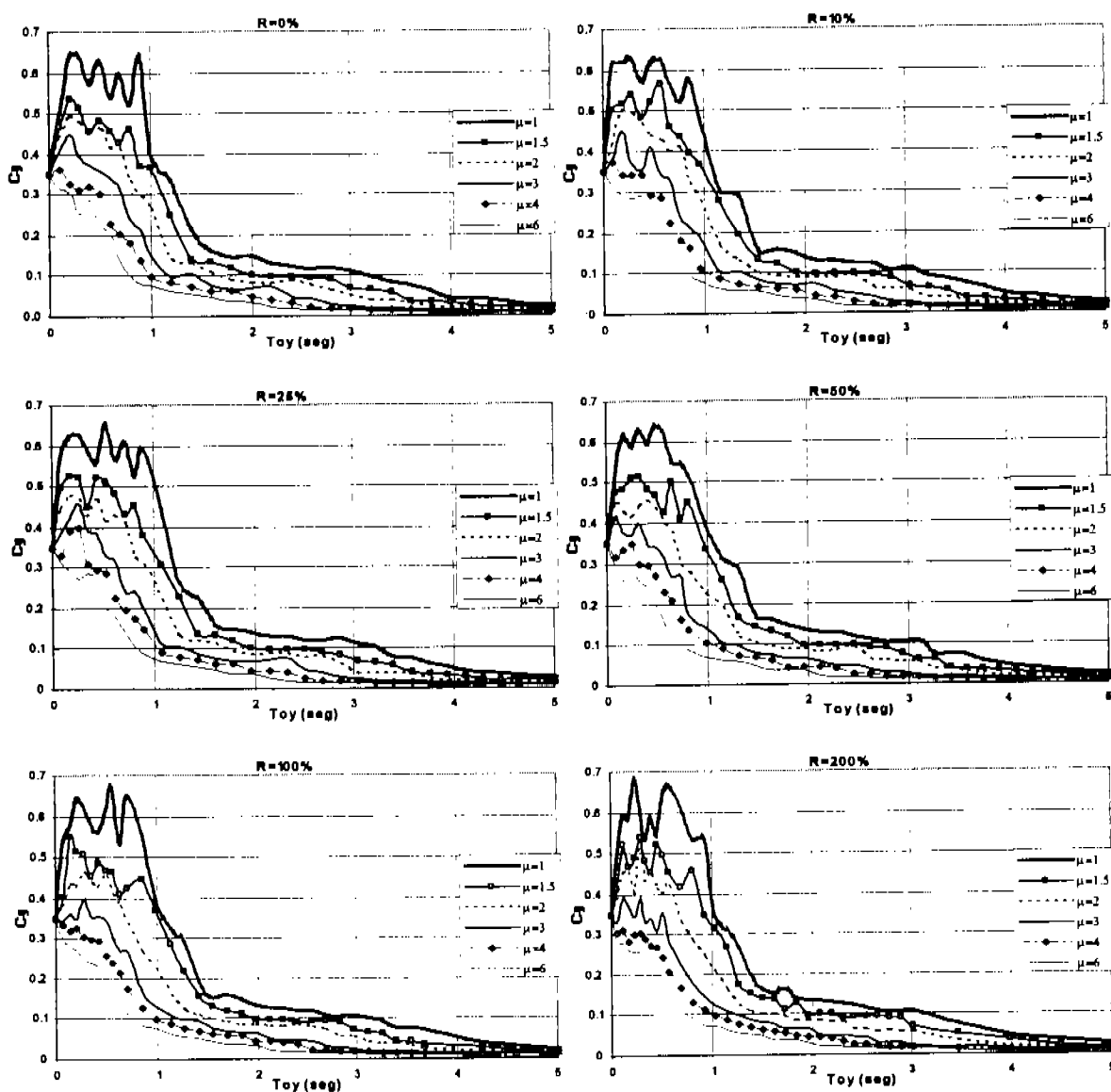


Figura IV.30 Efecto de la ductilidad para cada incremento de rigidez (El Centro)

De la figura IV.30 se infiere que la demanda de resistencia lateral no tiene variación significativa ante el cambio de rigidez, aunque como se verá más adelante da mejor aproximación considerar los respectivos espectros para cuando se representan las demandas de resistencia lateral referidas al periodo de la estructura original, sin DDE.

El efecto observado es válido para estructuras convencionales con excelente capacidad de deformación sin perdida importante de rigidez y resistencia cuyo comportamiento esté regido por flexión y, estructuras con DDE.

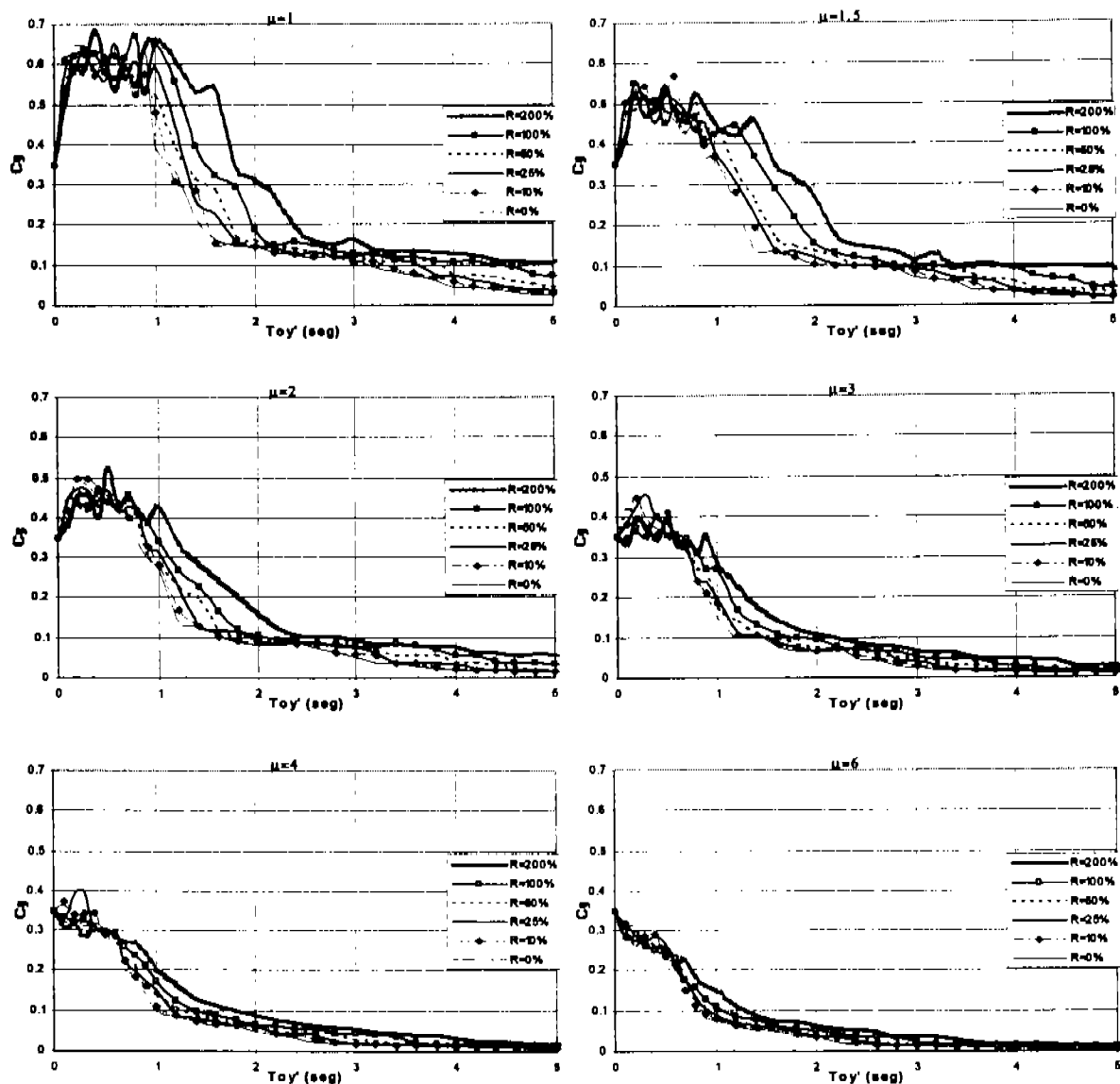


Figura IV.31 Efecto de la rigidez para cada incremento de ductilidad (El Centro)

En la figura IV.31 se observa lo que resulta obvio, a mayor ductilidad menor resistencia lateral. Una situación no tan clara es que los sistemas cuyo periodo fundamental se encuentra entre 0 y 1, para los espectros de ductilidad unitaria, al reducir su periodo por el incremento de rigidez no hay reducción o aumento en la demanda de resistencia lateral, mientras para periodos mayores a 1seg. al incrementar la rigidez se incrementa la demanda de resistencia lateral, es decir, para sistemas que se encuentran en la rama descendente el incremento de rigidez provoca que se demande mayor resistencia lateral para lograr la misma ductilidad.

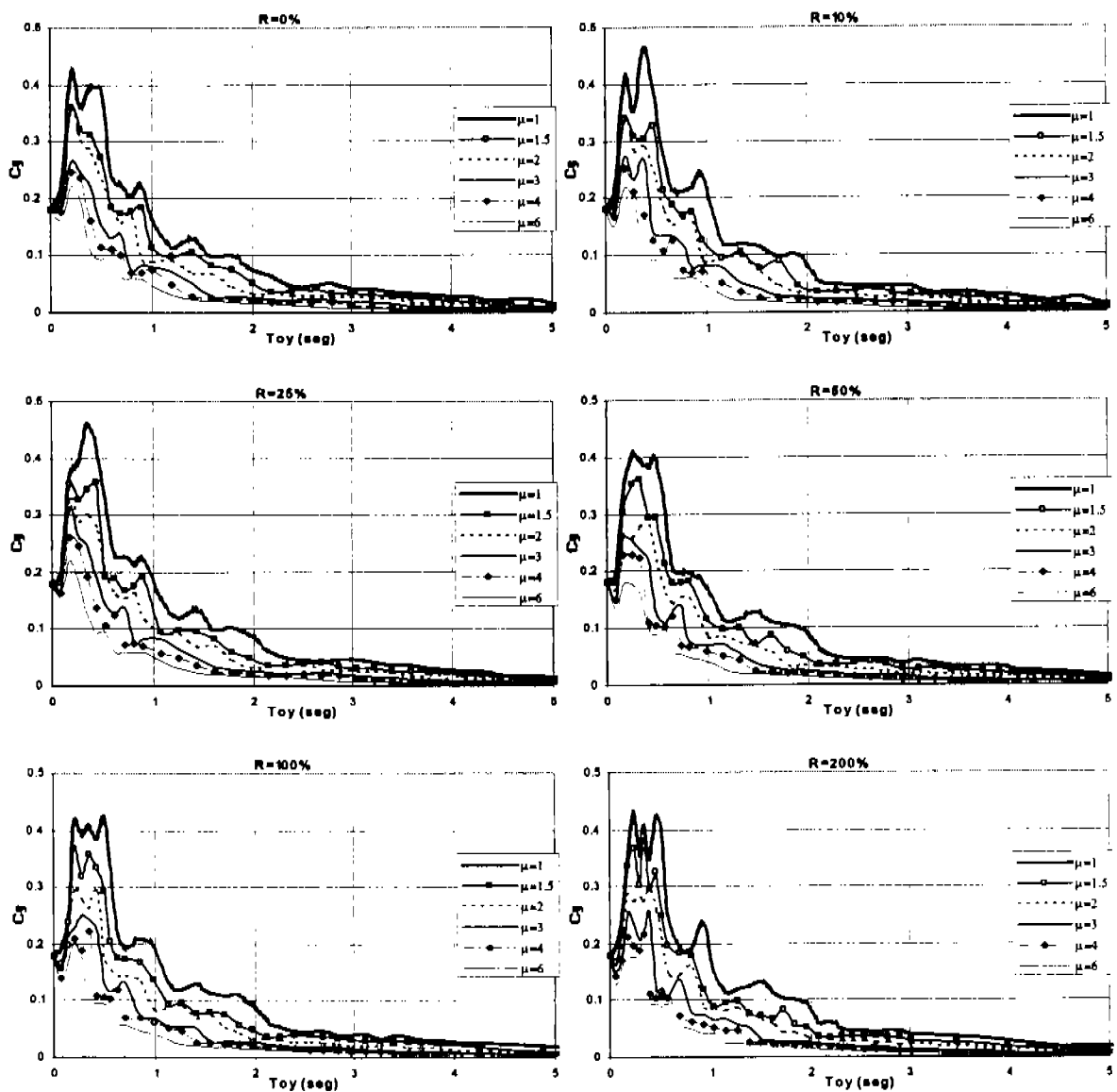


Figura IV.32 Efecto de la ductilidad para cada incremento de rigidez (Taft)

Los espectros de resistencia lateral requerida para lograr cierta ductilidad para el registro de Taft se presentan en la figura IV.32 de donde se observa que a medida que se incrementa la rigidez la resistencia lateral tiende a disminuir ligeramente.

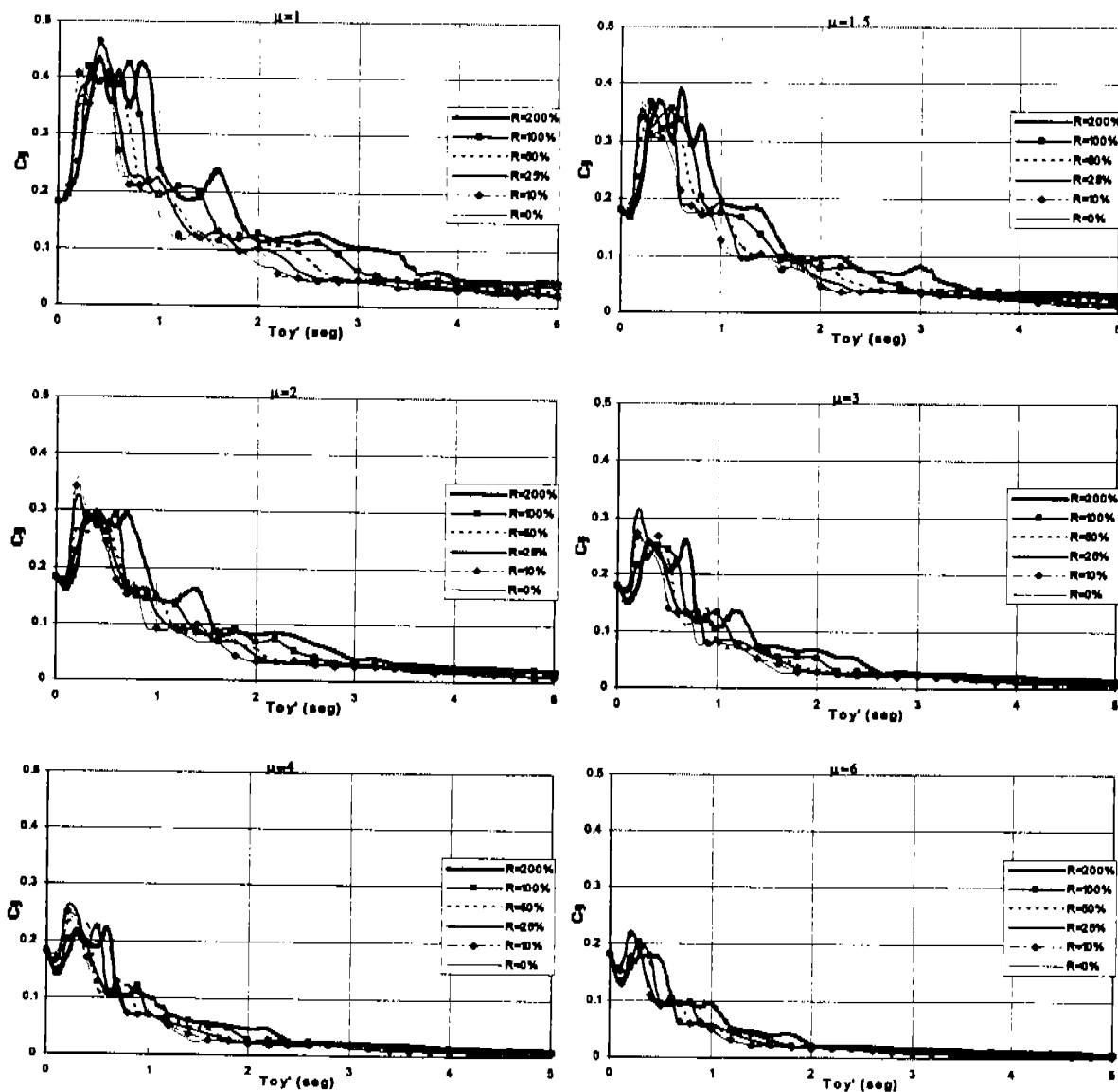


Figura IV.33 Efecto de la rigidez para cada incremento de ductilidad (Taft)

Se observa en la figura IV.33 que la tendencia general al incrementar la rigidez se incrementa la demanda de resistencia lateral de manera tal que por la forma del espectro puede despreciarse el valor numérico y sólo tener presente la tendencia.

Espectros de distorsión de entrepiso

Como ya se mencionó en el comienzo del capítulo resulta más útil estudiar las distorsiones que los espectros de deformación, según el autor.

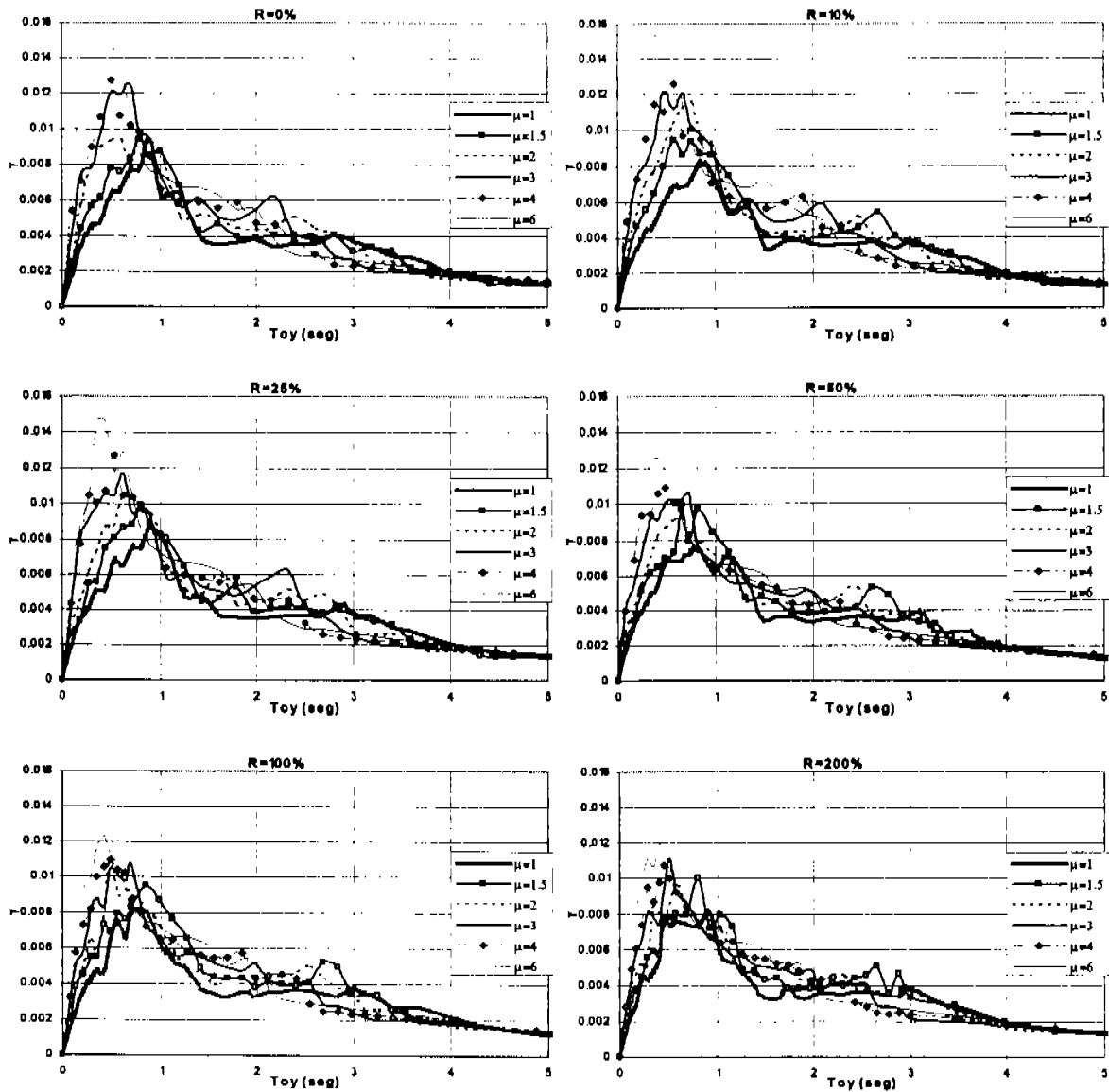


Figura IV.34 Espectro de distorsión (El Centro)

De la figura IV.34 se deduce que a mayor incremento de rigidez se reducen las distorsiones. Además se observa que las distorsiones máximas son para los periodos entre 0.5 1 seg. En las estructuras reales

normalmente se cuenta con aporte de rigidez de elementos no modelados o divisorios no desconectados de la estructura de tal suerte que se reducen sus distorsiones.

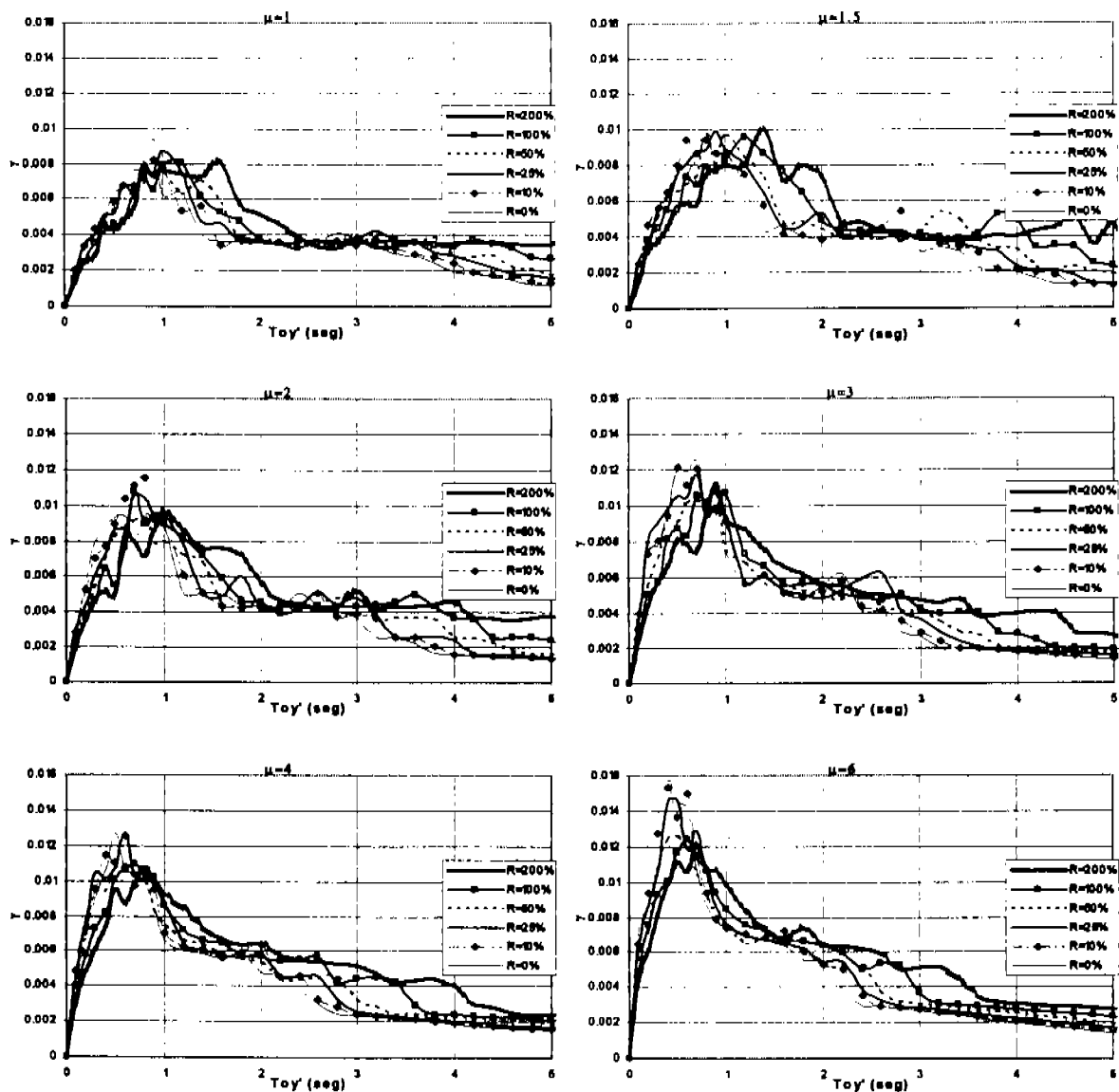


Figura IV.35 Espectros de distorsión referidos al periodo de la estructura original (El Centro)

De la figura IV.35 se puede decir que a mayor ductilidad, mayor distorsión principalmente para periodos comprendidos entre 0 y 1seg. Para periodos mayores a 1.5seg con una ductilidad de 1 se observa que el cambio de rigidez no produce una reducción significativa en los distorsiones.

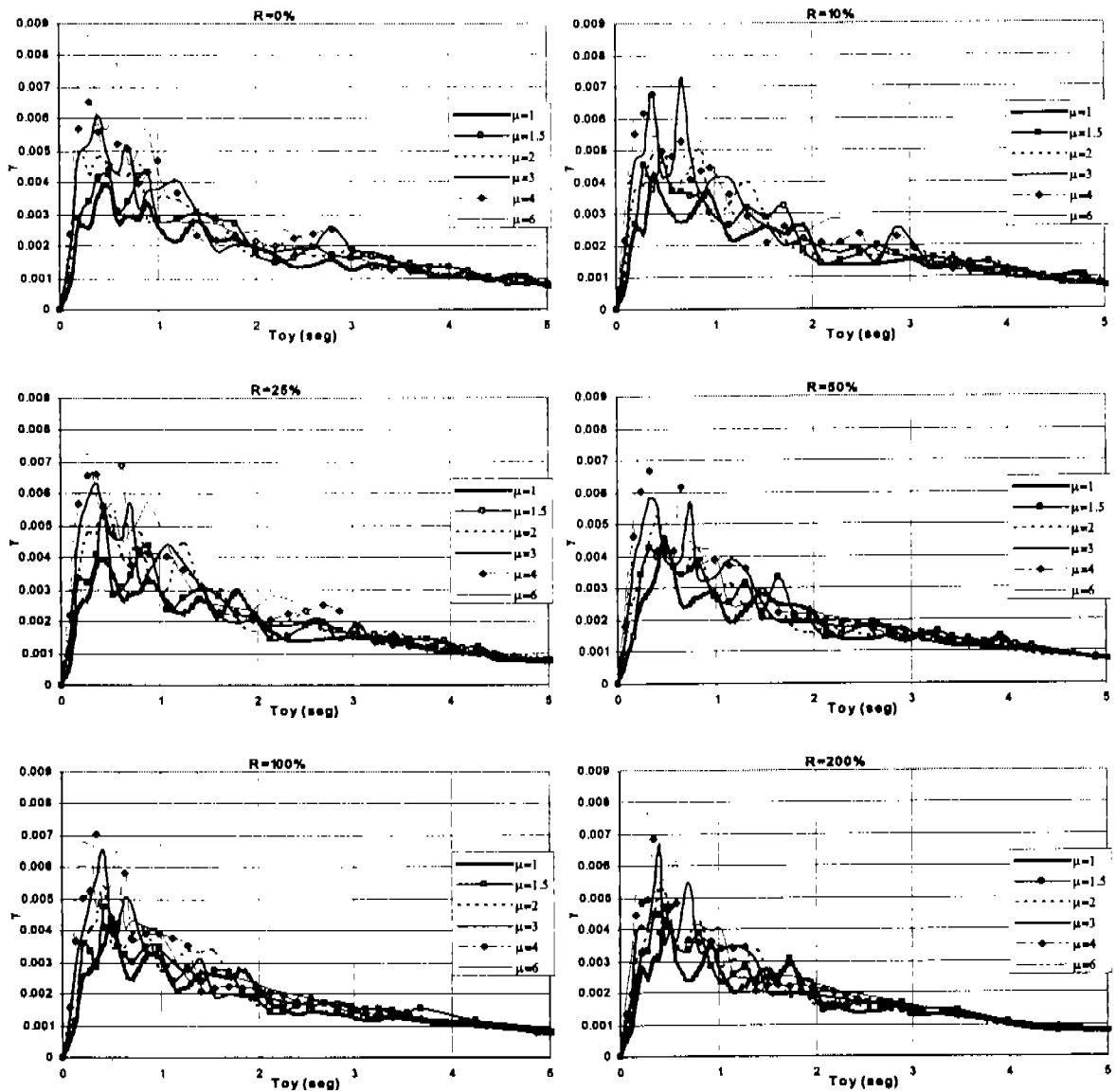


Figura IV.36 Espectro de distorsión (Taft)

Los espectros de distorsión del Taft se muestran en la figura IV.36 de donde se ve que, por ejemplo, para una ductilidad de 1 los sistemas con periodos mayores a 1seg. el cambio de rigidez produce menores distorsiones, sólo que no son significativas. Como se ha visto hasta el momento los espectros de distorsión son sensibles al tipo de sistema, a la ductilidad y al tipo de registro. Las distorsiones son en general pequeñas comparadas con las obtenidas de los otros registros. Las máximas distorsiones se presentan para periodos de 0.5seg.

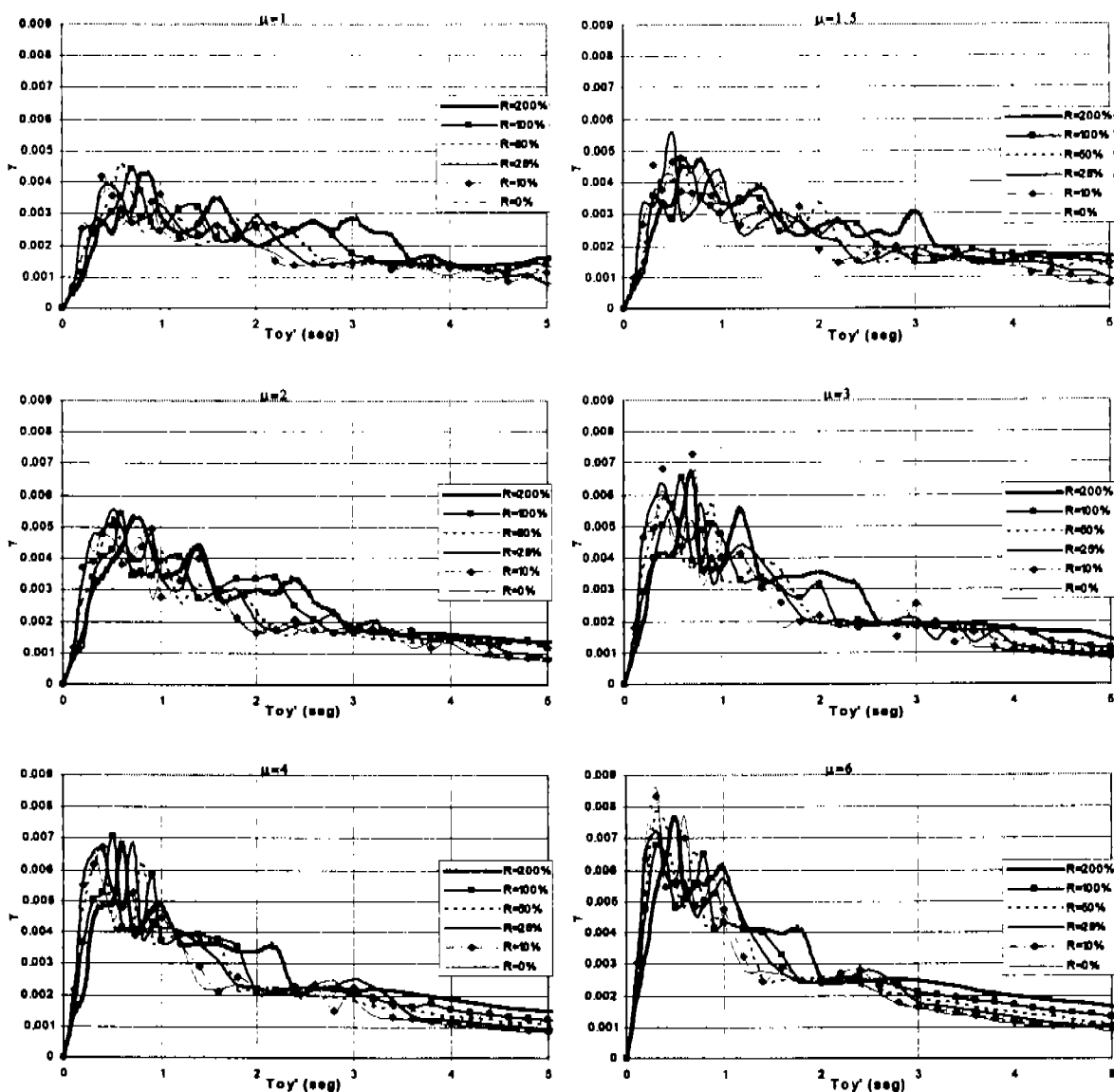


Figura IV.37 Espectros de distorsión referidos al periodo de la estructura original (Taft)

De todos los espectros de distorsión estudiados en este trabajo los espectros mostrados en la figura IV.37 son los que presentan menores distorsiones. De esta misma figura se aprecia que las mayores distorsiones se presentan para periodos cortos de 0.4 a 0.8seg., en el caso de los espectros que desarrollan una ductilidad de 6, así como también para ese rango de periodo se presentan las reducciones mas significativas en las distorsiones.

Espectro de energía

Para ductilidades de 1 hasta 3 se puede considerar que la energía para todos los sistemas es constante y además pequeña comparada con la energía disipada por los mismos sistemas pero que puedan desarrollar ductilidades mayores a 4, donde los sistemas con periodo fundamental corto hasta del orden de 2seg. tienden a disipar más energía que los sistemas con periodo mayor a 2seg. Para mostrar tal efecto se utilizan las figuras IV.38, IV.39, IV.40 y IV.41.

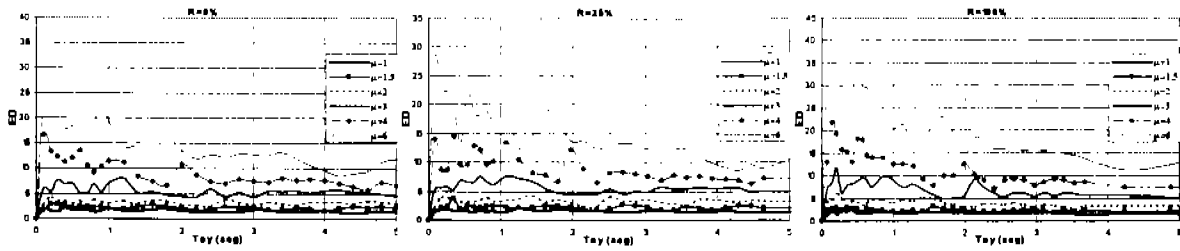


Figura IV.38 Espectro de energía disipada total acumulada (El Centro)

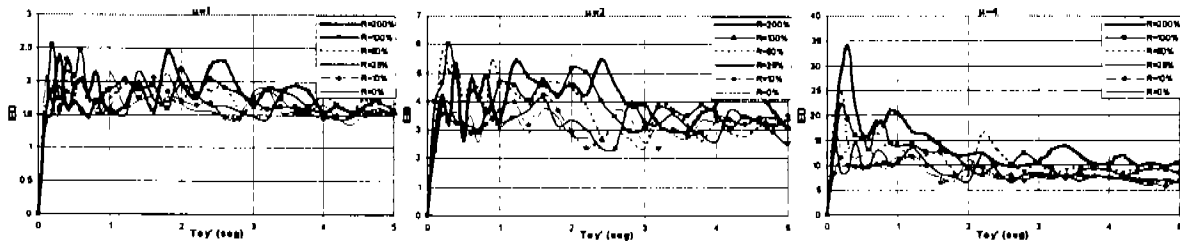


Figura IV.39 Espectro de energía disipada total aculada referida al periodo fundamental del sistema original, sin DDE, (El Centro)

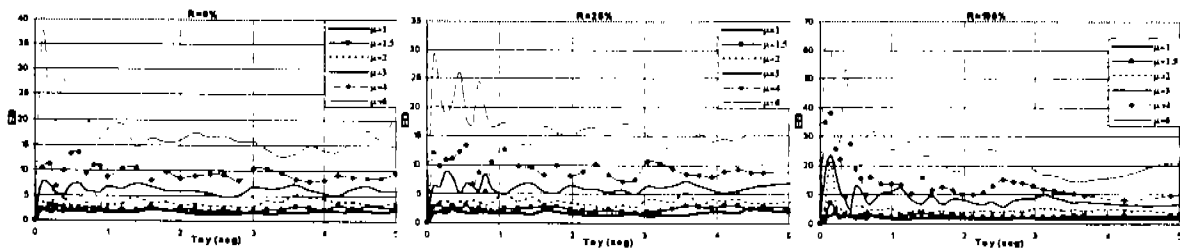


Figura IV.40 Espectro de energía disipada total acumulada (Taft)

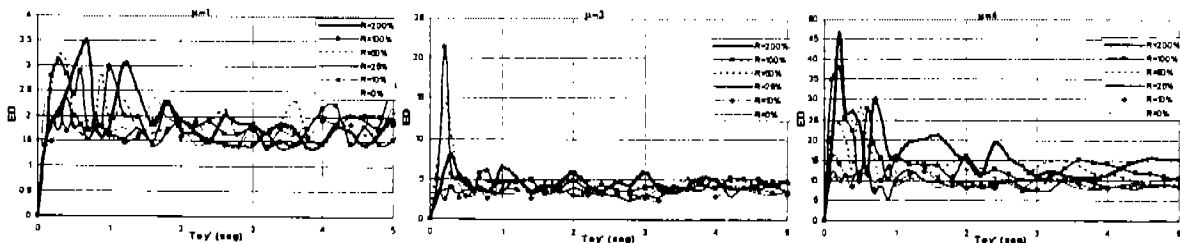


Figura IV.41 Espectro de energía disipada total acumulada referida al periodo fundamental del sistema original, sin DDE, (Taft)

V. EFECTO DEL CAMBIO DE RESISTENCIA POR USO DE DISPOSITIVO DISIPADOR DE ENERGÍA, EN LA DEMANDA DE RESISTENCIA Y DUCTILIDAD

Se debe entender por cambio de resistencia, al efecto que provoca la presencia del DDE en la curva resistencia-desplazamiento mostrada en la figura V.1, (es decir, la resistencia lateral a la cual se presenta el agrietamiento crece por la presencia del DDE, como se puede ver en la figura V.1), que sirve para definir los parámetros del modelo de comportamiento del concreto armado de Takeda, que es el modelo utilizado en este trabajo. No se confunda resistencia con la capacidad máxima del sistema a soportar carga, ya que en este trabajo, se presentan los espectros de isoductilidades, los cuales representan la mínima resistencia lateral para conseguir la ductilidad objetivo y a partir de estos requerimientos de resistencia lateral, se construyen los espectros de distorsión y energía disipada, que se presentan más adelante. Si se incrementará la resistencia lateral a la carga última y por lo tanto la resistencia lateral al agrietamiento, se analizan diferentes sistemas, por lo tanto, no sería razonable compararlos entre sí; más bien, se analizaría el efecto de la sobre-resistencia, el cual no motivó de estudio de este trabajo, aunque de manera indirecta se estudie el incremento de resistencia de manera interna, en la configuración de la curva primaria que representa a los sistemas en estudio.

Aquí se estudia el efecto que causa un incremento en la relación de resistencia en las estructuras de concreto reforzado, debido a la presencia del DDE, para lo cual se propone incrementar en 10%, 25%, 50%, 100% y 200% la relación de resistencia, para estructuras con ductilidades globales de 1, 1.5, 2, 3, 4 y 6.

El sistema que sirve de base para comparar los resultados, es una estructura de concreto que presenta comportamiento y modo de falla regido por la flexión, sin adelgazamiento del lazo histerético, lo que implica proveer de suficiente detallado. A esta estructura, se le adicionan los DDE. La implementación del DDE aumenta la relación de resistencia lateral de la estructura y la rigidez lateral, de manera conjunta. En este capítulo se estudia únicamente el efecto del cambio de resistencia.

Dado que la rigidez se mantiene constante, al igual que el desplazamiento de fluencia, entonces se dejará igualmente fija la fuerza a la fluencia, con lo que resta solo variar la relación de resistencia al agrietamiento, entre la resistencia a la fluencia, que inicialmente toma el valor de 0.333, con lo cual artificialmente se obtiene la posibilidad de retardar el punto de agrietamiento en la curva trilineal del modelo, debido al incremento de resistencia que aporta el DDE, (figura V.1).

Determinar la fuerza que absorbe la estructura de concreto y la fuerza que toma el DDE no es el objetivo de este estudio; solo es importante señalar que, dadas las condiciones de la idealización, la resistencia máxima que toma el DDE queda limitada al conjunto de curvas inferiores, que muestra la figura V.2, la cual será explicada más adelante.

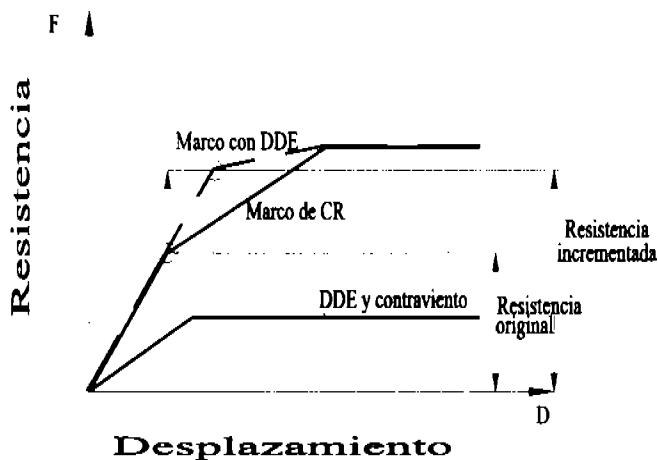


Figura V.1

El procedimiento se definió de manera que los incrementos de resistencia no producen cambio en el periodo de la estructura, pero si un cambio en la relación de resistencias. En la figura V.2 se puede ver las curvas primarias resultantes para cada incremento de resistencia.

Para tomar en cuenta la influencia del comportamiento del DDE se variaron los parámetros que regulan el desarrollo de la respuesta, los parámetros son: B0, controla la degradación de rigidez a la descarga; B1, es el factor de degradación de resistencia; B2, es el factor de adelgazamiento del lazo histerético; B3, es un factor de degradación de rigidez en el siguiente ciclo histerético. Los cuatro factores intervienen en las reglas histeréticas del modelo de Takeda con deslizamiento versión Shionara; para el modelo tradicional de Takeda sólo intervienen B0 y B1. Este estudio se realiza con el modelo tradicional de Takeda.

En la tabla V.1 se muestran los valores de los parámetros y sus respectivos efectos, además valores recomendados para estructuras convencionales y los valores para revisar el efecto del incremento de resistencia.

Tabla V.1 parámetros que definen la historia de comportamiento de los lazos de histéresis de los sistemas

B0	B1
0 Rigidez a la descarga con un valor más grande que K_y y no se degrada	1 No degrada la resistencia
0.5 La rigidez a la descarga es igual a K_y y no degrada	0.5 Degrada gradualmente la resistencia
1.0 La rigidez a la descarga es igual a K_y y se degrada rápidamente	0 Degrada mucho la resistencia
Valores recomendados para estructuras tradicionales de concreto	
0.5-1.0	0.7-1.0
Valores utilizados en este capítulo	
0.1-0.5	0.5-0.8

En la figura V.2 se pueden ver las curvas primarias, en línea continua, para el análisis del incremento de la relación de resistencia y, además se grafican las características que tendrán los DDE, con línea punteado, tal que se genere el incremento de resistencia; de estas gráficas se deduce que no existen materiales y estructuraciones de DDE, que produzcan el comportamiento descrito por la gráfica. En este trabajo, bajo la hipótesis de incrementar sólo la relación de resistencia, es válido que no existan materiales con tales características, para los fines planteados.

Con la idea del reparto de fuerzas laterales que toma la estructura de concreto y el DDE se observa, de la figura V.2, que el DDE debe soportar una fuerza que es variable, que depende del desplazamiento y a su vez el desplazamiento es función del tiempo y del tipo de excitación, por lo tanto, la fuerza lateral que debe soportar la estructura de concreto, resulta también variable.

Para obtener los espectros de resistencia requerida para una ductilidad dada de 1, 2, 3, 4, y 6 para la estructura original (sin disipadores de energía) y, para la estructura reforzada con DDE, se propone un incremento en la relación de resistencias de 0%, 10%, 20%, 50% y 100%.

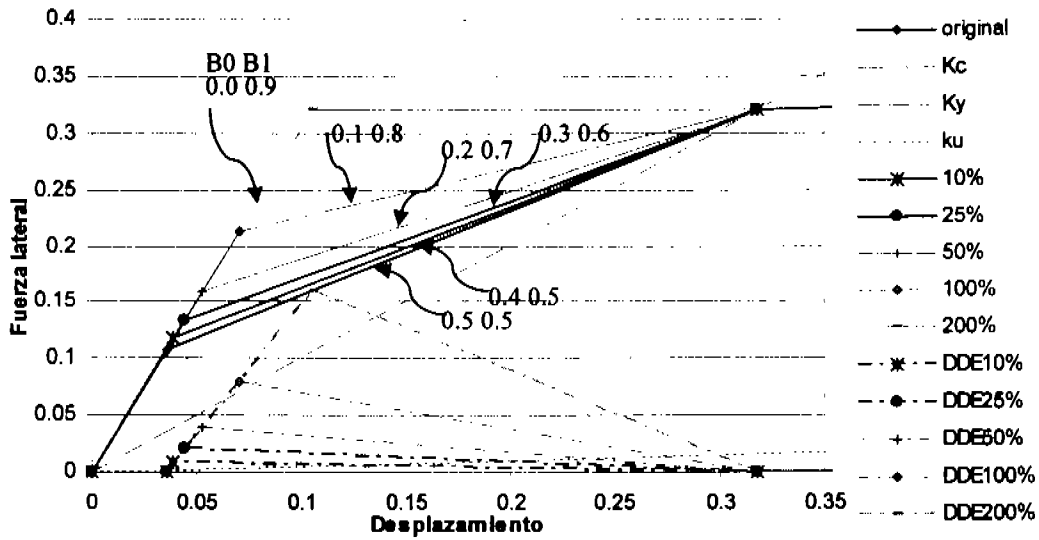


Figura V.2 Curvas primarias de los diferentes modelos considerados para análisis

Como en este capítulo no hay cambio de rigidez, no se genera cambio en el periodo del sistema analizado, por lo que a un periodo le corresponden tantas resistencias laterales como incrementos de la relación de resistencia, y como ejemplo se muestra la figura V.3, donde se observa que el sistema original y el sistema modificado tienen el mismo periodo fundamental.

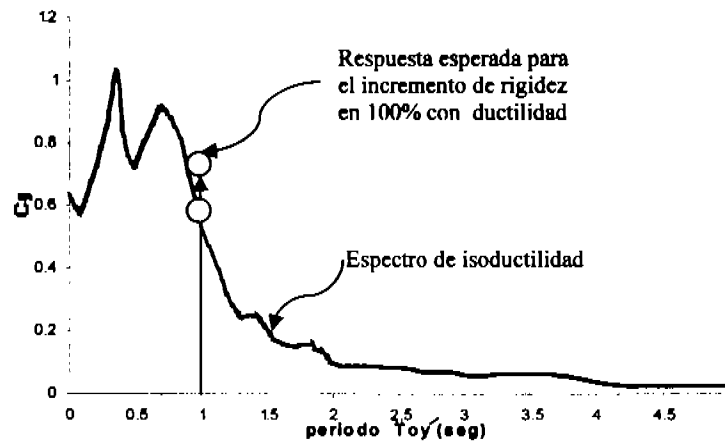


Figura V.3 Representación del cambio de resistencia lateral debido al cambio de resistencia.

Los resultados mostrados a continuación, son válidos para estructuras convencionales con excelente capacidad de deformación, que puedan representarse como sistemas de un grado de libertad, sin pérdida importante de rigidez y resistencia, cuyo comportamiento esté regido por flexión y para estructuras con DDE.

V.1 PARA REGISTROS DE MOVIMIENTO CON PERIODO DOMINANTE CORTO

Se consideraron dos registros que generan respuestas con periodo dominante corto, Kobe (1995, Hygoken Nanbu Japan Earthquake), y Lolloe (1985, Chile Earthquake), los cuales generan los espectros mostrados a continuación.

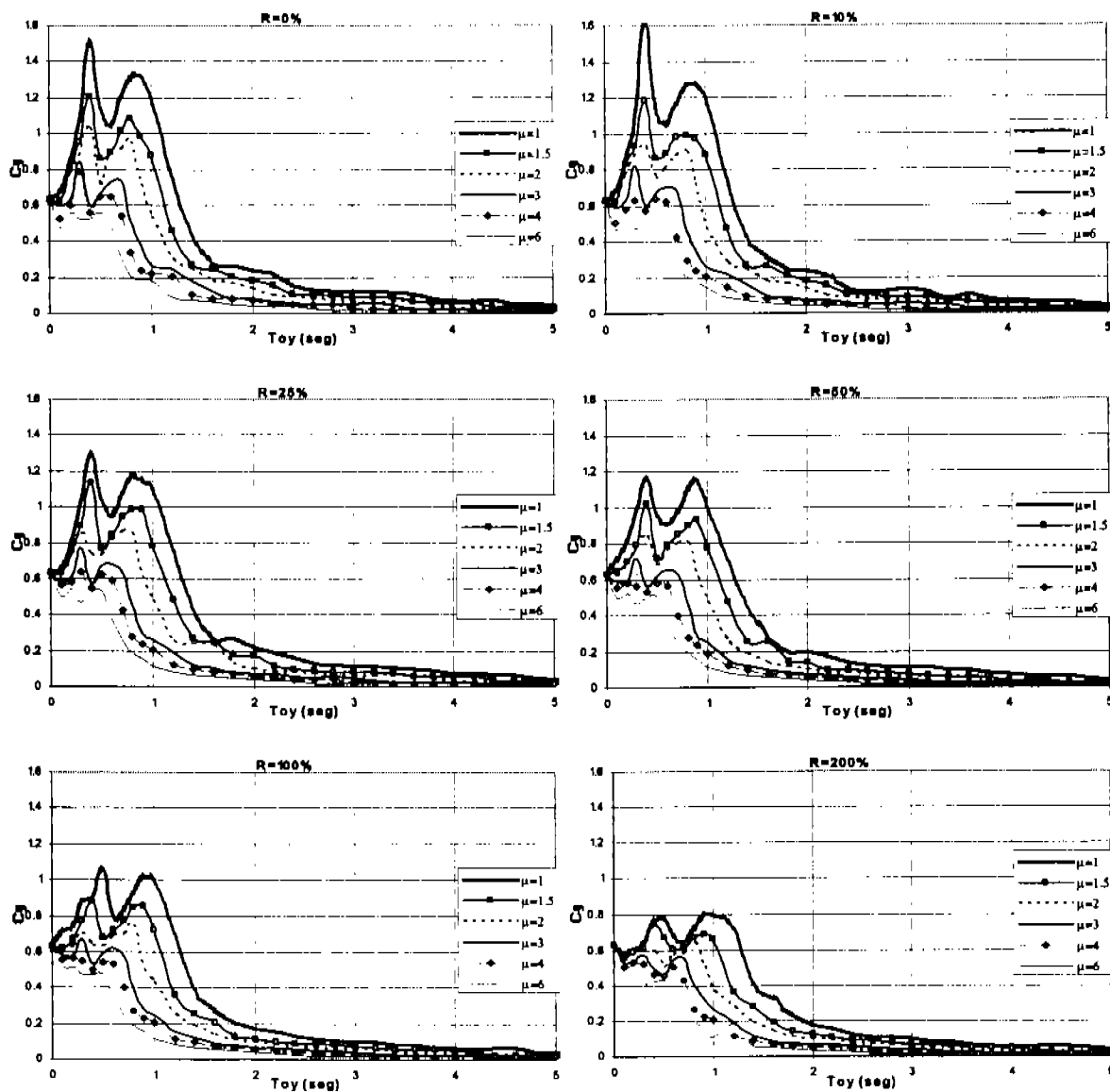


Figura V.4 Efecto de la ductilidad para cada incremento de resistencia (Kobe)

De observar la figura V.4 se encuentra que a mayor incremento en la relación de resistencia, la demanda de resistencia para iguales ductilidades, tiende a decrecer. Además, se observa que existe un corrimiento del periodo fundamental hacia periodos mas cortos a medida que la ductilidad crece. El

efecto observado permite incrementar la capacidad de deformación de la estructura, para reducir la demanda de respuesta, sin tomar en cuenta el efecto del incremento de rigidez; de ser así, se pueden provocar errores, puesto que ya se vio que el incremento de rigidez juega un papel trascendental en la demanda de resistencia lateral.

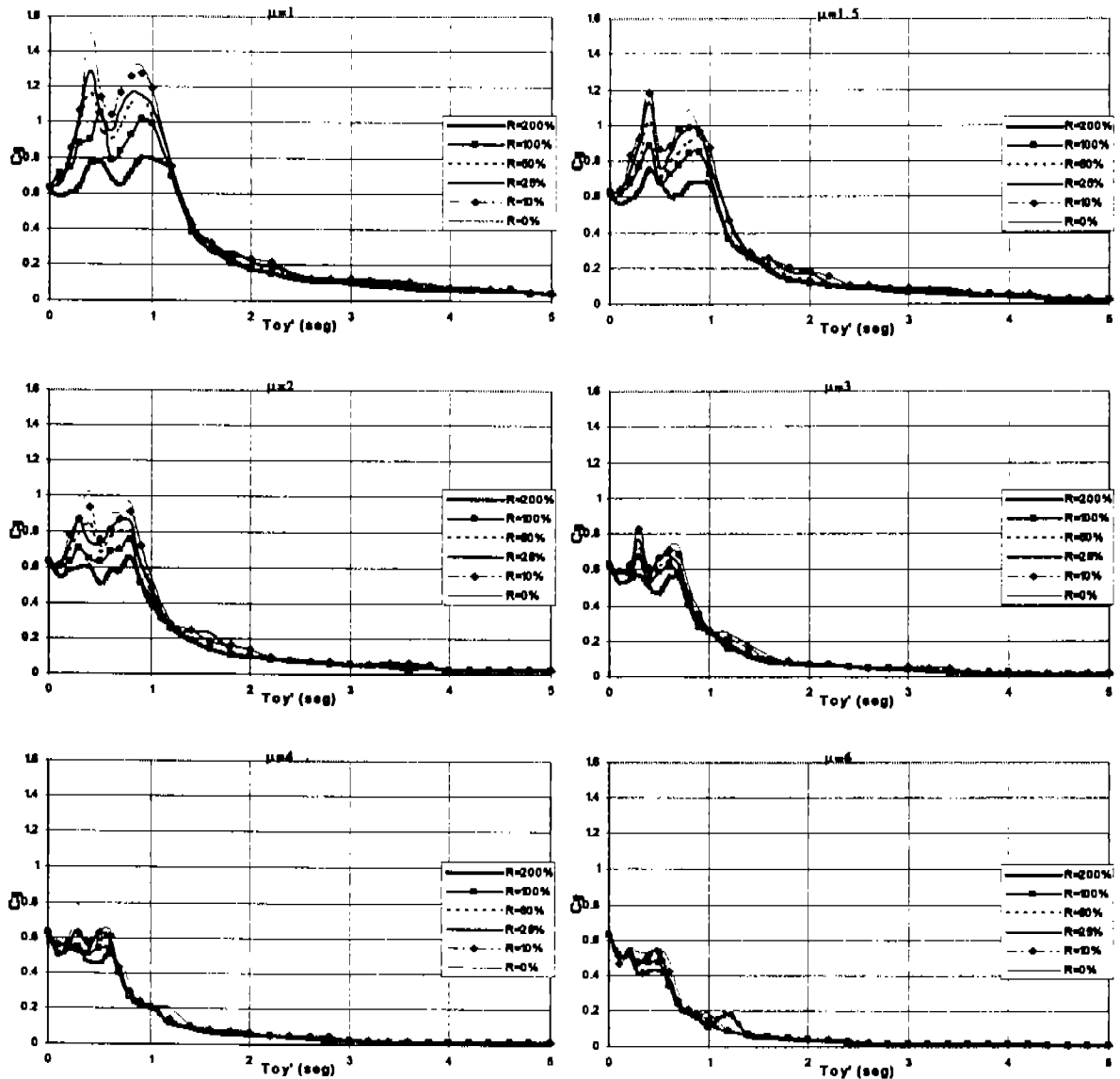


Figura V.5 Efecto de la resistencia para cada incremento de ductilidad (Kobe)

Para una ductilidad fija, por ejemplo de 1, al incrementar la relación de resistencia, se reduce la respuesta en el intervalo de periodos de 0.1 a 1.1seg., coincidente con los periodos de máxima respuesta. Para el resto de los periodos, no hay cambio en la demanda de resistencias laterales.

La tendencia observada se puede asociar con la causa de la fatiga de bajo ciclaje, dado que a medida que se incrementa la relación de resistencia, se demandan menores resistencias laterales para lograr la misma ductilidad; esto sugiere que se puede anular la fatiga de bajo ciclaje, al incrementar la relación de resistencia, o lo que es lo mismo que incrementar la resistencia. Como resulta de dominio común, la fatiga de bajo ciclaje se presenta para la zona de periodos con máxima amplificación dinámica; la máxima reducción ante el incremento de la relación de resistencia se presenta para los periodos de máxima respuesta. El efecto de la reducción es más grande en ductilidades pequeñas, por ejemplo 1 o 1.5seg.

Al aprovechar las ventajas de incrementar la relación de resistencia, se deduce que el efecto es válido para la "propiedad" inherente de las estructuras, llamada sobre resistencia. Cuando se hagan reducciones del espectro de diseño elástico por sobre-resistencia, hay que tener presente que esta sobre-resistencia ayuda a las estructuras con periodo fundamental cercano al periodo del suelo, a controlar mejor la fatiga de bajo ciclaje.

Estas observaciones llevan a pensar que, para las estructuras denominadas del grupo "A" según el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, el incrementar la resistencia lateral de manera uniforme para todos los periodos fundamentales, conduce a sobre-diseñar las estructuras que tengan periodo fundamental mayor al periodo dominante del suelo. Por lo tanto, se puede recomendar poner el factor de 1.5 como máximo y reducirlo en función de la relación de periodos de la estructura y del suelo.

Con respecto a los procedimientos tradicionales de diseño se sabe que, el factor de comportamiento sísmico "Q" y la ductilidad, se encuentran relacionadas. De un estudio que establezca las relaciones entre las resistencias laterales requeridas para lograr niveles de ductilidad global prefijos en SIGL representativos de sistemas estructurales de concreto sin DDE y sistemas estructurales con DDE, se pueden conocer los factores de comportamiento sísmico para las estructuras con DDE en función del factor de comportamiento sísmico de estructuras de concreto convencionales. Como los sistemas con DDE tienden a requerir de menor resistencia lateral para poder alcanzar los mismos niveles de ductilidad, que los alcanzados por el sistema tradicionales, se tendría que los factores de comportamiento sísmico para estructuras con DDE, sean mayores que los adoptados para estructuras convencionales de concreto.

Nota: R=100% significa 100% de incremento en la relación de resistencia, en este capítulo.

Todas las observaciones de las figuras V.4 y V.5 son validas para todas las figuras generadas por todos los registros estudiados en este trabajo; con la finalidad de no repetir textos, en lo siguiente sólo se comentará características particulares para cada figura, se acepta que las descripciones ya mencionadas aplican para todos los espectros generados.

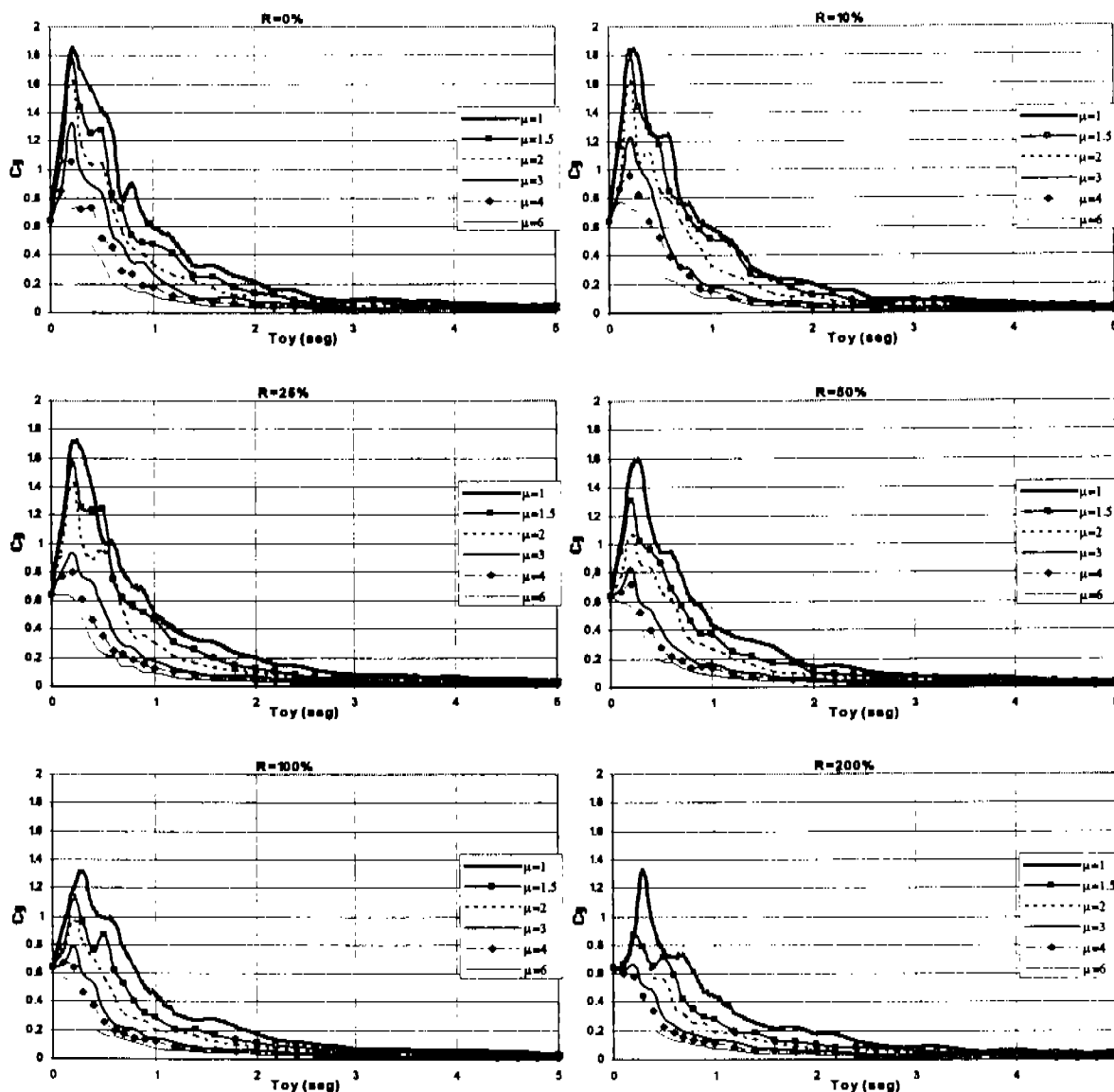


Figura V.6 Efecto de la ductilidad para cada incremento de resistencia (Llolleo)

Del dominio común es que a mayor incremento en la relación de resistencia, se demandan menores fuerzas, lo que se puede constatar en la figura V.6; además se puede conocer la magnitud de la reducción.

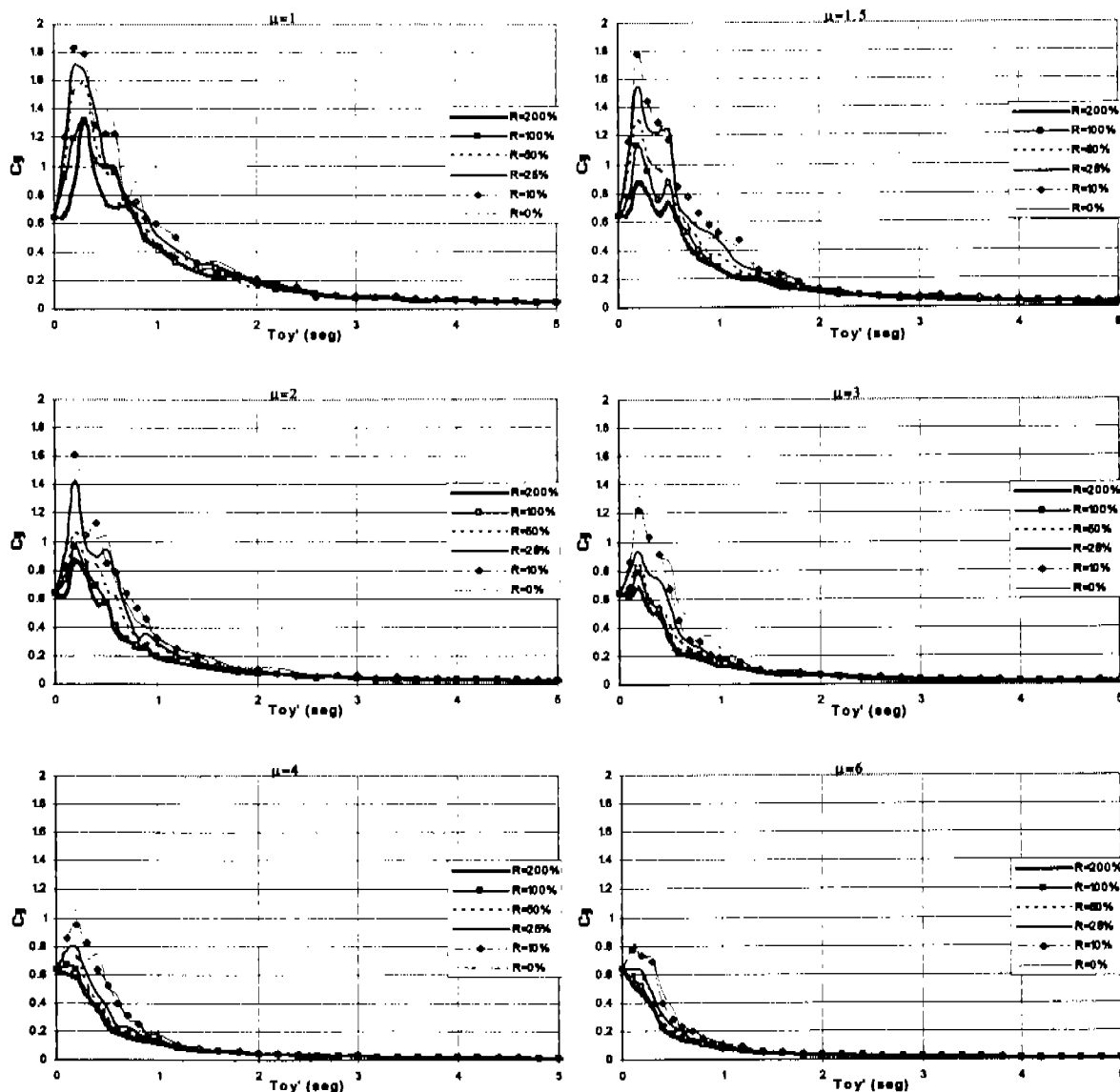


Figura V.7 Efecto de la resistencia para cada incremento de ductilidad (Llolleo)

De observaciones particulares cuantificables deducidas de la figura V.7 se puede decir que; para periodos mayores a 1.5seg. no hay efecto del incremento en la relación de resistencia en la remanda de resistencia lateral y, apenas un diferencial imperceptible en la demanda de resistencia por el cambio de ductilidad.

Espectros de distorsión de entripiso

De la resistencia lateral requerida para producir los espectros de isoductilidad se generan los espectros de desplazamiento, los cuales son divididos entre la altura que le correspondería al sistema según se explicó en el capítulo anterior, para obtener los espectros de distorsión mostrados a continuación.

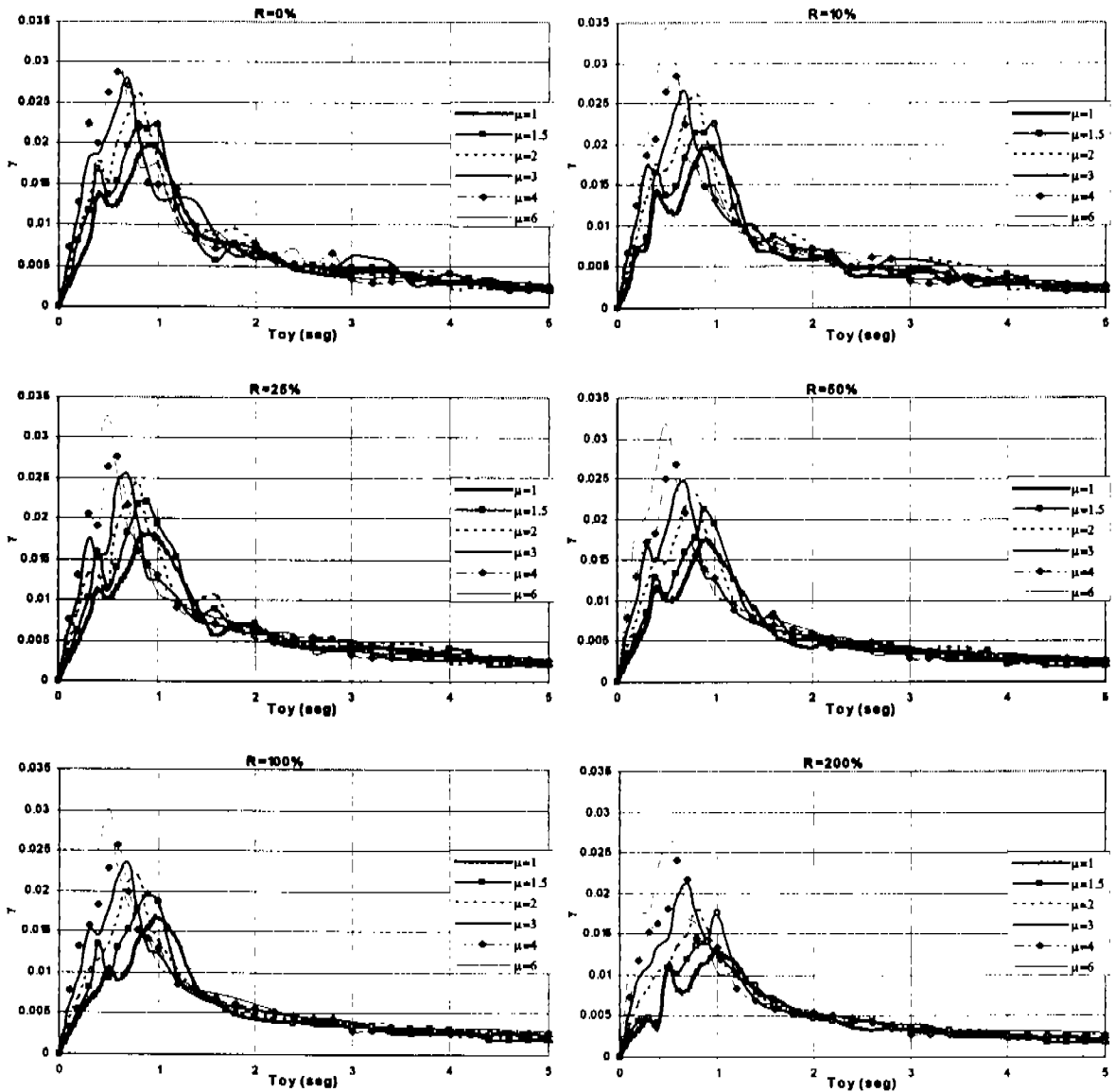


Figura V.8 Espectro de distorsión (Kobe)

Se observa en la figura V.8 que a medida que se incrementa la relación de resistencia las distorsiones decrecen para periodos fundamentales de 0.1 a 1.

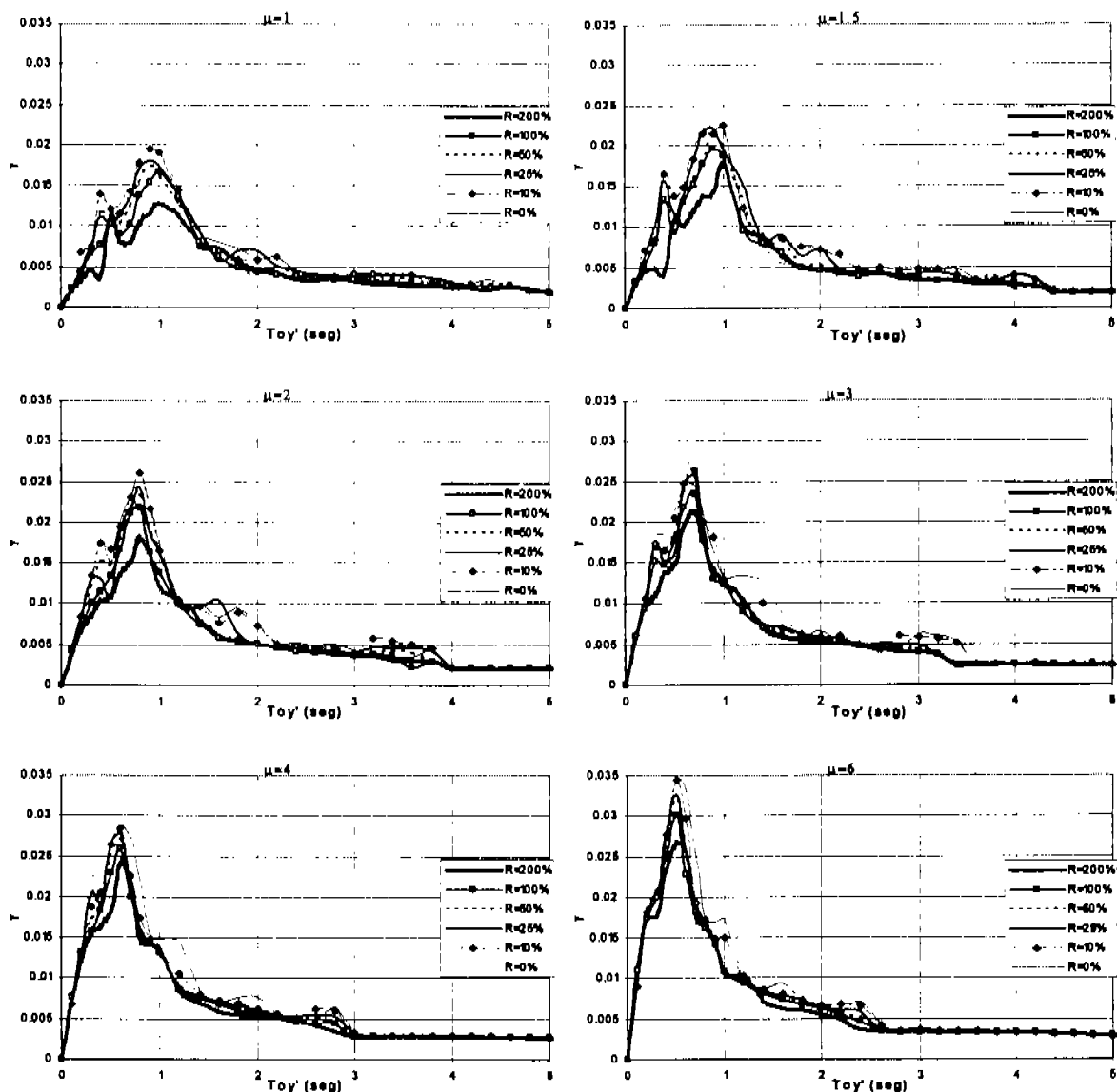


Figura V.9 Espectros de distorsión referidos al periodo De la estructura original (Kobe)

De la figura V.9 que muestra los espectros de distorsión, se deduce que el mayor beneficio de incrementar la relación de resistencia se da para el periodo de máxima respuesta el cual varía en función de la ductilidad objetivo de 0.9 a 0.5seg.

Como al incrementar la relación de resistencia no se modifica el periodo, los sistemas no modifican su periodo fundamental de vibrar.

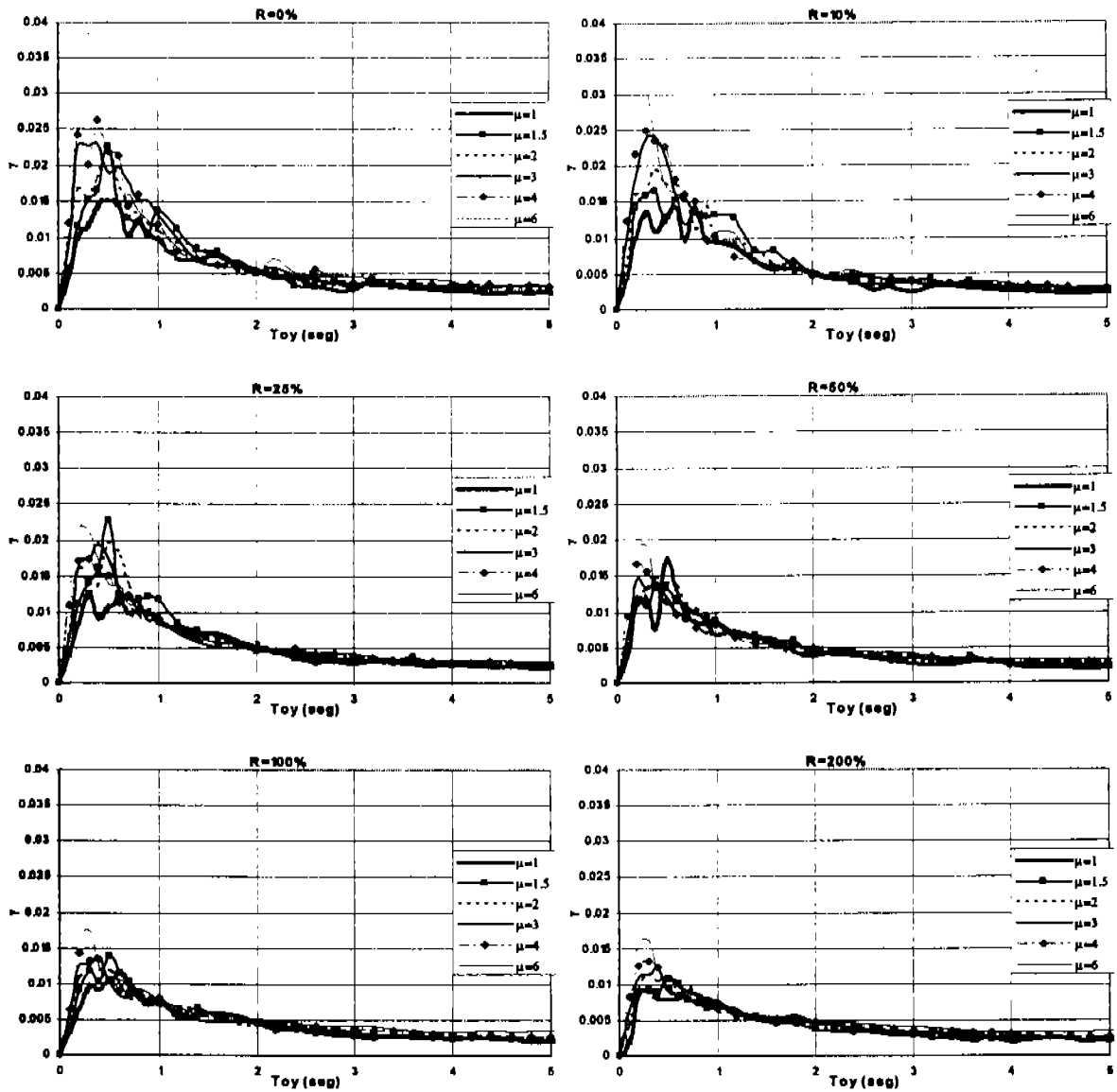


Figura V.10 Espectro de distorsión (Lolloe)

De observar la figura V.10 se puede decir que: a mayor incremento en la relación de resistencia las distorsiones disminuyen. En general las observaciones hechas para los espectros de distorsión son válidas para todos los espectros de distorsión, sólo hay que tomar en cada caso los valores que correspondan.

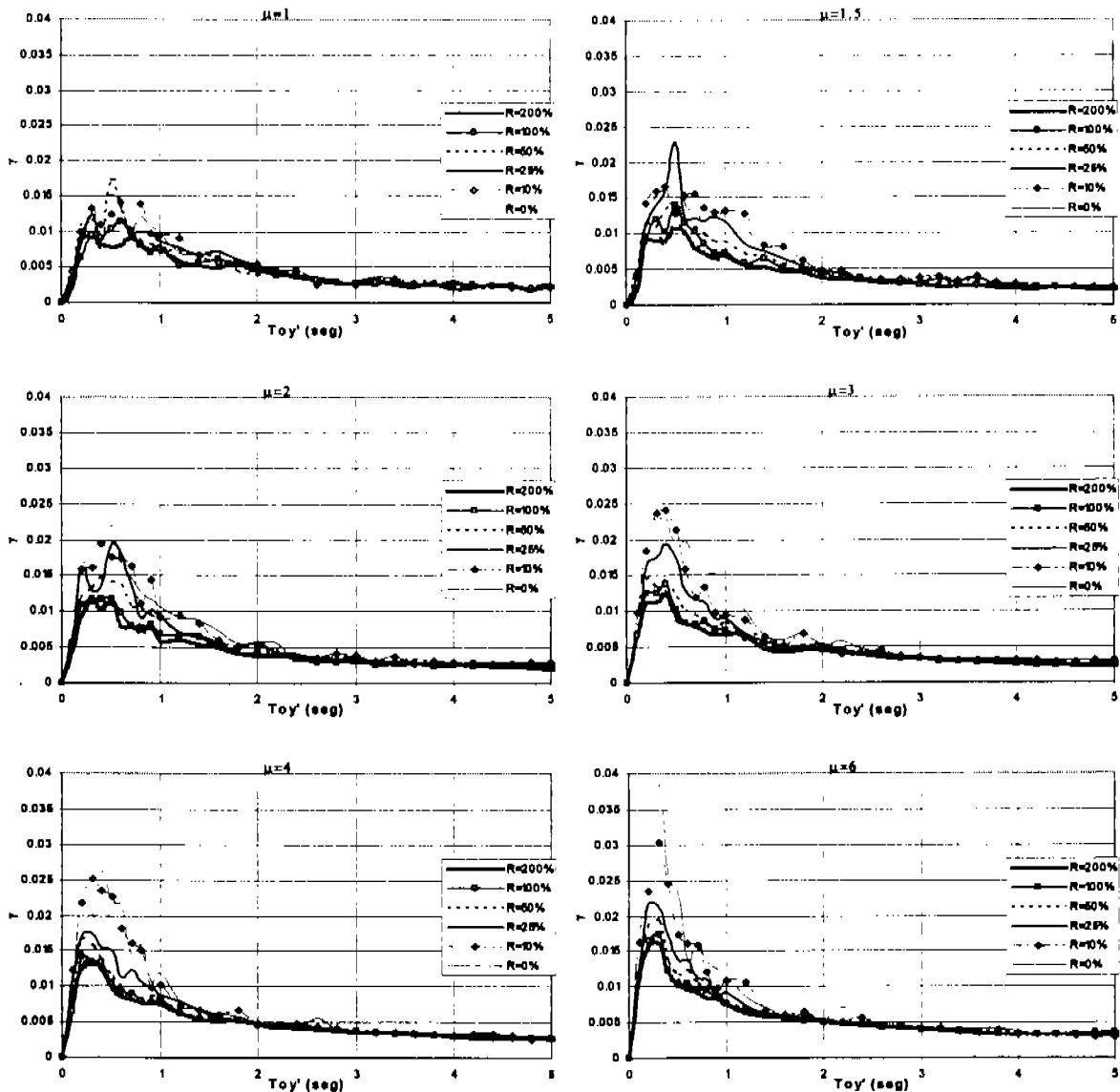


Figura V.11 Espectros de distorsión referidos al periodo de la estructura original (Lolloe)

De revisar la figura V.11 se puede decir que: para el grupo de sistemas que desarrollan ductilidades de 6, las distorsiones son las más grandes que se presentan, comparando con todas las ductilidades estudiadas. En general, las mayores distorsiones se presentan para periodos fundamentales del orden de 0.5seg.

Espectros de energía

Las observaciones descritas a continuación son válidas para las figuras V.12, V.13, V.14 y, V.15. Para un grupo de sistemas se presenta constante energía disipada, siempre y cuando la ductilidad no rebase la ductilidad de 4. A mayor ductilidad se disipa mayor cantidad de energía esta situación es congruente con los espectros de distorsión los cuales presentan mayores distorsiones para mayores ductilidades. Para ductilidades de 6 es claro que la disipación de energía es mayor para periodos cortos.

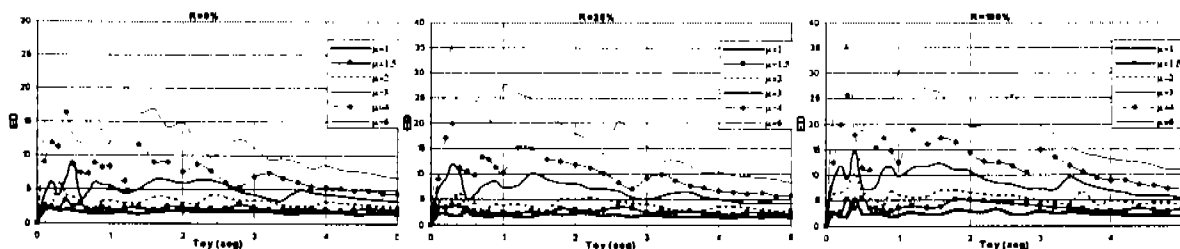


Figura V.12 Espectro de energía disipada total acumulada (Kobe)

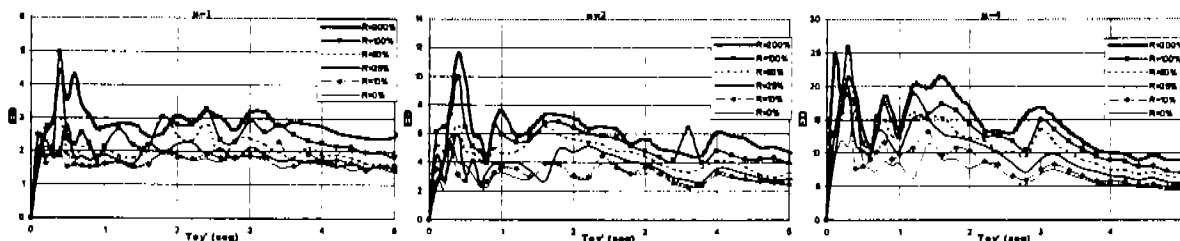


Figura V.13 Espectro de energía disipada total acumulada referida al periodo fundamental del sistema original, sin DDE, (Kobe)

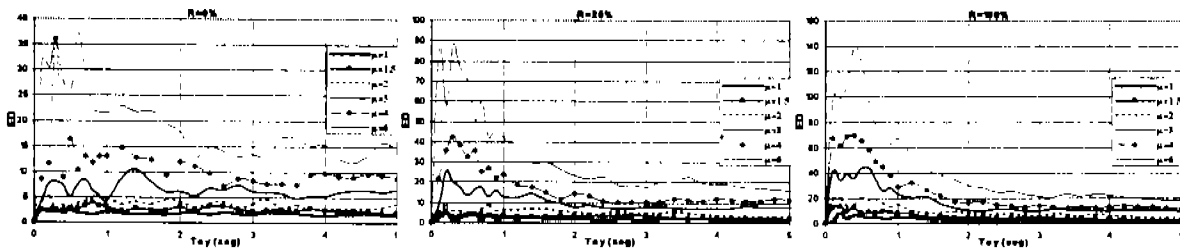


Figura V.14 Espectro de energía disipada total acumulada (Lolloe)

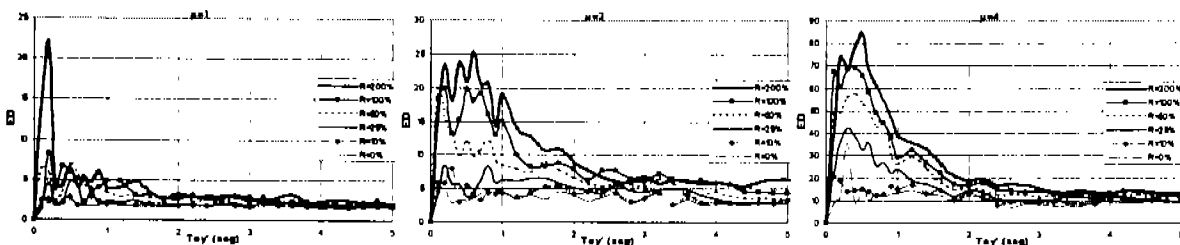


Figura V.15 Espectro de energía total acumulada referida al periodo fundamental del sistema original, sin DDE, (Lolloe)

V.2 PARA REGISTROS DE MOVIMIENTO CON PERIODO DOMINANTE LARGO

En este caso se considera que los registros de SCT (1985, Caleta de campo, Michoacán Earthquake) y Tohoku (1978, Miyagi-ken-oki Earthquake) representan registros que generan respuesta con periodo dominante largo. Las observaciones hechas en el subcapítulo “V.2 para registros de movimiento con periodo dominante corto”, son válidas en lo general para los espectros mostrados a continuación, entonces, para no repetir textos, se omiten las generalidades descritas anteriormente, sólo restando comentar particularidades cuantitativas.

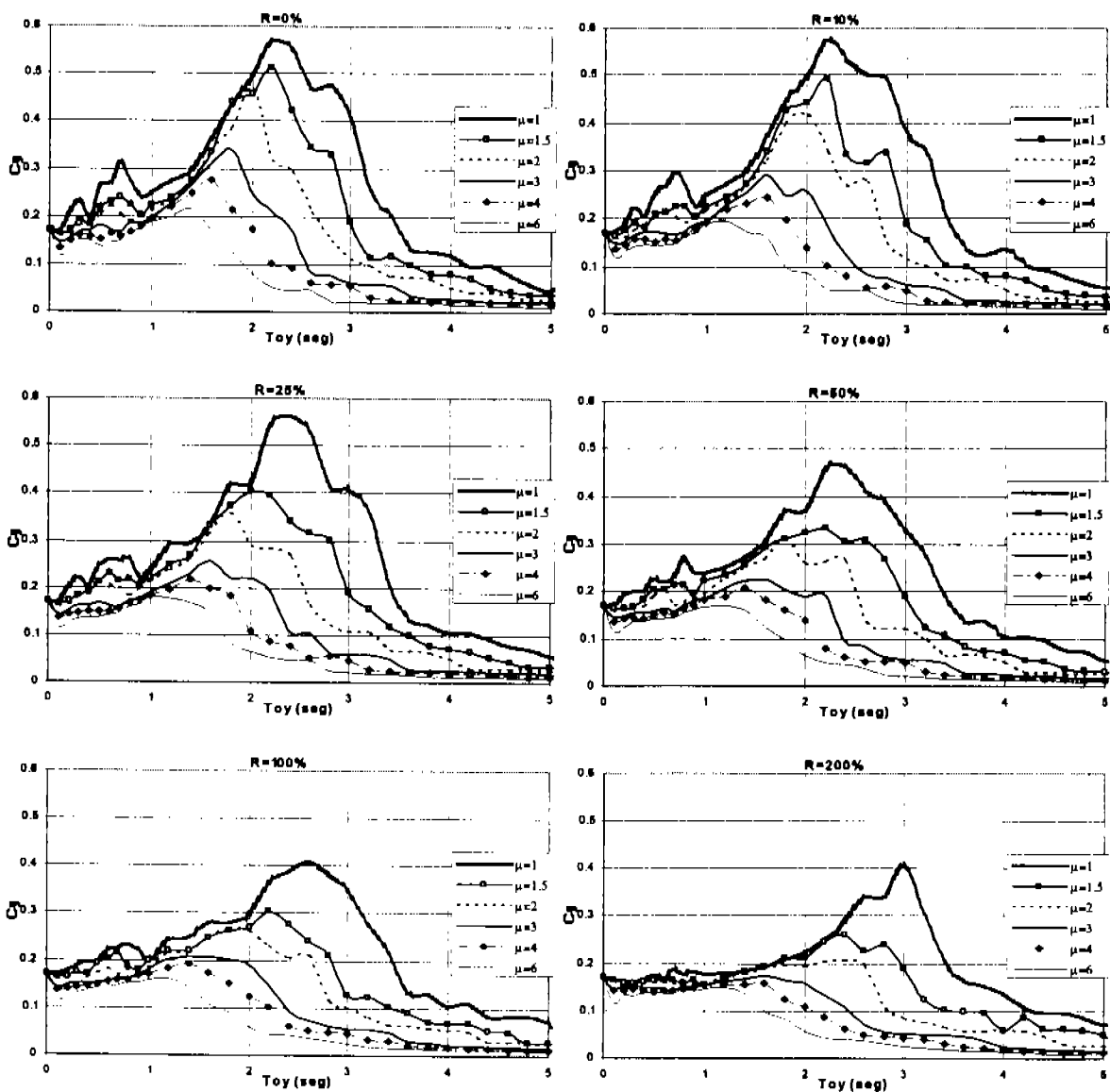


Figura V.16 Efecto de la ductilidad para cada incremento de resistencia (SCT85)

Para el caso particular de los espectros generados a partir del registro de SCT85, se observa en la figura V.16 que la variación del periodo de máxima respuesta cambia más que en los demás espectros estudiados, por ejemplo para la estructura original y una ductilidad de uno el periodo de máxima respuesta se presenta en 2.3seg., reduciéndose hasta 1.45seg para una ductilidad de 6. La variación es dependiente de la ductilidad e independiente del nivel de incremento de la relación de resistencia.

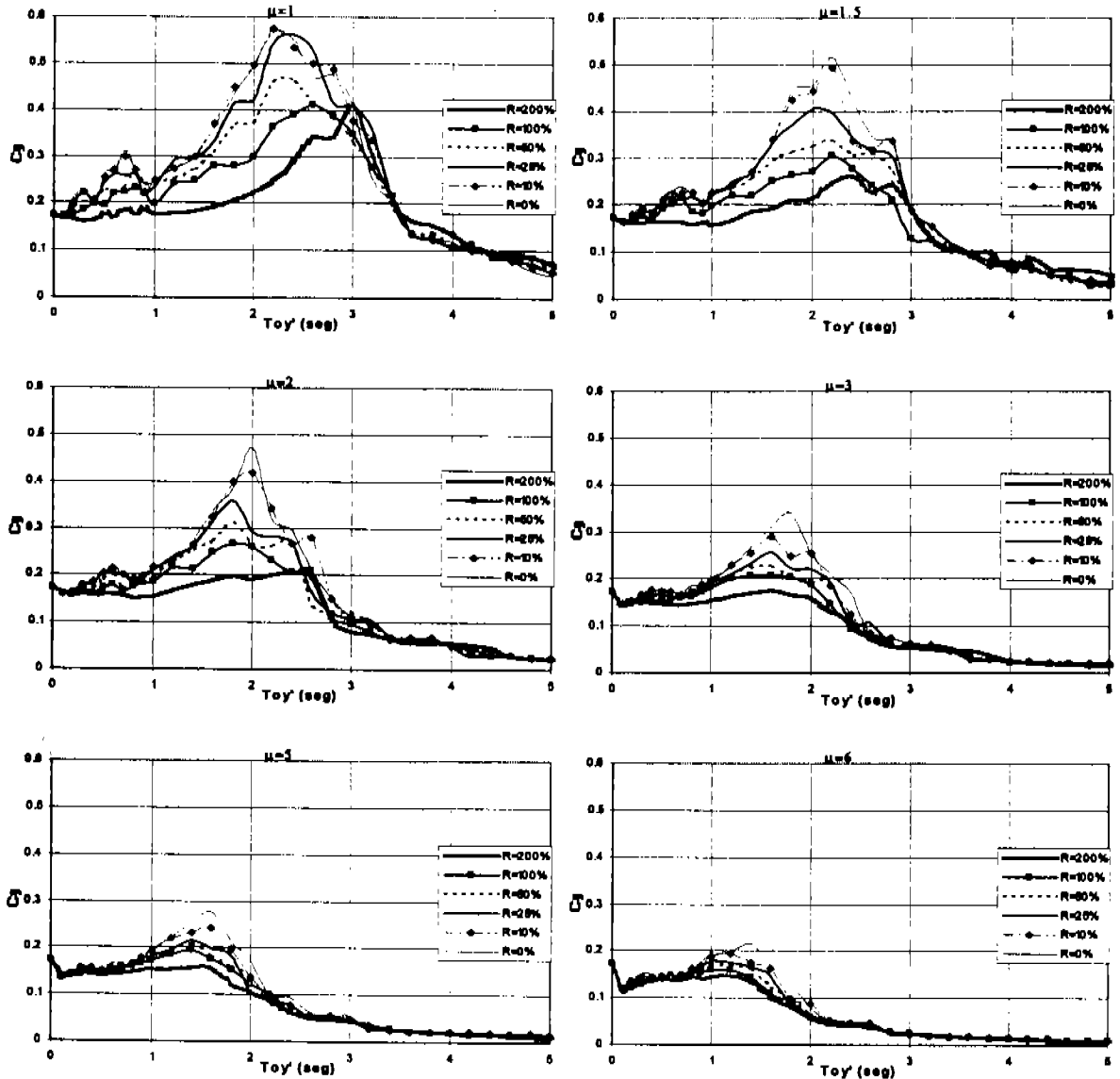


Figura V.17 Efecto de la resistencia para cada incremento de ductilidad (SCT85)

En la figura V.17 se observa que no se presentan zonas de periodos para las cuales el incremento de la relación de resistencia demande mayores resistencia laterales, y sin que importe el nivel de ductilidad.

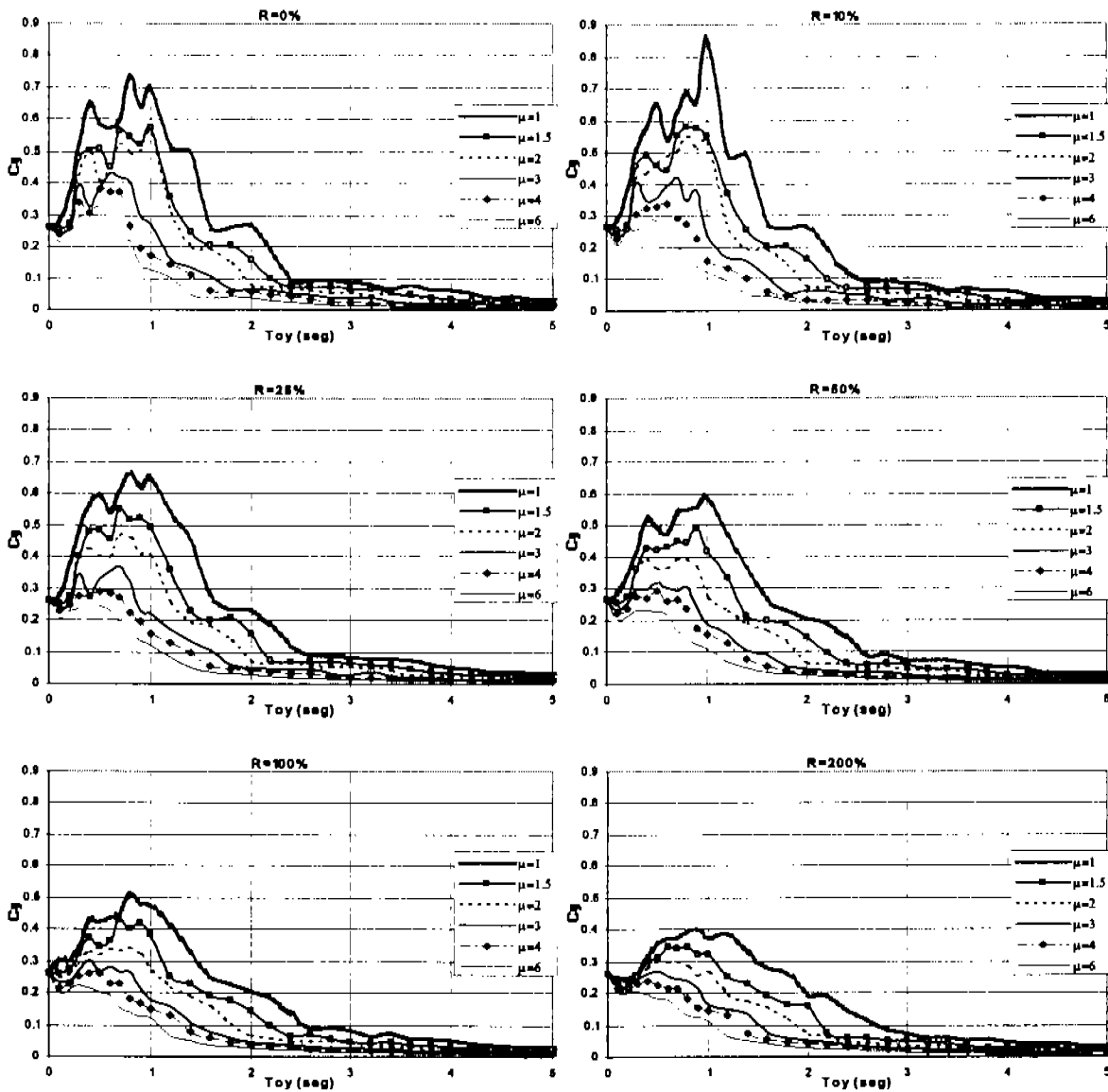


Figura V.18 Efecto de la ductilidad para cada incremento de resistencia (Tohoku)

En la figura V.18 se observa la variación del periodo de máxima respuesta que va de 0.5 a 1seg. dependiendo de la ductilidad. También se ve comprueba que a mayor ductilidad los sistemas demandan menos resistencia lateral, condición que resulta obvia. Para periodos mayores a 2.5seg. el cambio de ductilidad no genera cambio significativo en la resistencia lateral.

Resulta conveniente recordar que el efecto observado es válido para estructuras convencionales con excelente capacidad de deformación sin perdida importante de rigidez y resistencia cuyo comportamiento esté regido por flexión y para estructuras con DDE.

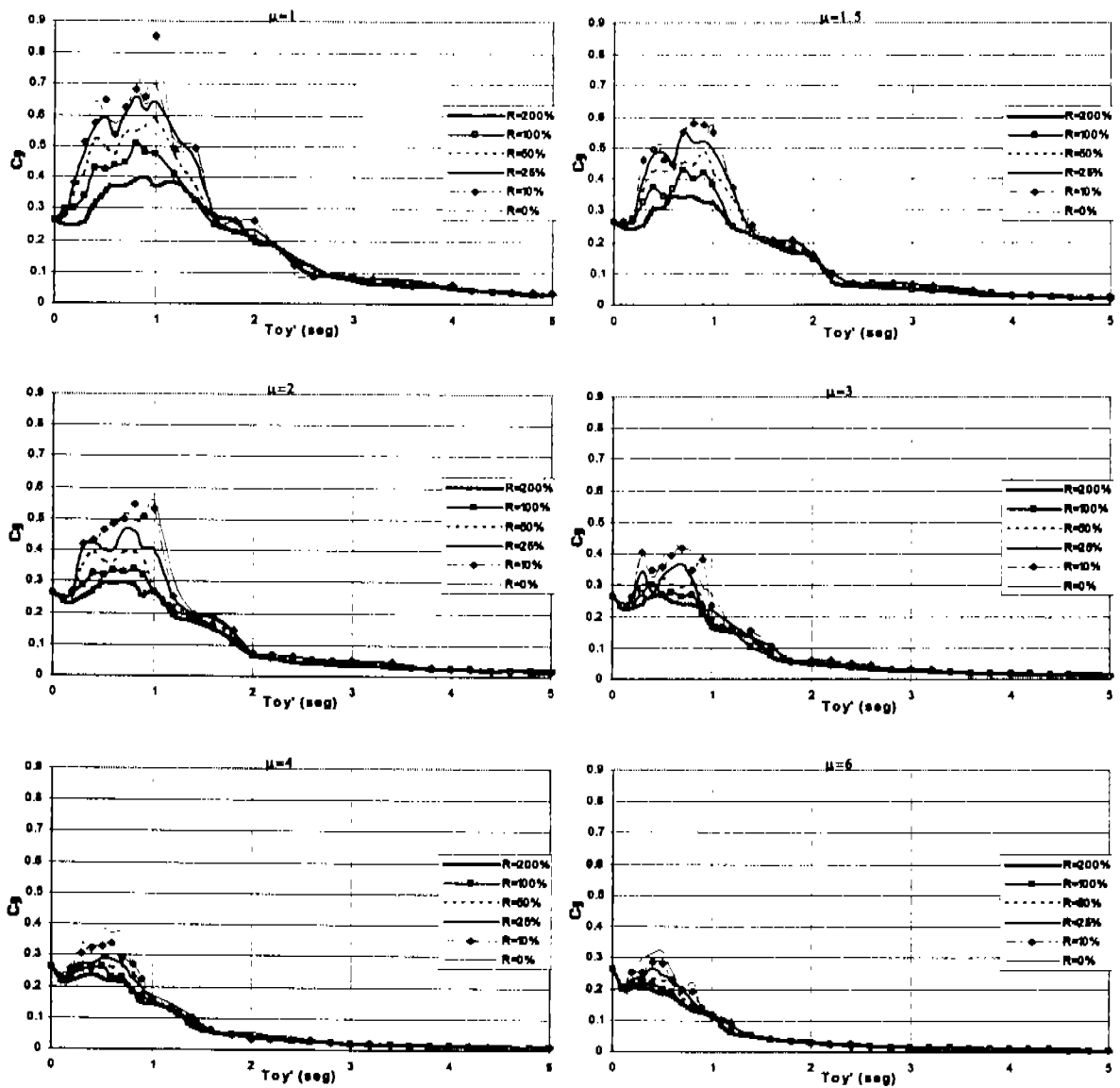


Figura V.19 Efecto de la resistencia para cada incremento de ductilidad (Tohoku)

De estudiar la figura V.19 se concluye que el incrementar la relación de resistencia genera reducciones significativas para periodos cercanos a los periodos de máxima respuesta, y para el resto de periodos no hay cambio, es decir, la demanda de resistencia lateral no cambia por incrementar la relación de resistencia, siendo esto válido para cualquier nivel de ductilidad.

Espectros de distorsión de entrepiso

Ya se ha explicado en el capítulo anterior como se estiman las alturas de los sistemas, y por tanto, se conocen las distorsiones de los sistemas que poseen la resistencia lateral, tal que se alcancen las ductilidades en estudio.

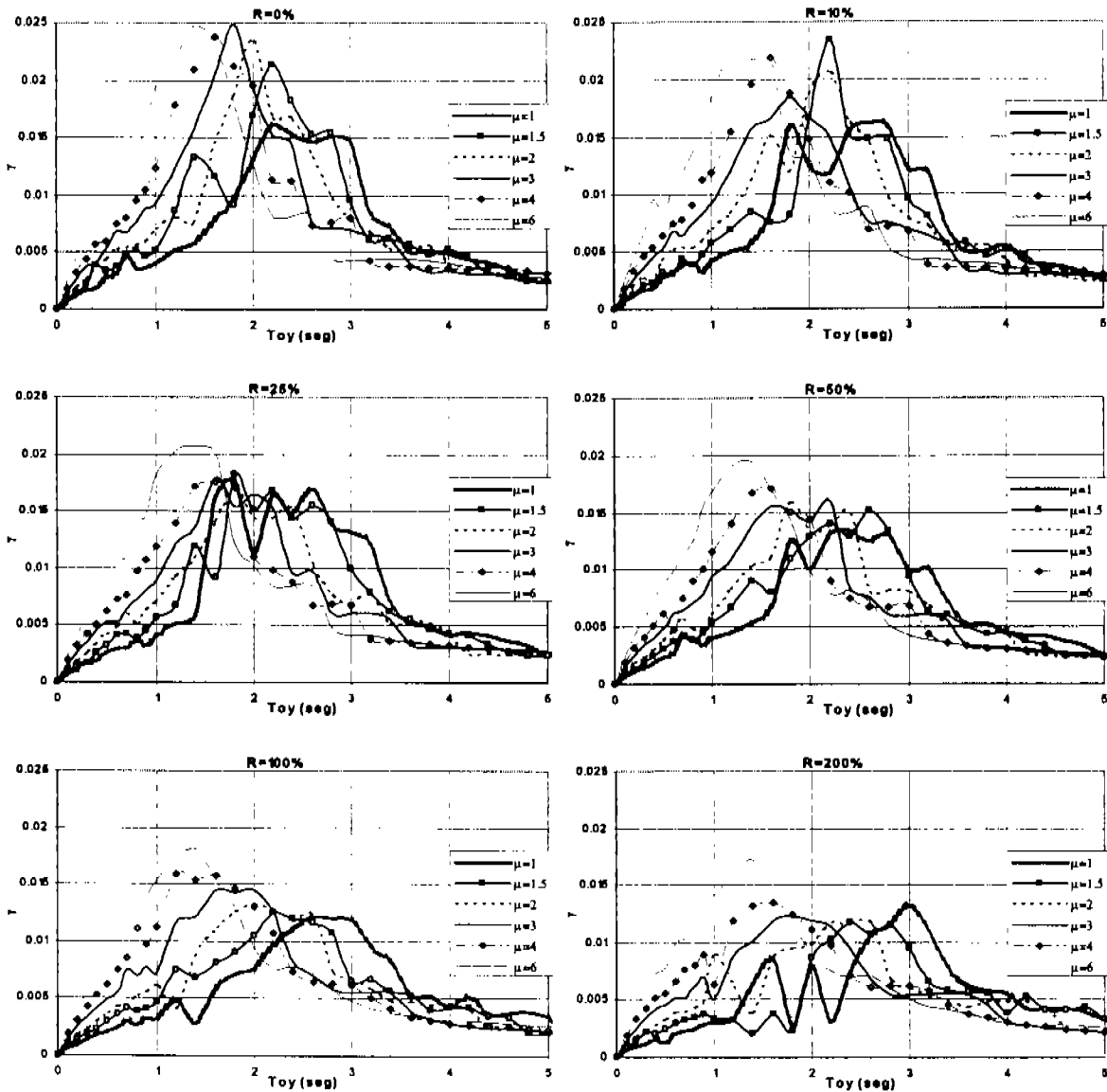


Figura V.20 Espectro de distorsión (SCT85)

Se encuentra en la figura V.20 que para periodos de 0.1 a 1.5seg. el reducir la ductilidad genera una reducción en las distorsiones. Para periodos de entre 1.5 a 2.7seg. no hay una tendencia definida a

incrementar o a reducir las distorsiones, esto porque depende del nivel de ductilidad y del periodo. Para periodos comprendidos entre 2.7 y 5seg. el incrementar la ductilidad genera reducciones en las distorsiones.

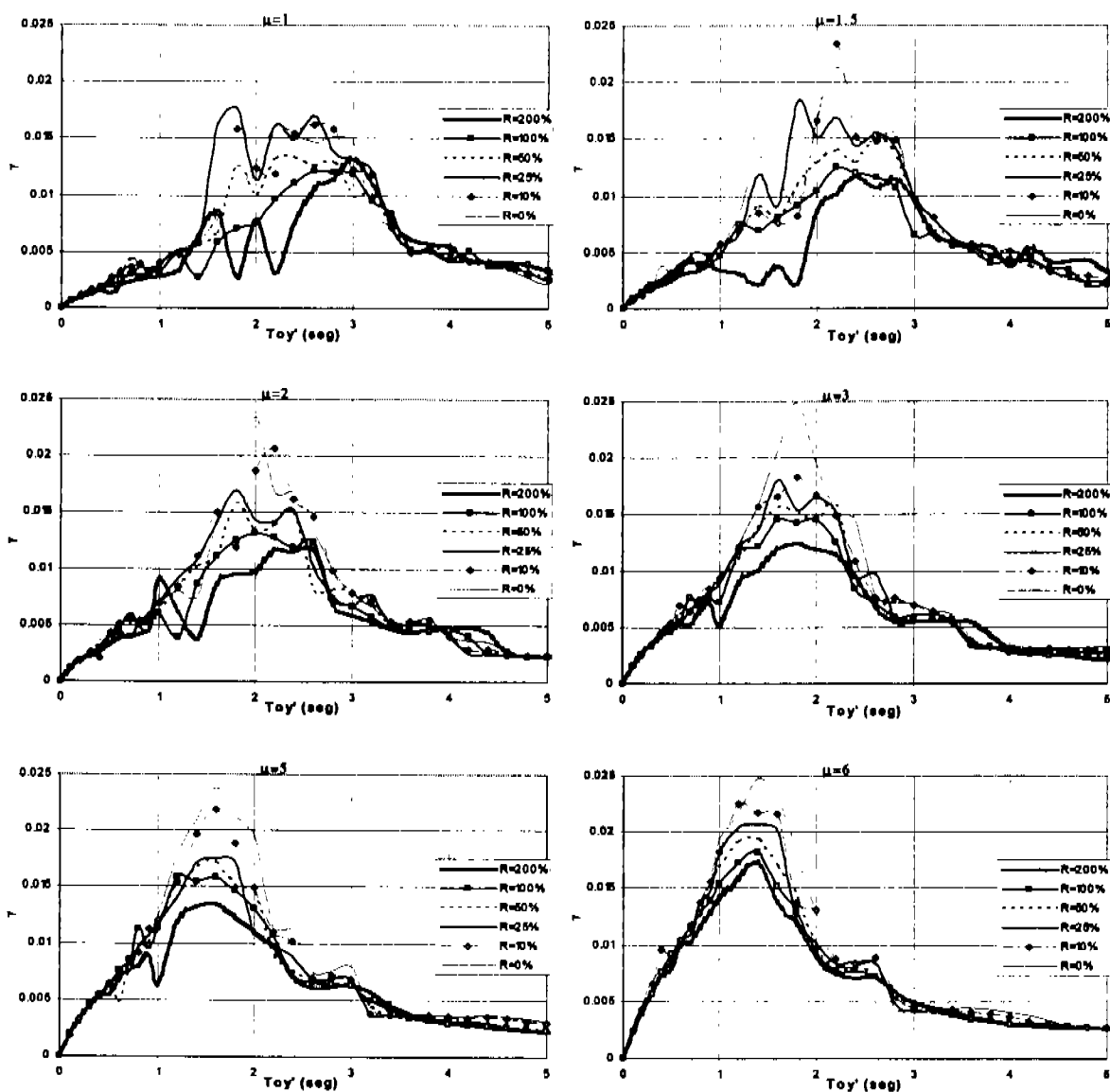


Figura V.21 Espectros de distorsión referidos al periodo de la estructura original (SCT85)

De la figura V.21 se deduce que, en general, al incrementar la relación de resistencia hay una reducción en las distorsiones para periodos cercanos al periodo de máxima respuesta ante la distorsión.

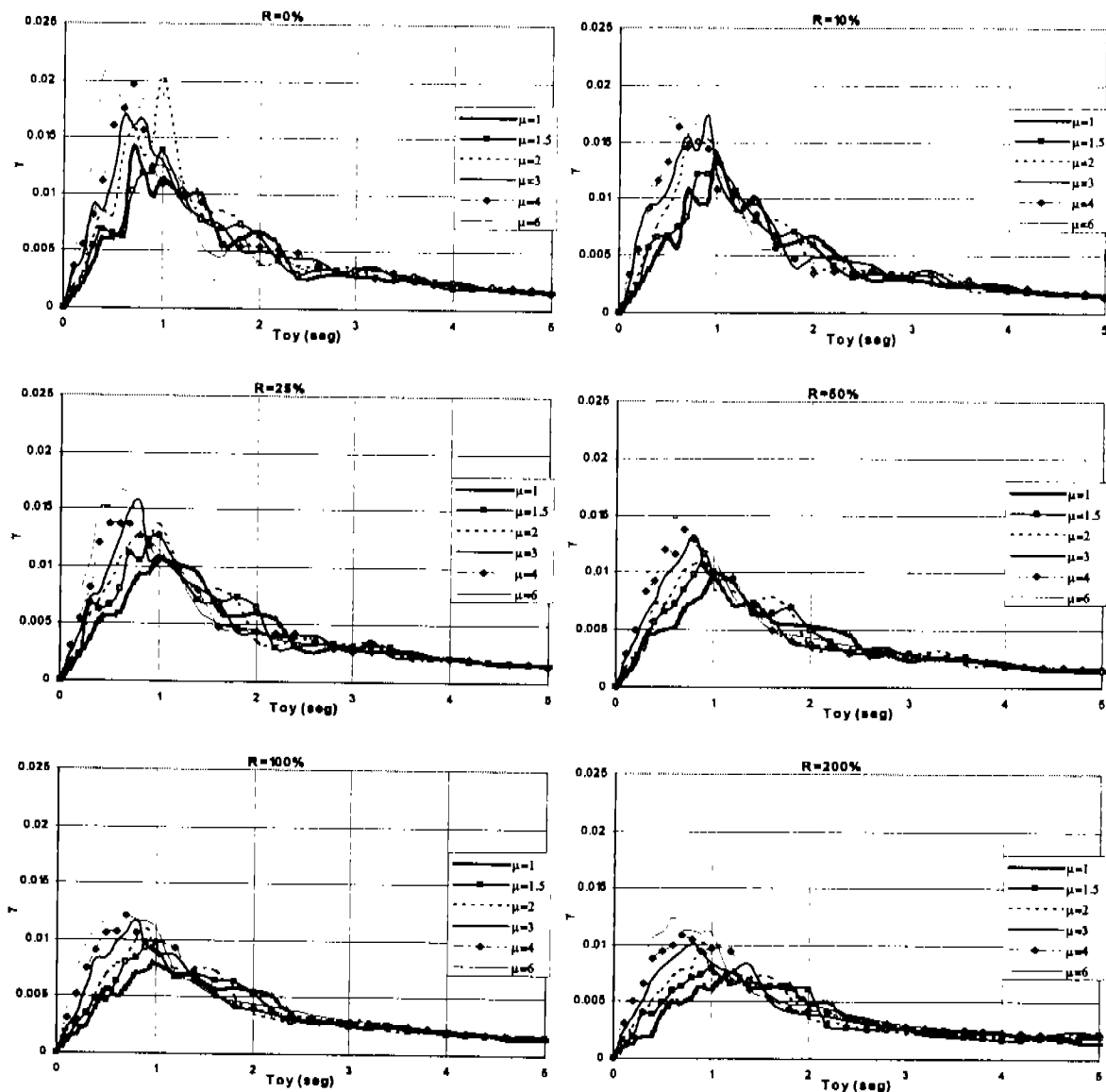


Figura V.22 Espectro de distorsión (Tohoku)

Del conjunto de espectros representados en la figura V.22 se deduce que del universo de estructuras aquí analizadas, las que reducen sus distorsiones con forme la ductilidad se reduce hasta 1, son los sistemas con periodo entre 0.1 y 0.7seg aproximadamente sin intervención del incremento en la relación de resistencias. Además es importante resaltar que para los sistemas con incremento en la relación de resistencia las distorsiones se reducen al orden de la mitad de las distorsiones obtenidas para el conjunto de sistemas de referencia.

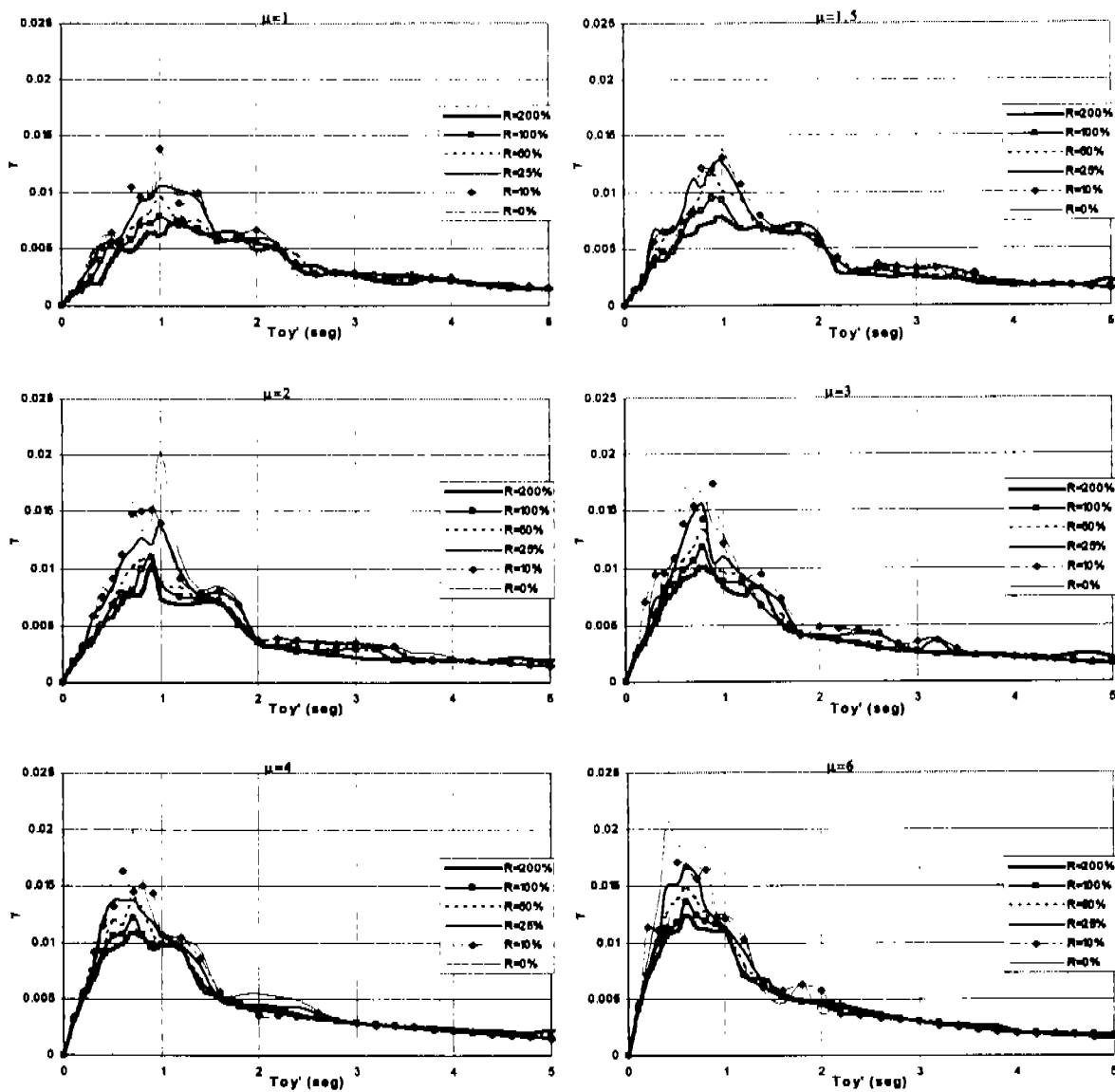


Figura V.23 Espectros de distorsión referidos al periodo de la estructura original (Tohoku)

Al observar la figura V.23 se encuentra que el periodo de máxima respuesta ante la distorsión fluctúa entre 0.5 y 1seg. dependiendo del nivel de ductilidad. Y justo para estos periodos se presenta una reducción de las distorsiones a medida que se incrementa la relación de resistencias.

Espectro de energía

Los espectros de energía elaborados en este trabajo son espectros de energía disipada total acumulada, de los cuales se infiere que a mayor energía disipada mayor daño en las estructuras convencionales y para la estructuras con DDE comportamiento controlado por los DDE.

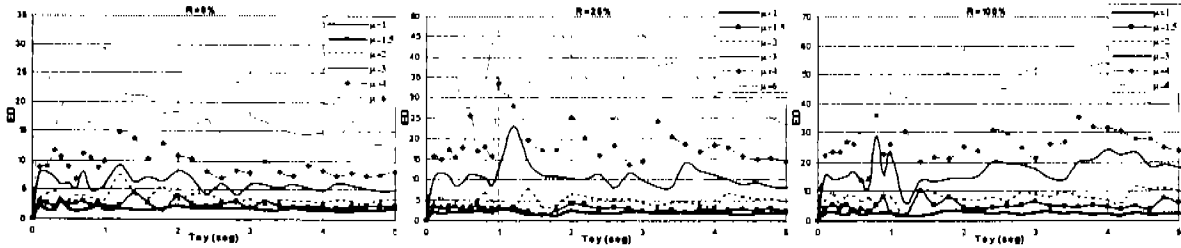


Figura V.24 Espectro de energía disipada total acumulada (SCT85)

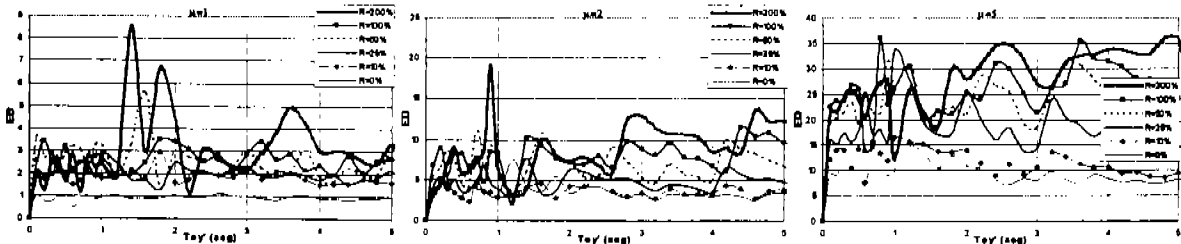


Figura V.25 Espectro de energía disipada total acumulada referida al periodo fundamental del sistema original, sin DDE, (SCT85)

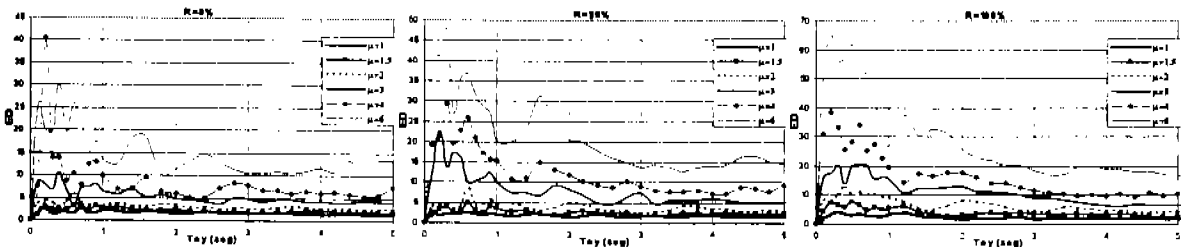


Figura V.26 Espectro de energía disipada total acumulada (Tohoku)

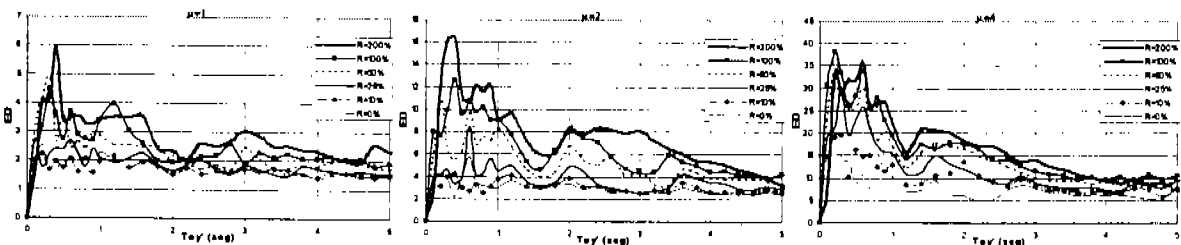


Figura V.27 Espectro de energía total acumulada referida al periodo fundamental del sistema original, sin DDE, (Tohoku)

V.3 PARA REGISTROS CON EXCITACIÓN EN SUELO DURO

Para este caso se toman los registros de El Centro (1940, Imperial Valley Earthquake) y Taft (1952, Kem Country Earthquake) representativos de las excitaciones en suelo duro, pero son registros que presentan características diferentes, como se puede ver en la tabla II.1, por lo que se infiere deben ser tomados en cuenta en este trabajo.

Las observaciones hechas para los espectros de resistencia lateral antes mencionadas en este capítulo son aplicables a los espectros de este subcapítulo, en cuanto a las tendencias generales. Aún así, en lo sucesivo se harán comentarios adicionales y/o particulares para los siguientes espectros.

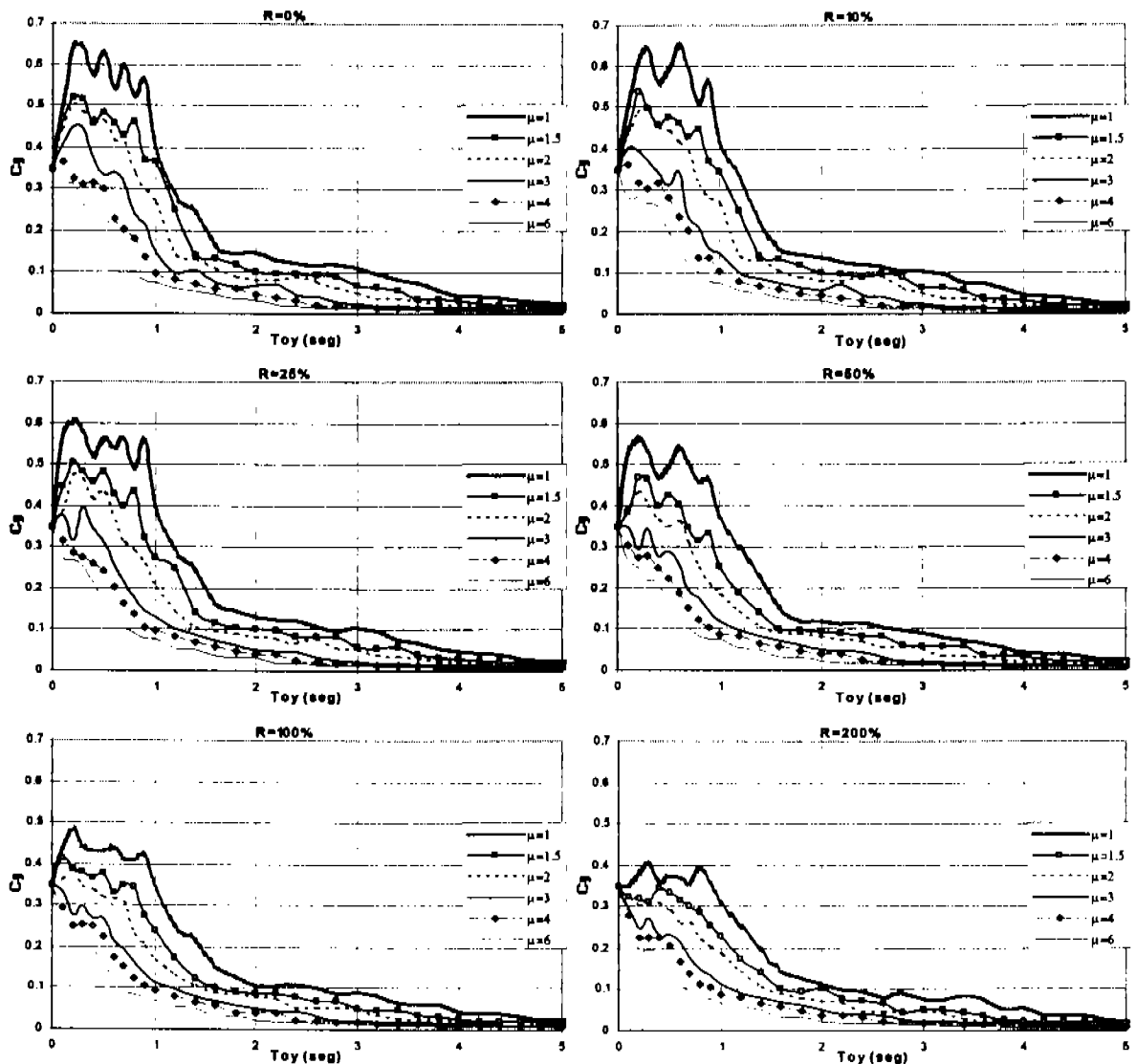


Figura V.28 Efecto de la ductilidad para cada incremento de resistencia (El Centro)

En la figura V.28 se pueden ver los requerimientos de resistencia lateral para lograr las ductilidades deseadas en este estudio de diferentes grupos de sistemas.

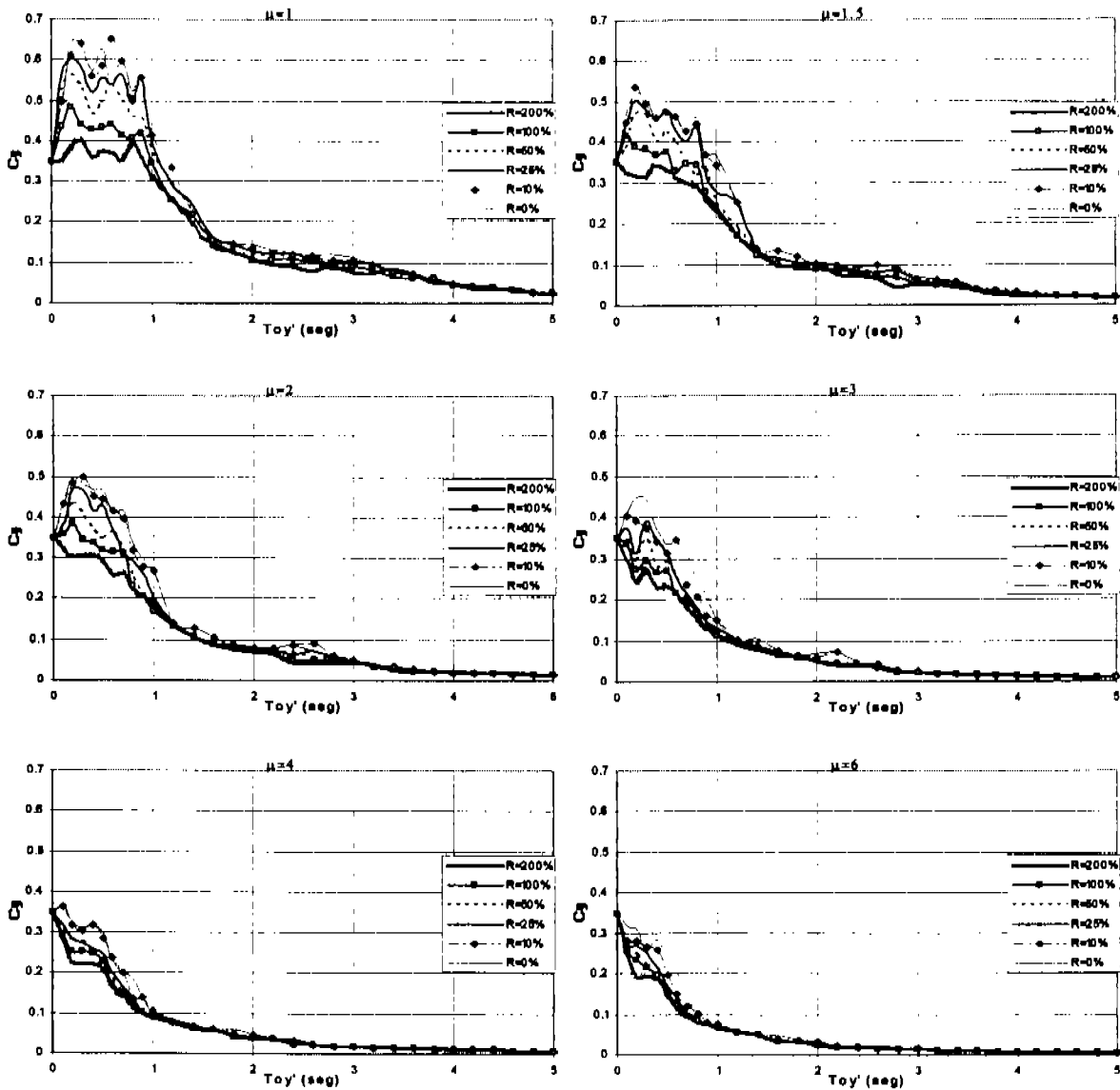


Figura V.29 Efecto de la resistencia para cada incremento de ductilidad (El Centro)

De los espectros mostrados en la figura V.29 se puede ver que para periodos mayores a 1.5seg. en los espectros de ductilidad unitaria no hay cambio en la demanda de resistencia lateral. Esta tendencia está presente en todos los espectros, sólo que la magnitud y el periodo cambia dependiendo de la ductilidad.

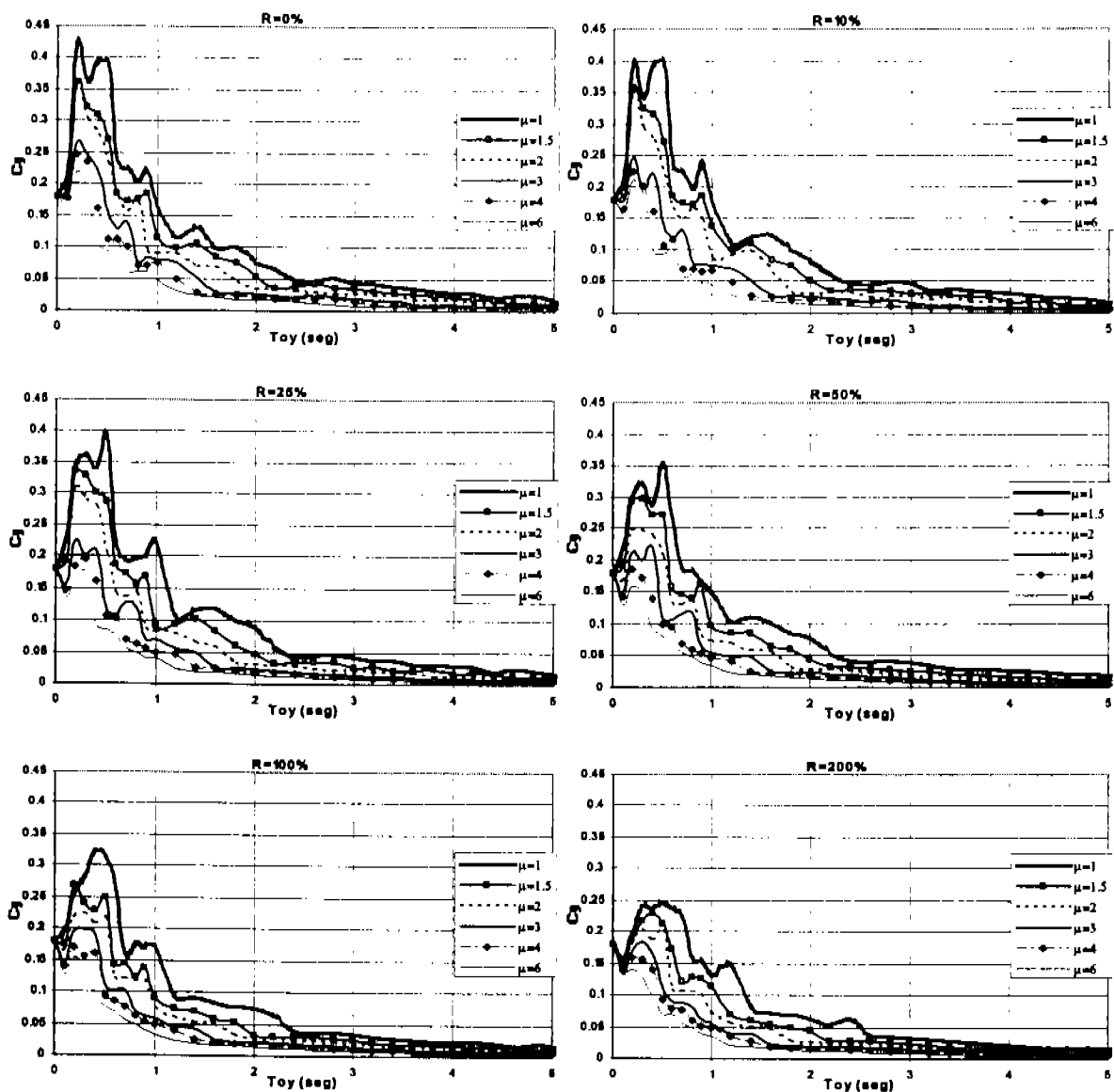


Figura V.30 Efecto de la ductilidad para cada incremento de resistencia (Taft)

En la figura V.30 se puede ver que el incremento en la ductilidad no genera cambio significativo en la demanda de resistencia lateral para periodos mayores a 2seg. este efecto prevalece constante a pesar de incrementar la relación de resistencia. Por incremento en la relación de resistencia se presenta una reducción en la demanda de la resistencia lateral.

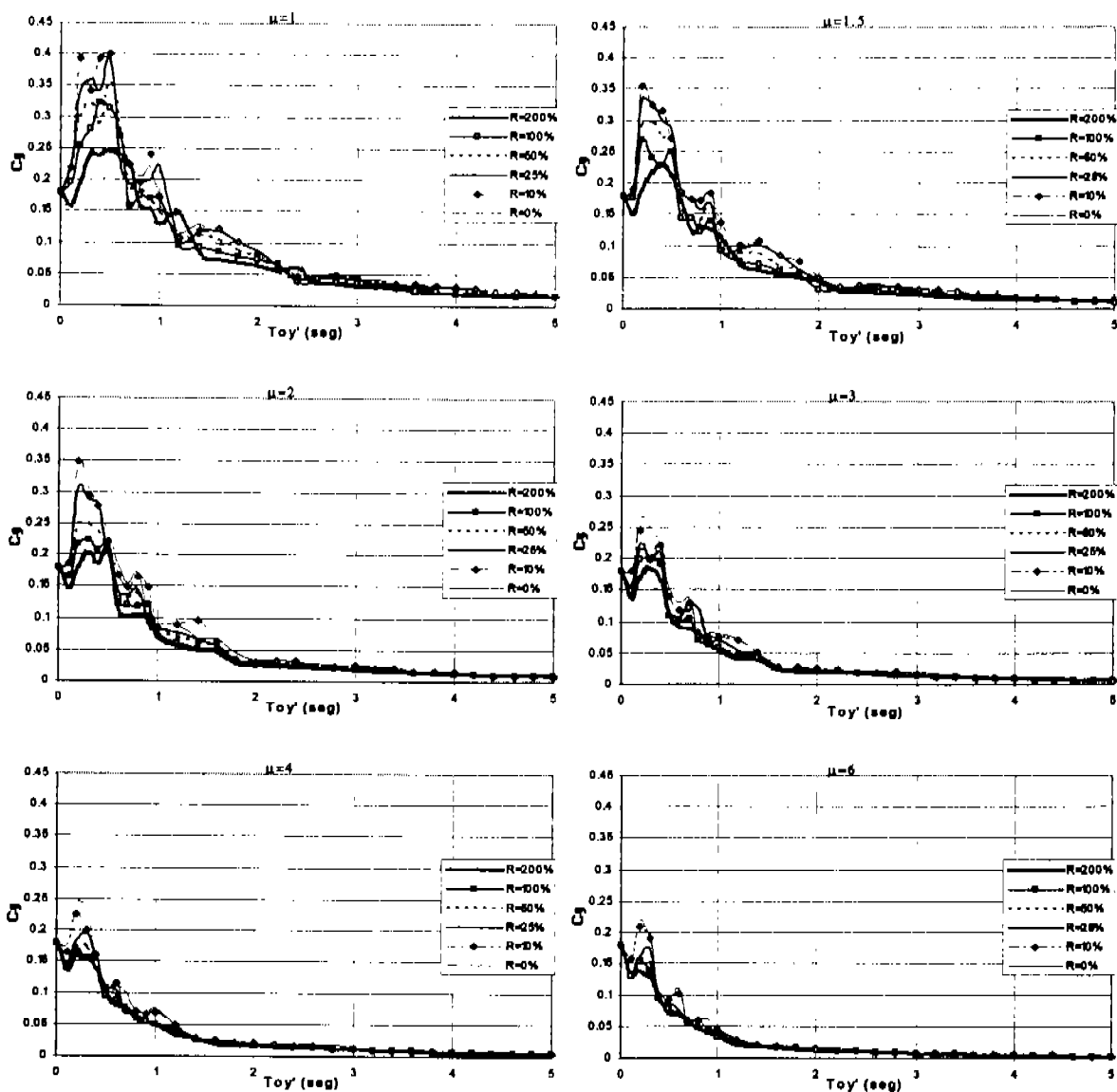


Figura V.31 Efecto de la resistencia para cada incremento de ductilidad (Taft)

En la figura V.31 se puede ver que el incremento en la relación de resistencia produce reducciones en la demanda de resistencia lateral, sólo que en este caso, Taft, la reducción en la resistencia lateral es pequeña en general y aún más pequeña para ductilidades de 3 en adelante, a tal grado que puede ser mejor el ignorar la reducción.

Espectros de distorsión de entripiso

En los párrafos anteriores y en el capítulo IV se explica como se obtienen los espectros de distorsión, por lo tanto únicamente resta hacer anotaciones especiales o particulares para ampliar aún más la descripción de los espectros de distorsión.

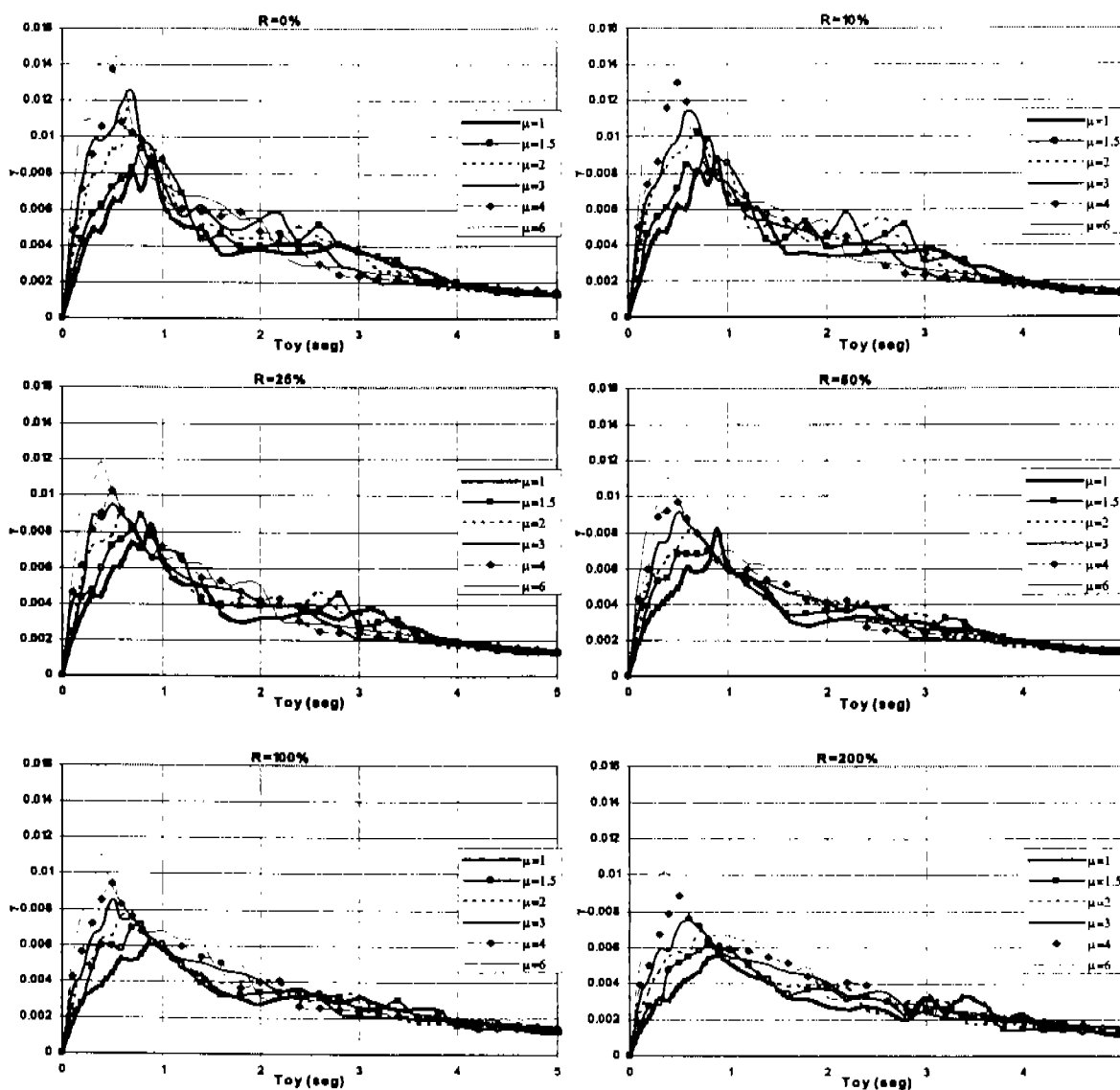


Figura V.32 Espectro de distorsión (El Centro)

En la figura V.32 se aprecia una tendencia a reducir las distorsiones a medida que se reduce la ductilidad en el rango de periodos de 0.1 a .8seg. de ahí en adelante no hay cambio significativo.

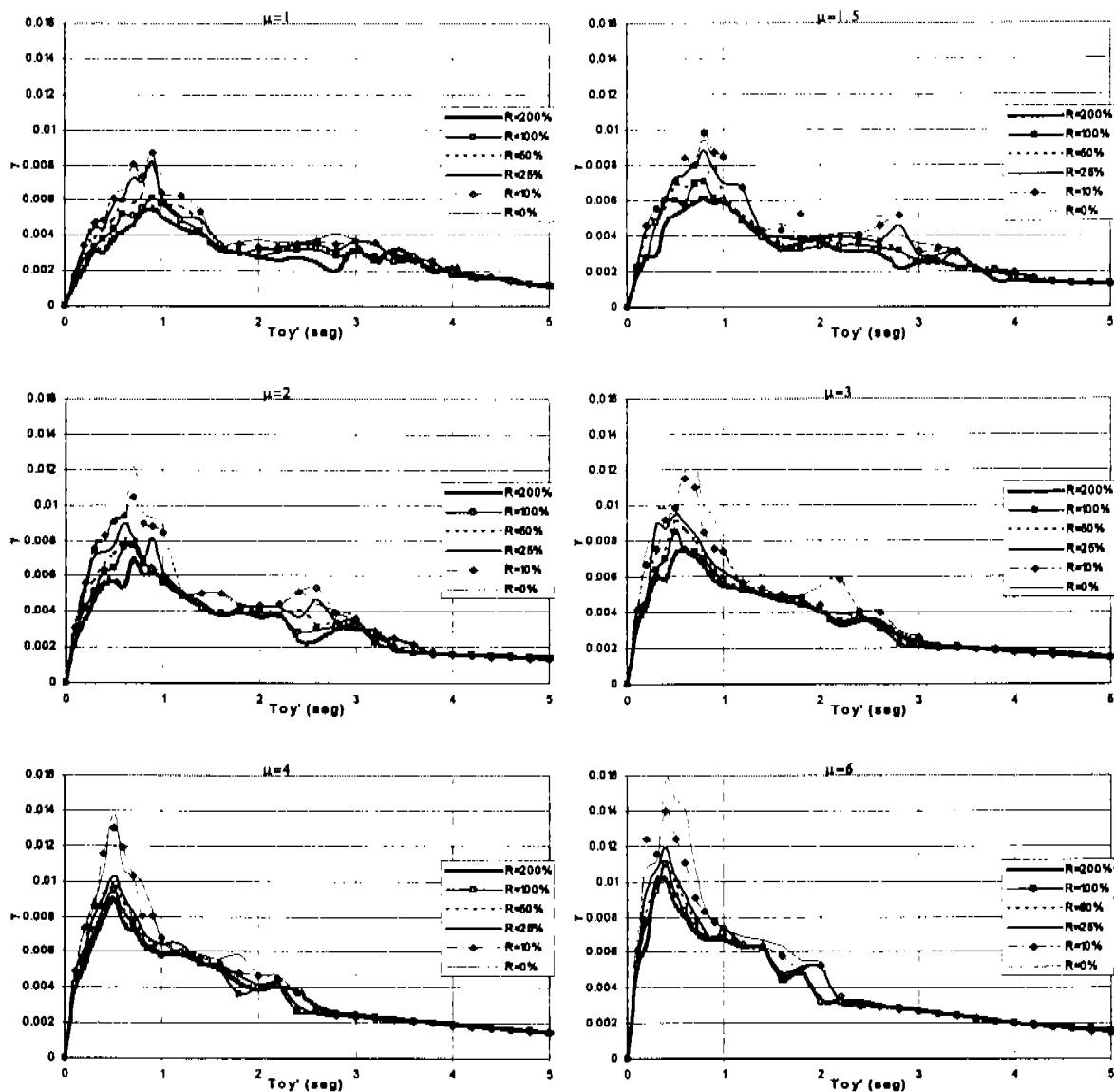


Figura V.33 Espectros de distorsión (El Centro)

De la figura V.33 se deduce que para periodos mayores a 1.5seg. no hay cambio significativo en la distorsión, mientras que para periodos cortos si hay reducciones por incremento de resistencia.

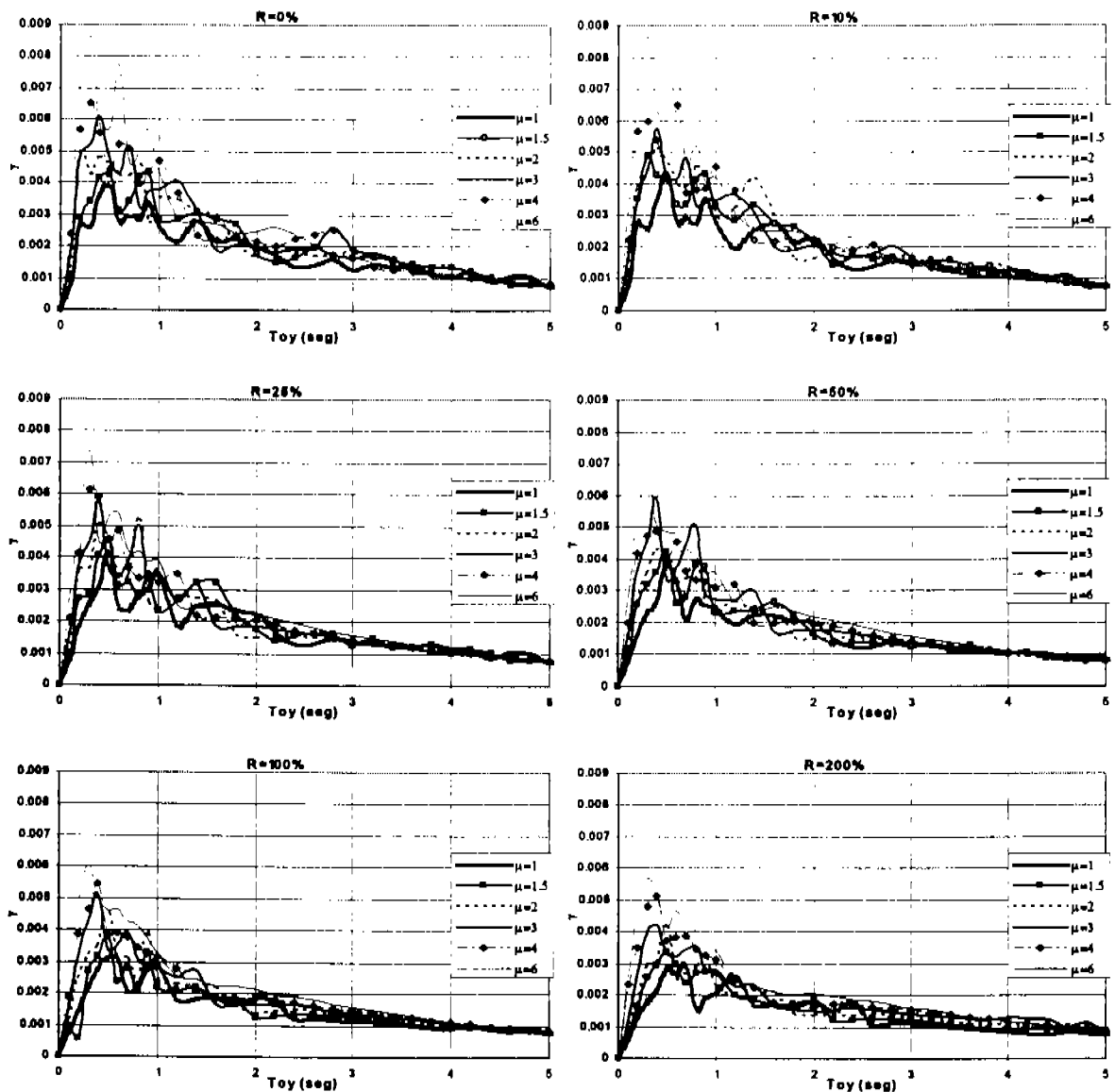


Figura V.34 Espectro de distorsión (Taft)

En la figura V.34 se muestran los espectros de distorsión de donde se aprecia una tendencia a incrementar la distorsión a medida que se incrementa la ductilidad, pero no se presentan zonas claras o definidas donde se pueda decir con certeza que exista incremento de distorsión al incrementar la ductilidad.

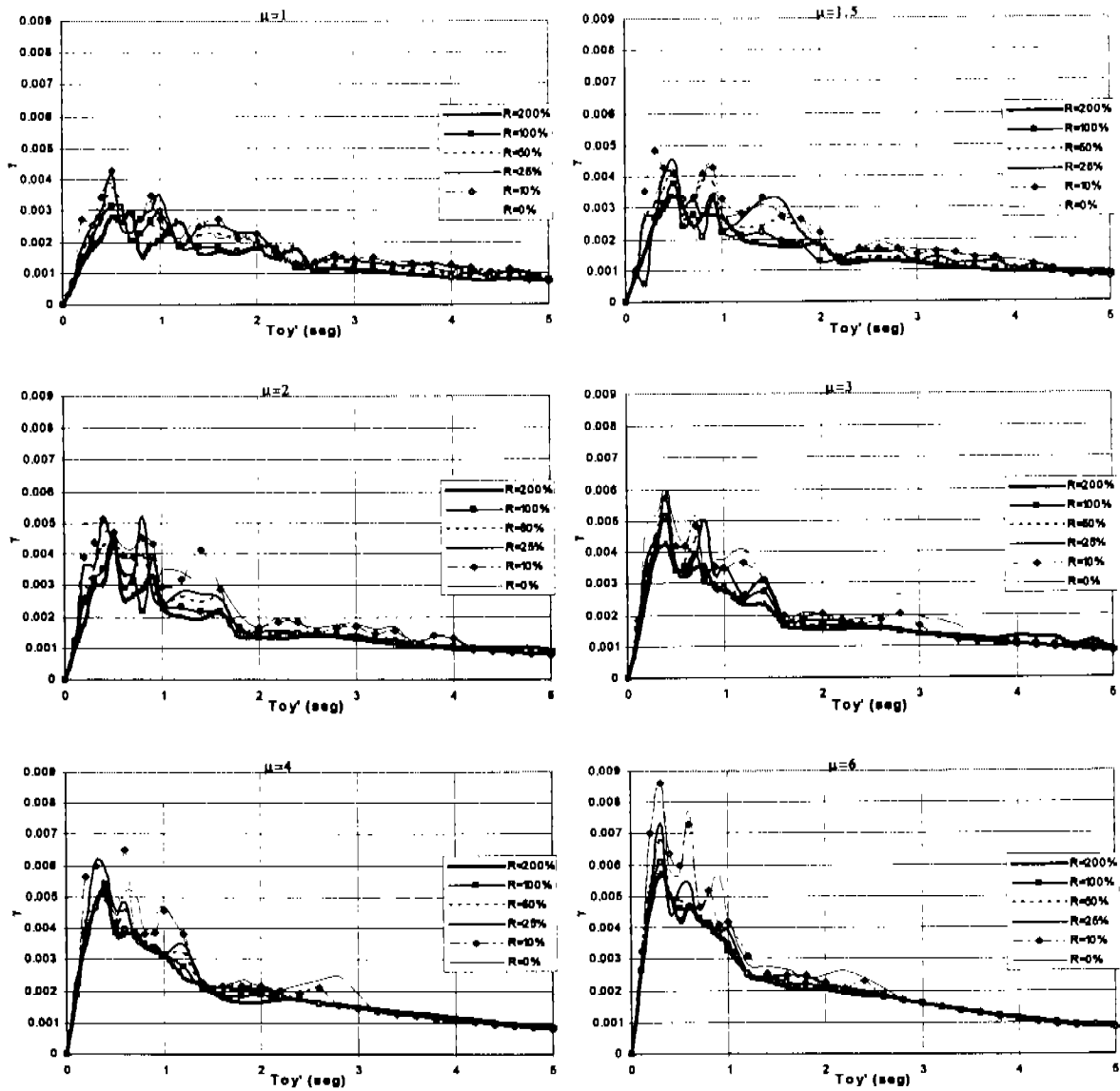


Figura V.35 Espectros de distorsión referidos al periodo de la estructura original (Taft)

La figura V.35 permite ver los espectros de distorsión de donde se puede decir que no hay una clara ventaja por incrementar la relación de resistencia, sólo se puede decir, en este sentido, que hay una tendencia a reducirse las distorsiones a medida que se incrementa la relación de resistencia.

Espectros de energía

Todo lo que se ha mencionado anteriormente, en los apartados referentes a espectros de energía, aplica cabalmente para los siguientes espectros, por lo tanto y para no repetir textos, se omite comentar más sobre estos espectros.

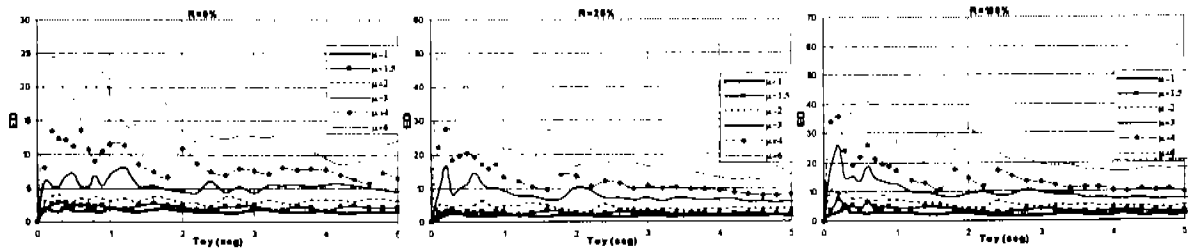


Figura V.36 Espectro de energía disipada total acumulada (El Centro)

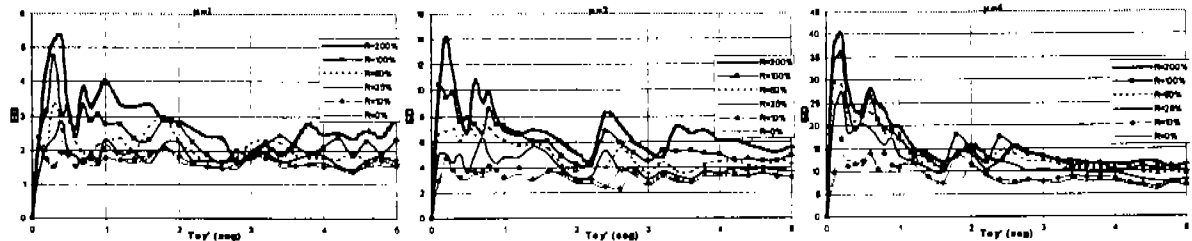


Figura V.37 Espectro de energía disipada total acumulada referida al periodo fundamental del sistema original, sin DDE, (El Centro)

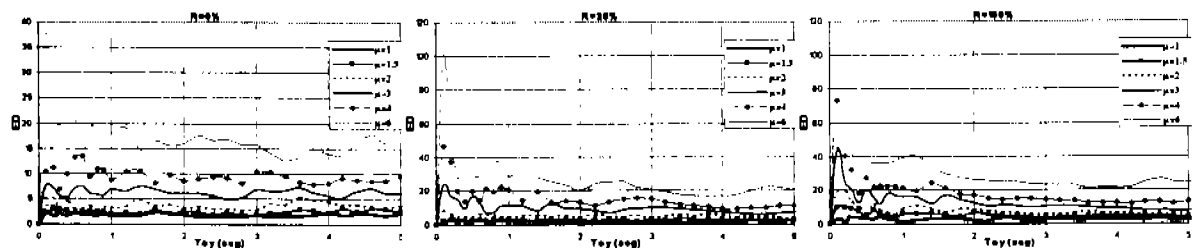


Figura V.38 Espectro de energía disipada total acumulada (Taft)

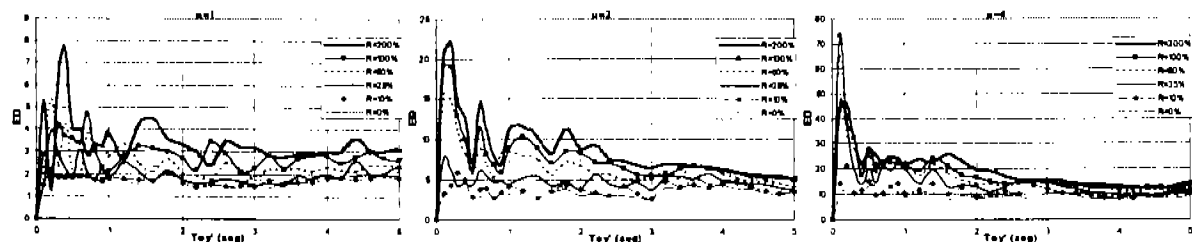


Figura V.39 Espectro de energía disipada total acumulada referida al periodo fundamental del sistema original, sin DDE, (Taft)

VI. EFECTO COMBINADO DEL CAMBIO DE RIGIDEZ Y RESISTENCIA POR USO DE DISPOSITIVO DISIPADOR DE ENERGÍA, EN LOS ESPECTROS DE RESISTENCIA Y DUCTILIDAD

En este capítulo se discute el efecto que causa el incremento de rigidez y la modificación en la relación de resistencias en las estructuras de concreto reforzado provocando por la implementación del DDE. Para el estudio se proponen incrementos en los valores de rigidez y resistencia de 10%, 25%, 50%, 100% y 200%, para estructuras con ductilidades globales de 1, 1.5, 2, 3, 4 y 6.

Como en los casos anteriores, se toma como base de comparación, los resultados del modelo de histéresis representativo de una estructura de concreto que presente comportamiento y modo de falla regido por la flexión, sin adelgazamiento del lazo histerético, lo que implica que la estructura cuenta con suficiente detallado que ayuda a reducir o evitar problemas de adherencia y cortante. Ésta es la estructura a la que se le adicionan los DDE, que incluyen el contraviento, para controlar la respuesta disipando energía mediante el comportamiento no lineal del dispositivo. La implementación del DDE se acepta aumenta la relación de resistencias y la rigidez lateral, de manera simultanea.

Para dar el efecto conjunto de incremento de rigidez y relación de resistencias por presencia del DDE, se modifican dos parámetros del modelo de histéresis simultáneamente, el periodo a la fluencia y el cociente de resistencias, estudiados por separado en el capítulo IV y V respectivamente.

Para la condición de análisis lineal es sencillo determinar la fuerza que toma la estructura y el DDE, ver la figura VI.1, pero esta estimación es válida solo para el intervalo elástico.

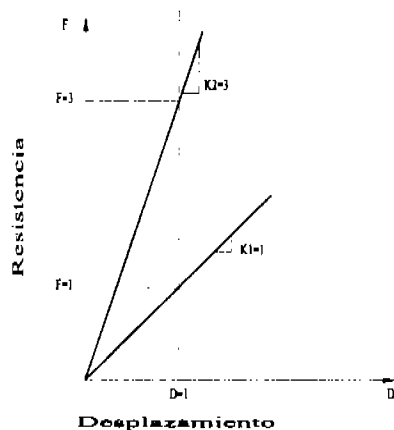


Figura VI.1 Relación entre resistencia y desplazamiento para una idealización elástica lineal

Para determinar la fuerza lateral que toma el DDE, acorde a las consideraciones hechas aquí, hay que ubicar en la figura VI.2 el desplazamiento obtenido, con lo cual se puede obtener la resistencia lateral o fuerza, al repetir este procedimiento para varias deformaciones se encuentra que la fuerza o resistencia lateral es dependiente de la deformación y limitada a la capacidad de tomar fuerza del DDE, entonces el excedente de fuerza o resistencia lateral lo tomará la estructura.

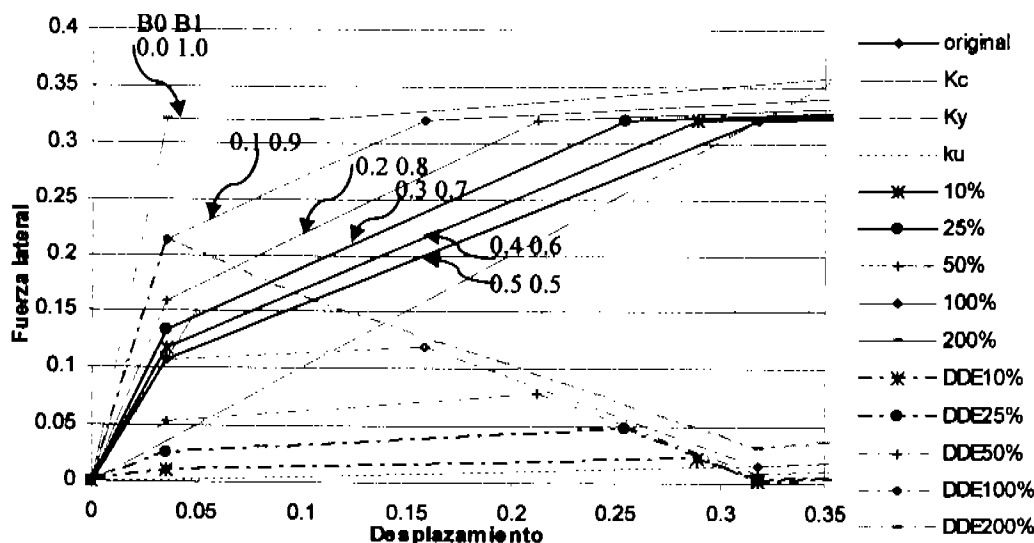


Figura VI.2 Curvas primarias de los diferentes modelos considerados para análisis

El contenido representado en la figura VI.2 ya fue explicado en los capítulos IV y V, por lo tanto, sólo resta aclarar que en este capítulo la figura se elaboró para representar los incrementos de rigidez y de relación de resistencia de manera conjunta en las curvas primarias.

Como ya se mencionó en el capítulo, los incrementos de rigidez producto de la incursión del DDE,

producen un cambio en el periodo de la estructura, ya que $T_y = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K_y}}$; $T_{y0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K_{y0}}}$ si se tiene

que: $\alpha_y = \frac{K_{y0}}{K_y}$; entonces T_y queda $T_y = 2\pi \sqrt{\frac{\alpha_y m}{K_{y0}}} = \frac{1}{\alpha_y} T_{y0}$ de esta forma se obtienen los nuevos

periodos a la fluencia T_y para cada incremento de rigidez.

Los incrementos de resistencia producen un cambio en la relación de fuerzas al agrietamiento y a la fluencia de donde $F_c = 0.33\alpha_y F_y$, con este cambio se retarda el agrietamiento; $\alpha_y = \alpha_y$.

Combinando los incrementos de rigidez y los incrementos de resistencia se obtienen gráficas de curvas primarias como las mostradas en la figura VI.2, donde además en la parte inferior se muestran las características que tendrán los DDE con materiales que se comporten tal como se requiere, excepto para un incremento de 200%.

Con respecto a la curva primaria asociada al 200% de incremento en la rigidez y relación de resistencia, se ve que representa una estructura cuyo comportamiento global es semejante a la idealización del material elásto-plástico perfecto, lo que ayuda a discernir que en la práctica de la ingeniería no se encontraría una estructura de concreto con DDE que presente es comportamiento, la observación se basa en que las estructuras de concreto reforzado presentan agrietamiento y por tal, cambio en la rigidez lateral, además para que se presente el comportamiento observado la estructura tendría que ser de un grado de libertad (lateral) o que todos sus elementos verticales inicien el agrietamiento, la fluencia y la falla al mismo tiempo. ya que según la curva los DDE gobiernan por completo el comportamiento del sistema, dadas las características de la curva se piensa que mas bien se esta describiendo el comportamiento de un DDE con una estructura de concreto que no tiene influencia significativa en el comportamiento, por tanto, se piensa que el incremento combinado de rigidez y relación de resistencia del 200% es únicamente una referencia.

Para tomar en cuenta la influencia del comportamiento del DDE se variaron los parámetros que controlan el desarrollo de la respuesta del modelo histerético de Takeda, donde: B0 controla la degradación de rigidez a la descarga; B1 controla la degradación resistencia. Para conocer más sobre los parámetros se presenta la tabla VI.1.

Tabla VI.1 Parámetros para el modelo de Takeda

B0	B1
0 Rigidez a la descarga con un valor más grande que K_y y no se degrada	1 No degrada la resistencia
0.5 La rigidez a la descarga es igual a K_y y no degrada	0.5 Degrada gradualmente la resistencia
1.0 La rigidez a la descarga es igual a K_y y se degrada rápidamente	0 Degrada mucho la resistencia
Valores recomendados para estructuras convencionales de concreto	
0.5-1.0	0.7-1.0
Valores utilizados en este capítulo	
0-0.5	0.5-1

Como en este estudio hay cambio de rigidez y cambio de la relación de resistencia por lo tanto se genera cambio en el periodo del sistema analizado, por lo que a un periodo le corresponden tantas resistencias laterales como incrementos de rigidez y de la de relación de resistencia, y para ejemplo se tiene la figura V.3 donde se observa, la representación esquemática, que el sistema original y el sistema modificado tienen diferente periodo fundamental y diferente resistencia lateral.

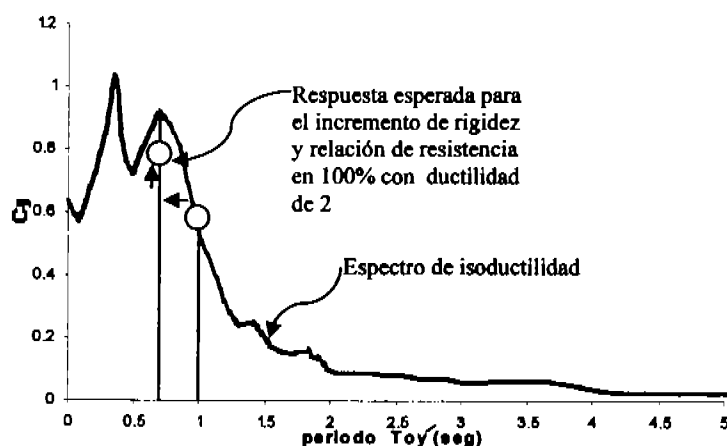


Figura V.3 Representación del cambio de resistencia lateral debido al cambio de resistencia.

En los espectros de isoductilidad o de resistencia lateral que son mostrados en las figuras IV.4, IV.5, etc. R , representa el incremento en la rigidez y en la relación de resistencia; μ , es la ductilidad deseada u objetivo; C_y , coeficiente sísmico o la resistencia lateral requerida para lograr la ductilidad objetivo; y T_{01} , representa al periodo fundamental de los sistemas definidos por C_y y su respectivo periodo a la fluencia; T_{01}' representa el periodo fundamental del sistema original.

Al elaborar este capítulo se presenta la disyuntiva de indicar los efectos observados para cada figura a pesar de repetir textos, situación indeseable por principio, u omitir explicaciones que en el desarrollo del trabajo ya se hayan comentado indicando la referencia, con lo cual se tendría una recopilación de referencias para cada figura. Ante tal dificultad, se opta por aclarar que al observar todas las figura correspondientes a este capítulo, se encontró que al incrementar la rigidez y la relación de resistencia de manera conjunta, se logra la misma tendencia de superponer los efectos del incremento de rigidez y de incremento de relación de resistencia, por tal motivo para las figuras siguientes aplican los comentarios conjuntos hechos en los dos capítulos anteriores, IV y V, además se comentan algunas tendencias y/o valores que resultan de especial interes.

VI.1 PARA REGISTROS DE MOVIMIENTO CON PERIODO DOMINANTE CORTO

De revisar las figuras VI.4 y VI.6 se encuentra que presentan la mismas tendencias, sólo que para sus respectivos valores, por ejemplo el periodo dominante es diferente para los dos casos, también la magnitud de la resistencia lateral para lograr cierta ductilidad. A pesar de las diferencia comparten características como la que se describe a continuación.

A mayor incremento en la rigidez y relación de resistencia se logra reducir la demanda o requerimiento de resistencia lateral para alcanzar la ductilidad deseada, como era de esperarse según el concepto de la

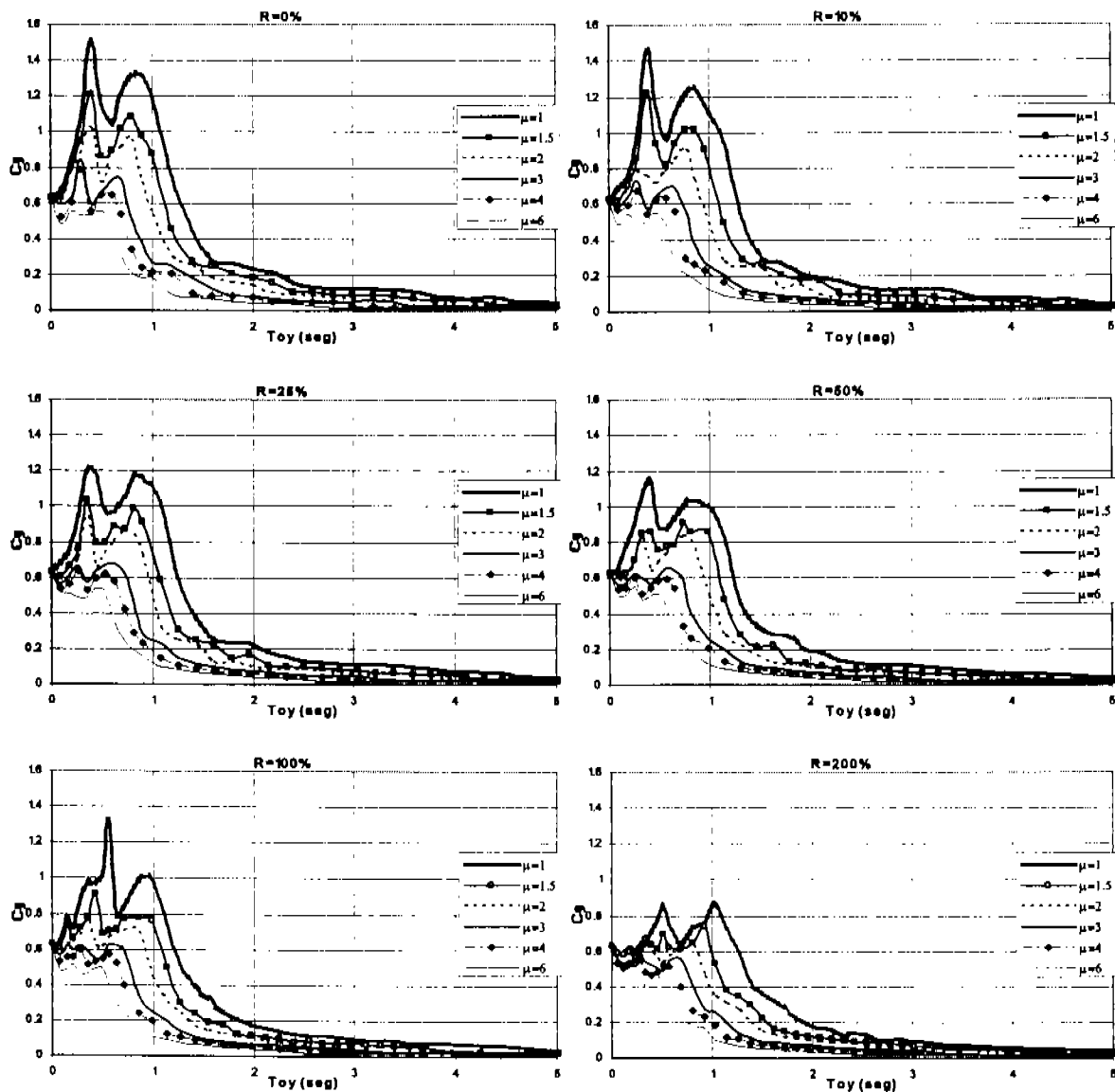


Figura VI.4 Relación entre ductilidad e incremento de rigidez y resistencia (Kobe)

dinámica de estructuras, donde se plantea que a menor capacidad de resistencia lateral la estructura se deforma más para poder alcanzar la resistencia demandada por la excitación, logrando con esto mayores ductilidades, pero de observar detenidamente el fenómeno se encuentra que aparte de reducción en la resistencia lateral por incremento de la ductilidad, al incrementar la capacidad de disipación de energía de los sistemas se logra una reducción adicional que principalmente tiene efecto en los periodos de máxima respuesta y principalmente en ductilidades de 1 a 2. Este efecto se puede ver más claramente en las figuras VI.5 y VI.7 donde el periodo asociado a las demandas de resistencia lateral se mantiene referido a las estructura sin DDE.

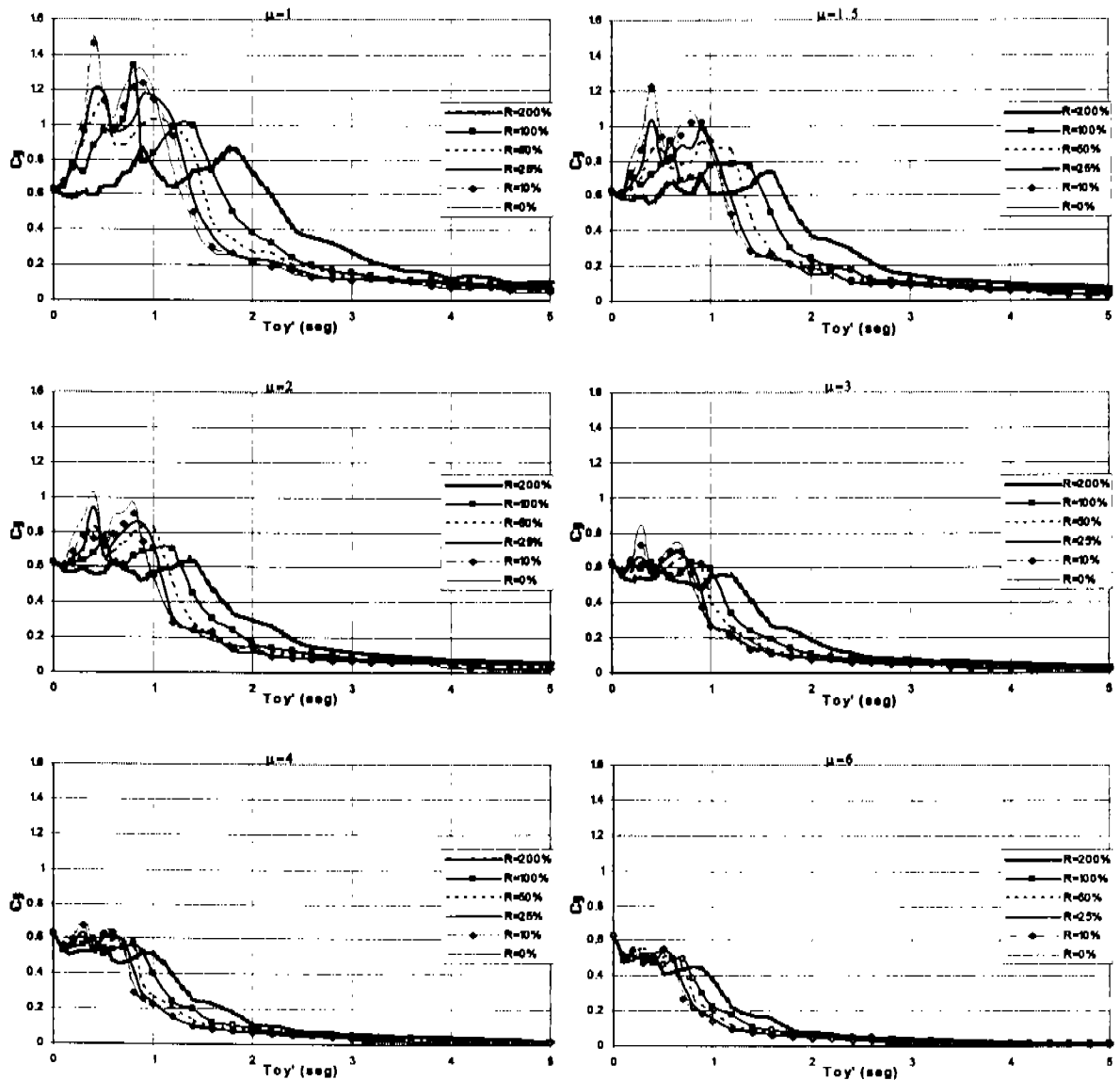


Figura VI.5 Relación entre ductilidad e incremento de rigidez y resistencia, referida al periodo del sistema sin DDE (Kobe)

La principal característica que se describe en este apartado tiene que ver con el beneficio de colocar DDE en sistemas con periodo corto, ya que es aquí donde se encuentra mayor reducción de las demandas de resistencia, siendo más ventajoso el efecto en ductilidades de 1 a 2, como se puede ver en las figuras VI.5 y VI.7. Para periodos fundamentales mayores a 0.6seg en ductilidades de 6 y mayores de 1seg. para ductilidades de 1, se presenta un incremento en la demanda de resistencia lateral en la figura VI.5, mientras que en la figura VI.7 para periodos mayores a 0.6seg. aproximadamente, no hay prácticamente cambio en la demanda de resistencia lateral. Esto lleva a pensar que cada sitio debe ser estudiado en forma particular independientemente que parezca que tiene las mismas características que otro sitio ya estudiado.

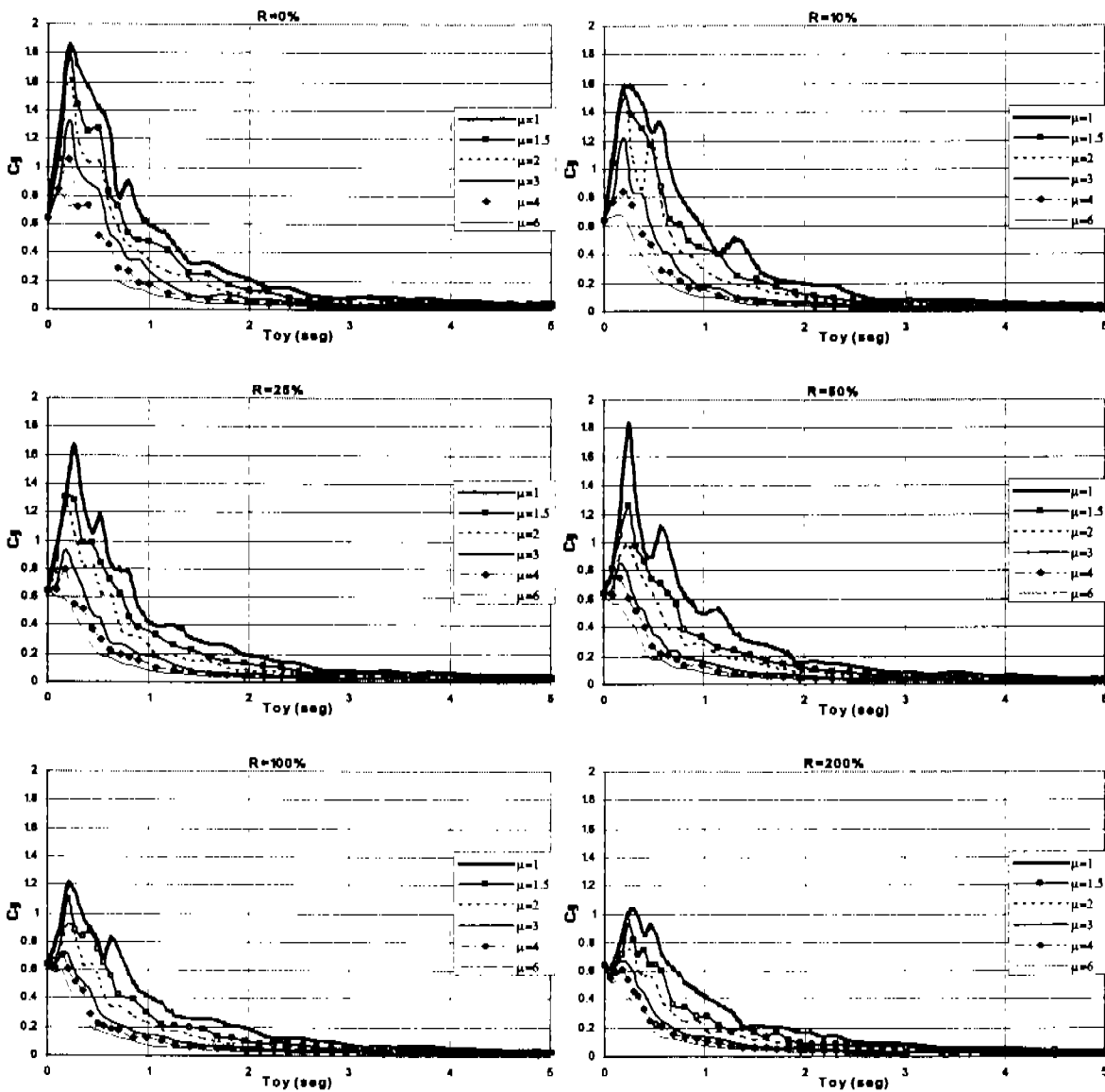


Figura VI.6 Relación entre ductilidad e incremento de rigidez y resistencia (Llolleo)

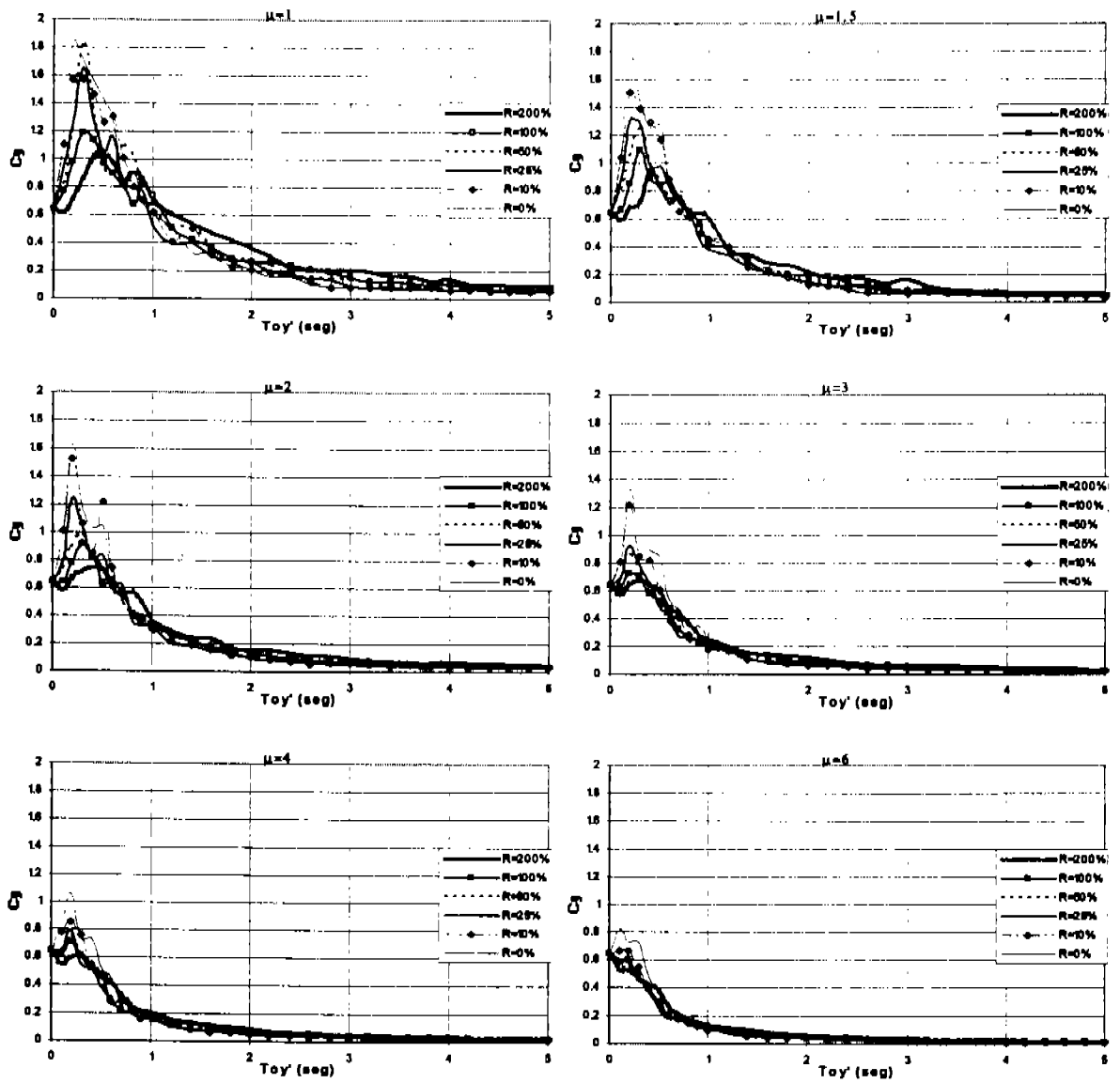


Figura VI.7 Relación entre ductilidad e incremento de rigidez y resistencia, referida al periodo del sistema sin DDE (Lolloe)

Espectros de distorsión de entrepiso

La forma en la que se obtuvieron las distorsiones se explicó en el capítulo IV. Las observaciones realizadas a las figuras IV.8, IV.9, IV.10, IV.11, V.8, V.9, V.10 y V.11 se ajustan perfectamente a las figuras VI.8, VI.9, VI.10 y VI.11 Por lo que se refiere a distorsiones todo esta escrito y además representado en suficiente número de espectros de manera que ya es innecesario abundar en el tema, cabe aclarar, que el comentario aplica y tiene validez según lo planteado en los alcances del trabajo.

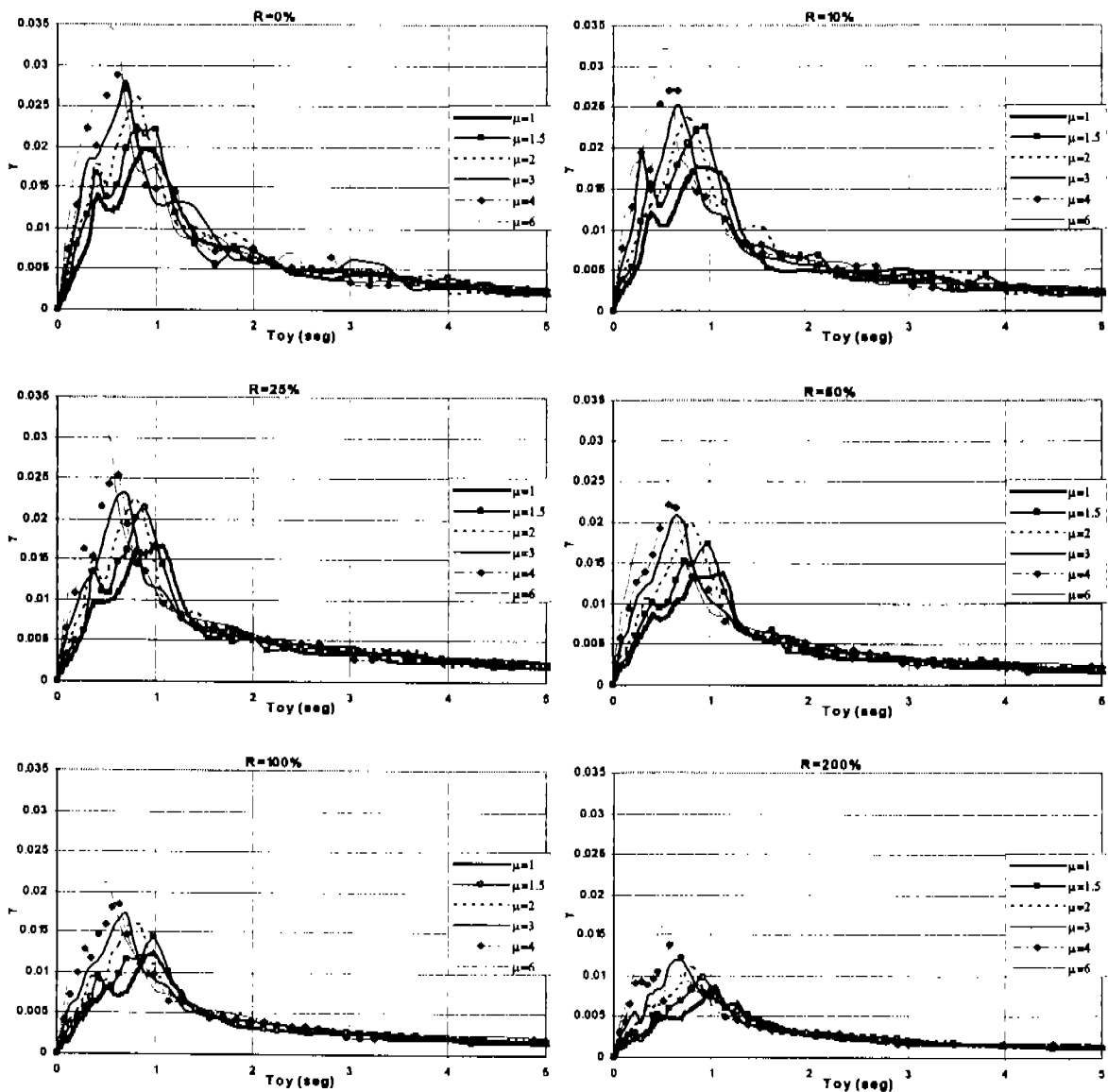


Figura VI.8 Relación entre distorsión e incremento de rigidez y resistencia (Kobe)

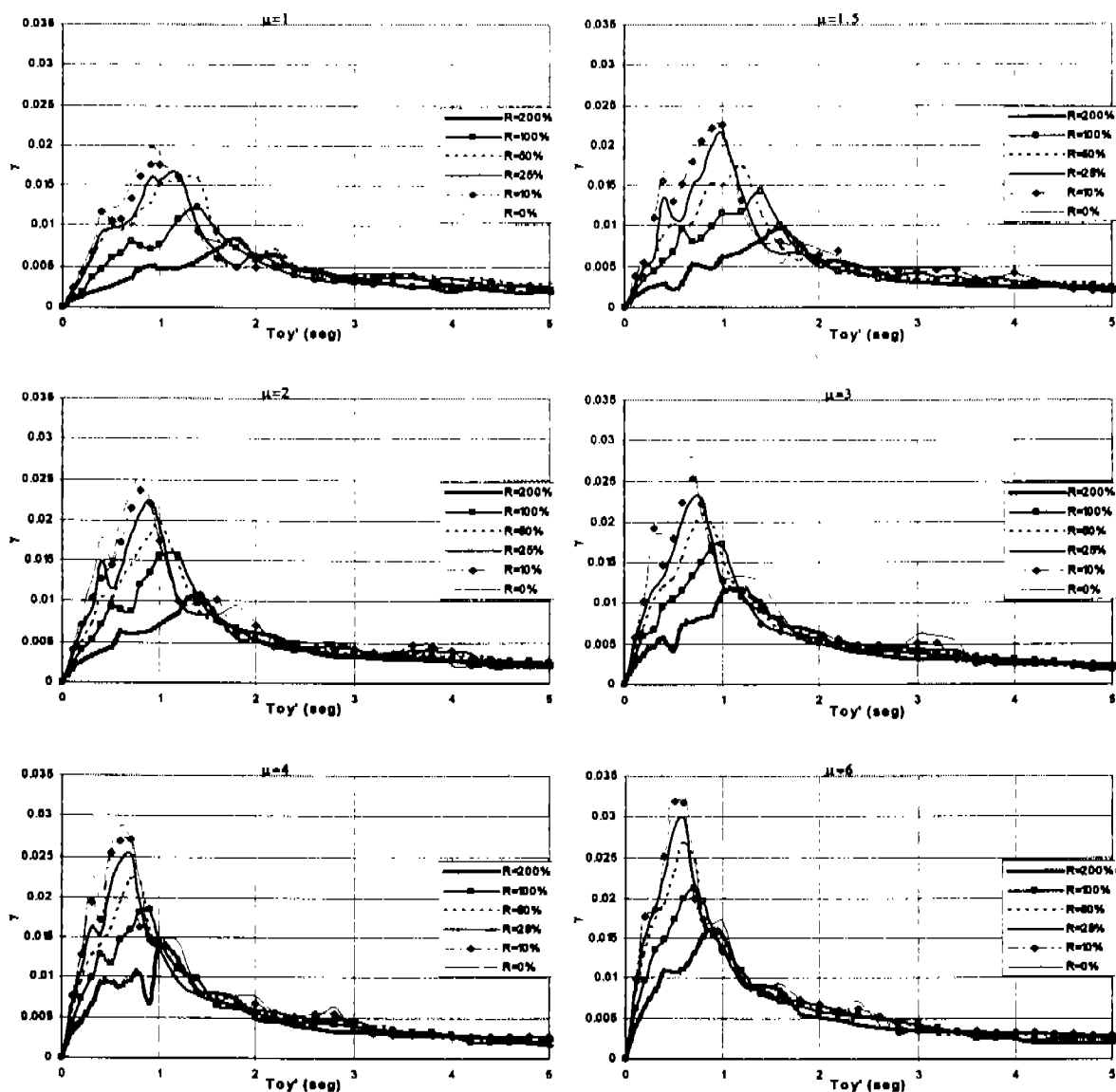


Figura VI.9 Relación ente distorsión e incremento de rigidez y resistencia, referida al periodo del sistema sin DDE (Kobe)

Se observa de la figura VI.9 que para un gran numero de sistemas se rebasan los límites establecidos por el RCDF, que permite una distorsión de 0.006 y 0.012 según sea el caso en estudio. Por lo tanto, se deduce que los sistemas que tienen únicamente la resistencia lateral mínima para desarrollar la ductilidad objetivo presentan problemas de inestabilidad.

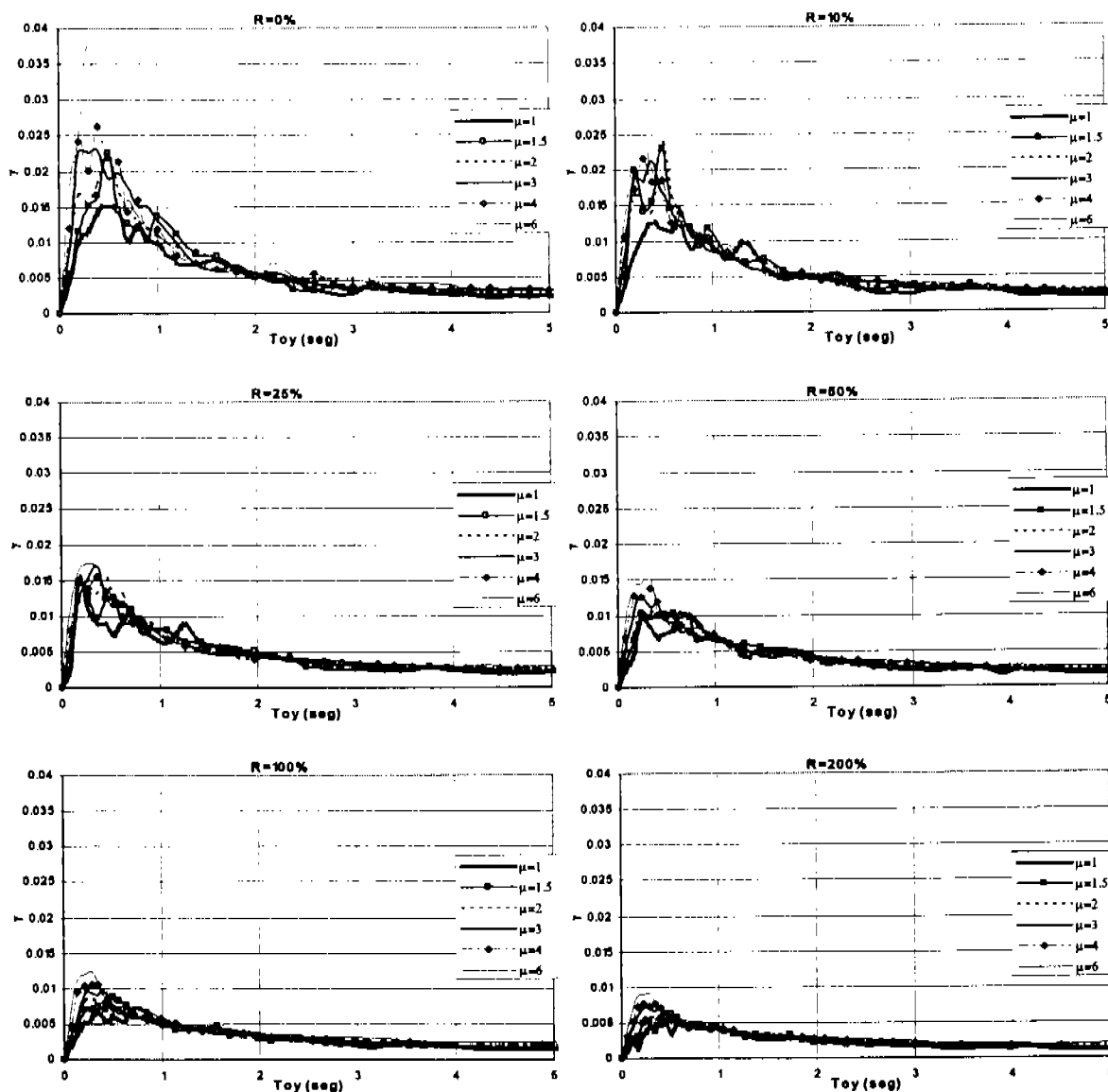


Figura VI.10 Relación entre distorsión e incremento de rigidez y resistencia (Llolleo)

De la figura VI.10 se deduce que el incremento simultaneo de la rigidez y la relación de resistencia conducen a estructuras más seguras, si el criterio del nivel de las distorsiones es único y válido. Con el incremento simultaneo de la rigidez y la relación de resistencia se logran reducir las distorsiones de 0.015 para un sistema sin incrementos a 0.005 para el mismo sistema pero ahora con un 200% de incremento en los parámetros seleccionados.

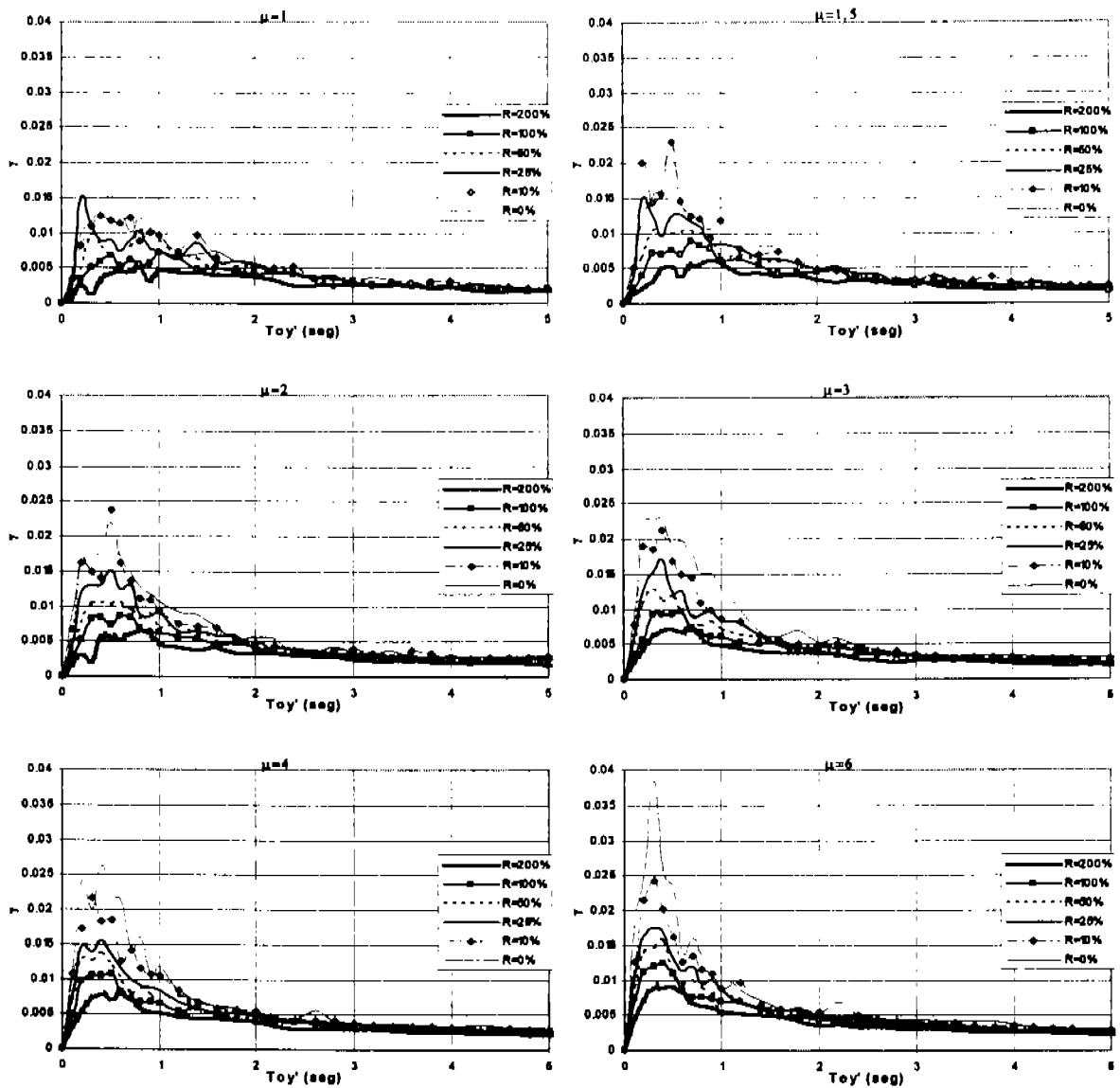


Figura VI.11 Relación entre distorsión e incremento de rigidez y resistencia, referida al periodo del sistema sin DDE (Lollo)

En la figura VI.11 se observa que para sistemas con periodo fundamental mayor a 1seg. no hay cambio significativo en las distorsiones por incremento de la rigidez y resistencia ni por cambio en la ductilidad del sistema.

Espectros de energía

Por lo que se refiere a los espectros de energía y dado lo que se plantea, todo esta dicho, basta con revisar los comentarios hechos para las figuras referentes a energía en los capítulos IV y V.

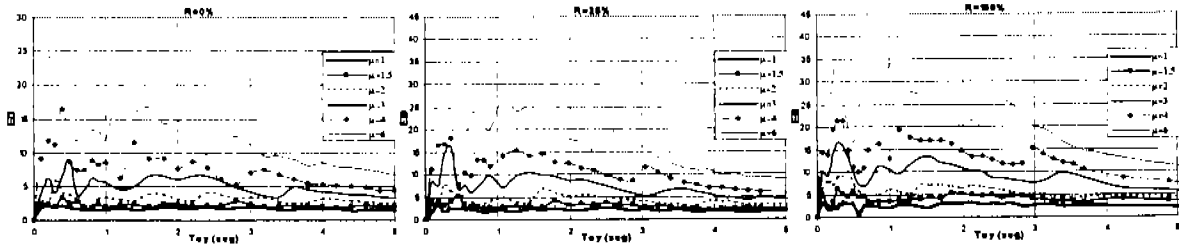


Figura VI.12 Energía disipada total acumulada (Kobe)

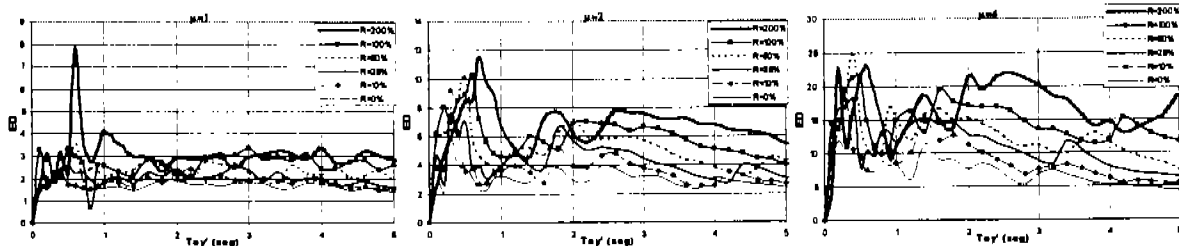


Figura VI.13 Energía disipada total acumulada, referida al periodo del sistema sin DDE (Kobe)

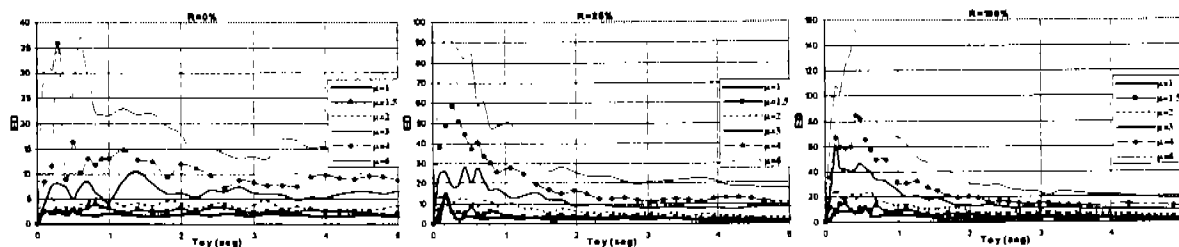


Figura VI.14 Energía disipada total acumulada (Lolloe)

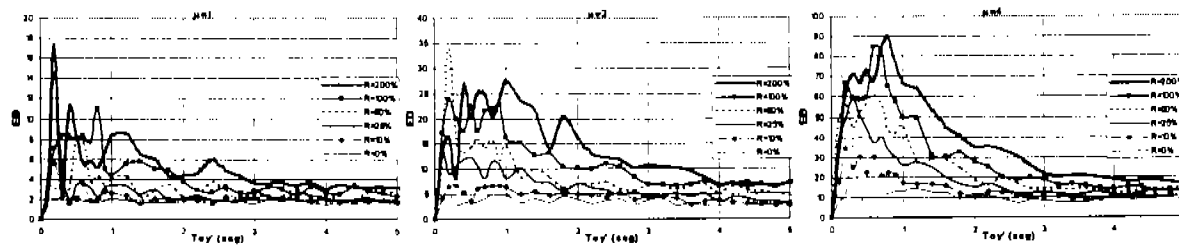


Figura VI.15 Energía disipada total acumulada, referida al periodo del sistema sin DDE (Lolloe)

VI.2 PARA REGISTROS DE MOVIMIENTO CON PERIODO DOMINANTE LARGO

Para los espectros generados por registros que causen demandas máximas de resistencia lateral a los periodos largos se encuentra que son precisamente los espectros de las figuras VI.16, VI.17, VI.18 y VI.19 poseen características combinadas de los espectros analizados en los capítulos IV y V en donde se estudió por separado el incremento de rigidez y el incremento de la relación de resistencia respectivamente, por lo que el lector debe remitirse a dichos capítulo para entender mejor lo plasmado por los espectros.

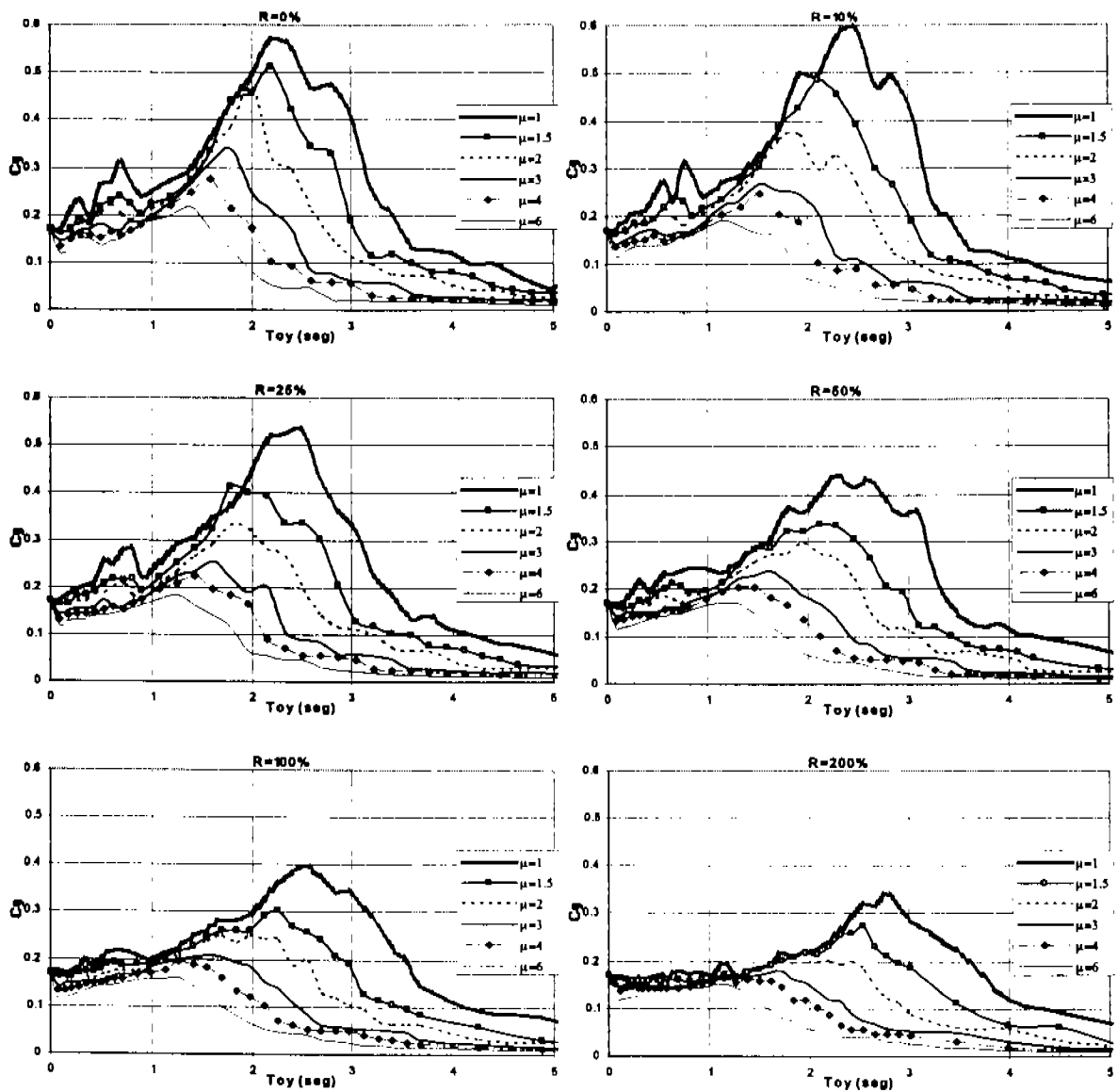


Figura VI.16 Relación entre ductilidad e incremento de rigidez y resistencia (SCT85)

En los espectros de resistencia lateral o también llamado coeficiente basal o hasta de isoductilidad, se pueden presentar tres zonas: la primera en periodos menores al periodo dominante y/o periodos cortos, en donde la presencia de los DDE es benéfica; junto a esta zona puede o no presentarse una zona donde el beneficio de la presencia de los DDE depende del nivel de influencia y del periodo fundamental del sistema, después de estas dos zonas, para periodos largos, se puede presentar una zona donde la presencia de los DDE puede provocar un incremento en la resistencia lateral necesaria, excepto para Lolloo, Tohoku y Taft donde la zona es insignificante, indefinida o de poca influencia respectivamente.

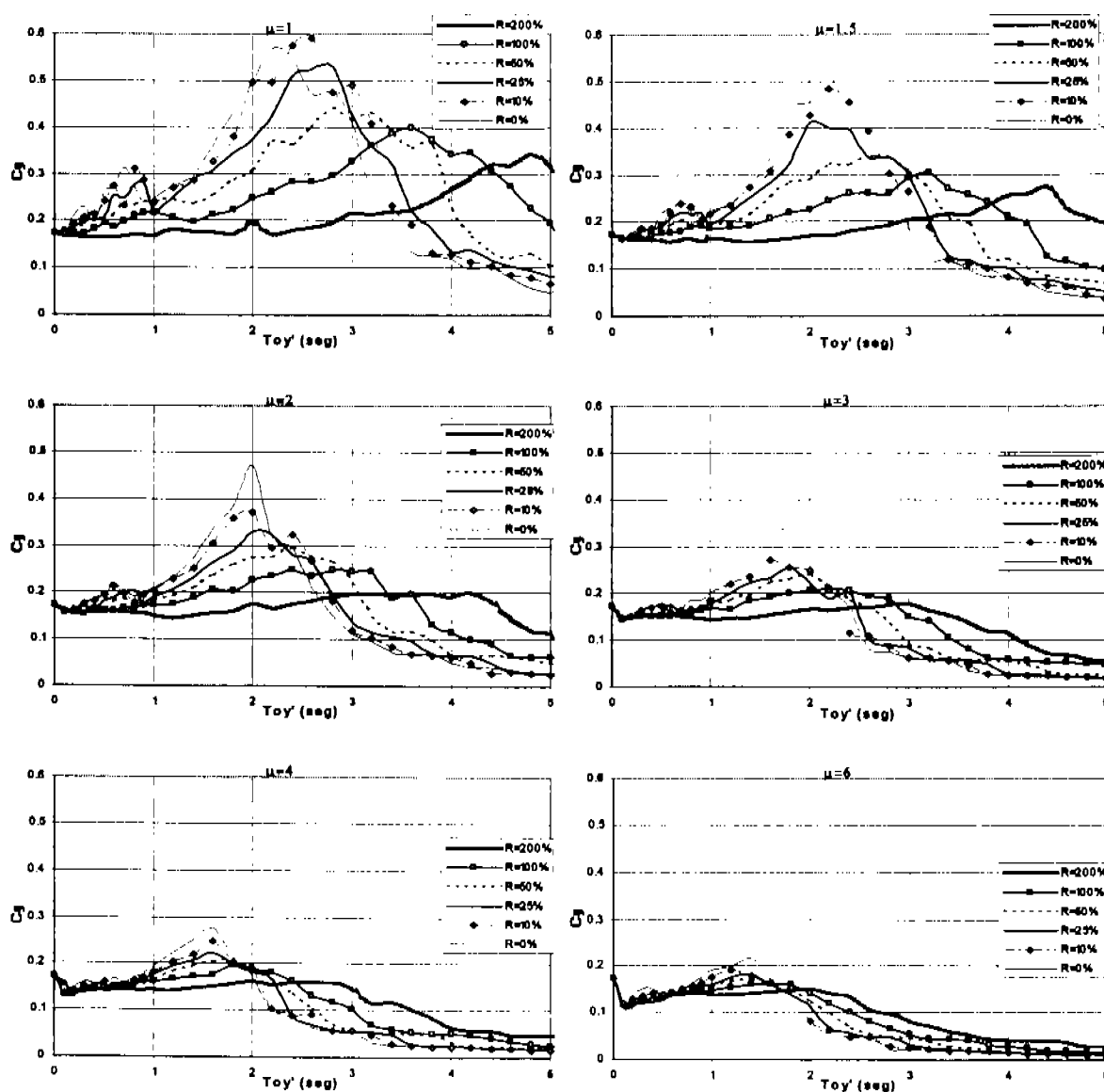


Figura VI.17 Relación entre ductilidad e incremento de rigidez y resistencia, referida al periodo del sistema sin DDE (SCT85)

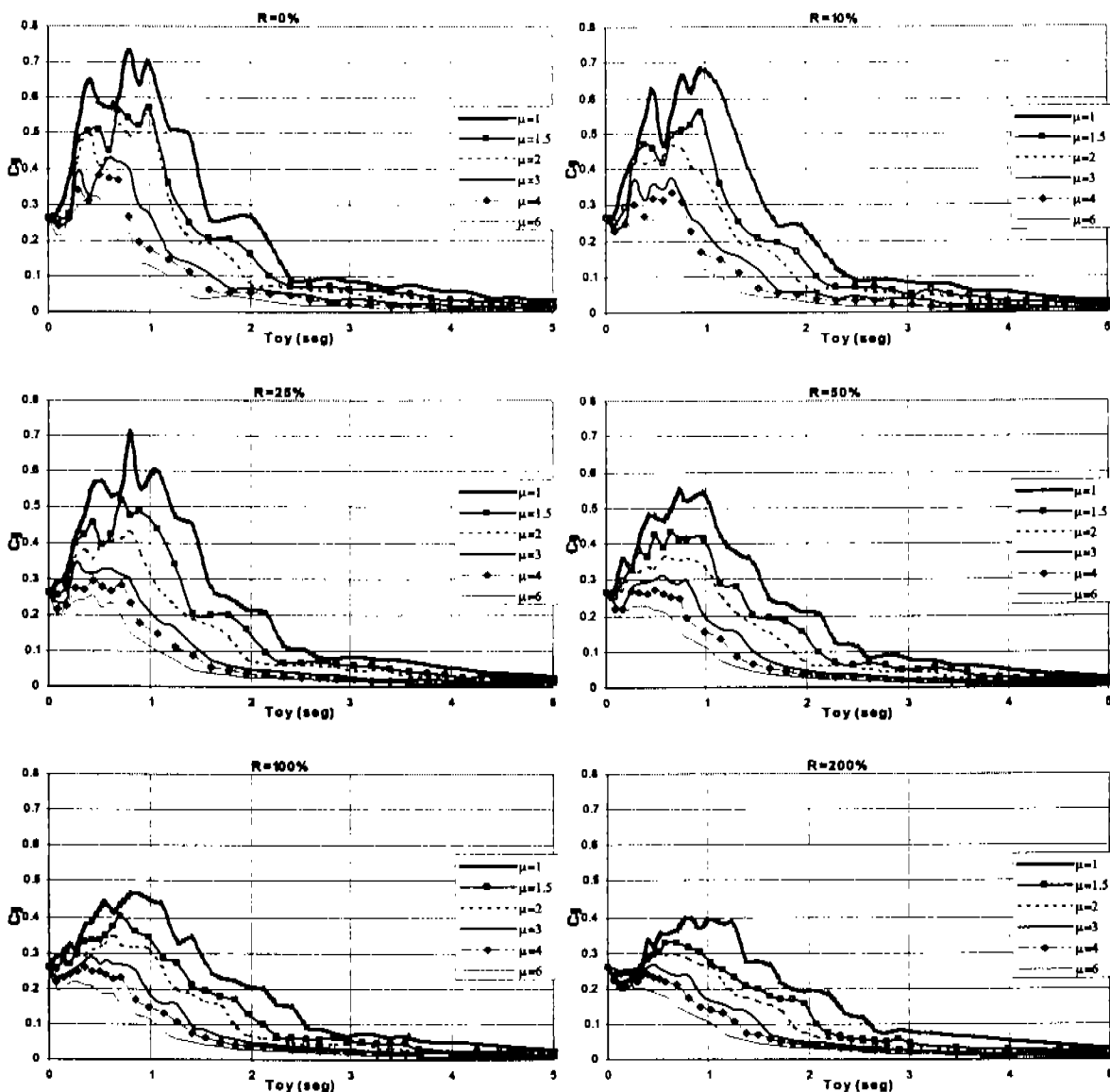


Figura VI.18 Relación entre ductilidad e incremento de rigidez y resistencia (Tohoku)

De la figura VI.18 se puede ver que para los sistemas con periodo fundamental mayor a 2.5 seg. no hay cambio significativo en la resistencia lateral aún al considerar los diferentes incrementos y las diferentes ductilidades.

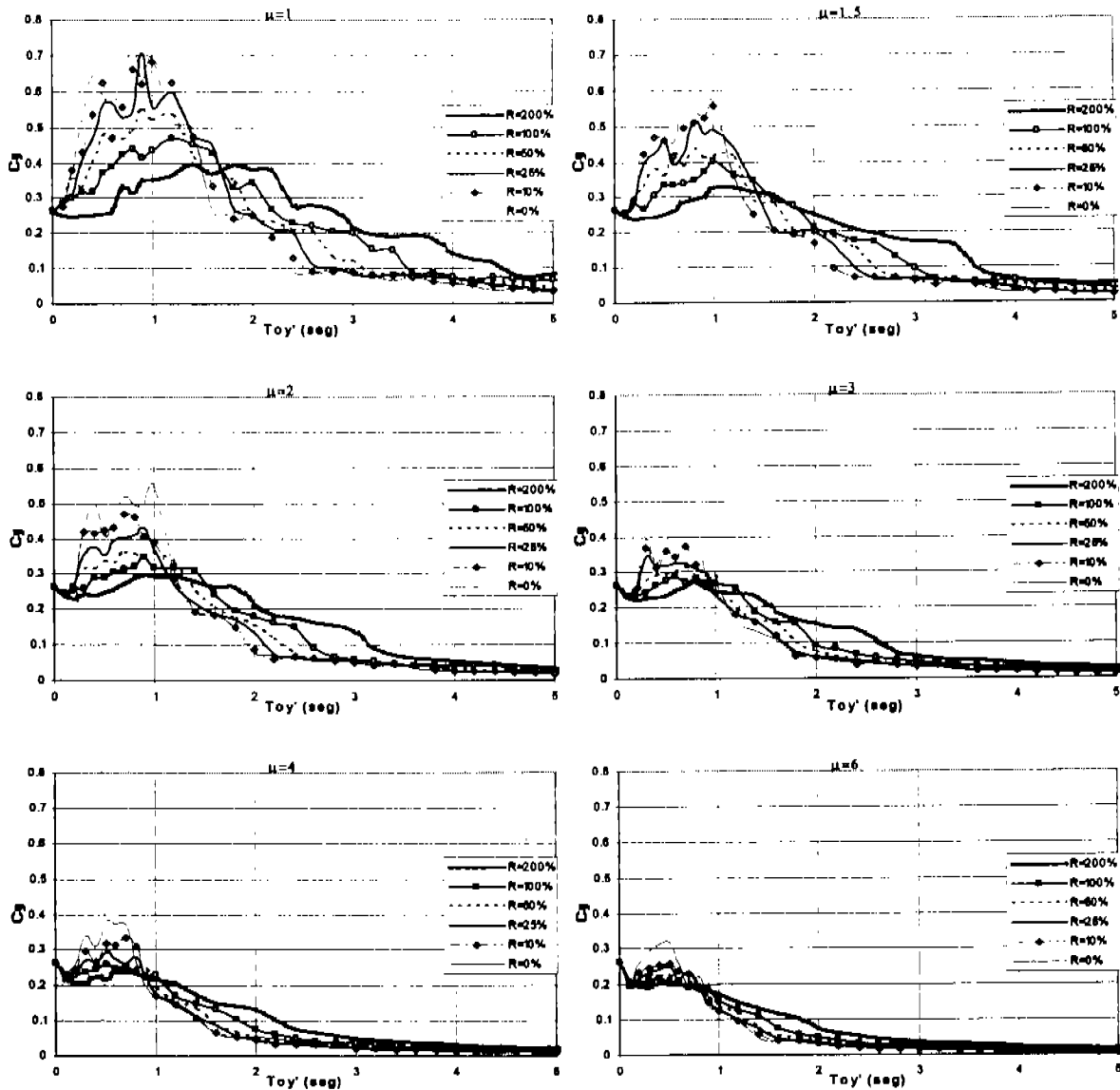


Figura VI.19 Relación entre ductilidad e incremento de rigidez y resistencia, referida al periodo del sistema sin DDE (Tohoku)

En la figura VI.19 se puede ver que para cualquier ductilidad se presentan dos zonas bien definidas, la primera para periodos cortos donde el incremento en la rigidez y la relación de resistencia provocan una reducción en la resistencia lateral; mientras que en la segunda zona, para periodos largos, el incremento de la rigidez y la relación de resistencia provoca un incremento en la resistencia lateral.

Espectros de distorsión de entropiso

De ser necesario comprender la forma es que se elaboraron los espectros de distorsión o lo que representan deberá consultar lo escrito anteriormente para espectros de distorsión, ya que por respeto al lector, no se repite texto, a menos de ser indispensable.

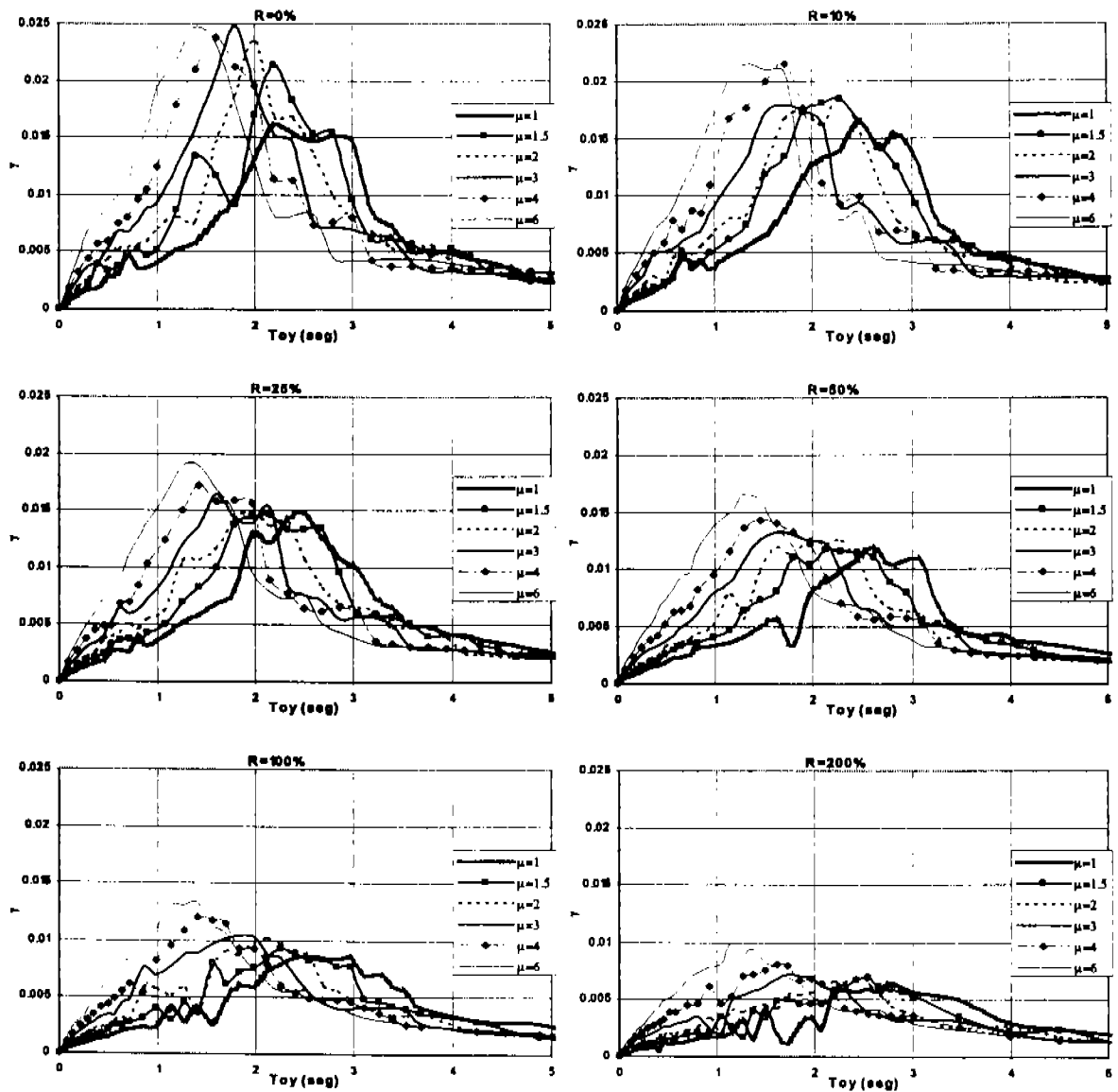


Figura VI.20 Relación entre distorsión e incremento de rigidez y resistencia (SCT85)

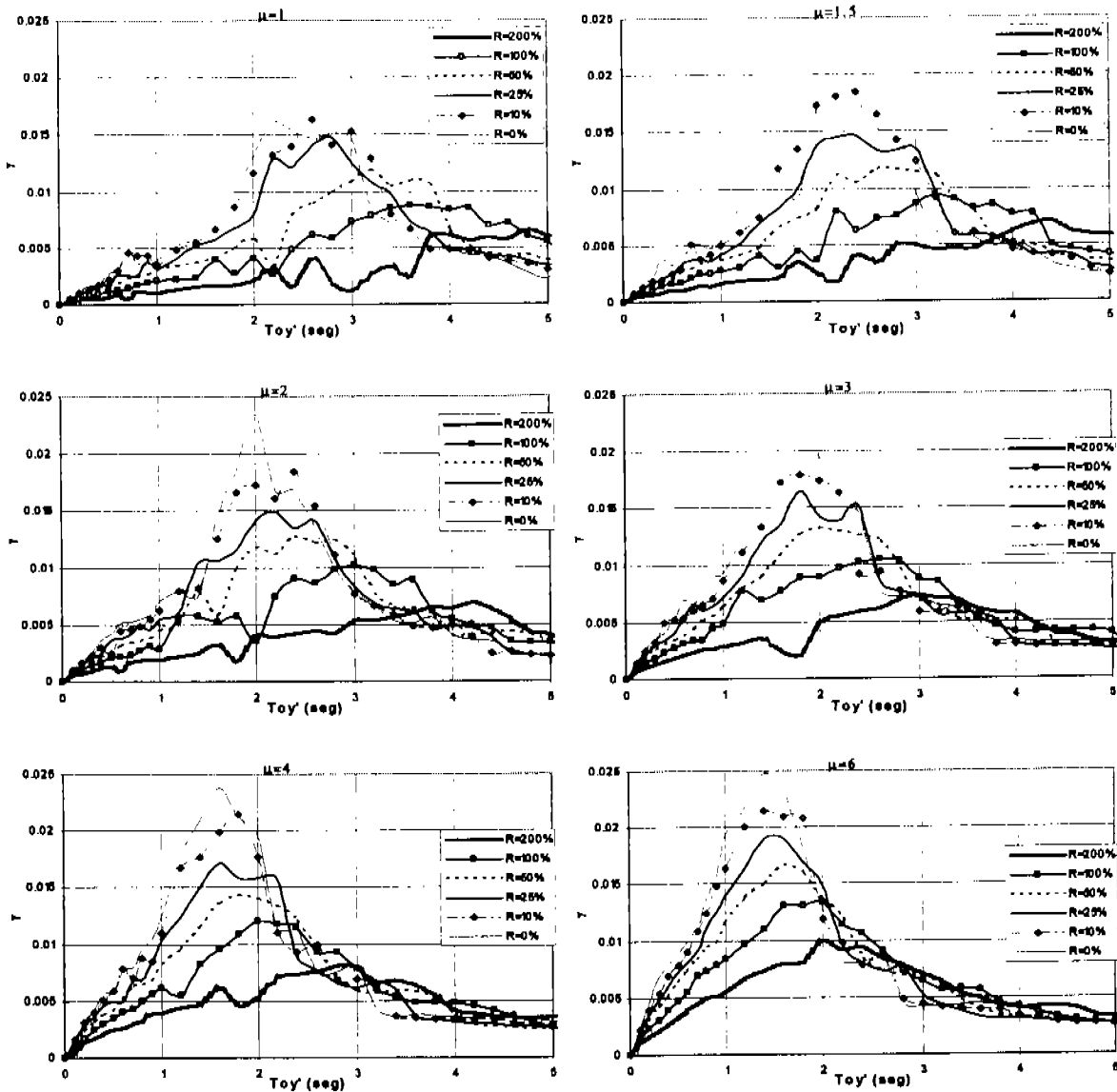


Figura VI.21 Relación entre distorsión e incremento de rigidez y resistencia, referida al periodo del sistema sin DDE (SCT85)

En la figura VI.21 se puede ver que para periodos cortos y hasta periodos de máxima respuesta, al incrementar la rigidez y la relación de resistencia se provoca una reducción en tamaño del espectro, mientras que para periodos mayores, a los de máxima respuesta, se tiene el efecto del incremento es nulo, para fines prácticos.

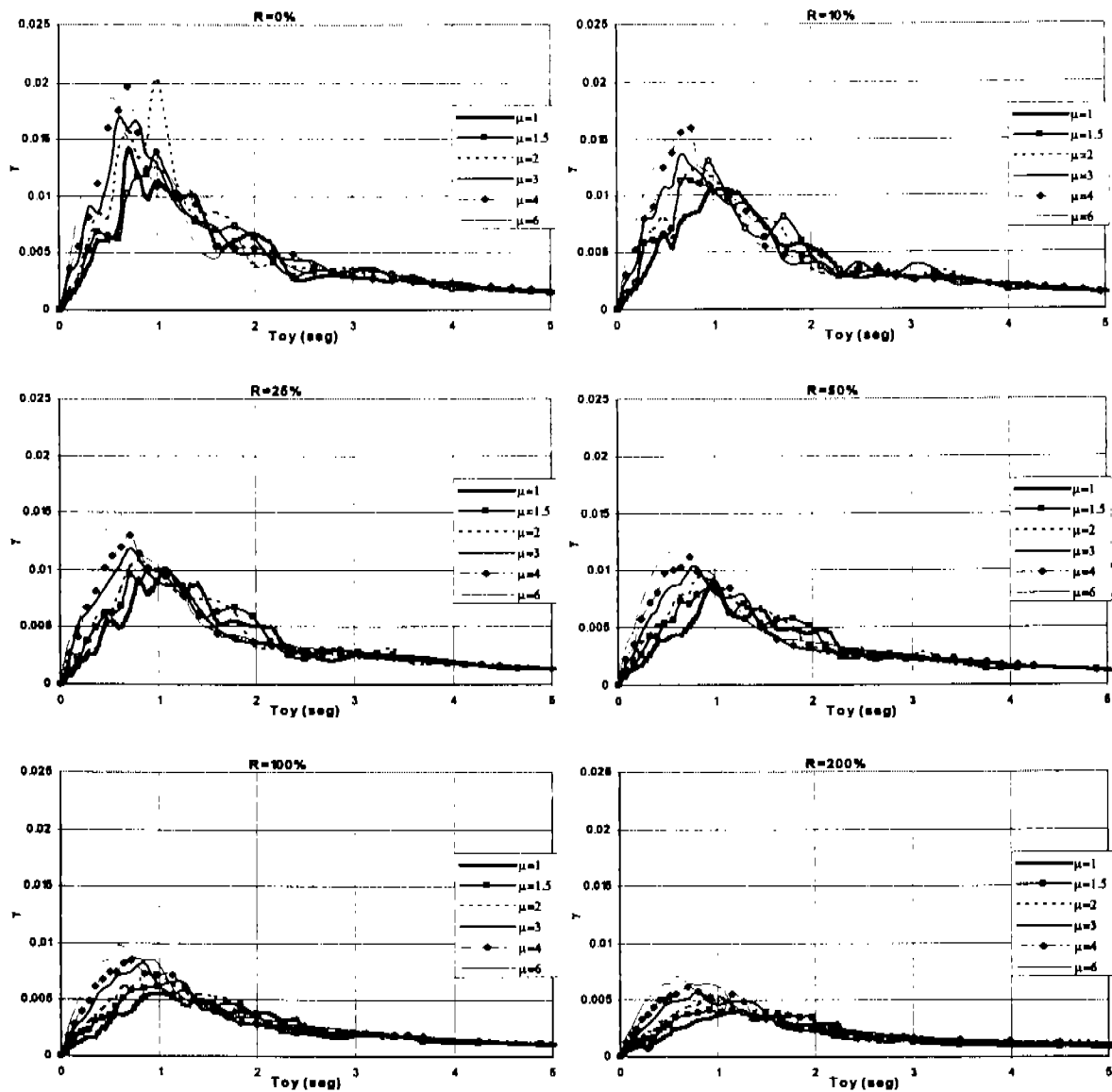


Figura VI.22 Relación entre distorsión e incremento de rigidez y resistencia (Tohoku)

En la figura VI.22 se observa que para los sistemas sin DDE, las distorsiones sobrepasan los límites establecidos por el RCDF, mientras que los sistemas con DDE, es decir, con incremento de rigidez y relación de resistencia, las distorsiones quedan por debajo de la norma.

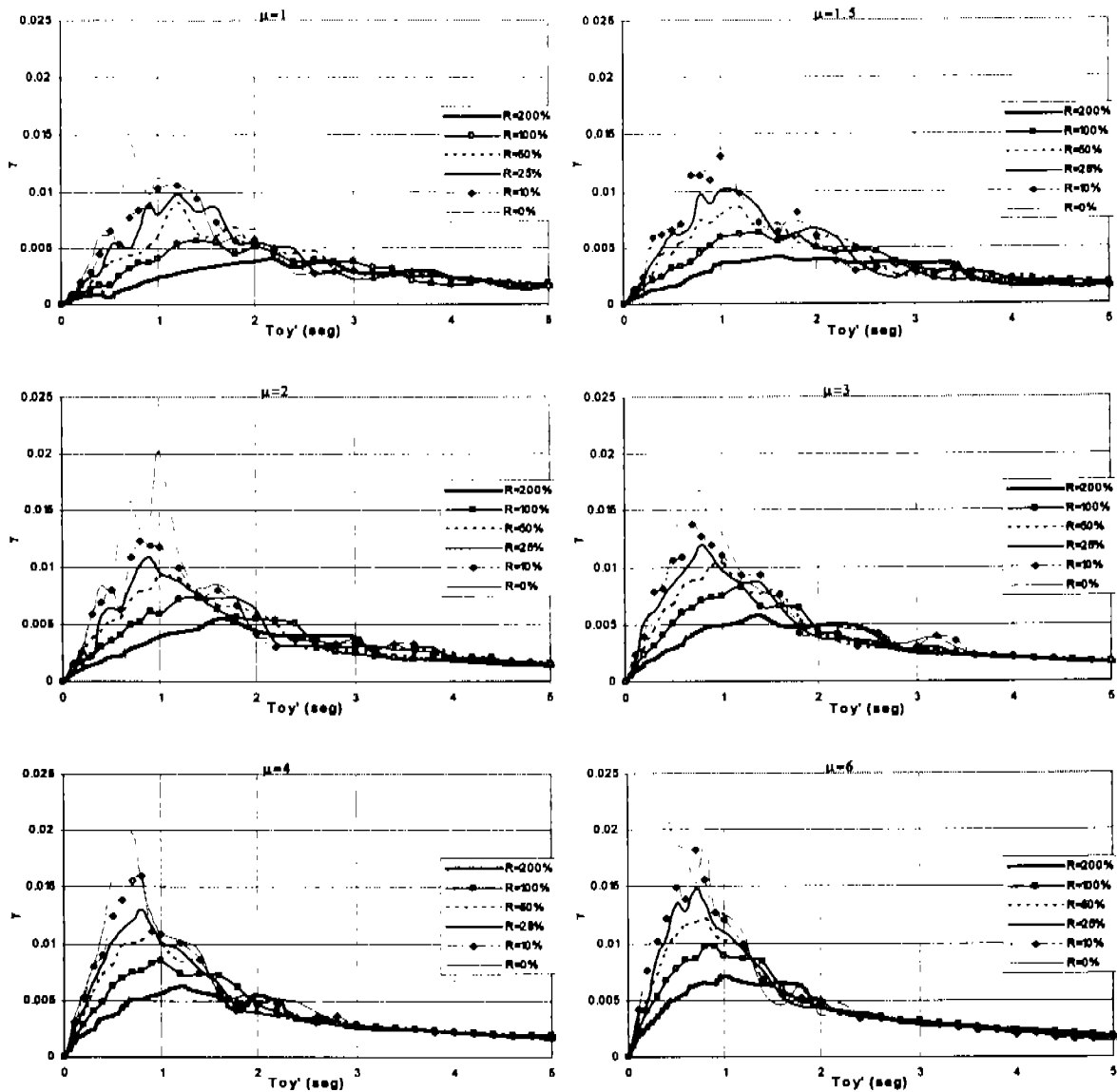


Figura VI.23 Relación entre distorsión e incremento de rigidez y resistencia, referida al periodo del sistema sin DDE (Tohoku)

En la figura VI.23 se ve que para periodos largos el incremento en la rigidez y la relación de resistencia no cambia significativamente el tamaño de las distorsiones.

Espectro de energía

En las figuras siguientes se presentan los espectros de energía disipada total acumulada, los cuales no difieren en lo esencial de los presentados hasta el momento, pero se justifica su presentación por el hecho de tener diferente magnitud de energía, y para que den luz, a los trabajos que se realicen posteriormente.

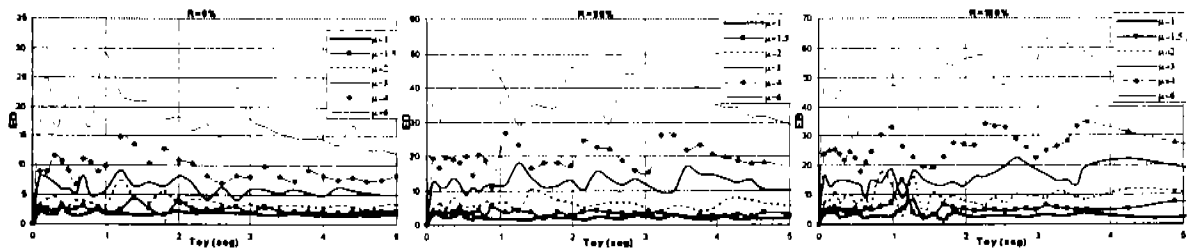


Figura VI.24 Energía disipada total acumulada (SCT85)

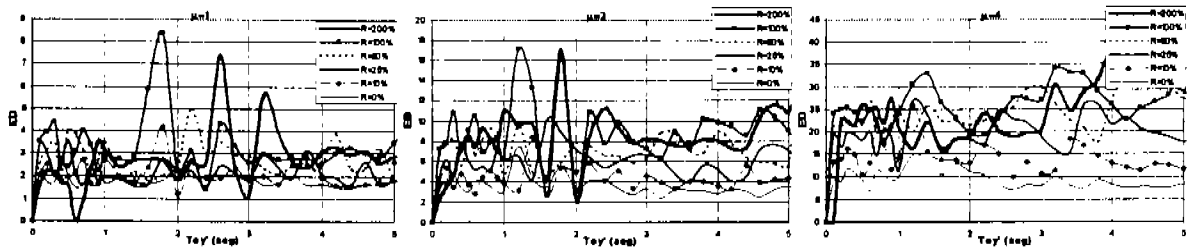


Figura VI.25 Energía disipada total acumulada, referida el periodo del sistema sin DDE (SCT85)

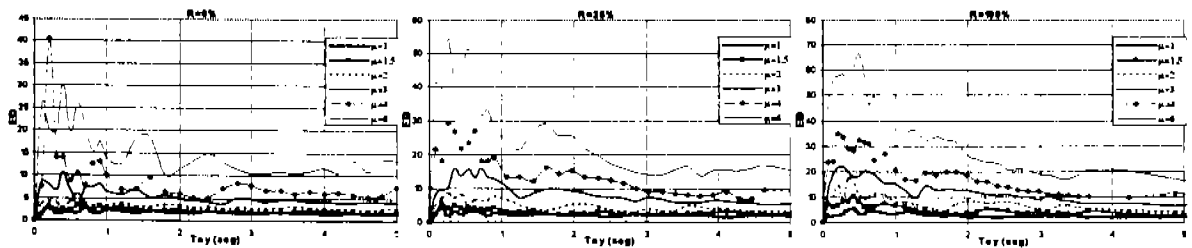


Figura VI.26 Energía disipada total acumulada (Tohoku)

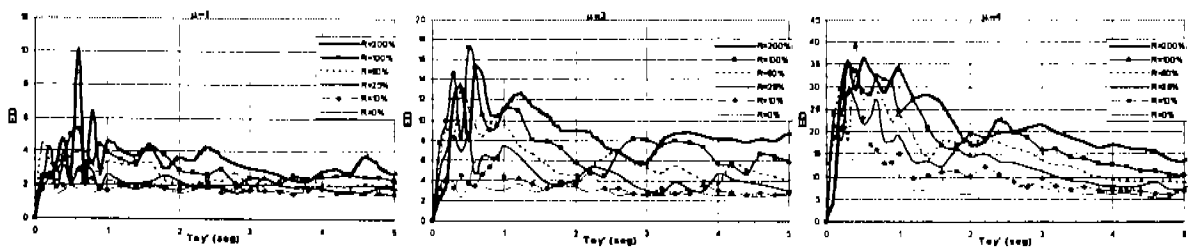


Figura VI.27 Energía disipada total acumulada, referida el periodo del sistema sin DDE (Tohoku)

VI.3 PARA REGISTROS CON EXCITACIÓN DE SUELO DURO

Hasta el momento de elaborar el trabajo, el autor no encuentra información diferente a la plasmada anteriormente, con lo que sólo resta leer los párrafos anteriores y los trabajos indicados en la bibliografía.

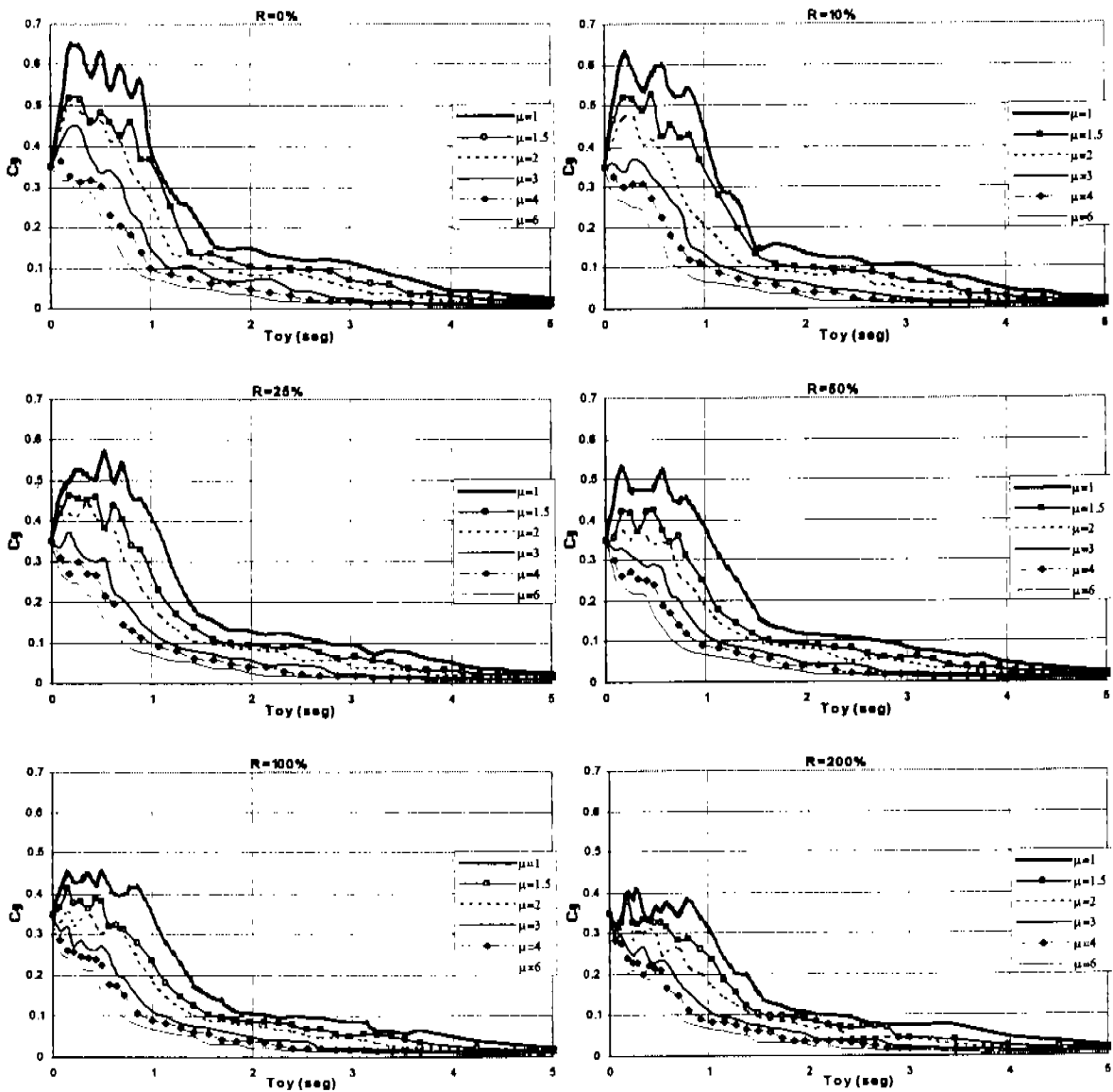


Figura VI.28 Relación entre ductilidad e incremento de rigidez y resistencia (El Centro)

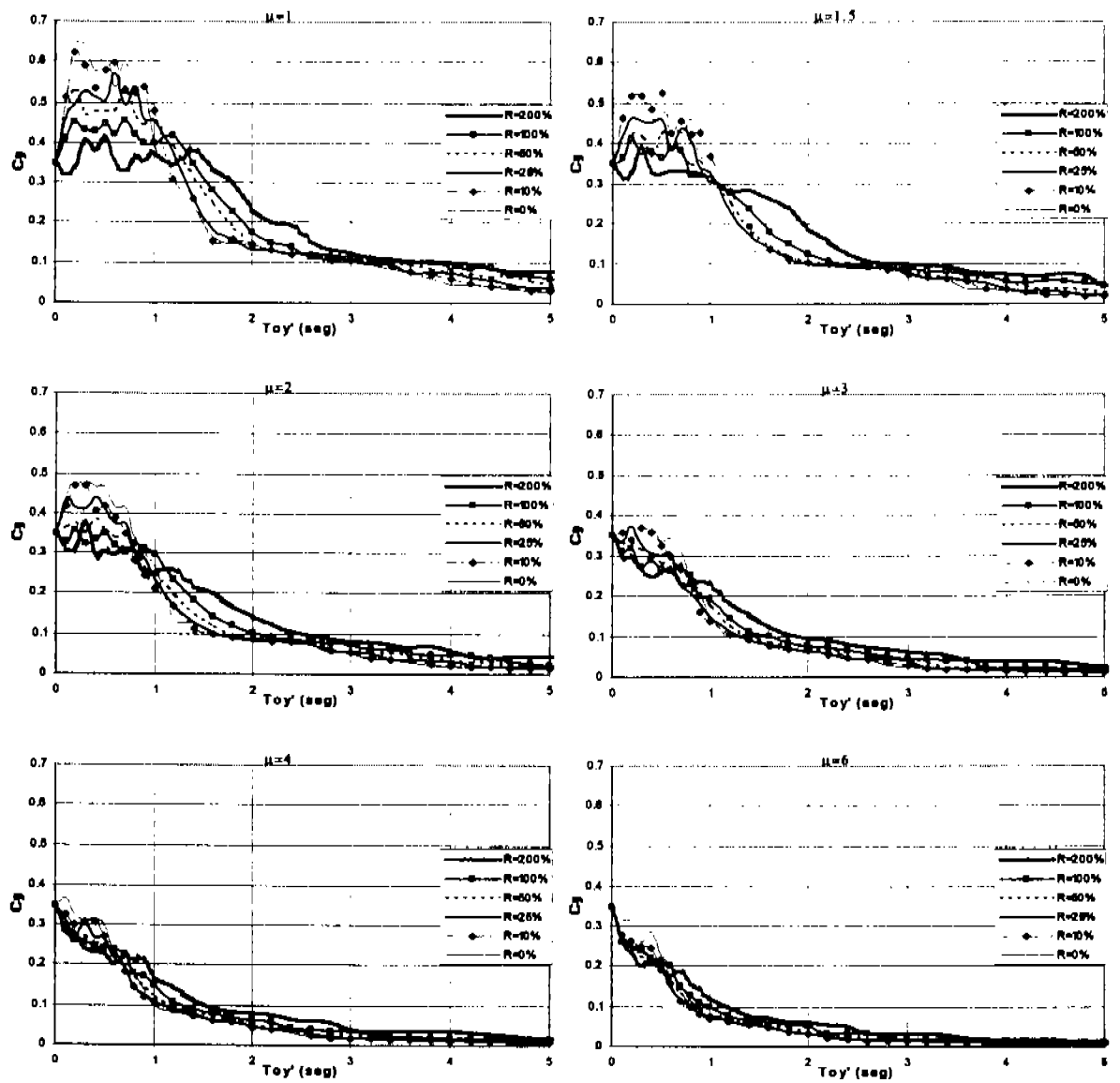


Figura VI.29 Relación entre ductilidad e incremento de rigidez y resistencia, referida al periodo del sistema sin DDE (El Centro)

Se completa el presente capítulo con los espectros mostrados a continuación, donde se muestra gráficamente el efecto de la presencia de los DDE en las estructuras de concreto.

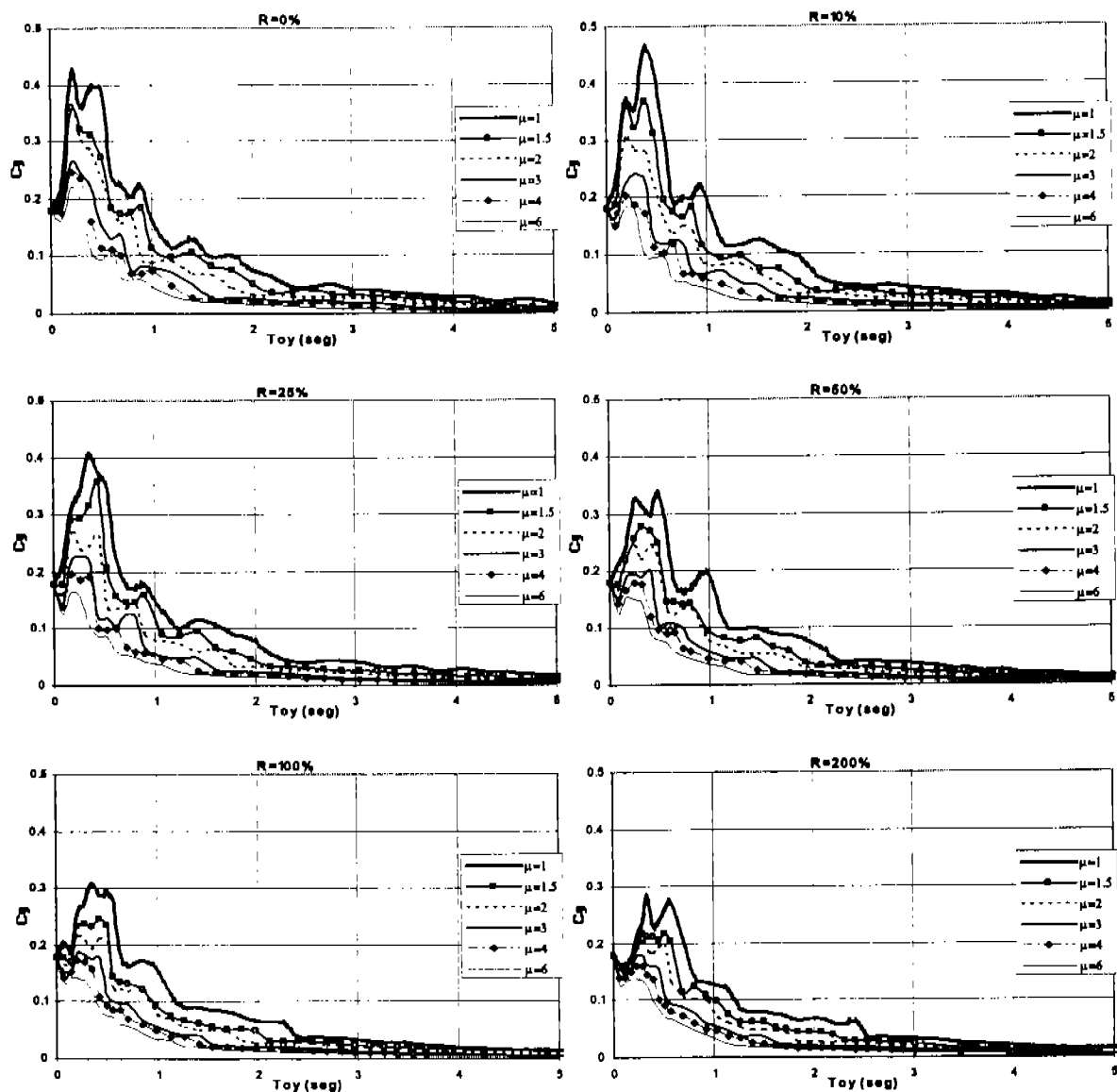


Figura VI.30 Relación entre ductilidad e incremento de rigidez y resistencia (Taft)

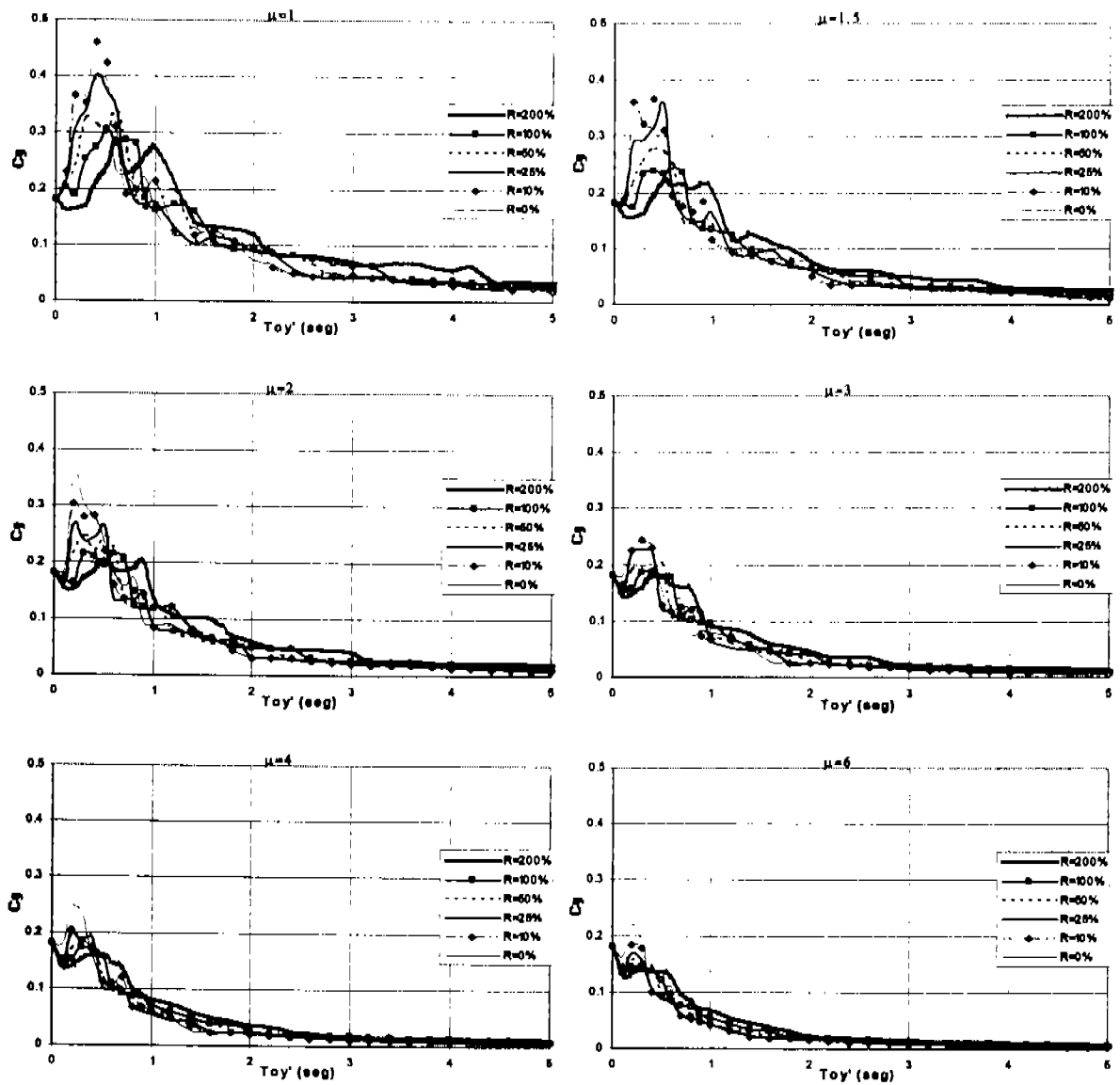


Figura VI.31 Relación entre ductilidad e incremento de rigidez y resistencia, referida al periodo del sistema sin DDE (Taft)

Espectros de distorsión de entrepiso

En las figuras siguientes se presentan los espectros resultantes de colocar DDE en las estructuras. Para entender más como se obtienen y la implicación que tiene su forma, consultar los capítulos IV y V en lo referente a espectros de distorsión.

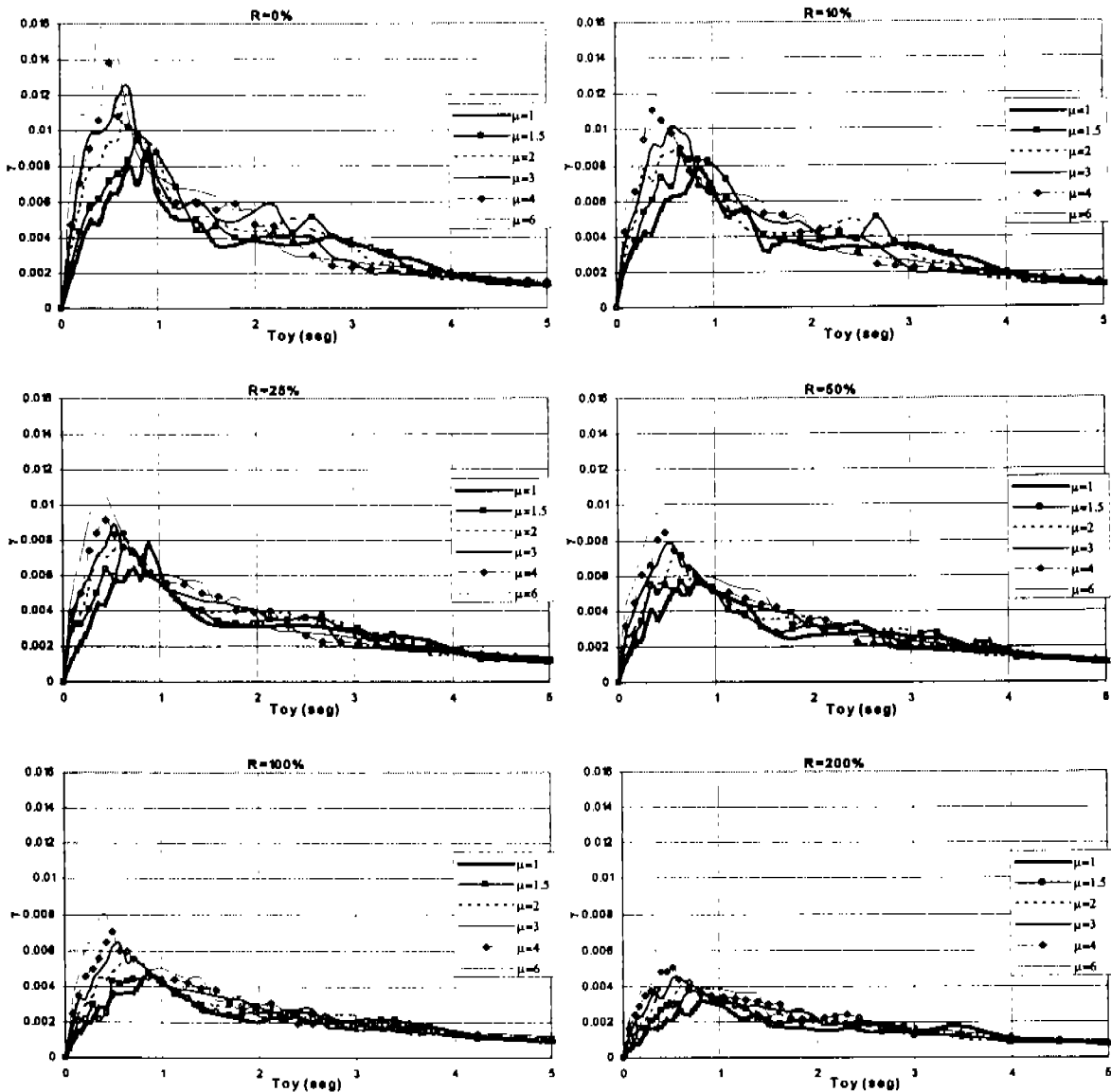


Figura VI.32 Relación entre distorsión e incremento de rigidez y resistencia (El Centro)

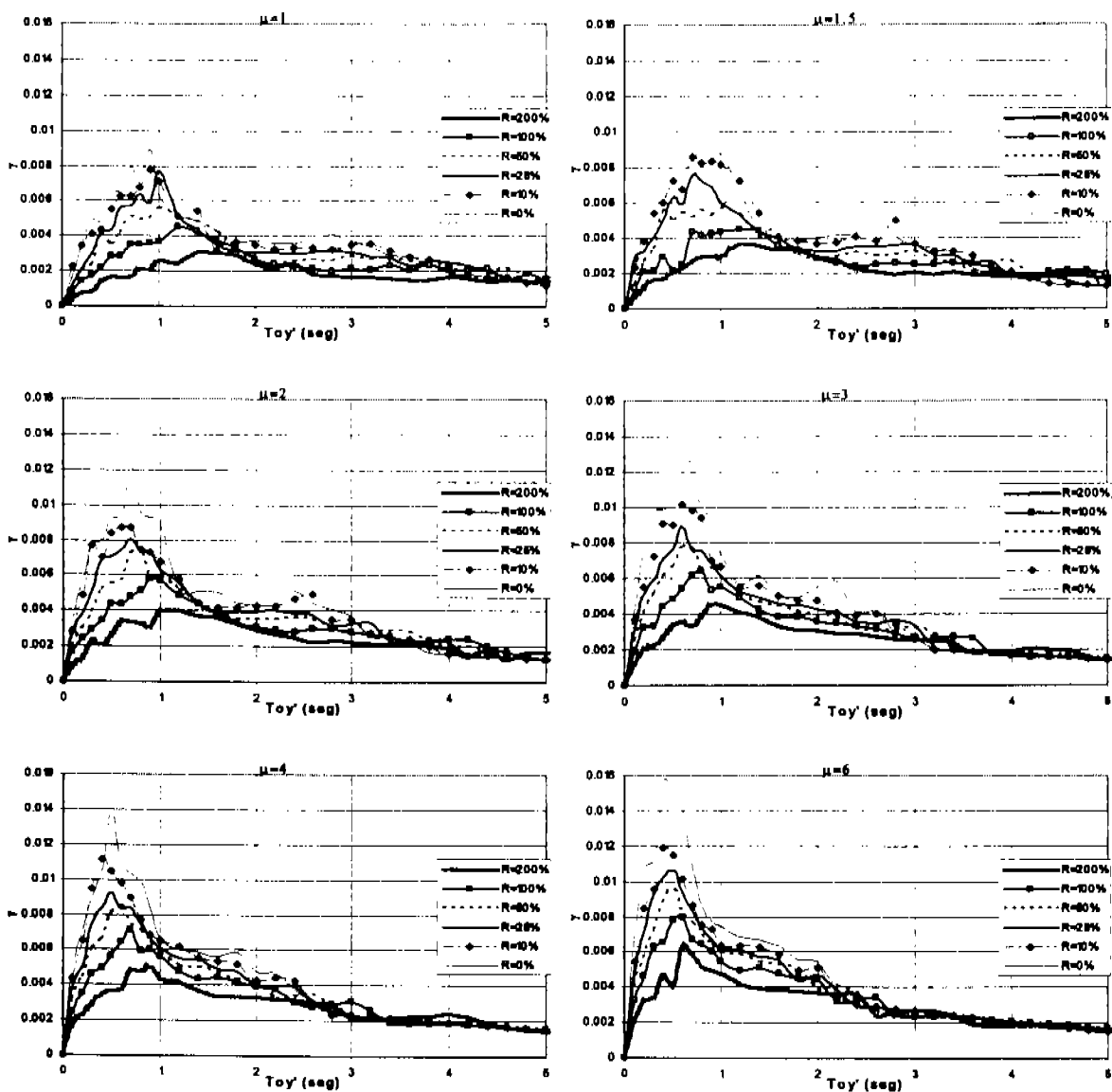


Figura VI.33 Relación entre distorsión e incremento de rigidez y resistencia, referida al periodo del sistema sin DDE (El Centro)

EFFECTO COMBINADO DEL CAMBIO DE RIGIDEZ Y RESISTENCIA POR USO DE DISPOSITIVO DISIPADOR DE ENERGÍA, EN LOS ESPECTROS DE RESISTENCIA Y DUCTILIDAD

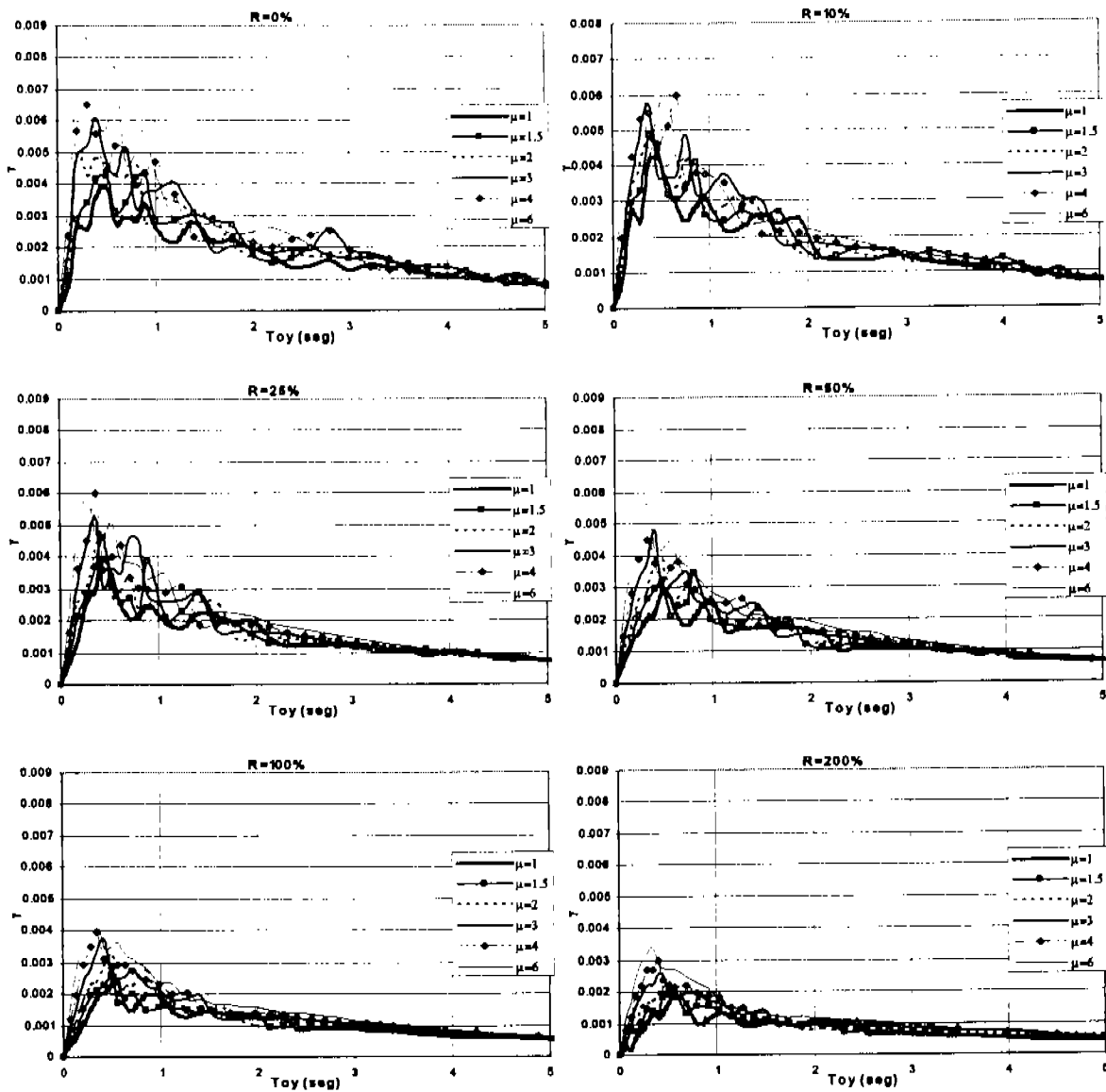


Figura VI.34 Relación entre distorsión e incremento de rigidez y resistencia, referida al periodo del sistema sin DDE (Taft)

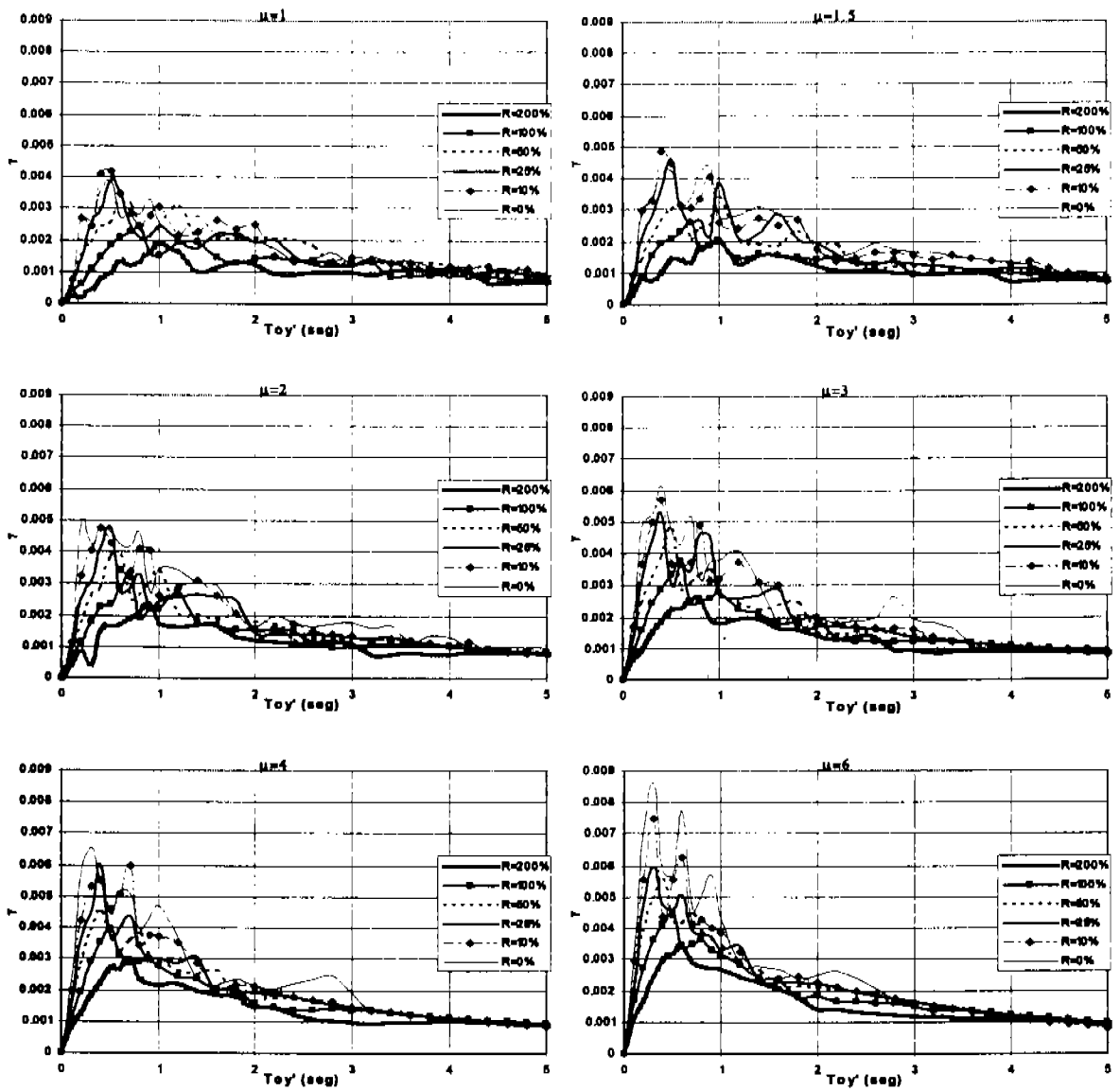


Figura VI.35 Relación entre distorsión e incremento de rigidez y resistencia, referida al periodo del sistema sin DDE (Taft)

Espectros de energía

Por lo que se refiere a los espectros de energía y dado lo que se plantea en los objetivos de este trabajo, todo esto dicho, basta con revisar los comentarios hechos para las figuras referentes a energía en los capítulos IV y V, para entender que significa cada espectro.

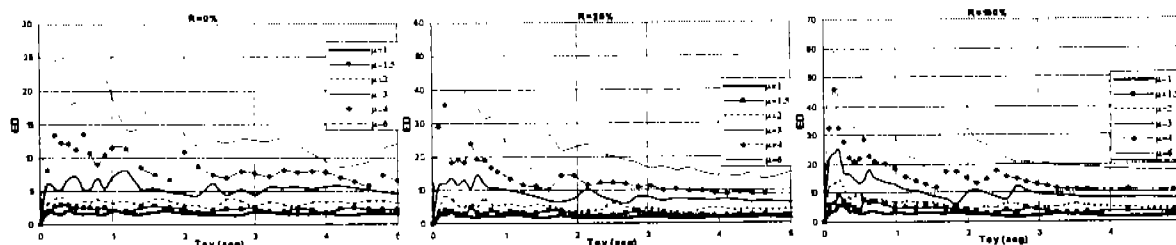


Figura VI.36 Energía disipada total acumulada (El Centro)

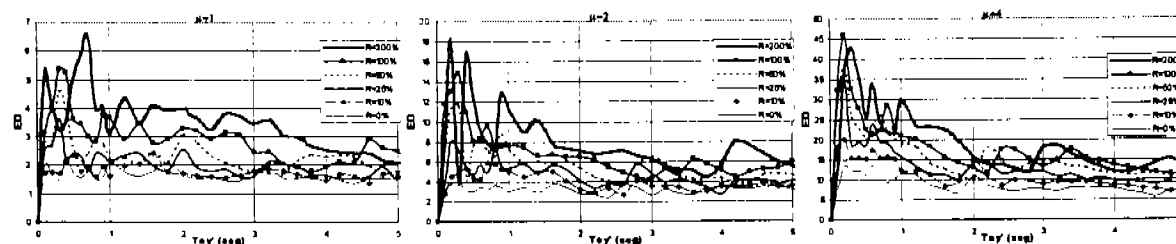


Figura VI.37 Energía disipada total acumulada, referida al periodo del sistema sin DDE (El Centro)

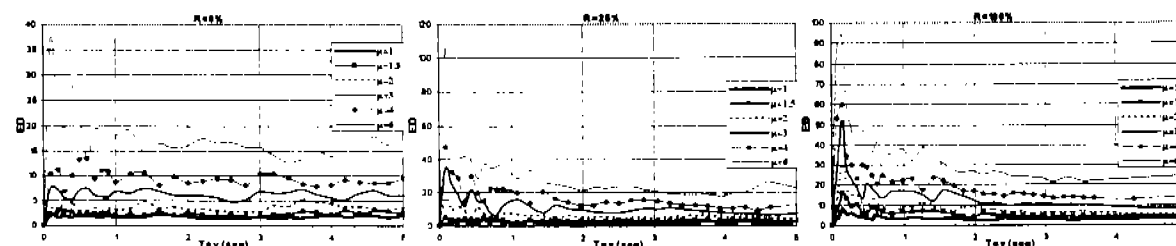


Figura VI.38 Energía disipada total acumulada (Taft)

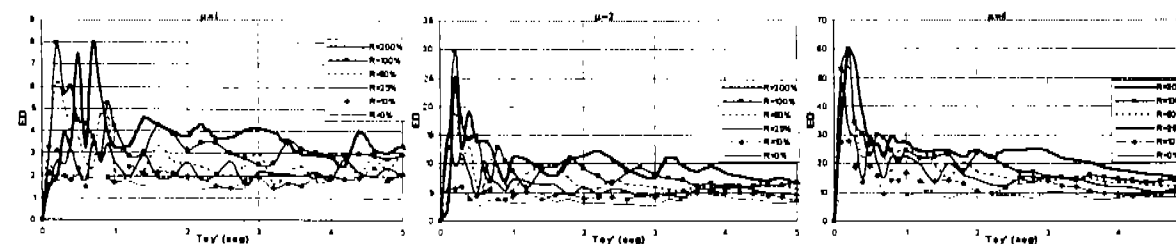


Figura VI.39 Energía disipada total acumulada, referida el periodo del sistema sin DDE (Taft)

VII. EFECTO DEL AMORTIGUAMIENTO VISCOSO EN LA RESPUESTA NO LINEAL

En la mayoría de los análisis de respuesta dinámica de sistemas, las diversas fuentes de amortiguamiento se suelen representar por un amortiguamiento viscoso, logrando así una simplificación del problema que no adolece de precisión, para efectos prácticos.

El amortiguamiento inherente a las estructuras sujetas a excitaciones, se puede representar generalmente por amortiguamiento viscoso interno y externo, amortiguamiento de fricción de cuerpo, amortiguamiento de histéresis y amortiguamiento por radiación al material de desplante.

El amortiguamiento viscoso interno, es el que nos ocupa en el presente trabajo, es proporcional a la velocidad, de manera que el factor de amortiguamiento se incrementa en proporción a la frecuencia natural de la estructura. El amortiguamiento viscoso externo, se genera por las acciones del medio ambiente y se desprecia por la magnitud de sus valores. El amortiguamiento por fricción de cuerpo también llamado amortiguamiento de Coulomb, se presenta por la fricción de las superficies intergranulares, es constante e independiente de la velocidad y del tamaño del desplazamiento. El amortiguamiento histérico, se presenta por la inversión en el signo de la carga en el intervalo inelástico, considerado en este estudio. El amortiguamiento por radiación, es el causado por la propagación de las ondas del movimiento de la estructura, en el material de desplante, suelo.

En las referencias citadas en este trabajo no se encontró la relación entre la ductilidad y el amortiguamiento, además el autor desconoce la influencia del cambio de amortiguamiento de 2 a 5%. Se encontró en la bibliografía que el nivel de amortiguamiento depende del tipo de estructuración y de la intensidad de las acciones; es una variable que se encuentra en ese intervalo.

Con la finalidad de evaluar el efecto del amortiguamiento viscoso en la respuesta no lineal, se hizo un análisis, al variar el amortiguamiento viscoso proporcional a la rigidez en los siguientes valores 0.02 y 0.05; mientras que el amortiguamiento viscoso proporcional a la masa se consideró 0.0, para todos los grupos de sistemas estudiados.

De los análisis realizados, se observó que en los espectros inelásticos de respuesta, para una ductilidad de 1, un incremento en el amortiguamiento viscoso de 2% a 5% en los sistemas reduce las respuestas

de manera más significativa, que con los espectros inelásticos con ductilidad cercana a 1; se encontró que conforme aumenta la ductilidad del sistema estructural en estudio, el efecto del amortiguamiento viscoso tiende a decrecer, por lo tanto, a ductilidades grandes, el efecto del amortiguamiento viscoso puede despreciarse; esta misma conclusión aplica para periodos fundamentales grandes, donde el efecto del cambio de amortiguamiento viscoso es poco significativo.

VII.1 PARA REGISTROS DE MOVIMIENTO CON PERIODO DOMINANTE CORTO

Existe influencia significativa en los espectros de resistencia lateral para un cambio de amortiguamiento de 2% a 5% para las zonas de periodos de máxima respuesta, en el resto de periodos la influencia es para efectos prácticos nula, también la influencia es despreciable para ductilidades mayores a 2, independientemente del periodo fundamental, por lo que se justifica que el trabajo se realizará con 5% de amortiguamiento para todos los espectros. Las características descritas son aplicables para todos los registros de este estudio y para todas las condiciones estudiadas, por lo tanto sólo se muestran los espectros de resistencia lateral para los registros estudiados con incremento de rigidez, con incremento en la relación de resistencia y con el efecto combinado de incremento de rigidez y relación de resistencia, para ductilidades de 1, 1.5, 2, 3, 4 y 6, sin hacer más comentarios.

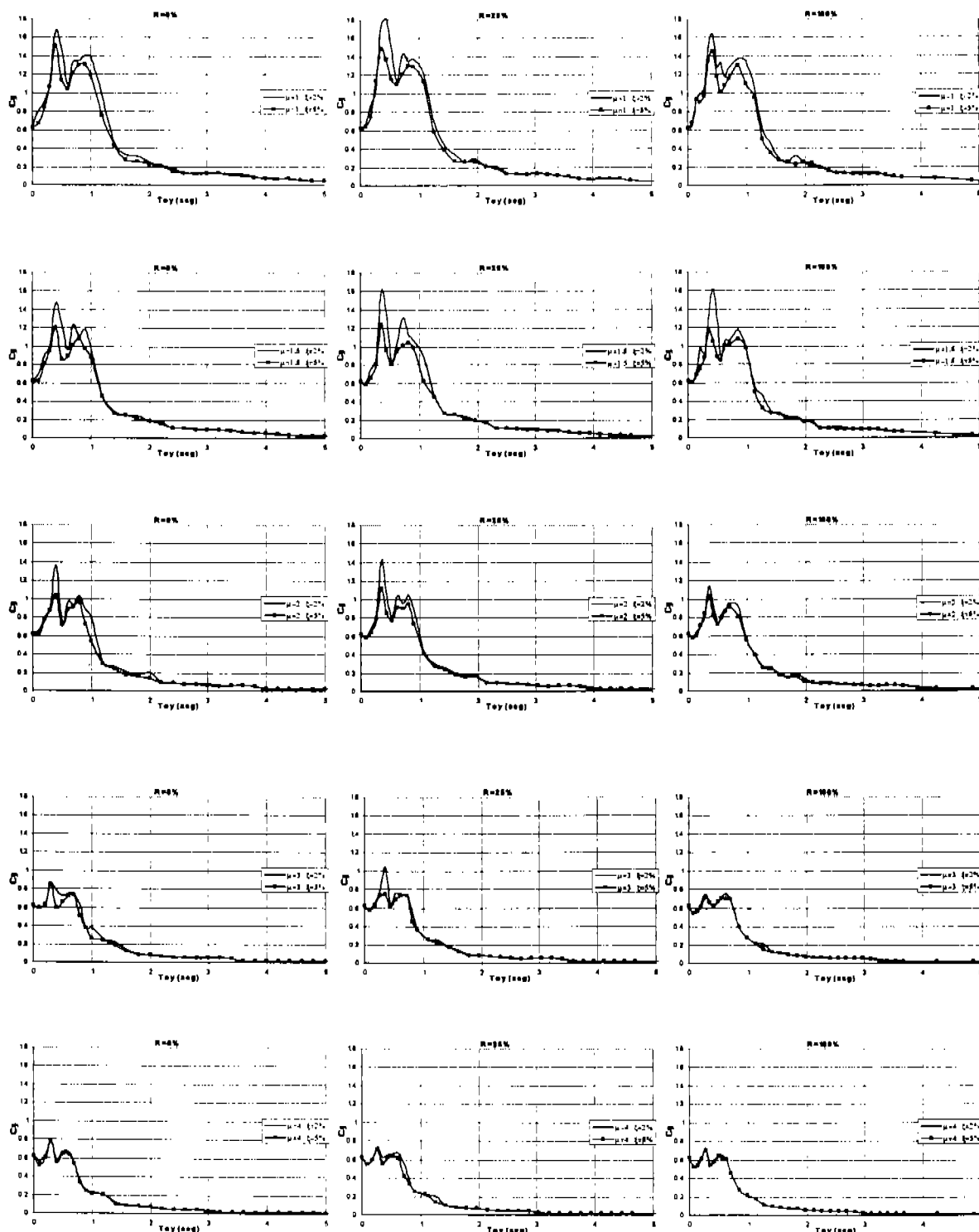


Figura VII.1 Espectros de resistencia lateral para amortiguamientos de 2% y 5% (Kobe, Rigidez)

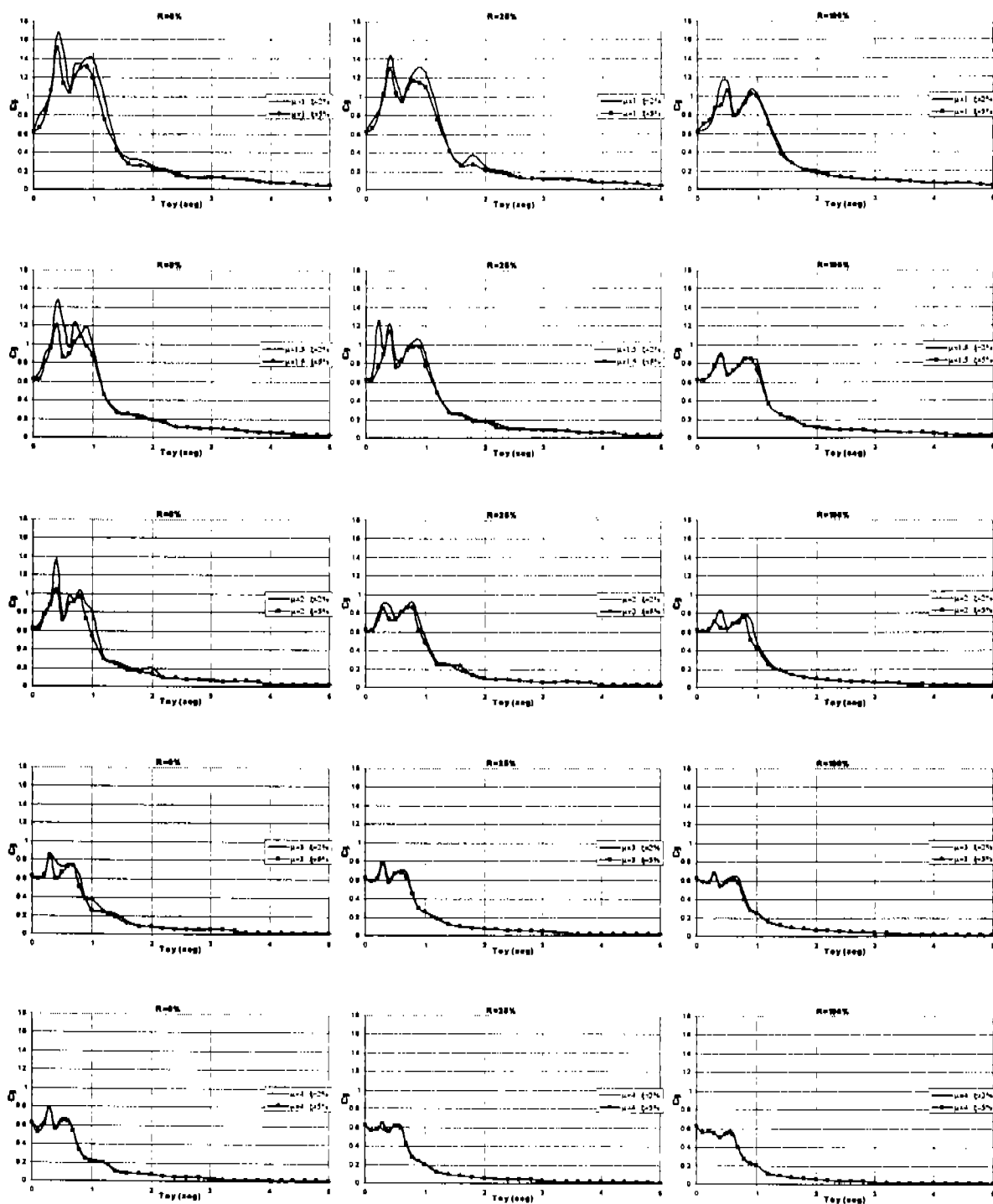


Figura VII.2 Espectros de resistencia lateral para amortiguamientos de 2% y 5% (Kobe, Resistencia)

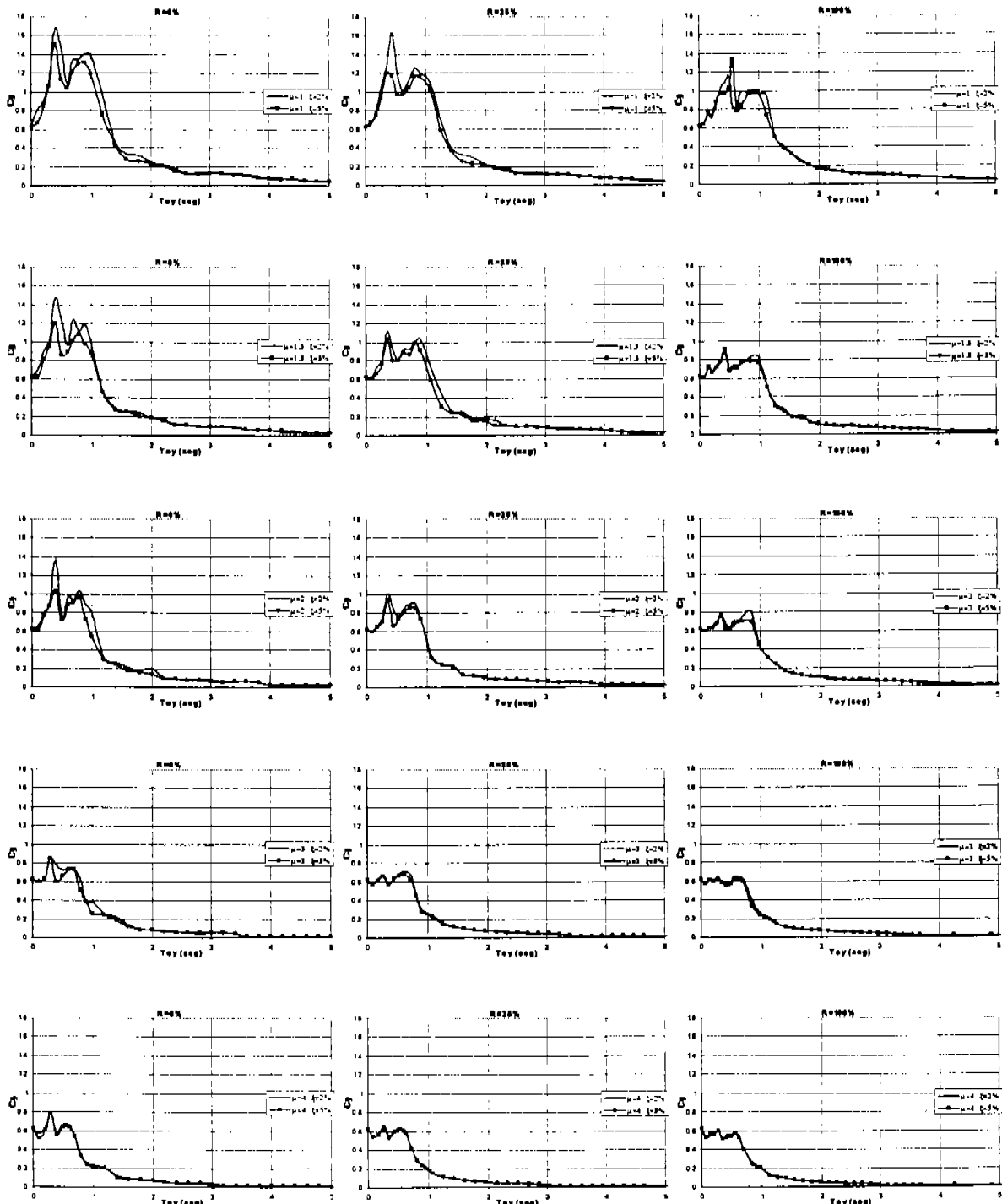


Figura VII.3 Espectros de resistencia lateral para amortiguamientos de 2% y 5%
(Kobe, Rigidez y Resistencia)

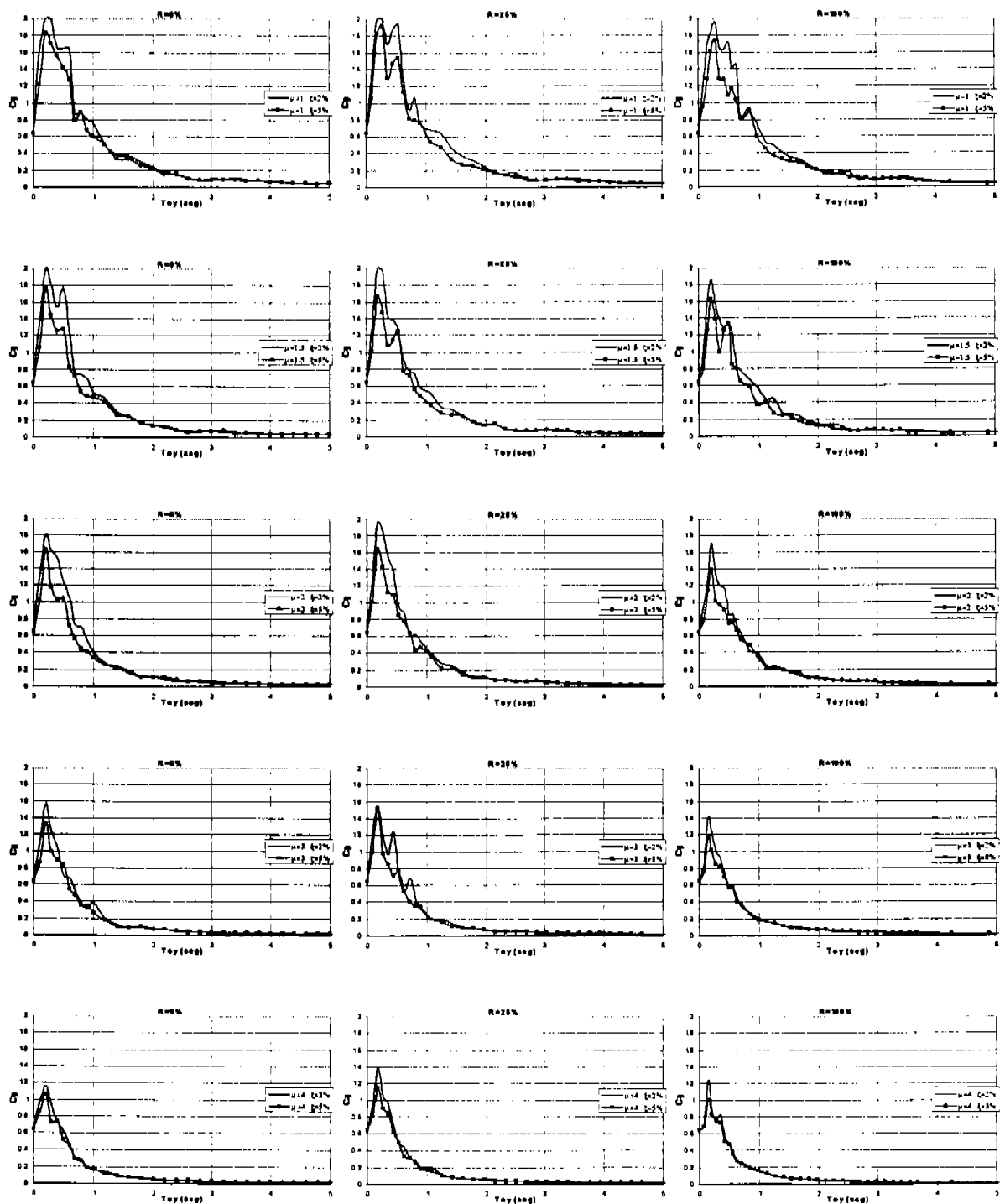


Figura VII.4 Espectros de resistencia lateral para amortiguamientos de 2% y 5% (Llolleo, Rigidez)

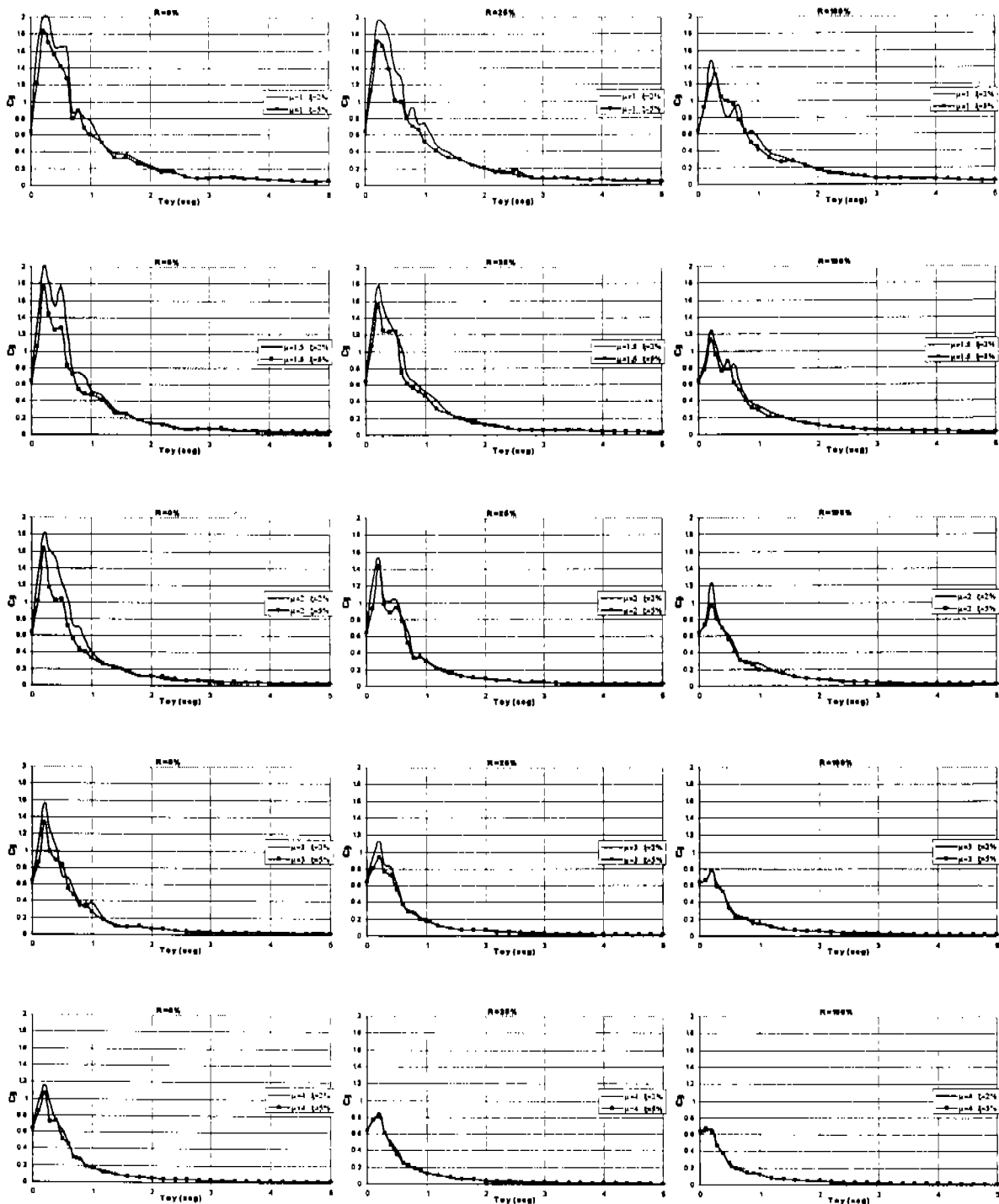


Figura VII.5 Espectros de resistencia lateral para amortiguamientos de 2% y 5% (Llolleo, Resistencia)

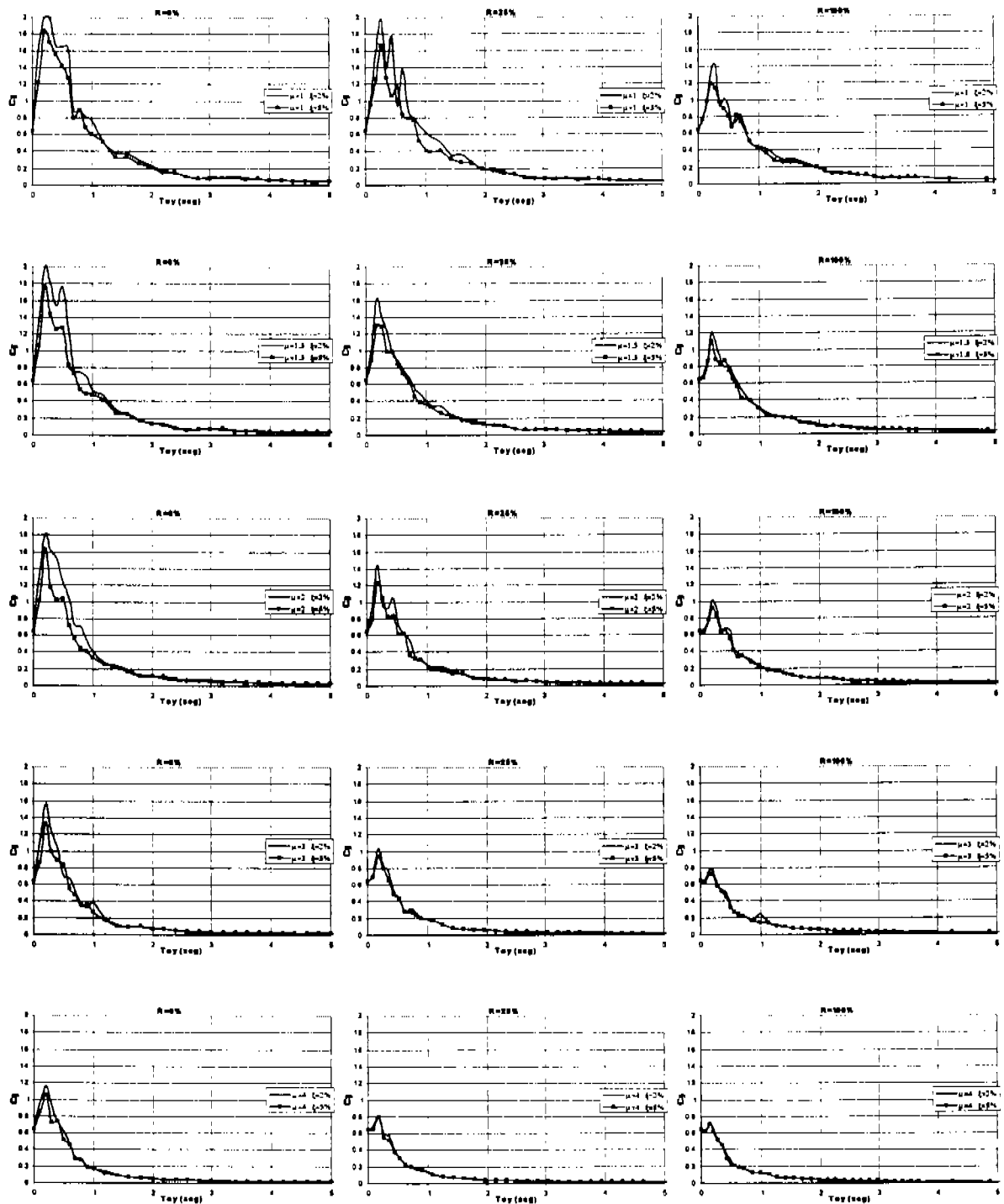


Figura VII.6 Espectros de resistencia lateral para amortiguamientos de 2% y 5%
(Llollo, Rigidez y Resistencia)

VII.2 PARA REGISTROS DE MOVIMIENTO CON PERIODO DOMINANTE LARGO

Existe influencia significativa en los espectros de resistencia lateral para un cambio de amortiguamiento de 2% a 5% para las zonas de periodos fundamentales de máxima respuesta, para el resto de los periodos fundamentales la influencia es para efectos prácticos nula, también la influencia es despreciable para ductilidades mayores a 2, independientemente del periodo fundamental, por lo que se justifica que el trabajo se realizará con 5% de amortiguamiento para todos los espectros. Las características descritas son aplicables para todos los registros de este estudio y para todas las condiciones estudiadas, por lo tanto sólo se muestran los espectros de resistencia lateral para los registros estudiados con incremento de rigidez, con incremento en la relación de resistencia y con el efecto combinado de incremento de rigidez y relación de resistencia, para ductilidades de 1, 1.5, 2, 3, 4 y 6. Para observar detalladamente los cambios en los espectros se presentan las siguientes figuras.

De los resultados obtenidos se infiere que en espectros elásticos, el cambio de amortiguamientos modifica la magnitud de las demandas en forma importante.

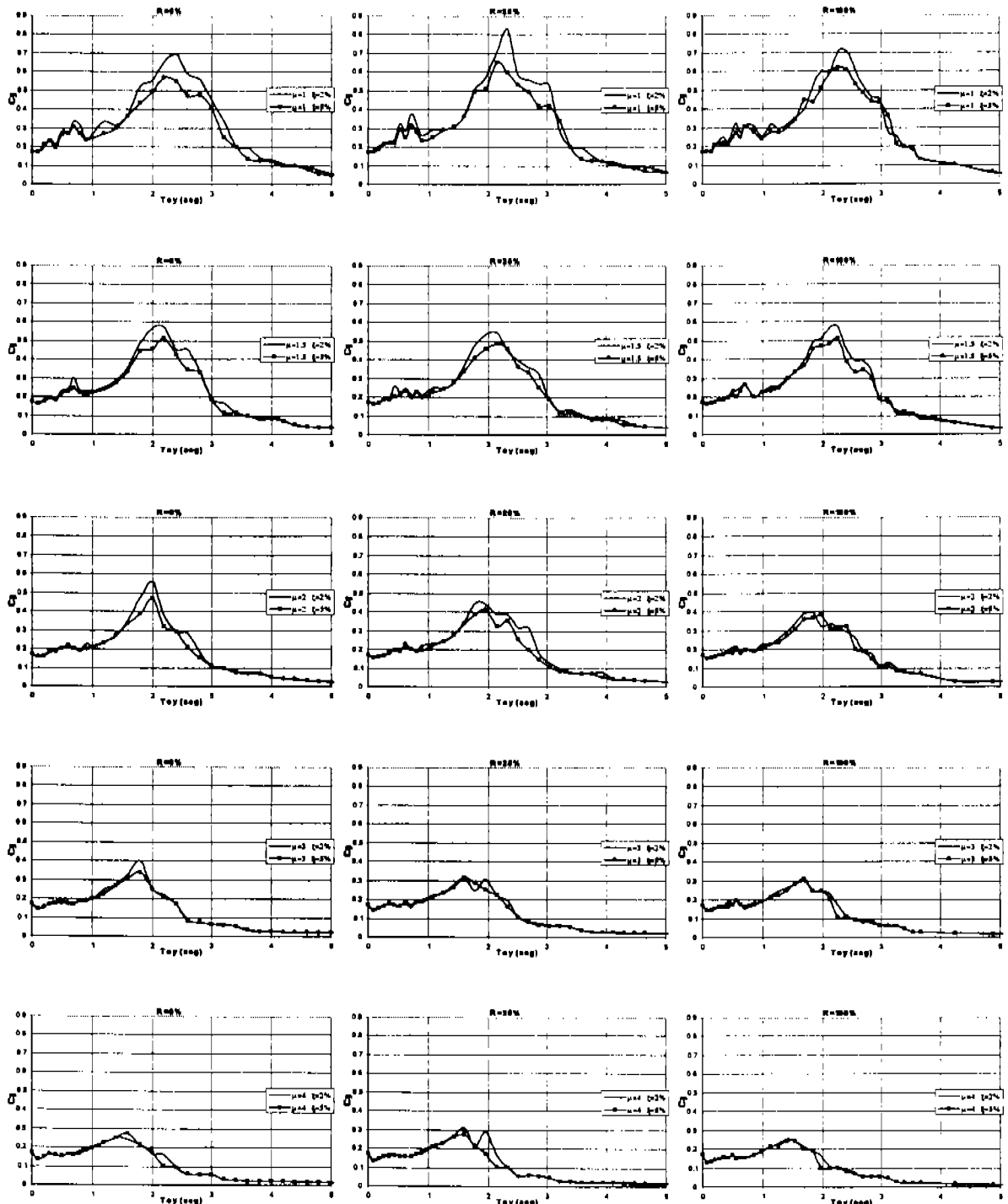


Figura VII.7 Espectros de resistencia lateral para amortiguamientos de 2% y 5% (SCT85, Rigidez)

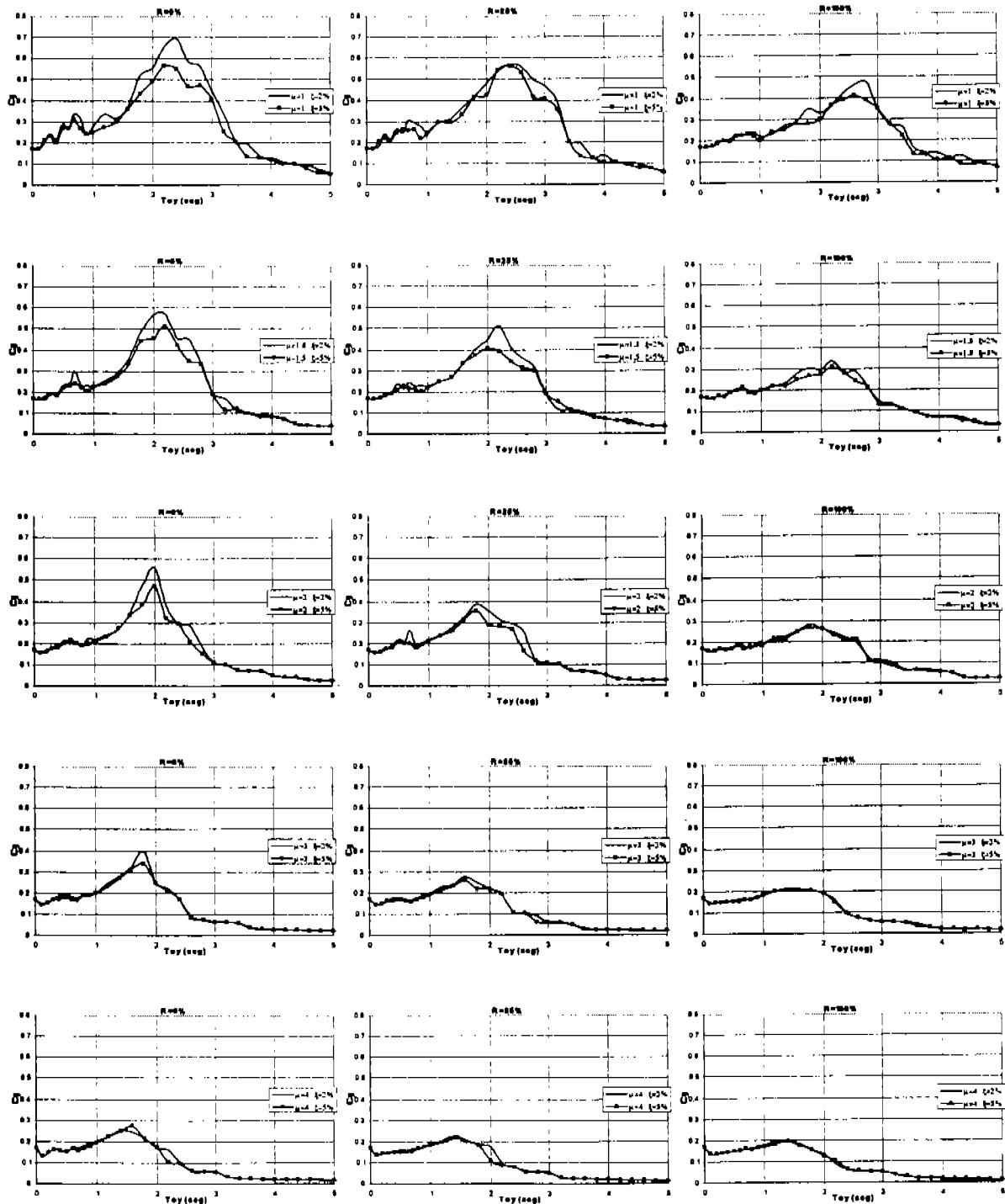


Figura VII.8 Espectros de resistencia lateral para amortiguamientos de 2% y 5% (SCT85, Resistencia)

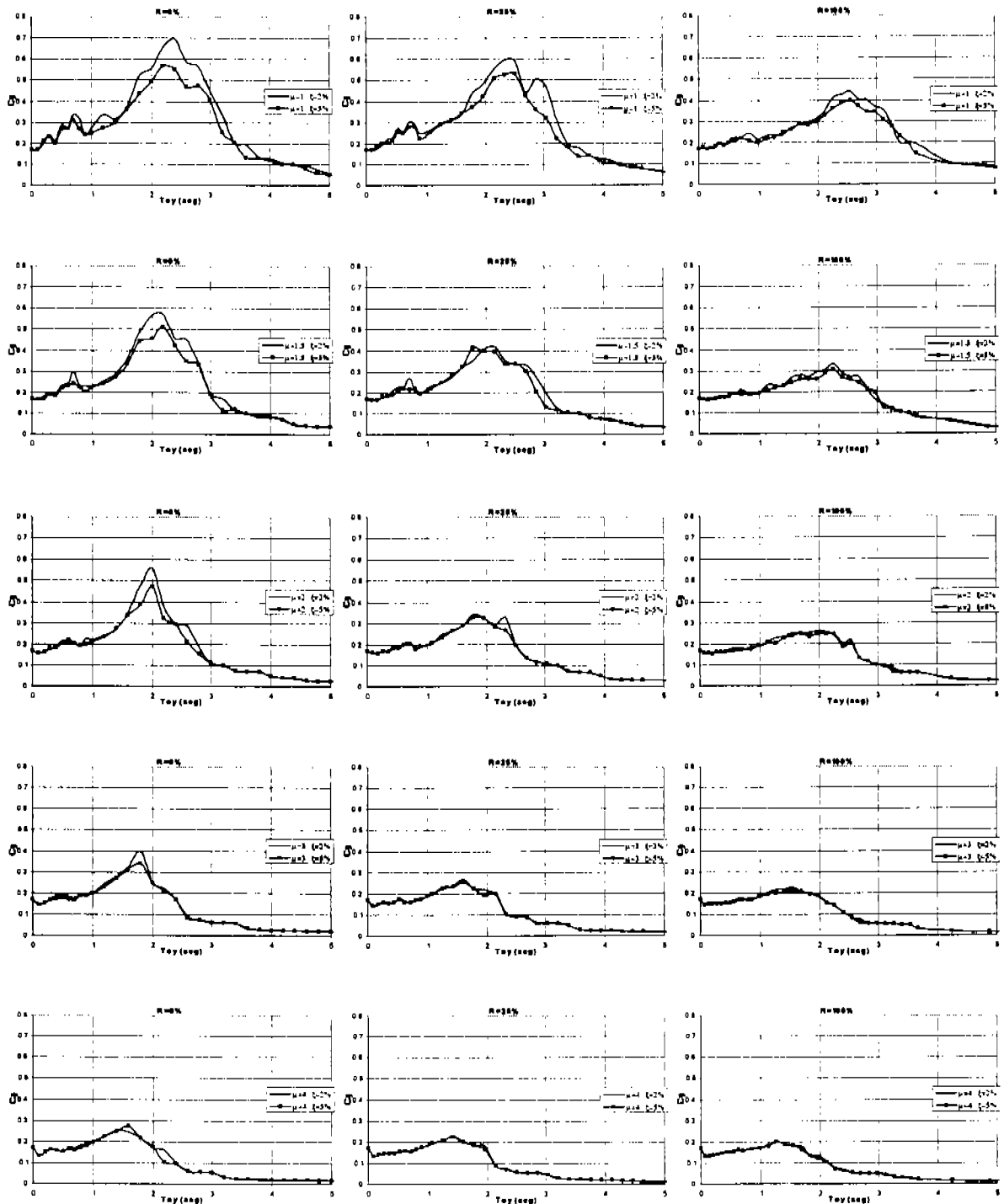


Figura VII.9 Espectros de resistencia lateral para amortiguamientos de 2% y 5% (SCT85, Rigidez y Resistencia)

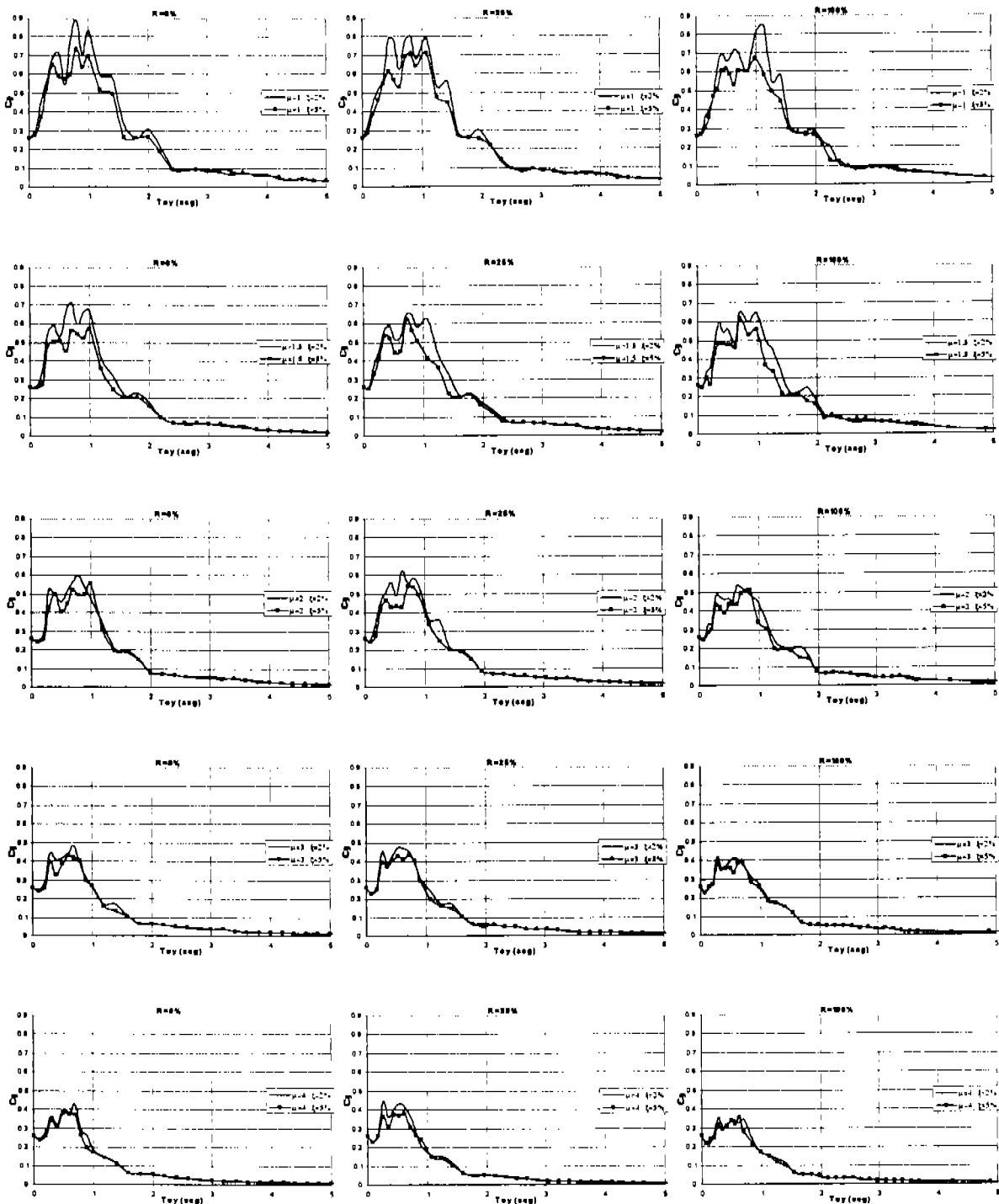


Figura VII.10 Espectros de resistencia lateral para amortiguamientos de 2% y 5% (Tohoku, Rigidez)

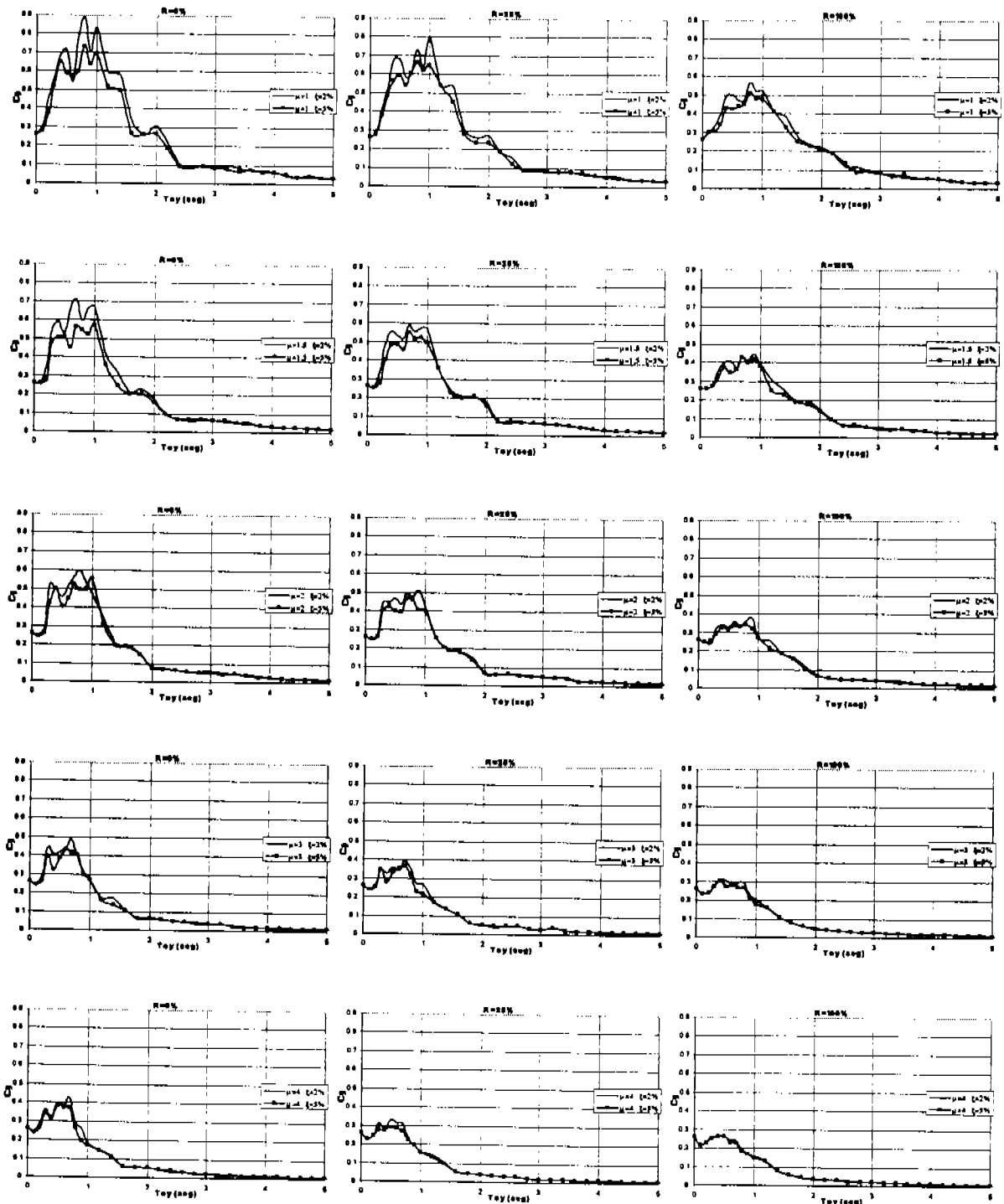


Figura VII.11 Espectros de resistencia lateral para amortiguamientos de 2% y 5%
(Tohoku, Resistencia)

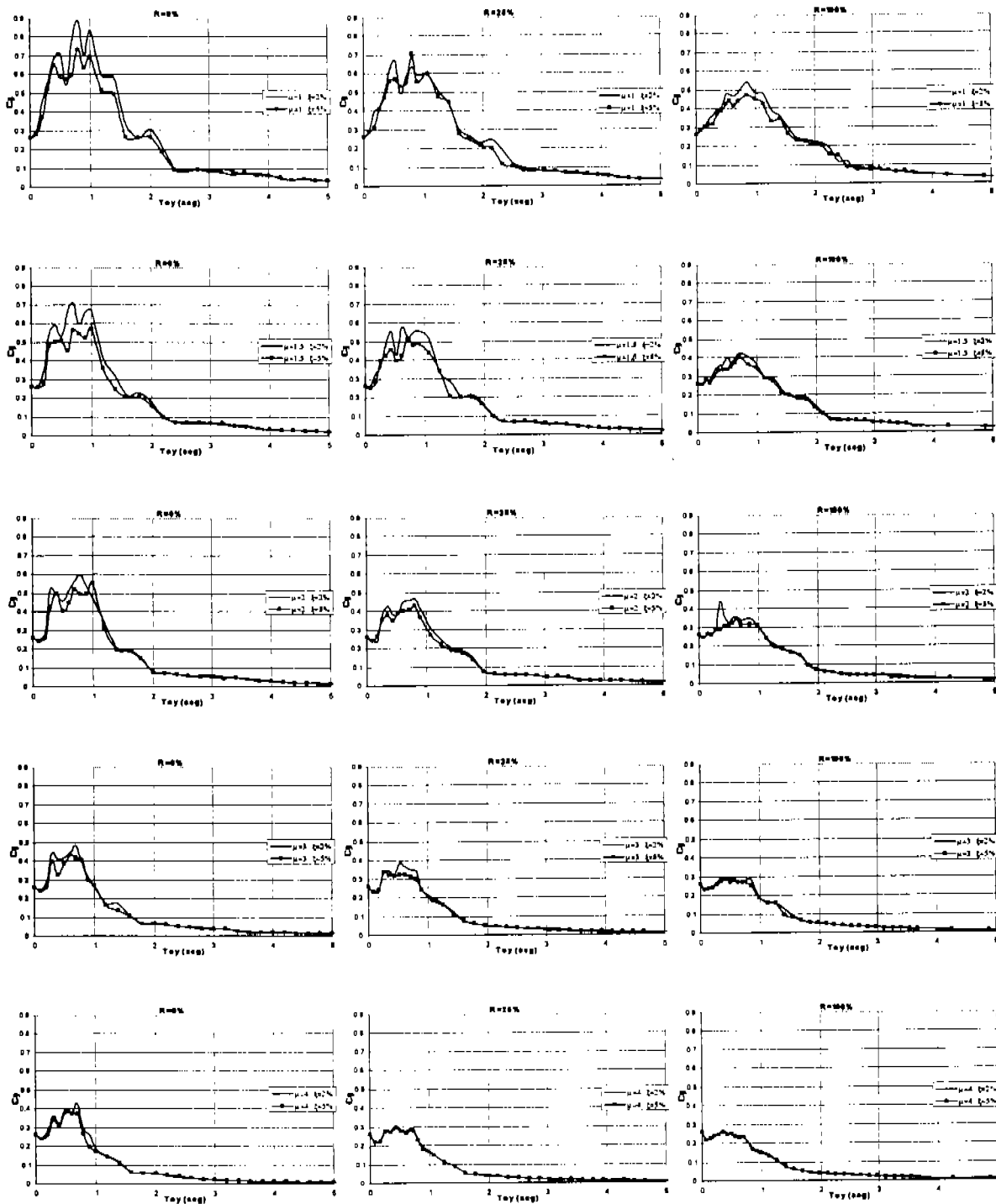


Figura VII.12 Espectros de resistencia lateral para amortiguamientos de 2% y 5%
(Tohoku, Rigidez y Resistencia)

VII.3 PARA REGISTROS CON EXCITACIÓN DE SUELO DURO

El efecto y tendencias descritas anteriormente para registros de movimiento con periodo dominante corto y largo son aplicables a los espectros mostrados a continuación:

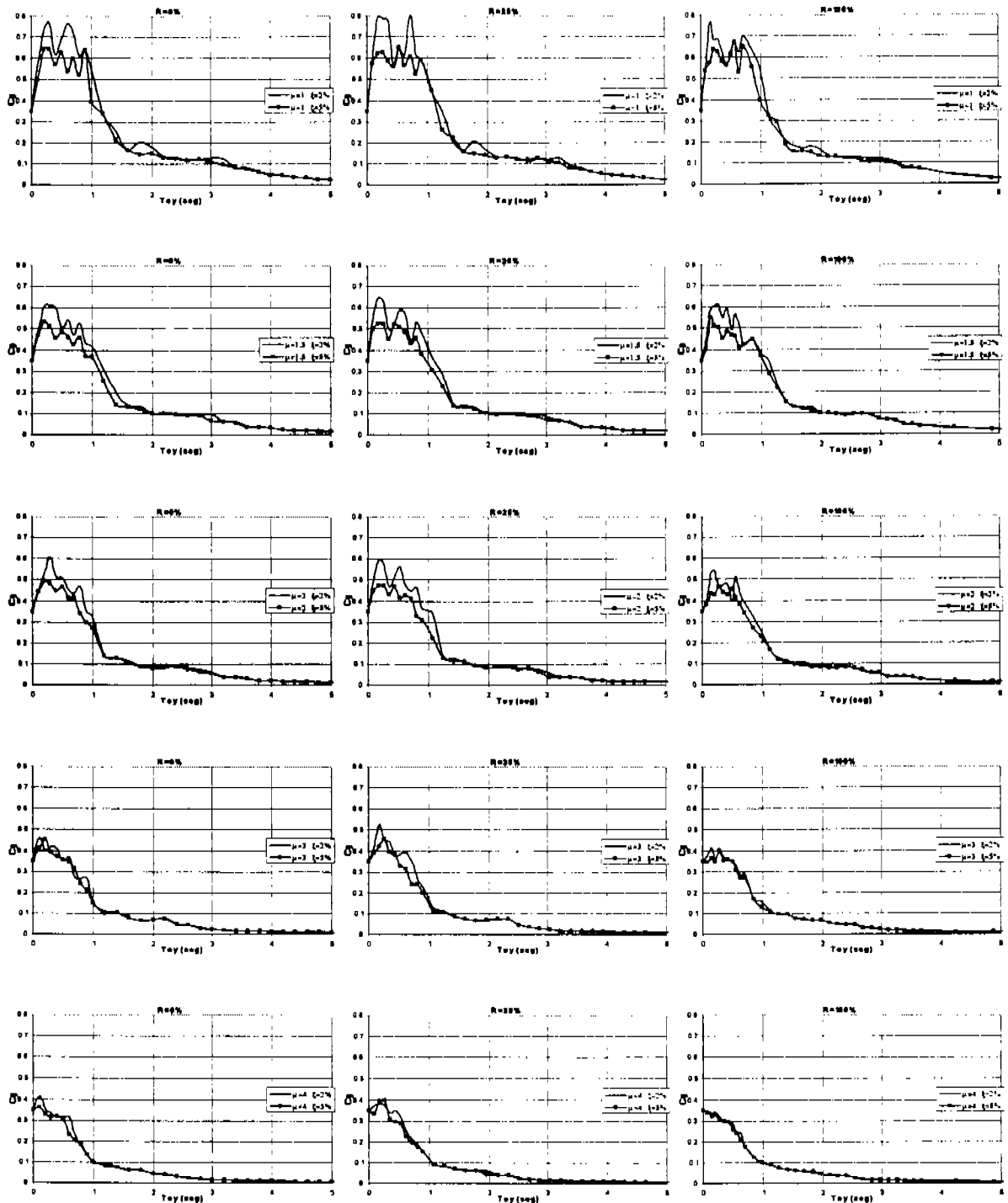


Figura VII.13 Espectros de resistencia lateral para amortiguamientos de 2% y 5% (El Centro, Rigidez)

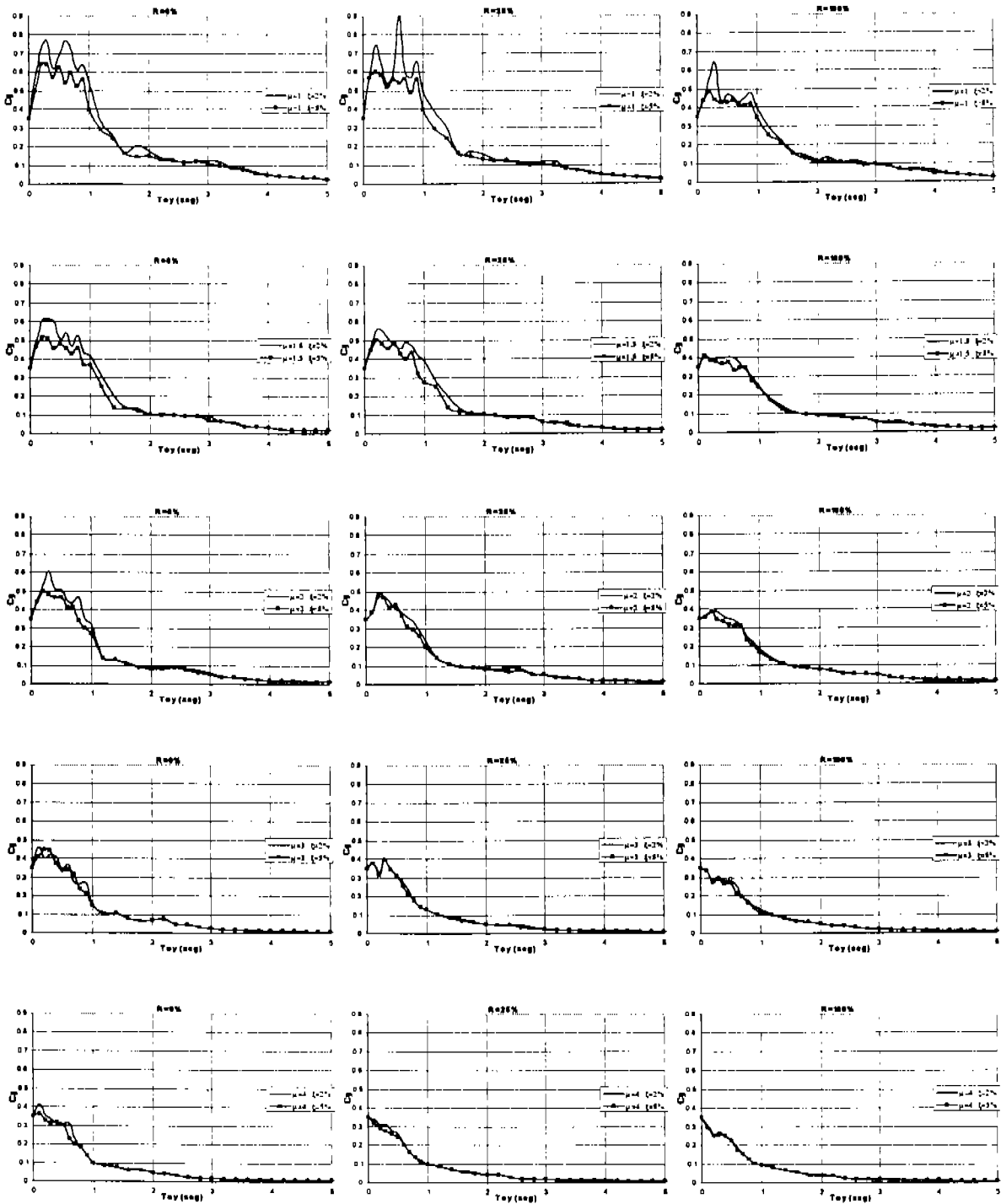


Figura VII.14 Espectros de resistencia lateral para amortiguamientos de 2% y 5%
(El Centro, Resistencia)

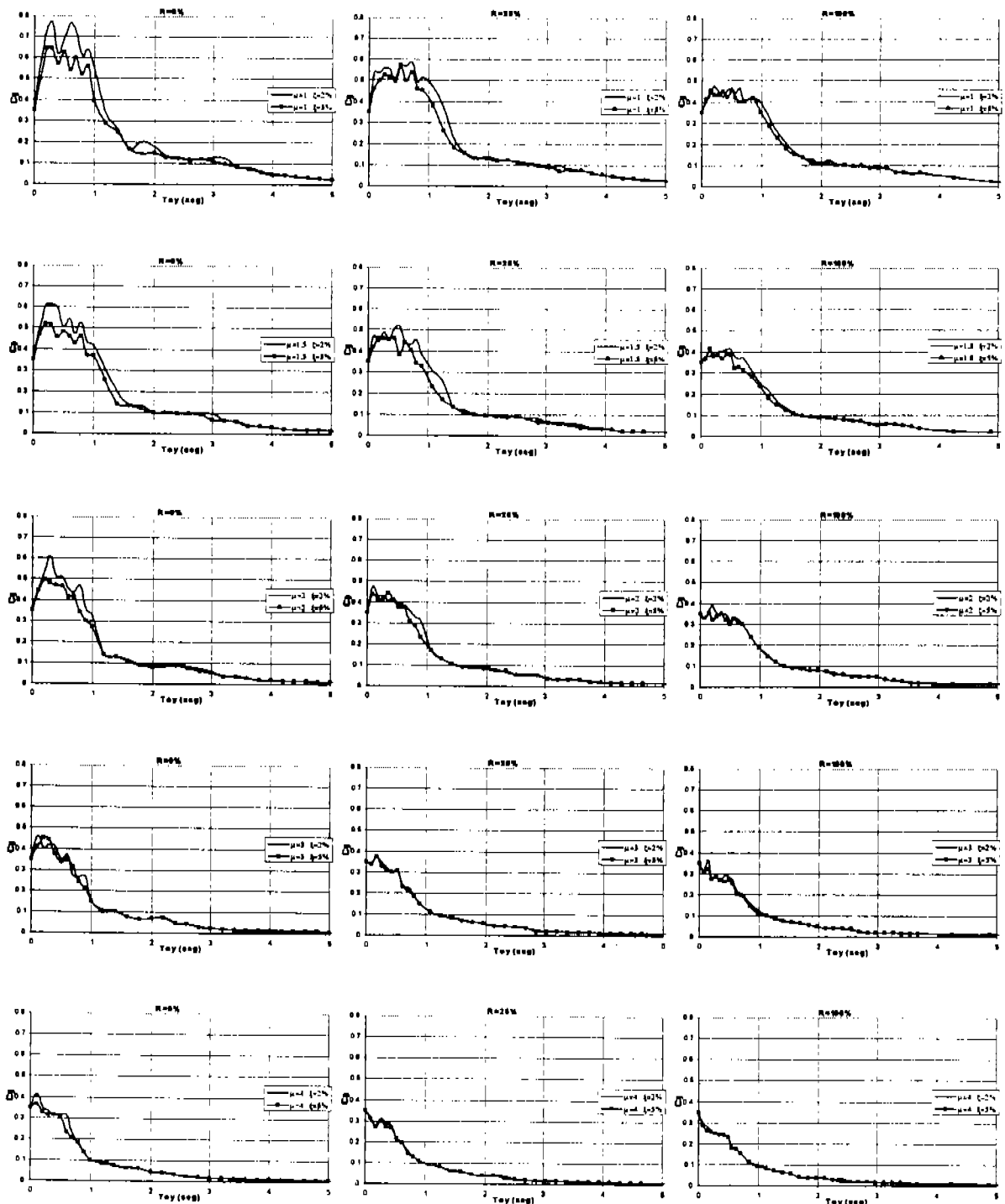


Figura VII.15 Espectros de resistencia lateral para amortiguamientos de 2% y 5%

(El Centro, Rigidez y Resistencia)

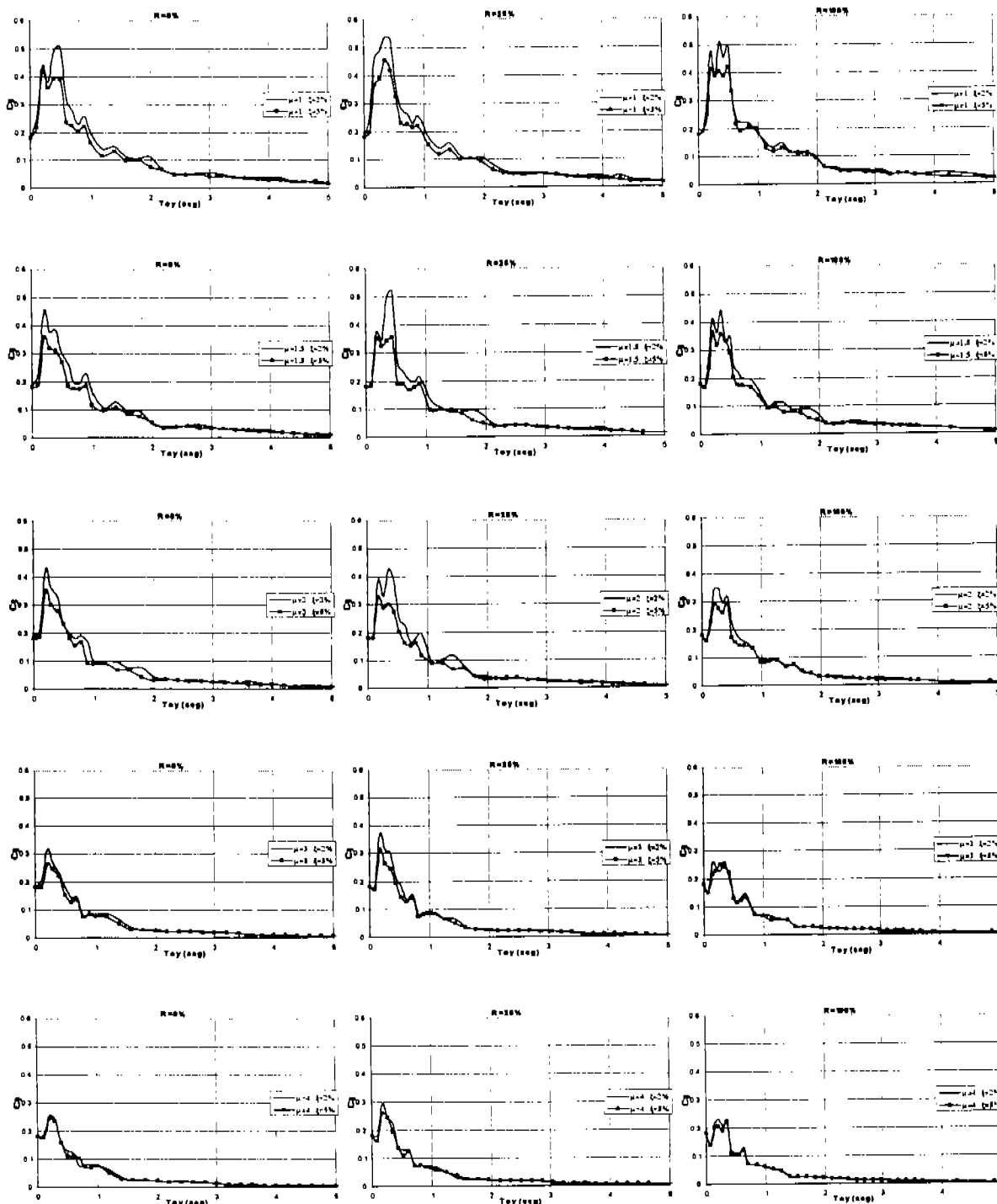


Figura VII.16 Espectros de resistencia lateral para amortiguamientos de 2% y 5% (Taft, Rigidez)

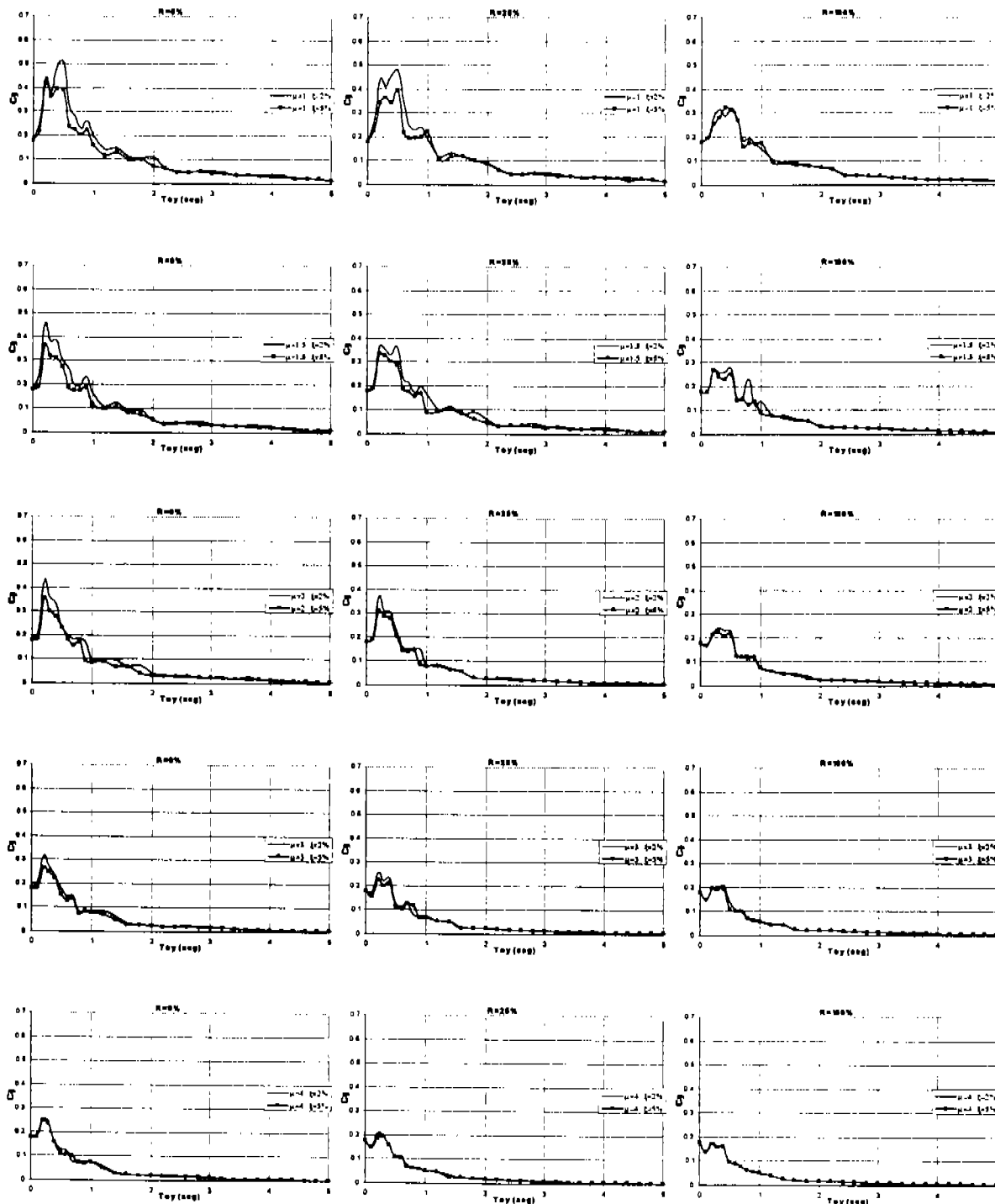


Figura VII.17 Espectros de resistencia lateral para amortiguamientos de 2% y 5% (Taft, Resistencia)

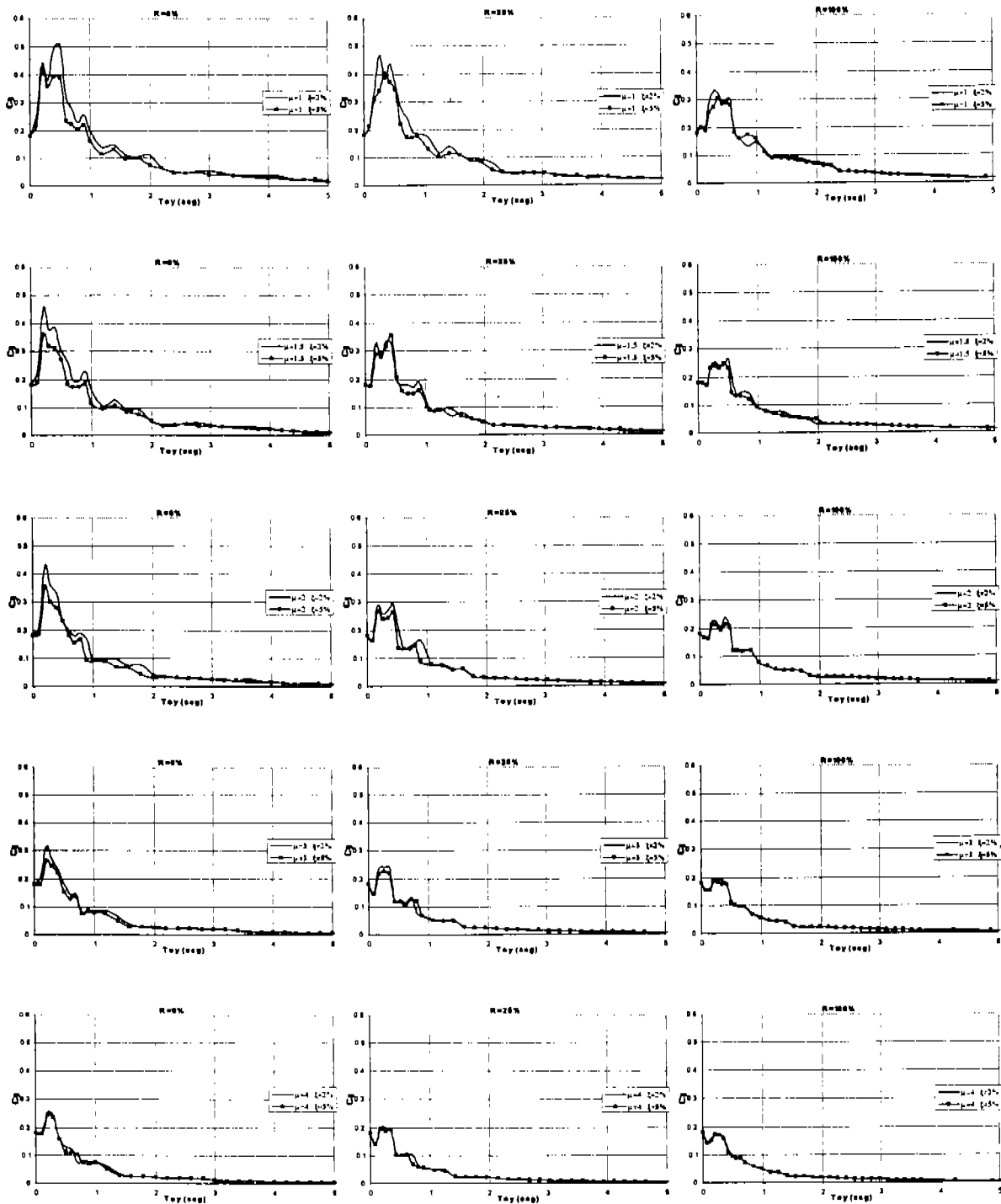


Figura VII.18 Espectros de resistencia lateral para amortiguamientos de 2% y 5% (Taft, Rigidez y Resistencia)

Una estructura puede definirse a partir de dos parámetros: el coeficiente para diseño sísmico y el periodo fundamental. Para generar estos valores, que a su vez sean apropiados para espectros de diseño, se deducen cocientes espectrales a partir del espectro de diseño propuesto en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF-04) y sus Normas Técnicas Complementarias para diseño por Sismo, (NTCDS-04), por ejemplo, para estructuras ubicadas en la zona III, zona de lago conformada de arcilla de alta compresibilidad, con periodo dominante del suelo del orden de 2.0seg.; esta zona es de especial interés en el estudio, ya que como se pudo ver en los espectros de aceleración elásticos presentados en el capítulo III. La zona de máxima demanda de resistencia y de máximo aprovechamiento del efecto amortiguamiento se encuentra comprendida en un intervalo entre 1 y 3 segundos, para registros en suelo blando con foco lejano.

En la figura VII.19 se muestran los espectros de diseño para diferentes factores de comportamiento sísmico que se estudian; se aprovecha para representar donde el espectro de diseño toma en cuenta factores locales que propician una reducción en el tamaño de la parte plana del espectro.

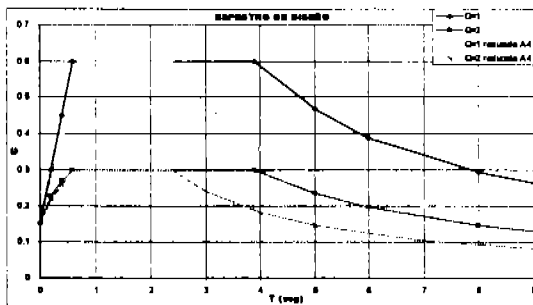


figura VII.19.a

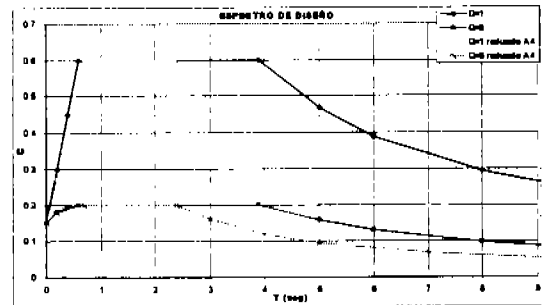


figura VII.19.b

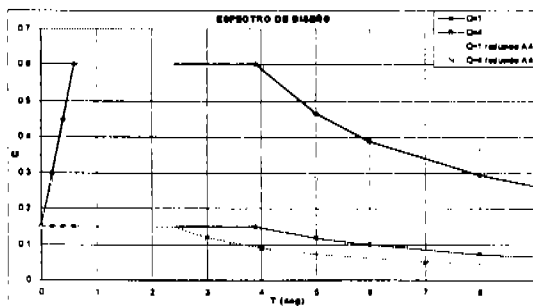


figura VII.19.c

Figura VII.19 Espectros de diseño para zona III para diferentes factores de comportamiento sísmico

Una vez definido el coeficiente sísmico y el periodo fundamental, se procede a determinar la ductilidad generada por los sistemas, esto para amortiguamientos de 2% y de 10%; se obtienen los espectros mostrados en la figura VII.20, en donde se puede ver que, para periodos cortos, la ductilidad generada sobrepasa valores prácticos y racionales, además se entiende que estas ductilidades tan grandes no se presentan en estructuras reales, debido a la sobrerresistencia.

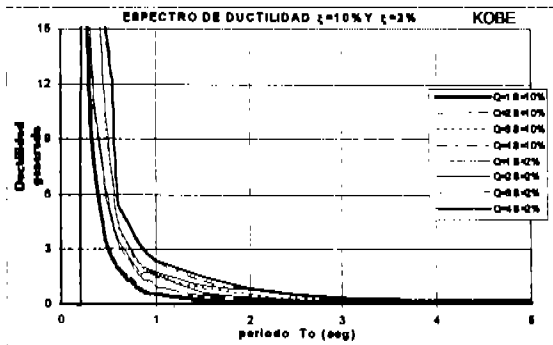


figura VII.20.a

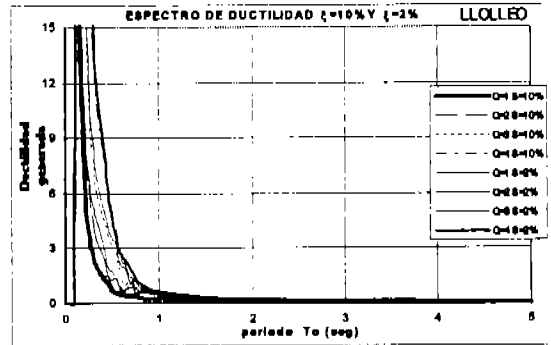


figura VII.20.b

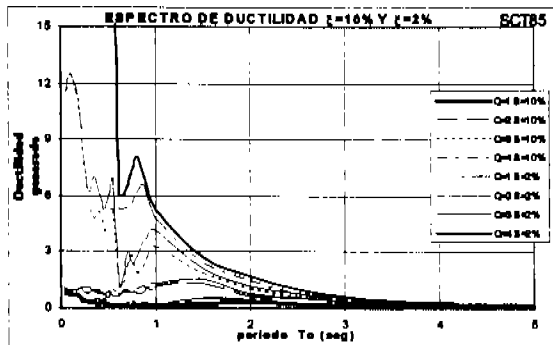


figura VII.20.c

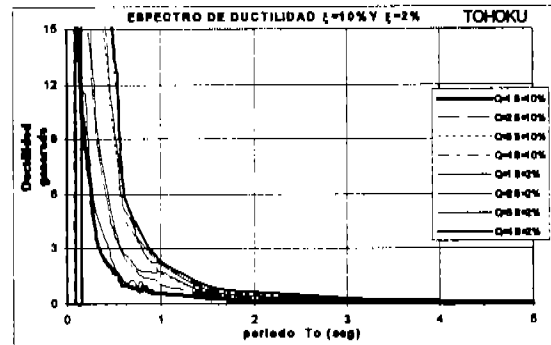


figura VII.20.d

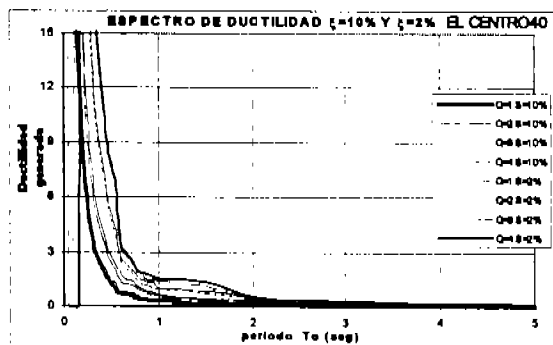


figura VII.20.e

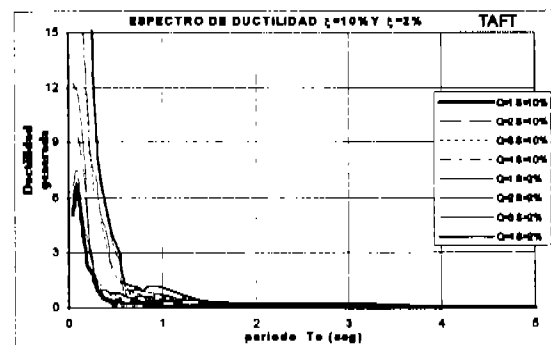


figura VII.20.f

Figura VII.20 Espectros de ductilidad generada para los registros en estudio.

En la figura VII.20 se muestran los espectros de ductilidad generada para los registros sísmicos en estudio, donde se puede ver que el amortiguamiento viscoso no influye en las respuestas de demanda generada por la estructura. Se hizo variar el amortiguamiento viscoso del 2% al 10%, sin encontrar efecto importante

Para periodos mayores a 1.5 seg. se observa que la ductilidad generada no sobrepasa de dos, mientras que para periodos menores a 1.5 seg. la ductilidad generada se dispara hasta valores sin significado físico. Para el espectro de Sct85 y Taft el incremento en la ductilidad generada para periodos cortos es menos significativa que para los otros casos.

VIII. CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECTROS DE DISEÑO PARA ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO CUANDO SE EMPLEAN DISPOSITIVOS DISIPADORES DE ENERGÍA PASIVOS

Desde hace muchos años se tiene la conciencia de que una estructura está sujeta a diferentes niveles de excitación durante su vida útil, por lo que se ha tomado provisiones como las indicadas en el Título de Diseño Estructural del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal de 1976. En este planteamiento se reconoce la necesidad de revisar dos tipos de estados límite, el de servicio y el de falla, en él se menciona el procedimiento para la revisión de cada uno de ellos. En la práctica del diseño sísmico no se hacen las estimaciones del nivel de desempeño de la estructura por falta de entendimiento a los requerimientos, esto debido a la falta de claridad de las Normas Técnicas Complementaria para Diseño por Sismo en lo referente a espectros de diseño y los niveles de desempeño recomendables. Para la versión 2004 del RCDF ya se han tomado en cuenta los niveles de sobrerresistencia, los efectos de sitio, entre otros, pero sigue sin tener un procedimiento racional para la revisión del estado límite de servicio.

En Estados Unidos y Japón, líderes en el desarrollo del llamado diseño por desempeño, han publicado algunas asociaciones profesionales y gubernamentales, tales como la Structural Engineering Association of California (SEAOC VISIÓN 2000) y la Federal Emergency Management Agency (FEMA 273). En particular, el planteamiento del Comité Visión 2000 de la SEAOC clasifican el nivel de desempeño en cuatro niveles asociados a cuatro niveles sísmicos de diseño. Los niveles de desempeño según SEAOC son: Operación Completa, Ocupación Inmediata, Seguridad de Vida y, Colapso Incipiente. A continuación se describen cada uno de ellos con la finalidad de encontrar el nivel de desempeño que se pueda comparar con el estado límite de servicio.

Operación Completa. Establece que la estructura debe permanecer prácticamente con su resistencia y rigidez original, puede presentarse algún agrietamiento en muros divisorios, fachadas o plafones, mientras que las instalaciones y equipo no deben dañarse.

Ocupación Inmediata. En estructuras de concreto, cuando más se puede presentar grietas de poco ancho, y el acero no debe exceder la fluencia. En estructuras de acero, no debe excederse el inicio de la fluencia; lo anterior implica que la resistencia e integridad del ciclo histerético de las estructuras

pueden sufrir un deterioro de poca consideración. Pueden existir fallas menores en equipos y contenidos que no son esenciales para el funcionamiento de los edificios.

Seguridad de Vida. Se debe garantizar la seguridad de la vida de los usuarios. Las estructuras se comportan inelásticamente, perdiendo un porcentaje considerable de su rigidez, resistencia y capacidad de disipación de energía. Es posible que parte de los muros divisorios, fachadas y plafones sufran daño de consideración y tengan que ser repuestos en su totalidad, aunque su nivel de daño no implica que se desprendan de la estructura o que lleguen al colapso.

Colapso Incipiente. Es equivalente al estado límite de falla, y se satisface si se mantiene la estabilidad global de la estructura, de tal manera que se garantice la integridad física de los ocupantes, aun cuando el daño estructural y no estructural sea grave.

A cada uno de los niveles de desempeño se asocia un nivel sísmico de diseño: Frecuente, Ocasional, Raro y Muy Raro, que corresponden a un período de recurrencia. El comité SEAOC VISIÓN 2000, sugiere que los periodos de retorno asociados a los cuatro niveles sísmicos de diseño sean 43, 75, 250 y 475 años respectivamente, aunque no se presenta una deducción con bases racionales de los valores. Es necesario aclarar que los periodos de retorno deben variar en función de las características de la sismicidad de la región.

El estado límite de servicio puede considerarse equivalente al de operación completa de SEAOC; para satisfacerlo, la estructura debe permanecer sin pérdida de resistencia y, a lo más con pérdida limitada de rigidez en el caso de las estructuras de concreto. Bajo estas premisas se puede justificar el uso de un análisis elástico que resulte en un espectro elástico de diseño derivado de las excitaciones sísmicas de ocurrencia frecuente y de baja a moderada intensidad. En este capítulo se utilizará un análisis no lineal variando la ductilidad de 1 a 1.5 tomando así el efecto de la pérdida de rigidez en el cambio de pendiente de la curva primaria trilineal que no toma el análisis elástico. Al desarrollar ductilidades de 1 y 1.5 se toma en cuenta que la estructura permanecerá, casi, en el rango elástico y absorberá más energía de una excitación sísmica frecuente de intensidad moderada, por lo tanto los DDE estarán trabajando para ductilidades de 1 a 1.5. Para analizar las estructuras se supondrá un amortiguamiento viscoso de 2%.

Los espectros de respuesta y de diseño para el estado límite de servicio debe ser congruente con el estado de esfuerzos y deformaciones esperados en la estructura. Se ha encontrado, según Newmark y

Hall (1982), que para niveles de esfuerzo del orden o menores que 50% del esfuerzo de fluencia, el coeficiente equivalente de amortiguamiento en estructuras de acero soldadas o estructuras de concreto con un agrietamiento ligero, el amortiguamiento es del 2% al 3%, otros estudios muestran que para distorsiones de entrepiso del orden de 0.0015, el coeficiente equivalente de amortiguamiento es aproximadamente 2% para edificios de acero o concreto presforzado, y de 3% para estructuras de concreto reforzado o mampostería, por lo tanto, queda justificado el uso en este capítulo de un amortiguamiento del 2%.

Antes de desarrollar el estudio planteado en este capítulo, se mencionan dos aspectos que resultan de alguna manera relacionados con el tema aquí tratado; el primero tiene que ver con el efecto de la magnitud del sismo en la forma del espectro de respuesta para revisión del estado límite de servicio, tratado en el artículo "El estado límite de servicio en el diseño sísmico de edificios de la ciudad de México", Carlos Reyes; El otro aspecto resulta interesante por estar relacionado con el periodo dominante del suelo y el periodo de máxima respuesta de resistencia lateral, los cuales tendrían que ser iguales para espectros elásticos y según lo encontrado en este trabajo, son diferentes para los espectros elásticos y más parecidos para espectros inelásticos, aún si el periodo de máxima respuesta, corresponde a los espectros inelásticos donde cambian en función de la ductilidad.

Efecto de la magnitud del sismo, en el espectro de respuesta para revisión del estado límite de servicio.

El efecto de la magnitud del sismo en los espectros de respuesta, provoca que el espectro de diseño asociado al estado límite de servicio, pueda ser diferente a los espectros de diseño para el estado límite de falla; entonces, puede no ser correcto escalar los espectros de diseño para el estado límite de falla, para obtener el espectro de diseño para el estado límite de servicio, pero según se deduce de las siguientes figuras, si puede ser válida la aproximación de escalar el espectro de diseño, para obtener el espectro de servicio. En el desarrollo de este trabajo no se tomó en cuenta el efecto de sitio.

Se eligieron los registros de la estación No.56 ocurridos el 31 de mayo de 1990 y el 14 de septiembre de 1995 por que pueden representar sismos para estados límite de servicio y estado límite de falla.

La figura VIII.1 muestra el registro de la estación No.56 del sismo ocurrido el 31 de mayo de 1990 con magnitud $M_c=5.5$

La figura VIII.2 muestra el registro de la estación No.56 del sismo ocurrido el 14 de septiembre de 1995 con magnitud $M_c=7.3$

Se observa diferente contenido de frecuencias y aceleraciones, por lo que es de esperarse que para una misma estructura se obtenga diferente respuesta ante la ocurrencia de tales eventos, situación que se corrobora más adelante, al mostrar los espectros de respuesta correspondientes a cada evento.

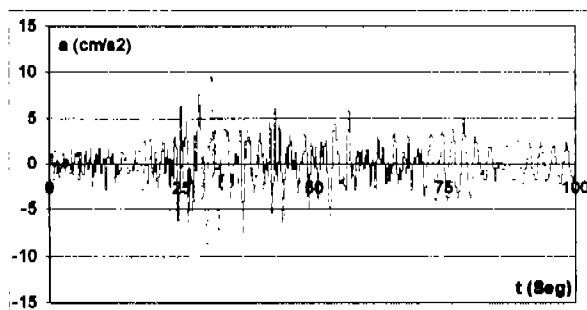


Figura VIII.1 $M=5.5$

Registro Estación No.56 31/May/1990

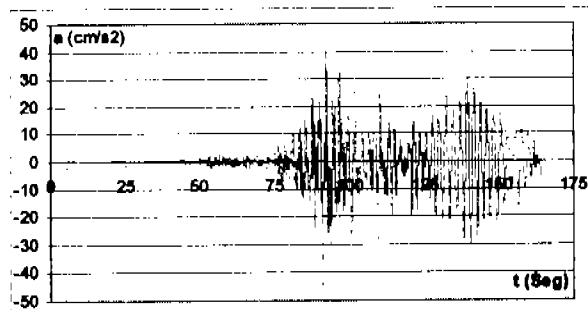
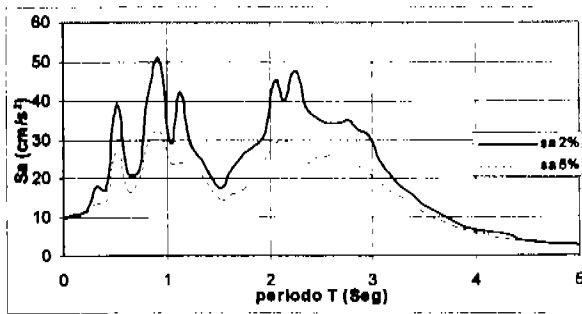


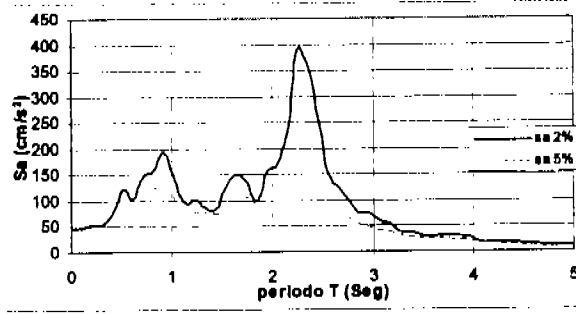
Figura VIII.2 $M=7.3$

Registro Estación No.56 14/Sep/1995

La figura VIII.3 y VIII.4 muestran el efecto del amortiguamiento, del 2% y 5%, en el espectro de respuesta de resistencia lateral para el registro sísmico del evento del 31 de mayo de 1990 y el del 14 de septiembre de 1995 respectivamente y a su vez, muestran el efecto de la magnitud en la forma del espectro de resistencia, que no tiene relación con el trabajo realizado, ni con ningún trabajo sobre estados límite de servicio, que tenga como base registros sísmicos acorde al estado límite estudiado; sólo se aprovecha el tema para aclarar posibles dudas en cuanto a la influencia de la magnitud en la forma de los espectros de respuesta. El efecto de la magnitud en la forma del espectro no tiene importancia relevante ya que como se verá más adelante, si ambos registros se toman como registros característicos de diseño para estado límite de servicio o de falla regiría, el obtenido el 14 de Septiembre de 1995. Ahora bien, si se tomara el primer registro para elaborar el espectro de diseño para el estado límite de servicio, regiría la forma del espectro de respuesta que resultara. Y si se elige el segundo registro, como registro de diseño del estado límite de falla, se encontrará una forma del espectro adecuado.



Estación No.56 31/May/1990
Con amortiguamiento de 2% y 5%



Estación No.56 14/Sep/1995
Con amortiguamiento de 2% y 5%

De los espectros de velocidad, figura VIII.5 y VIII.6, se observa que para un periodo de 2.25seg se obtiene la máxima respuesta de velocidad. El periodo de 2.25seg es el periodo de máxima respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento de un análisis elástico lineal, no resulta así en un análisis de no lineal, donde el periodo de máxima respuesta es ligeramente menor al estimado de un análisis elástico lineal, reduciéndose aún más conforme aumenta la ductilidad, cuando la máxima reducción resulta hasta del orden de 1seg. Debido al efecto de corrimiento del periodo de máxima respuesta una estructura que se encontrara justo en el periodo de máxima repuesta para su estado inalterado, si agrietamiento, con amortiguamiento del 2% tendería a reducir su rigidez conforme se incrementa el daño, daño controlado, incrementa el amortiguamiento y su periodo fundamental, mientras que el efecto del desarrollo de ductilidad la alejaría aun más del nuevo periodo de máxima respuesta. Así, una estructura que tenga periodo coincidente con el periodo de máxima respuesta le debe apostar a su buen comportamiento dependiente de su capacidad de resistencia, ya que en algún momento estará sujeta a sollicitaciones elevadas, donde el efecto de fatiga de bajo ciclaje puede ser importante.

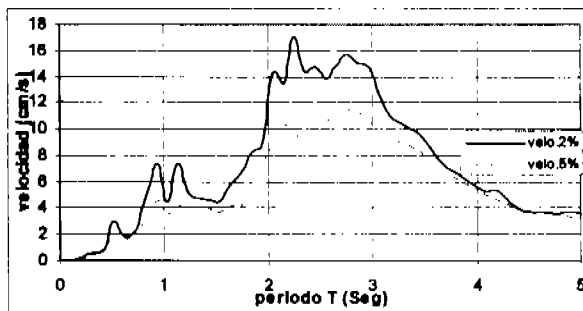


Figura VIII.5
Estación No.56 31/May/1990
Con amortiguamiento de 2% y 5%

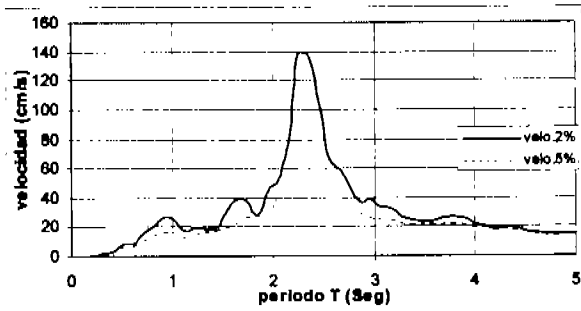


Figura VIII.6
Estación No.56 14/Sep/1995
Con amortiguamiento de 2% y 5%

De los espectros de desplazamiento, figura VIII.7 y VIII.8 se observa que es importante el nivel de amortiguamiento asignado al espectro de respuesta, pero es más importante comparar formas de espectros, para igual nivel de diseño e igual nivel de solicitación, ya que como se puede ver de la figura VIII.5, el nivel de amortiguamiento no es importante, si se compara la respuesta con la obtenida en la figura VIII.6

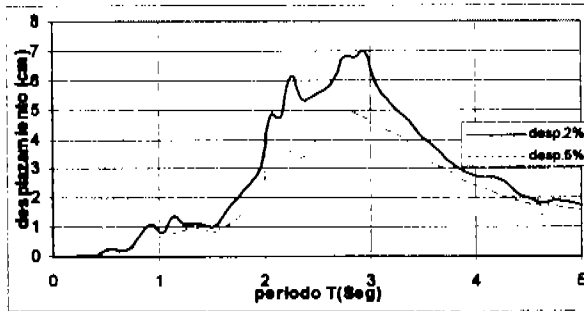


Figura VIII.7

Estación No56 31/May/1990
Con amortiguamiento de 2% y 5%

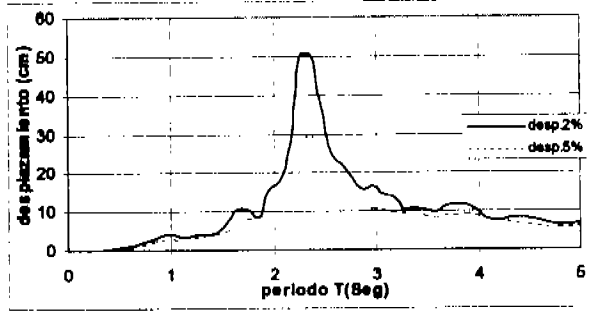


Figura VIII.8

Estación No.56 14/Sep/1995
Con amortiguamiento de 2% y 5%

Un aspecto relevante consiste en generar estructuras con suficiente capacidad resistente, aún si se elige el reducir por ductilidad el espectro elástico de diseño, con un factor de comportamiento sísmico de 4; esta demanda de resistencia no debe ser superada por la requerida para el estado límite de servicio, con factor de comportamiento sísmico de 1. Para dilucidar estas observaciones se utilizaron las figuras VIII.9 y VIII.10

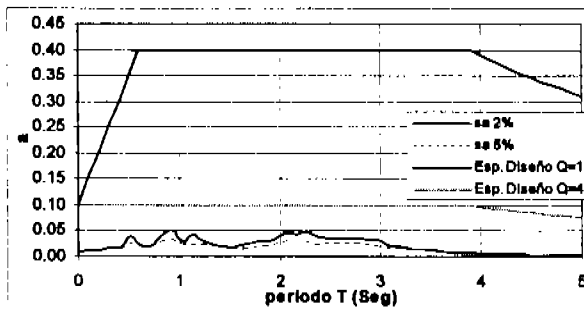


Figura VIII.9

Estación No56 31/May/1990
Con amortiguamiento de 2% y 5%

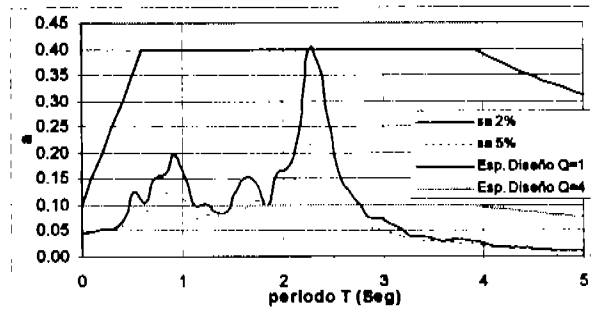


Figura VIII.10

Estación No.56 14/Sep/1995
Con amortiguamiento de 2% y 5%

Como se puede ver de la figura VIII.11 que a mayor amortiguamiento la respuesta tiende a uniformizarse para los distintos periodos, efecto similar que proporciona el incremento en la ductilidad

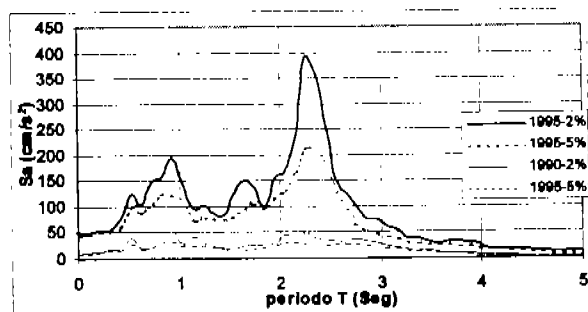


Figura VIII.11

Estación No.56 31/May/1990 y Estación No.56 14/Sep/1995

Con amortiguamiento de 2% y 5%

En la figura VIII.12 se puede ver el espectro de resistencia lateral para el registro de la estación 56 del sismo de 1995, que se toma en este apartado como el registro para generar el espectro de diseño, para diferentes ductilidades; 1, 1.5, 2, 3, 4 y 6 además se presenta el espectro de diseño correspondiente a la zona III según el RCDF para un factor de comportamiento sísmico de 4. Adicionalmente se presenta el espectro de respuesta elástico y el espectro de respuesta no lineal para una ductilidad de 1 del registro de la misma estación para el sismo de 1990 que para efectos de comparación del efecto de la magnitud en la forma y tamaño del espectro aquí se considera el registro del sismo de servicio.

Al analizar las sollicitaciones de diseño por estado límite de falla, se encuentra que al diseñar con el espectro correspondiente a la zona III, el efecto queda dentro de dicha zona, según el RCDF el espectro de diseño (línea gruesa continua con marca de cruz) es superior al espectro de respuesta para una ductilidad de 2 (línea discontinua sin marcas). Así, para todo el intervalo de periodos, el espectro de respuesta para una ductilidad de 2 y el espectro de respuesta elástico, se revisan.

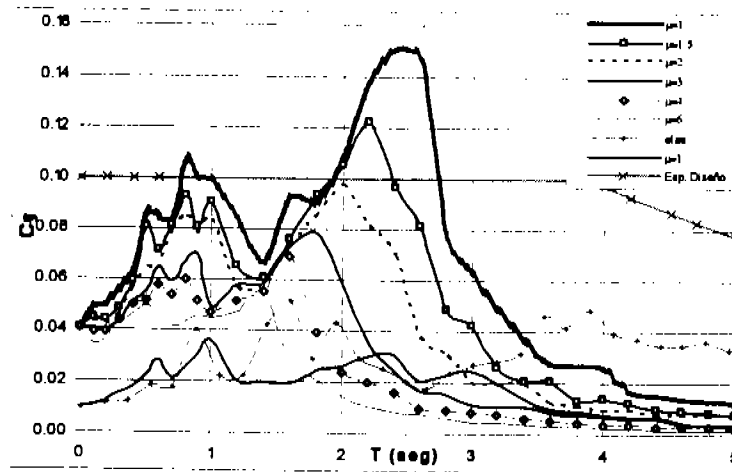


Figura VIII.12 espectro de diseño y espectros de respuesta

Relación entre periodo dominante del suelo y periodo de máxima respuesta de resistencia lateral.

Otro aspecto básico para la revisión del estado límite de servicio es la definición del parámetro de daño con que éste se controla, así como los valores específicos que se consideran como límites de dichos parámetros. El daño en elementos no estructurales comúnmente se controla limitando la distorsión máxima de entrepiso que, a su vez, es controlada por la rigidez lateral o por el periodo fundamental de vibración de la misma. Al tener un comportamiento prácticamente elástico, para el estado límite de servicio, la ductilidad tiende a 1 y el periodo fundamental esta en función de la rigidez, que a su vez es función de la inercia; Así al no existir, prácticamente agrietamiento, el periodo se reduce, con lo que se genera la necesidad de variar el periodo fundamental, con reducción para tomar en cuenta que la estructura no ha sufrido daño; se incrementa por efecto de la incertidumbre en el calculo, por contribución de elementos no estructurales. Cabe recordar que el periodo de la estructura "original", se redujo por el efecto que causa la presencia del sistema de contraviento-disipador de energía, DDE.

Una situación que llama el interés es que según la ubicación de la estación 56, localizada en la Escuela Secundaria No.18 de la calle de Córdoba No.68, colonia Roma, Delegación Cuauhtémoc. Se tiene según la Figura A 4.1, que el periodo fundamental del suelo es de 2seg y a partir de la relación

$G=2(H/T_s)^2$ con $T_s = \sqrt{\frac{H}{2G}}$ en donde G está en T/m^2 , T_s es el periodo dominante más largo del

terreno, en segundos y H es la profundidad, en metros, de los depósitos firmes profundos en dicho sitio. El tomar como dato de la figura A 7.1 $H=40m$, se tiene que T_s puede variar de 1.41 a 0.94, ya que

de no obtener G experimentalmente, se puede adoptar el valor que resulte más desfavorables entre los límites de 400 y 900 t/m^2 . Se tiene que ninguno de los valores coincide con, $T=2.25$ seg del espectro de respuesta elástico lineal, siendo más aproximado el valor que se obtuvo de la figura A 4.1 Los valores que se obtienen indirectamente de la figura A 7.1 se asemejan a los valores de periodo dominante de un análisis no lineal. Claro que esta no fue la intención del RCDF; para este caso, fue coincidencia.

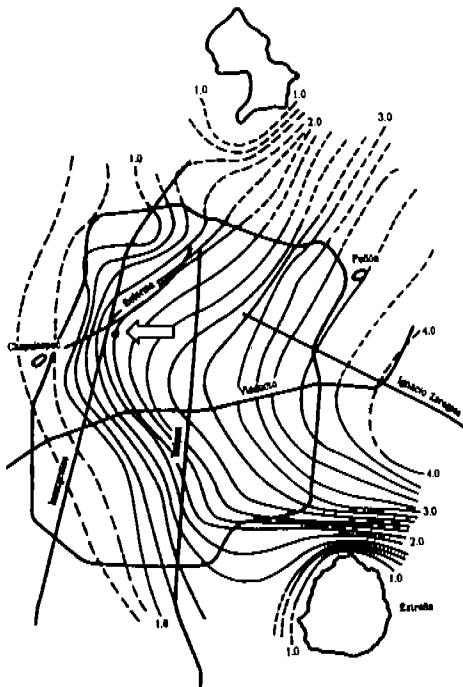


Figura A 4.1

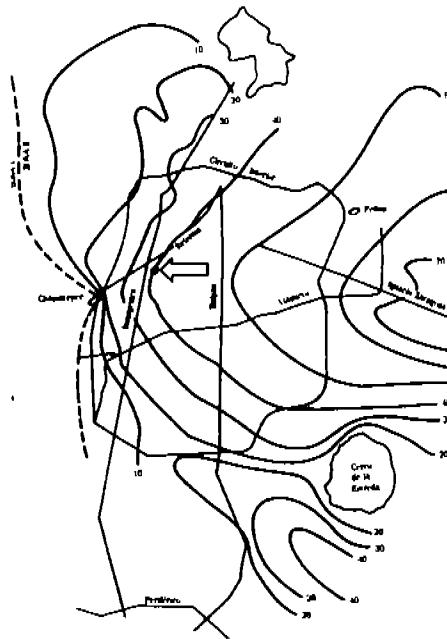


Figura A 7.1

Figura VIII.13 Figuras del RCDF

Para obtener los espectros de distorsión correspondientes a una ductilidad de 1 y 1.5 se utilizan las demandas de resistencia lateral para las mismas ductilidades de cada uno de los registros, pero ahora se utilizan los registros escalados al 50% (reducidos en 50%), además se utiliza un amortiguamiento del 2%, el factor de escala se elige de manera arbitraria buscando utilizar los registros utilizados en los capítulos anteriores y además tomar en cuenta que la intensidad, aceleración, magnitud, etc. cambian de un registro para el estado límite de falla y un registro para el estado límite de servicio.

VIII.1 PARA REGISTROS DE MOVIMIENTO CON PERIODO DOMINANTE CORTO

Las figuras están organizadas de tal manera que primero se presentan los espectros que toman en cuenta el incremento de rigidez en porcentaje denominado R. En este caso por tener variación en el periodo fundamental, primero se grafica al periodo de cada grupo de sistemas y posteriormente se presentan los mismos valores de distorsión pero ahora referidos al periodo del grupo de sistemas denominado original o sin DDE, con lo cual se obtiene otra perspectiva de los resultados. Después se presentan las figuras con los espectros que toman en cuenta el cambio en la relación de resistencia, para ellos no hay cambio en el periodo, por lo tanto, basta con una figura para representar las distorsiones, aquí R representa el incremento en la relación de resistencia. Enseguida se presentan dos figuras donde se muestran los espectros para los diferentes incrementos de rigidez y resistencia, entonces R representa dicho incremento, la primera presenta las distorsiones para los respectivos sistemas, a diferencia de la última figura donde todas las distorsiones están referidas al sistema sin DDE. En todas las figuras se presentan dos espectros, uno con un grupo de espectros que desarrollan una ductilidad unitaria para el registro sísmico que pretende representar un sismo para evaluar el estado límite de servicio y, el otro conjunto de espectros para una ductilidad de 1.5. La presentación de la figuras descrita anteriormente se repite para todos los registros.

De la figura VIII.14 se puede observar que para los incrementos de rigidez se reducen las distorsiones para todo el rango de periodos, esta tendencia se observa en estos espectros que están referidos al periodo de cada sistema, mientras que en la figura VIII.15 la tendencia descrita no muestra congruencia, porque en la figura VIII.15 las distorsiones se presentan en relación del periodo del sistema sin DDE.

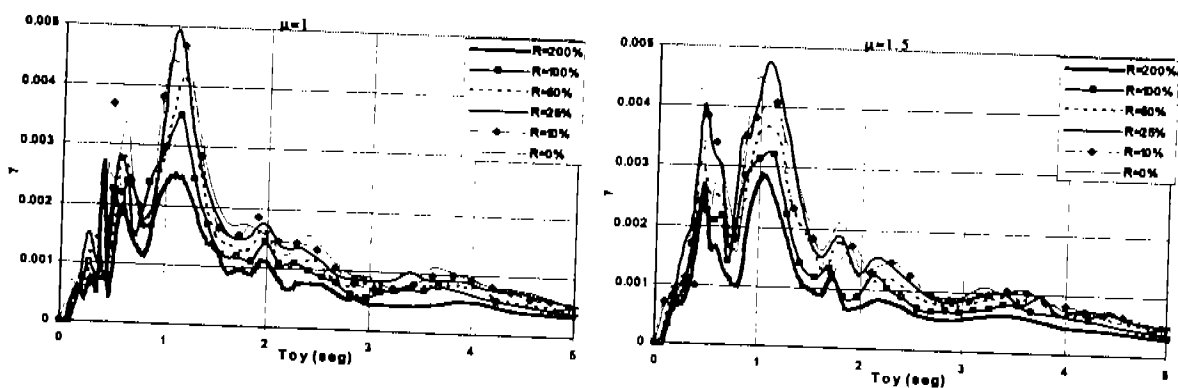


Figura VIII.14 espectros de distorsión (Kobe)

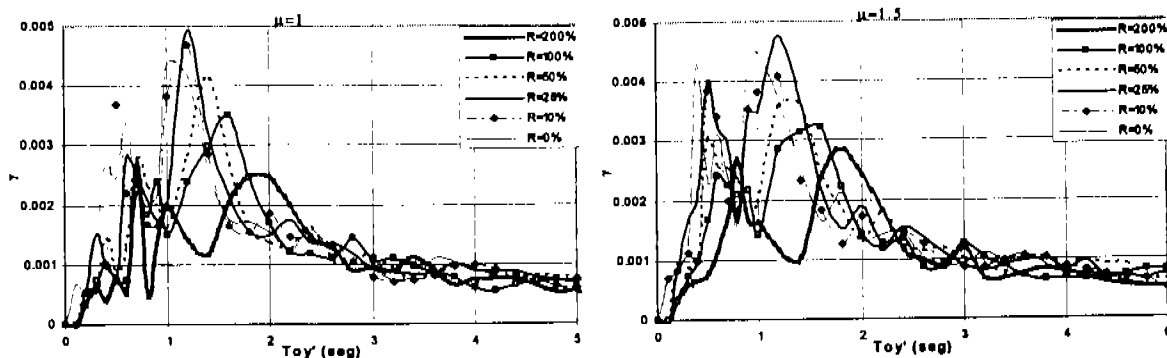


Figura VIII.15 espectros de distorsión referidos al periodo del sistema original (Kobe)

Al evaluar el efecto del incremento en la relación de resistencia en las distorsiones generadas por un sismo de servicio, se genera la figura VIII.16 que muestra tal efecto, de donde se puede decir que el cambio en la relación de resistencia no modifica las distorsiones.

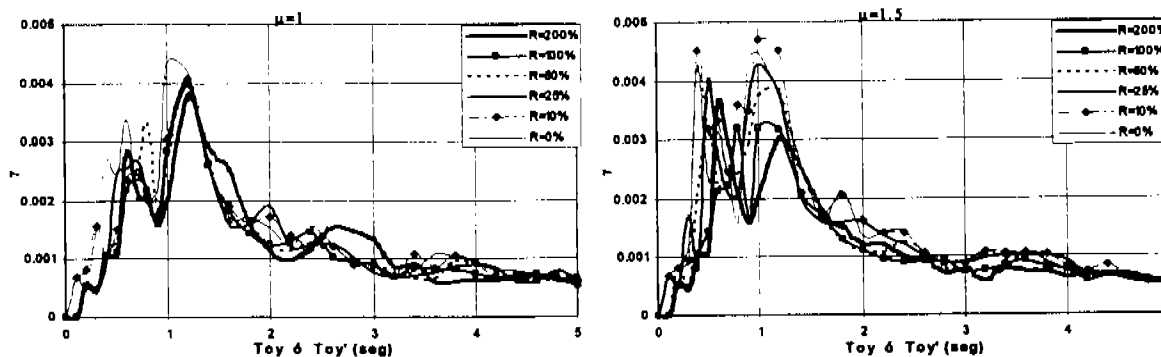


Figura VIII.16 espectros de distorsión (Kobe)

En la figura VIII.17 se muestran los espectros de distorsión resultantes de considerar el incremento de rigidez y el incremento en la relación de resistencia. Las distorsiones están referidas al periodo fundamental del sistema que las genera. Mientras que en la figura VIII.18 las distorsiones están presentadas en relación al periodo del sistema sin DDE, logrando con esto aprovechar la información para dos posibles fines; el primero, establecer el nivel de agrietamiento en las estructuras y el segundo, comparar para la misma estructura modificada por los DDE, los niveles de distorsión.

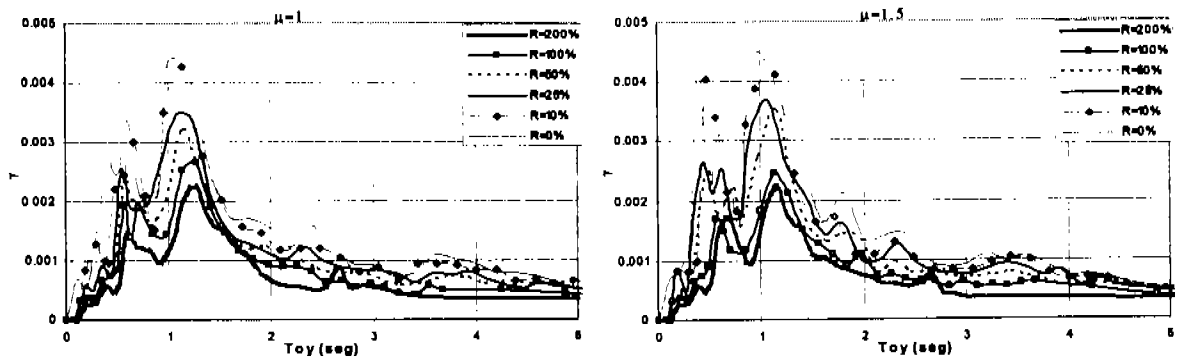


Figura VIII.17 espectros de distorsión (Kobe)

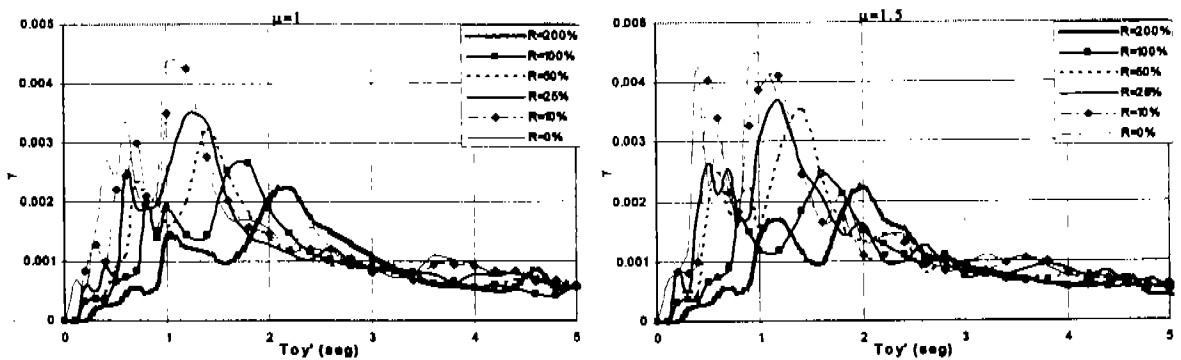


Figura VIII.18 espectros de distorsión referidos al periodo del sistema original (Kobe)

Como ya se mencionó, el procedimiento de obtención de los espectros de distorsión es el mismo para todos los registros, así como la forma en la que se presentan los resultados, únicamente difieren en cuanto a la forma, ya que las tendencias son similares, por lo tanto, en la sucesivo sólo se mencionarán las características más interesantes o que complementa la representación gráfica de las distorsiones.

En todos los espectros de distorsión generados por el registro de Llolleo se presenta una tendencia a incrementar las distorsiones a medida que se incrementa el periodo fundamental del sistema. Sin que la distorsión llegue a provocar el inicio de la fluencia, esperada para una distorsión de 0.010

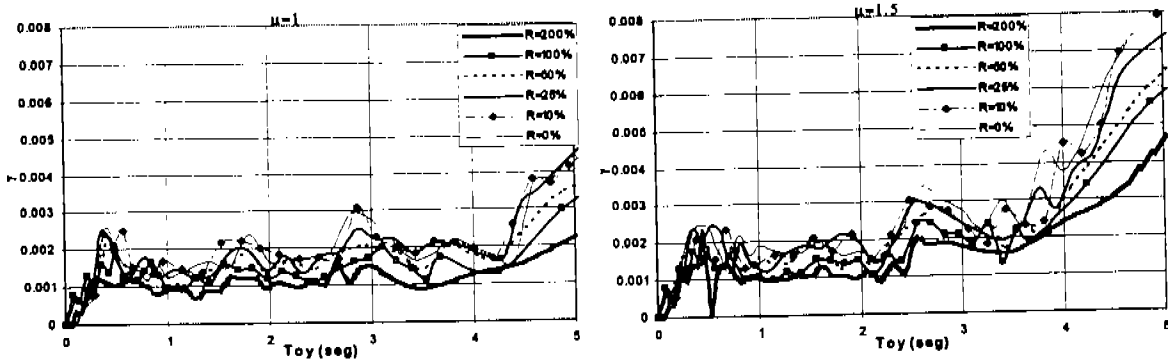


Figura VIII.19 espectros de distorsión (Llolleo)

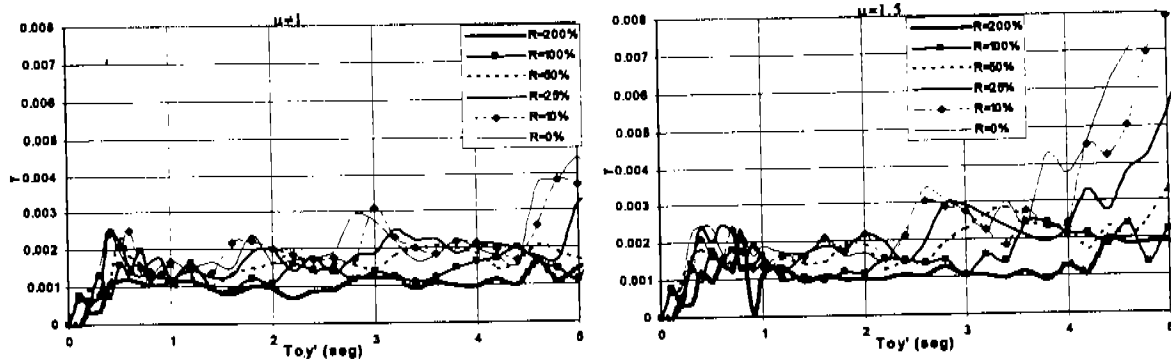


Figura VIII.20 espectros de distorsión referidos al periodo del sistema original (Llolleo)

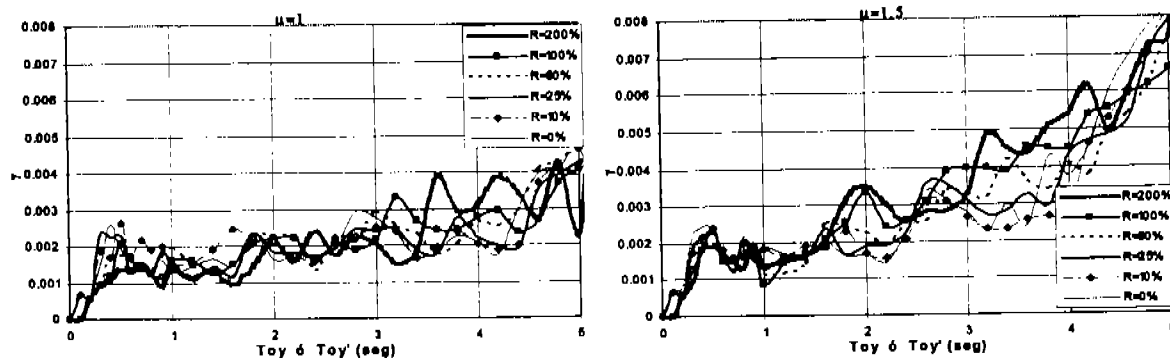


Figura VIII.21 espectros de distorsión (Llolleo)

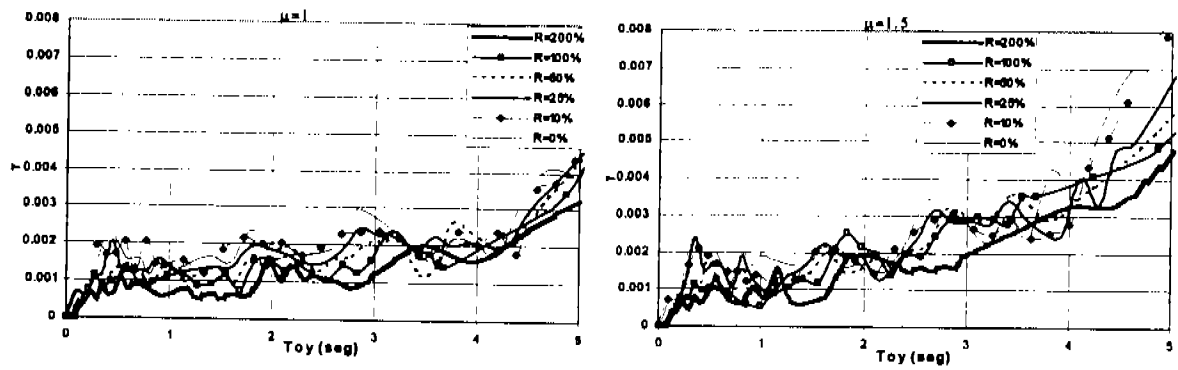


Figura VIII.22 espectros de distorsión (Lolloe)

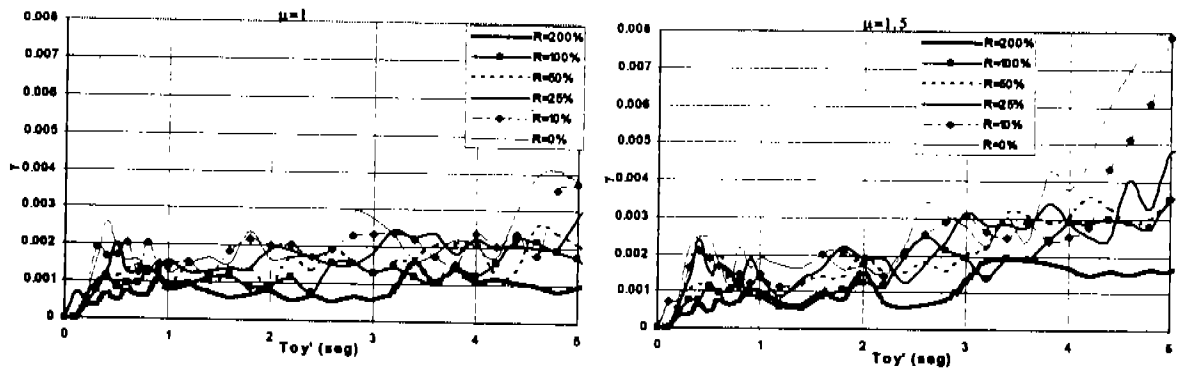


Figura VIII.23 espectros de distorsión referidos al periodo del sistema original (Lolloe)

VIII.2 PARA REGISTROS DE MOVIMIENTO CON PERIODO DOMINANTE LARGO

Aunque para periodos comprendidos entre 2.5 y 3.5 se presentan las máximas distorsiones estas no llegan a ser tales que se presente agrietamiento significativo, esperado para distorsiones de 0.005.

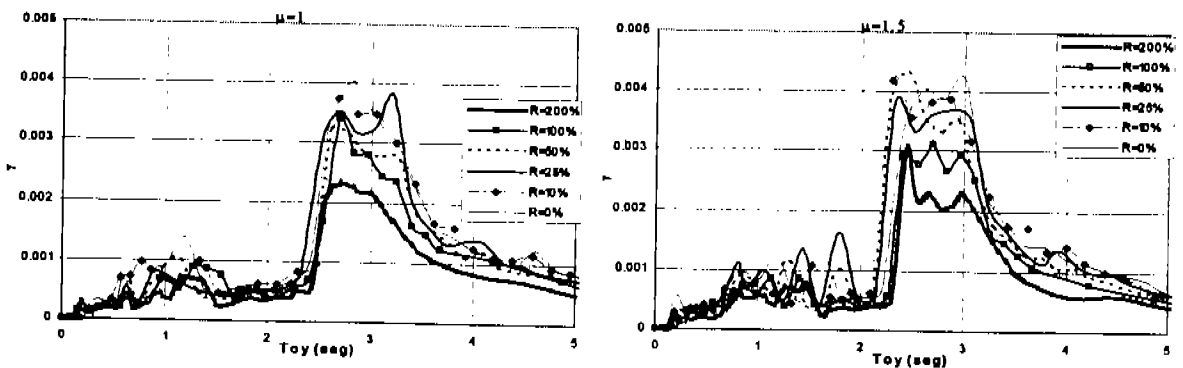


Figura VIII.24 espectros de distorsión (Sct85)

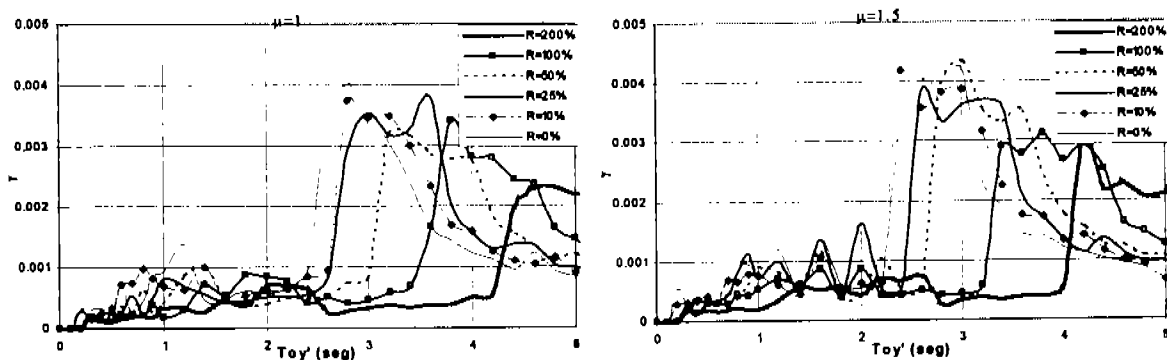


Figura VIII.25 espectros de distorsión referidos al periodo del sistema original (Sct85)

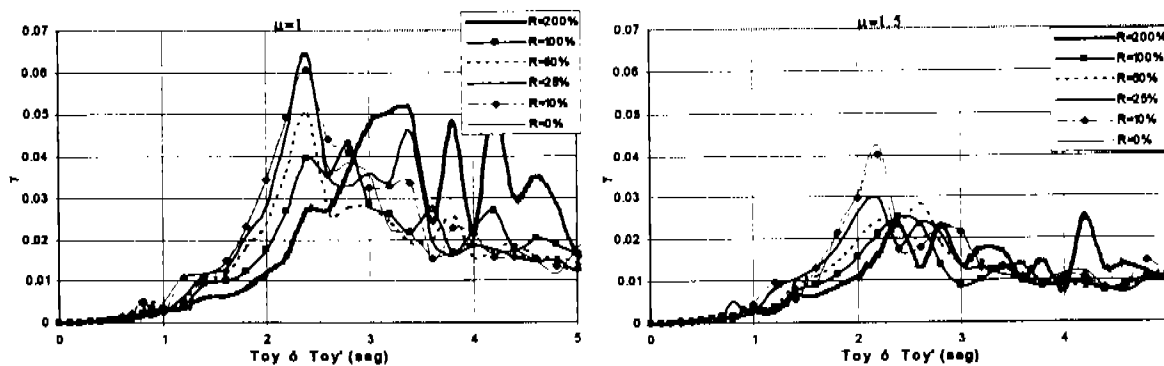


Figura VIII.26 espectros de distorsión (Sct85)

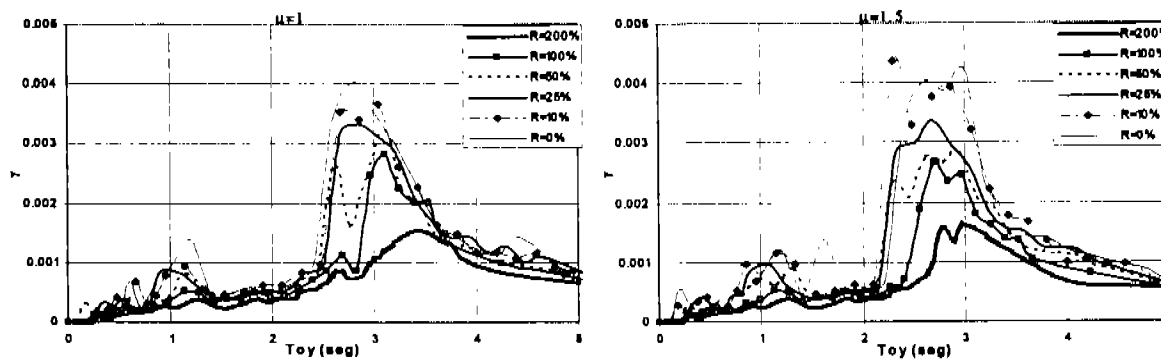


Figura VIII.27 espectros de distorsión (Sct85)

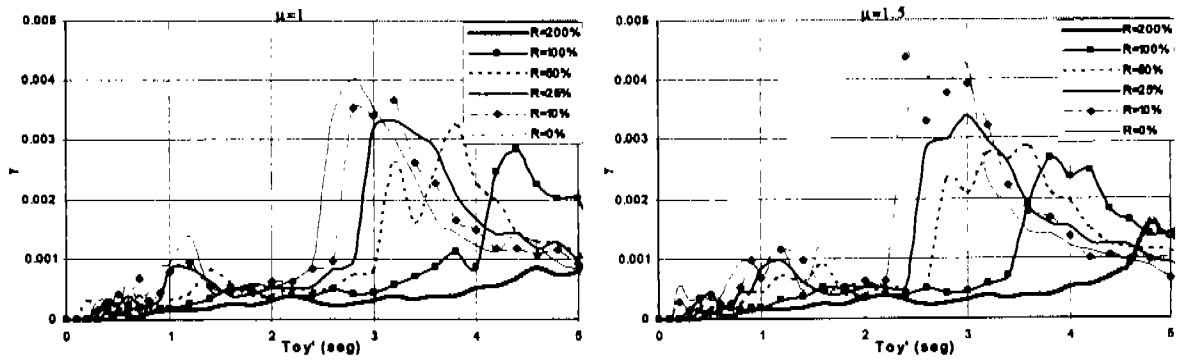


Figura VIII.28 espectros de distorsión referidos al periodo del sistema original (Sct85)

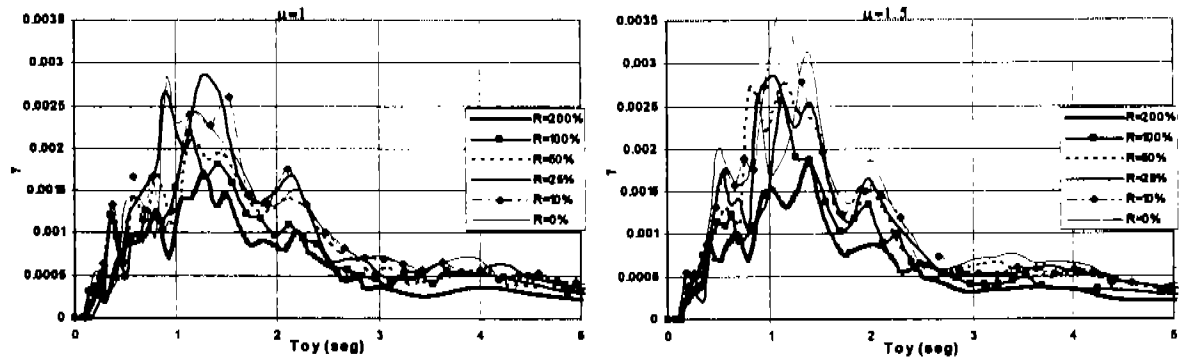


Figura VIII.29 espectros de distorsión (Tohoku)

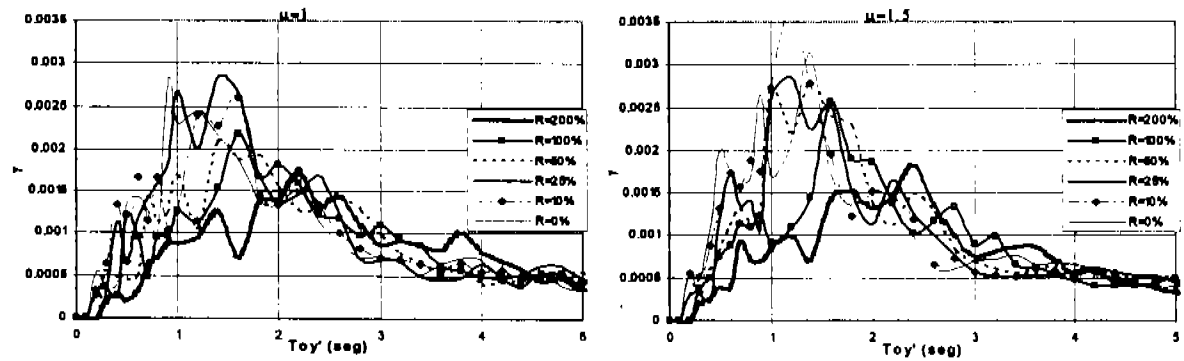


Figura VIII.30 espectros de distorsión referidos al periodo del sistema original (Tohoku)

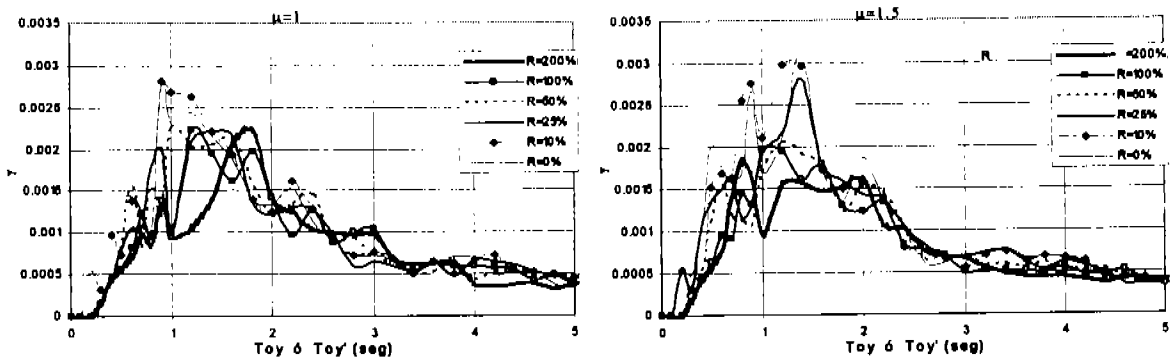


Figura VIII.31 espectros de distorsión (Tohoku)

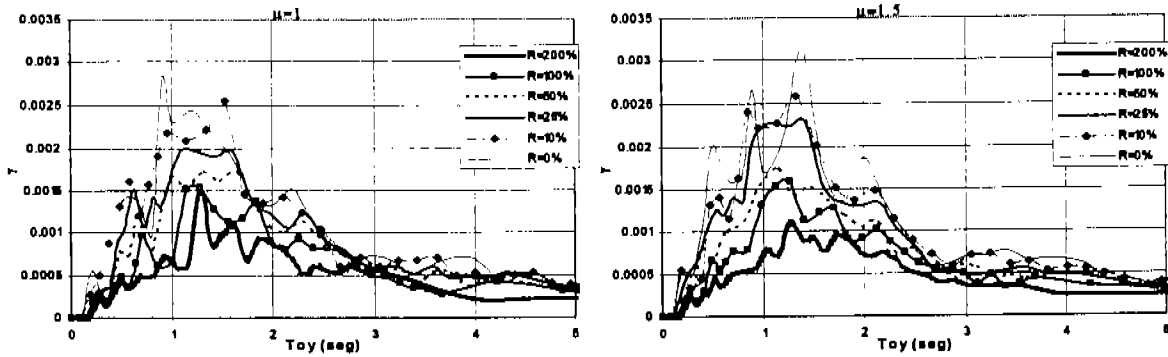


Figura VIII.32 espectros de distorsión (Tohoku)

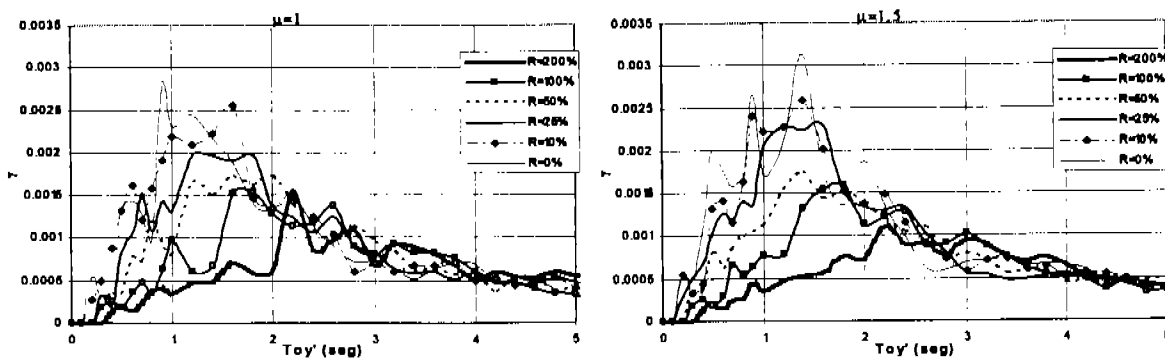


Figura VIII.33 espectros de distorsión referidos al periodo del sistema original (Tohoku)

VIII.3 PARA REGISTROS CON EXCITACIÓN DE SUELO DURO

Para los espectros de distorsión mostrados en esta categoría no se rebasan las distorsiones de .003 para El Centro y .0014 para el registro de Taft, lo cual es congruente con las hipótesis planteadas y además con los límites conocidos para este tipo de estructuras y estado límite.

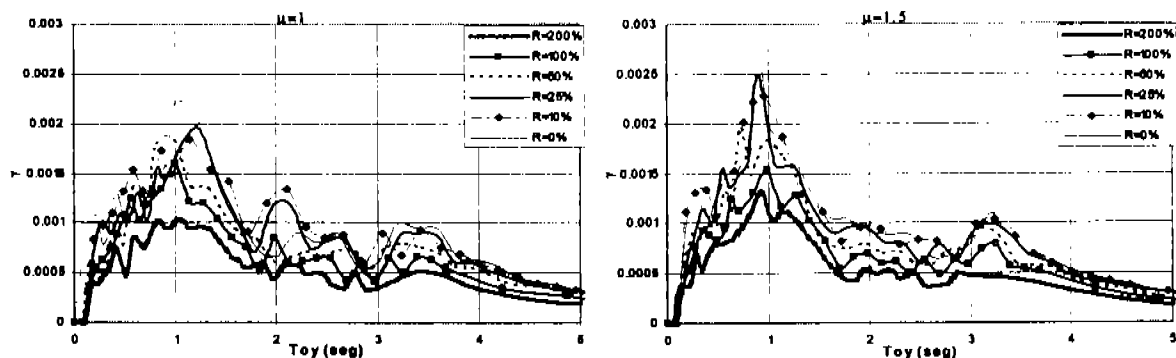


Figura VIII.34 espectros de distorsión (El Centro)

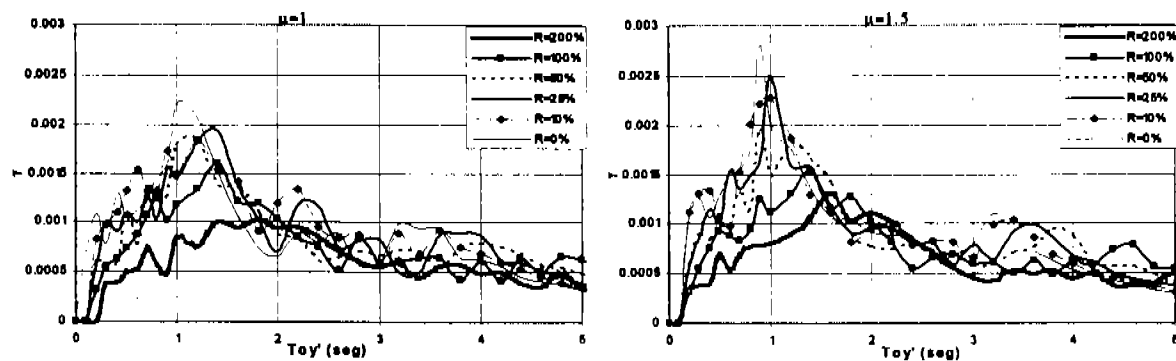


Figura VIII.35 espectros de distorsión referidos al periodo del sistema original (El Centro)

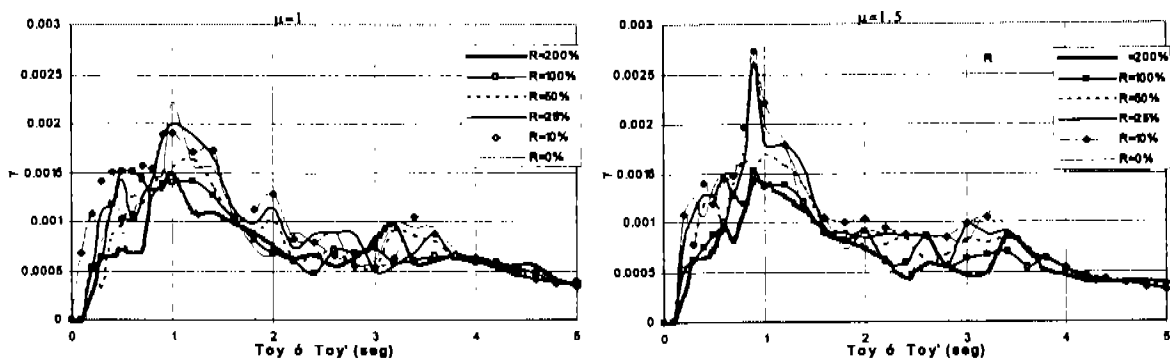


Figura VIII.36 espectros de distorsión (El Centro)

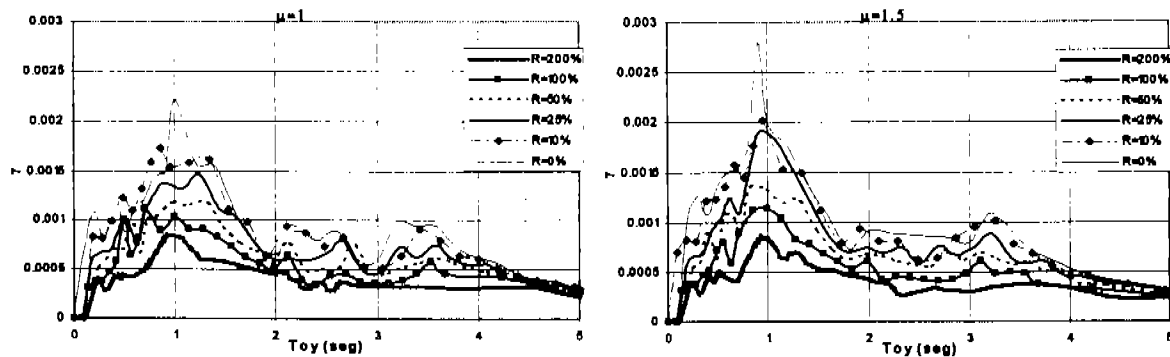


Figura VIII.37 espectros de distorsión (El Centro)

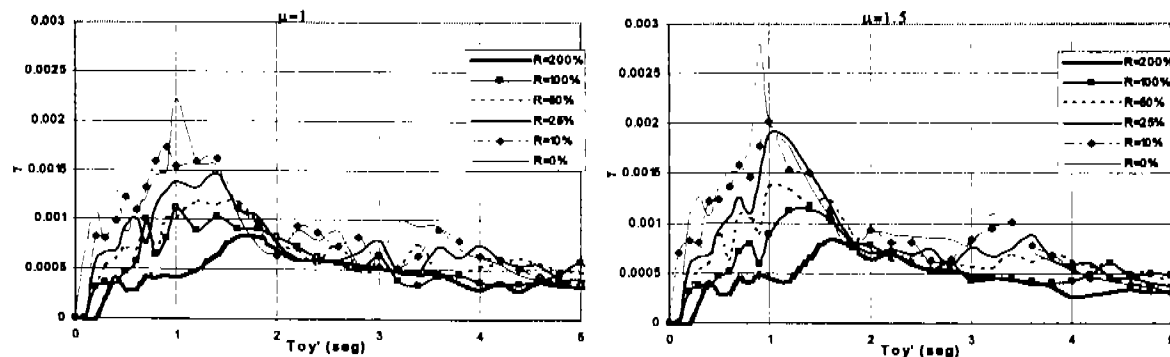


Figura VIII.38 espectros de distorsión referidos al periodo del sistema original (El Centro)

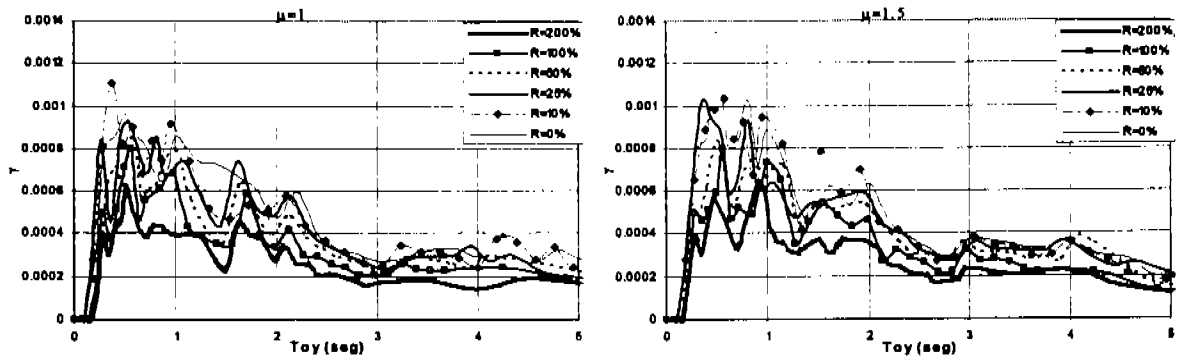


Figura VIII.39 espectros de distorsión (Taft)

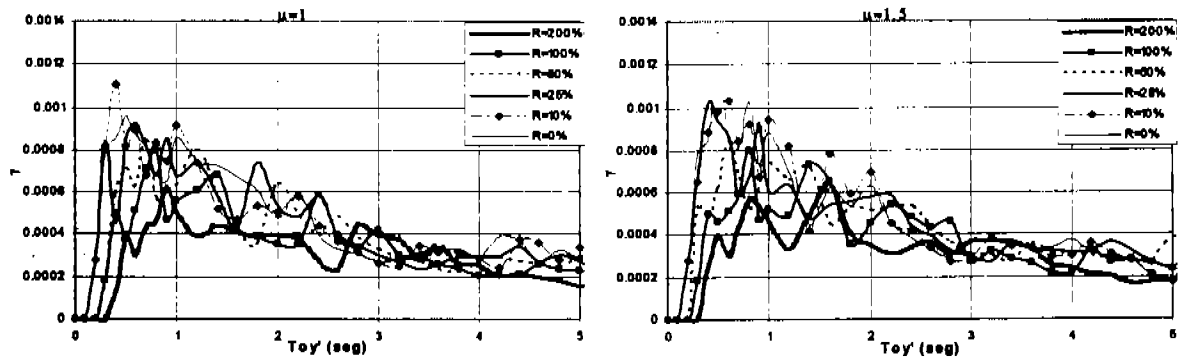


Figura VIII.40 espectros de distorsión referidos al periodo del sistema original (Taft)

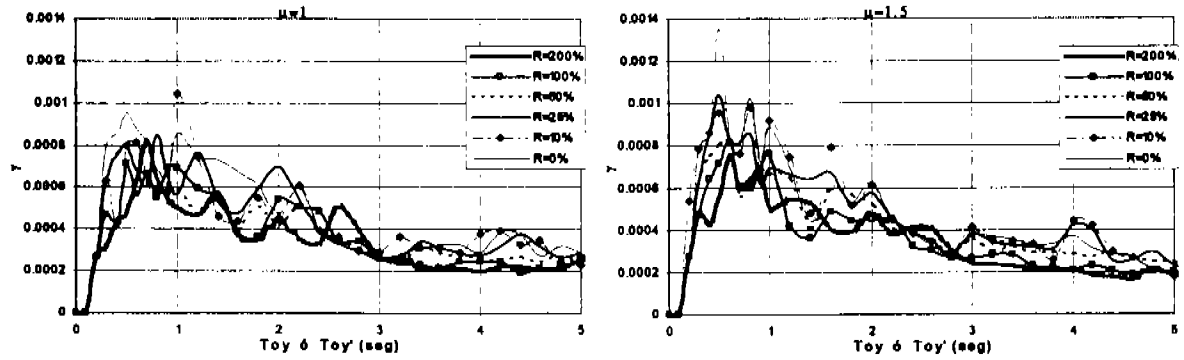


Figura VIII.41 espectros de distorsión (Taft)

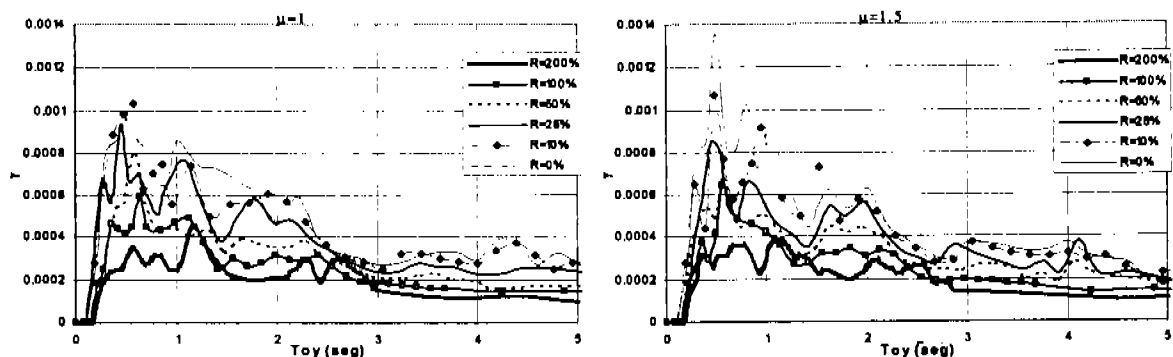


Figura VIII.42 espectros de distorsión (Taft)

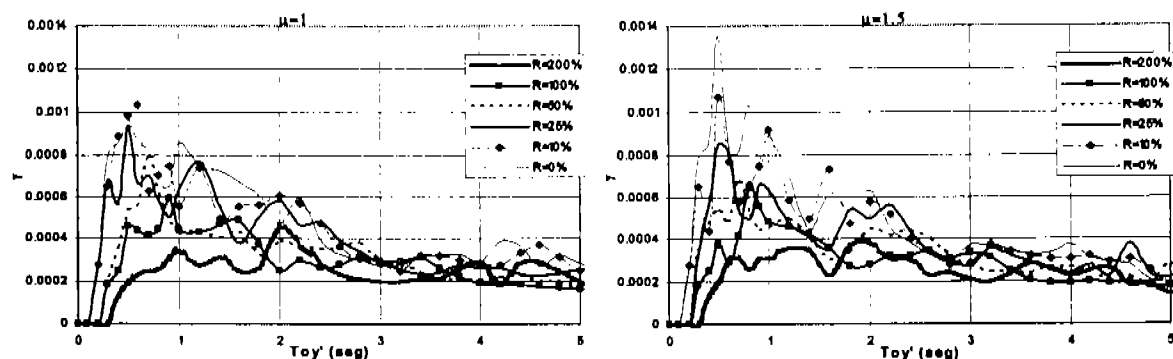


Figura VIII.43 espectros de distorsión referidos al periodo del sistema original (Taft)

En todos los espectros de distorsión presentados en este capítulo, se puede observar que existen periodos de máxima demanda de distorsión; para el resto de periodos, las distorsiones son menores a las esperadas para que se presente agrietamiento significativo, por lo tanto, se puede pensar que para las estructuras con estos periodos de baja demanda de distorsión, no se presentarán agrietamientos que valide un análisis no lineal, de tal forma que resulta válido el análisis elástico lineal, pero resultaría más acertado considerar el cambio de pendiente de la rigidez por agrietamiento y la disipación de energía, según se presenta en este trabajo.

IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES:

Se revisó la influencia de la rigidez en la respuesta no lineal de estructuras de concreto con y sin dispositivos disipadores pasivos de energía, para conocer los cambios en los espectros de respuesta de parámetros como: isoductilidad o resistencia lateral, distorsión y energía para el estado límite de falla; para el estado límite de servicio se revisó el cambio en los espectros de distorsión, para lo cual se requirió plantear diferentes grupos de sistemas de un grado de libertad que fueran representativos de estructuras reales, con capacidad de generar ductilidades de 1, 1.5, 2, 3, 4, y 6, que además, en cada grupo de sistemas recibiera incrementos en la rigidez de 10, 25, 50, 100, y 200 por ciento; los grupos de sistemas planteados se analizaron considerando la solución para sistemas de un grado de libertad por medio del método beta de Newmark, con los parámetros beta igual a un sexto y gama igual a un medio. De suponer adecuado que un sistema de concreto con dispositivos disipadores de energía, se puede representar como una estructura con comportamiento trilineal. Así se considera válido el modelo histerético de Takeda, para representar su respuesta ante carga cíclica reversible, la cual se tomó de los seis registros seleccionados que cumplieran con tener una gran gama de contenidos de frecuencia y amplitudes de aceleraciones; se encontró como representativos de las condiciones planteadas, a los registros sísmicos de Kobe 1995, Lolloe 1985, sct 1985, Tohoku 1978, El Centro 1940 y, Taft 1952. Se encontraron diversos resultados, mostrados en las figuras que contienen varios espectros de respuesta, de los cuales se puede mencionar, a manera de conclusión, las características más relevantes:

- De los espectros de isoductilidad o de resistencia lateral, o también conocido como cociente basal, se observa que a mayor incremento en la rigidez, se demandan menores resistencias laterales.
- Para un incremento de rigidez fijo, al incrementar la ductilidad, se reduce la respuesta principalmente en el intervalo de periodos de máxima respuesta.
- Para una ductilidad fija, al incrementar la rigidez, se incrementan las resistencias laterales, principalmente para periodos comprendidos en la rama descendente del espectro, al comparar con el periodo original del sistema.

Se revisó la influencia de la relación de resistencia en la respuesta no lineal de estructuras de concreto, con y sin dispositivos disipadores pasivos de energía, para conocer los cambios en los espectros de respuesta, de parámetros como: isoductilidad o resistencia lateral, distorsión y energía para el estado límite de falla; para el estado límite de servicio se revisó el cambio en los espectros de distorsión. De

igual manera, para considerar la influencia de la rigidez, se tomaron los mismos criterios en cuanto a análisis, ductilidades, incrementos en la relación de resistencia, análisis, modelo histerético y registros sísmicos. Se encontraron los resultados mostrados en las figuras, que contienen varios espectros de respuesta, de los cuales se puede mencionar, a manera de conclusión, sus características más relevantes:

- Se encuentra que a mayor incremento en la relación de resistencia, la demanda de resistencia para iguales ductilidades, tiende a decrecer.
- Para un incremento fijo de la relación de resistencia, se observa que al incrementar la ductilidad, se reduce la respuesta principalmente en el intervalo de periodos de máxima respuesta.
- A mayor incremento de ductilidad, se demandan menores resistencias laterales.
- A mayor incremento en la relación de resistencia, se demandan menores resistencias laterales, principalmente en el intervalo de periodos de máxima respuesta.
- De la tendencia observada, al incrementar la relación de resistencia, se puede plantear una revisión y ajuste del factor de comportamiento sísmico, en función del correspondiente a estructuras convencionales, con lo cual se tendrían factores de comportamiento sísmico mas grandes.
- Si se toma en cuenta las ventajas de incrementar la relación de resistencia, se puede controlar el efecto denominado fatiga de ciclaje.
- Dada la forma en que se toma en cuenta la importancia de una estructura de acuerdo al RCDF, el cual propone un factor uniforme de 1.5 para incrementar la resistencia lateral y dados los resultados obtenidos en este trabajo, se comenta que una forma más racional de plantear el factor, consiste en obtenerlo en función del periodo fundamental de la estructura y de la forma del espectro de diseño, asociado al sitio de desplante.

Con base en la revisión de la influencia de la rigidez y la relación de resistencia, y amortiguamiento en la respuesta no lineal de estructuras de concreto, con y sin dispositivos disipadores pasivos de energía, para conocer los cambios en los espectros de respuesta de parámetros como: isoductilidad o resistencia lateral, distorsión y energía para el estado límite de falla; para el estado límite de servicio se revisó el cambio en los espectros de distorsión. Al igual que en el estudio de la influencia de la rigidez y relación de resistencia, se tomaron los mismos criterios en cuanto a análisis, ductilidades, incrementos en la rigidez y relación de resistencia, análisis, modelo histerético y registros sísmicos. Se elaboraron las figuras que contienen varios espectros de respuesta, de los cuales se puede concluir, que las tendencias más relevantes son:

- Aplican todas las conclusiones que se realizaron en los dos párrafos anteriores, debido a que en este apartado, se tomaron en cuenta los efectos combinados del incremento de rigidez y de la relación de resistencia, como se espera en una estructura real. Sólo se plantean tres conclusiones más que resultan de interés, sin descartar la importancia de las demás conclusiones y tendencias observadas a lo largo de este trabajo.
- El amortiguamiento viscoso si tiene efecto considerable en la respuesta de las estructuras, según se observó en los espectros inelásticos de respuesta, para periodos de máxima respuesta y principalmente para ductilidades cercanas a la unidad.
- De los espectros con incremento en la relación de resistencia, se deduce que puede ser más apropiado considerar un factor de incremento de resistencia variable para las estructuras del grupo A
- El efecto de la magnitud del sismo, en la forma del espectro de respuesta para análisis del estado límite de servicio, es irrelevante ya que se deben generar sus propios espectros para las condiciones propias de los sismos y de la estructura (magnitud, amortiguamiento, rigidez, y ductilidad, por ejemplo).

RECOMENDACIONES:

Finalmente se proponen las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda realizar estudios del efecto de la sobre resistencia en las estructuras, mediante análisis no lineal, con los criterios planteados en este trabajo.
- Se sugiere realizar estudios de las estructuras existentes con dispositivos disipadores energía, para generar los parámetros que definen la curva primaria y afinar mejor la relación de resistencia al agrietamiento y la resistencia a la fluencia.
- Se propone elaborar espectros de diseño inelásticos, a partir de espectros de respuesta inelásticos, que tomen en cuenta el comportamiento histerético o el nivel de amortiguamiento histerético equivalente, para cada tipo de estructura, (entiéndase por cada tipo de estructura, al conjunto de parámetros que definen al sistema, rigidez, resistencia, periodo a la fluencia, coeficiente sísmico, relación de rigidez y de resistencia, o sea, la obtención de la curva primaria). Se sabe que la curva primaria se puede obtener de un análisis tipo empujón, el cual tiene diversas maneras de calcularse, pero aún así resulta de utilidad, si se estandariza su implementación, al menos para efectos de normatividad. Con esta

manera de elaborar los espectros de diseño, se puede obtener información que sirva de control en el proceso de diseño.

Bibliografía

- Aguirre, M. Sánchez, A. R. (1990), "Disipadores de Energía Sísmica", Revista Construcción y Tecnología, IMCyC, vol. I No. 10, pp 15-19
- Aguirre, M. (1993), "Disipador de Energía Montable sobre Contravientos en V Invertida", Reporte interno, proy. No. 2127 Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D. F.
- López, B., (1996), "Determinación Experimental del Comportamiento de un Marco Reforzado con un Dispositivo Disipador de Energía", Centro Nacional de Prevención de Desastres, reporte interno.
- Martínez, R. E. (1993) "Experiencias con la utilización de Dispositivos Disipadores de Energía en Edificios Existentes en la ciudad de México", Memoria del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, Jal., México.
- Scholl, R.E y White, W.H. (1990), "Elementos Adicionales de Amortiguamiento y Rigidez para mejorar el Desempeño Sísmico de Estructuras" VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VII Congreso de Ingeniería Estructural, Vol. III, pp. F247-F260
- Aguíñiga, F y Jara, J M (1993), "Reducción de daños sísmicos mediante el uso de osciladores resonantes", X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, octubre, Puerto Vallarta, pp. 826-832
- Chávez, J y González, R (1989), "Efectos de dos Tipos de amortiguadores externos en la respuesta de una estructura metálica de dos niveles", VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural Vol. III, pp. F341-F350
- Jara, J M, Vargas, E, González, R y Gómez, C (1990,1991), "Estudio analítico de la respuesta sísmica de edificios con disipadores de energía", Informes Técnicos finales al departamento del D. F. CIS, Fundación Javier Barros Sierra, A. C.
- Kelly, T E, Mayes, R L y Weissberg, S(1989), "Estimación de daño causado por sismos en estructuras convencionales y aisladas", VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural Acapulco, México, pp. F149-F158

Suárez, R. A y Ruiz S E (1993), "Sobre la respuesta sísmica de sistemas estructurales con osciladores resonantes sujetos a sismos de banda angosta", X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, octubre, Puerto Vallarta, México, pp. 559-564

Urrego O E y Ruiz S E (1993), "Influencia de la distribución de disipadores de energía en la respuesta sísmica de un edificio", X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, octubre, Puerto Vallarta, México, pp. 559-564

Silva F L y Ruiz S E (1993), "Consideraciones sobre el diseño sísmico de marcos con dispositivos disipadores de energía", X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, octubre, Puerto Vallarta, México, pp. 559-564

Esteva L. (2000). "Diseño sísmico basado en desempeño: tendencias y retos", Revista de Ingeniería Sísmica, Julio-Diciembre, pp 31-54

Yoshiaki Nakano, Fumitoshi Kumazawa, Hideo Katsumata, Matsutaro Seki y Tsuneo Okada (1992), "Experimental study of reinforced concrete frames retrofitted with ductile steel framed y-shaped bracing system", Bulletin of earthquake resistant structure research center No. 25, march 1992, Institute of industrial science University of Tokyo, pp 9-25

"Seismic Evaluation and retrofit of concrete buildings", volume 1 Applies Technology Council ATC-40 pp 2-1a2-20, 4-1a4-15, 6-1a6-37, 8-1a8-66.

Aguirre, M y Sánchez, R (1989), "Pruebas de Elementos Disipadores de Energía Sísmica", IMCyC, México.

Gómez, C, Rosenblueth, E y Jara J M (1993), "Estudio de un Sistema de un Grado de Libertad con Disipadores de Energía", Boletín del Centro de Investigación Sísmica, Fundación Javier Barros Sierra, Vol. 3, No. 1.

Martínez, E (1990), "Mejoramiento de la Respuesta Sísmica de Edificios Dañados, Mediante la Acción de Disipadores de Energía", Memorias del Seminario sobre Instrumentación Sísmica y Uso de Elementos Disipadores de Energía en el comportamiento Estructural, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, México, D.F., pp 211-248.

Tena Colunga, A. (1996), "Procedimiento Analítico para Definir la Rigidez y Capacidad Lateral de los Dispositivos Disipadores de Energía ADAS", Reporte, Centro de Investigación Sísmica, Fundación Javier Barros Sierra.

Whittaker, A., Aiken, I., Bergan, D., et. Al., (1995), "Code Requirements for the Design and Implementation of Passive Energy Dissipation Systems", ATC-17-1, Technical Papers on Passive Energy Dissipation, pp. 497-508.

Skinner, R. I., Kelly, J. M. y Heine, A. J. (1975), "Hysteretic Dampers for Earthquake Resistant Structures", *Earthquake Engineering Structural Dynamic*, Vol. 3, pp. 287-296

Scholl, R. E. (1993), "Fundamental Design Issues for Supplemental Damping Applications", *Revista Earthquake Spectra*, Vol.9, No. 3, pp 627-636

Ramberg, W. y Osgood, W. R. (1943), "Description of Stress Strain Curves by three Parameters", *Technical Notes*, No. 902, NACA.

Nakashima, M., Iwata, M., et. Al. (1994), "Energy Dissipation Behavior of shear Panels Made of Low Yield Steel", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 23, pp. 1299-1313.

Martínez, R. E. (1993b) "Experiences on the Use of Supplementary Energy Dissipators on Building Structures". *Memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Puerto Vallarta, Jal., México.

Lin, R. C., Liang, Z., Soong, T. T. y Zhang, R.H. (1988), "An Experimental Study of Seismic Structural Response with Added Viscoelastic Dampers", *National Center for Earthquake Engineering Research*, Reporte NCEER-88-0018, Búfalo, New York.

Aguirre, M. y Sánchez, A. R. (1991) "Structural Seismic Damper", *Journal of the Structural Division*, ASCE, pp 158-170

Ancira, L. R. (1982), "Estudios sobre la Efectividad de Disipadores de Energía en Edificios", *Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil*, UNAM.

Filiatrault, A. y Cherry, S. (1990), "Seismic Design Spectra for Friction Damped Structures", *Journal of the Structural Division*, Vol. 116, No.ST5, ASCE, New York.

Tena Colunga, A. (1997), "Mathematical Modeling of the ADAS Energy Dissipation Device", *Engineering Structures Journal*, en prensa.