



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

MÉTODOS DE ANÁLISIS SÍSMICO PARA ESTRUCTURAS CON DISIPADORES DE
ENERGÍA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:
TOMÁS CASTILLO CRUZ

TUTOR PRINCIPAL
SONIA RUÍZ GÓMEZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA
COMITÉ TUTOR
ROBERTO MELI PIRALLA, INSTITUTO DE INGENIERÍA
JUAN JOSÉ PÉREZ GAVILÁN, INSTITUTO DE INGENIERÍA
ORLANDO JAVIER DÍAZ LÓPEZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA
AMADOR TERÁN GILMORE, PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. AGOSTO 2014

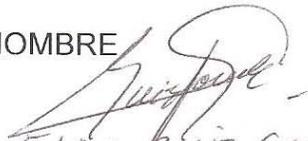
JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. ROBERTO MELI PIRALLA
Secretario: DR. JUAN JOSÉ PÉREZ GAVILÁN
Vocal: DRA. SONIA RUÍZ GÓMEZ
1 er. Suplente: DR. ORLANDO JAVIER DÍAZ LÓPEZ
2 d o. Suplente: DR. AMADOR TERÁN GILMORE

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓMA
DE MÉXICO, CIUDAD UNIVERSITARIA

TUTOR DE TESIS:

NOMBRE


SONIA ELDA RUÍZ GÓMEZ

FIRMA

DEDICATORIAS

A toda mi familia porque siempre estuvo y estará hasta el final de mis tiempos:

*"Bienaventurados los que te amarán sin esperar
que alguien pague su valor, que recompensen tanto amor,
a veces sí a veces no, a veces la vida nos da la espalda
para ver qué color hay que pintar el corazón". Savia*

A mis amigos de la universidad, por el camino que vamos tropezando juntos:

*"Sólo intenta encontrar tu espacio, cuando a tu alrededor todo se estrecha,
los inmortales están bajo tierra y sus cenizas se perderán
como todo lo demás sin dejar huella". E.B.*

A la UNAM por ser ese oasis de oportunidades

*"My best friend gave me the best advice
he said each day's a gift and not a given right
leave no stone unturned, leave your fears behind
and try to take the path less traveled by
that first step you take is the longest stride". Nickel Back*

*"They say it's never too late to stop being afraid
and there is no one else here, so why should I wait?
and in the blink of an eye the past begins to fade.
So have you ever been caught in a sea of despair?
and your moment of truth is the day that you say "I'm not scared"*

*Put your hands in the air if you hear me out there
I've been looking for you day and night
shine a light in the dark, let me see where you are
'cause I'm not going leave you behind
if I told you that you're not alone
and I show you this is where you belong". Shinedown*

AGRADECIMIENTOS

A todos los integrantes del jurado por enriquecer este trabajo con sus comentarios y observaciones.

Al CONACyT por el apoyo económico brindado.

Al Instituto de Ingeniería por permitir el uso de sus instalaciones para la realización de esta tesis.

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1. CONCEPTOS PRELIMINARES.....1

- 1.1 Tipos de disipadores estudiados 1
- 1.2 Balance de energía en las estructuras 2
- 1.3 Desplazamiento objetivo de la estructura 4

CAPÍTULO 2. MÉTODO DE DISEÑO PARA ESTRUCTURAS CON DISIPADORES DE ENERGÍA DE TIPO HISTERÉTICO.....5

- 2.1 Propiedades de diseño de los Disipadores de energía histeréticos 6
- 2.2 Geometría del sistema de disipación 13
 - 2.2.1 Dispositivos tipo TADAS 14
 - 2.2.2 Dispositivos tipo ADAS 16
- 2.3 Reducción del espectro de diseño considerando la presencia de disipadores de energía histeréticos 17
- 2.4 Elementos mecánicos de diseño para estructuras con disipadores de tipo histerético 19
 - 2.4.1 Fuerzas en la cimentación 21

CAPÍTULO 3. MÉTODO DE DISEÑO PARA ESTRUCTURAS CON DISIPADORES DE ENERGÍA DE TIPO VISCOSO LINEAL.....23

- 3.1 Parámetros de diseño de los disipadores de energía viscoso lineal 24
- 3.2 Reducción del espectro de diseño para estructuras con disipadores de tipo viscoso lineal 28
- 3.3 Elementos mecánicos de diseño para estructuras con disipadores de tipo viscoso lineal 29

CAPÍTULO 4. FACTORES DE REDUCCIÓN PARA ESPECTROS DE DISEÑO EN ESTRUCTURAS CON DISIPADORES DE ENERGÍA.....31

- 4.1 Estudio de Peligro sísmico en el valle de México 32
- 4.2 Expresión del Factor de reducción para sistemas con disipadores de tipo histerético 41
 - 4.2.1 Caracterización de los sistemas con disipadores de tipo histerético y Espectros de Peligro Uniforme 41
 - 4.2.2 Factores de reducción para estructuras con disipadores de tipo histerético 55
 - 4.2.3 Expresión matemática propuesta para el factor de amortiguamiento β_H 62
- 4.3 Expresión del Factor de reducción para sistemas con disipadores de tipo viscoso lineal 70
 - 4.3.1 Factores de reducción para estructuras con disipadores de tipo histerético 76
 - 4.3.2 Expresión matemática propuesta para el factor de amortiguamiento β_V 80

<i>CAPÍTULO 5. FACTORES DE CORRECCIÓN DE LA ENERGÍA EN EL DISIPADOR</i>	84
<i>CAPÍTULO 6. EJEMPLOS DE APLICACIÓN</i>	112
6.1 Estructura con disipadores de tipo histerético	120
6.1.1 Análisis modal considerando la presencia de disipadores histeréticos	128
6.1.2 Comportamiento de la estructura ante movimientos sísmicos reales	130
6.2 Estructura con disipadores de tipo viscoso lineal	135
6.2.1 Análisis modal considerando la presencia de disipadores viscosos lineales	136
6.2.3 Comportamiento de la estructura ante movimientos sísmicos reales	138

CONCLUSIONES Y APORTACIONES

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICE A: Artículo publicado en la revista *Journal of Earthquake Engineering*

RESUMEN

Se presenta una metodología para el análisis sísmico de estructuras habilitadas con disipadores de energía. El objetivo principal de la metodología que aquí se propone consiste en controlar las distorsiones de entrepiso de una estructura a través de la adición de sistemas de disipación de energía. En este trabajo se estudian principalmente dos tipos de disipadores: de tipo histerético y tipo visoco lineal. La metodología que aquí se propone busca que los componentes estructurales tales como trabes, columnas o muros permanezcan dentro de su intervalo de comportamiento elástico mientras que el excedente de demanda en la estructura es tomado por los disipadores de energía. Los parámetros de diseño de los disipadores de energía se obtienen a partir de un análisis modal de una estructura equivalente que representa al sistema completo estructura-disipador.

Se presentan también reglas para obtener factores de reducción para los espectros de diseño incluidos en las *Normas Técnicas Complementarias para diseño por Sismo del 2004*, las cuales se obtuvieron a partir de un estudio de peligro sísmico en el valle de México en donde se definieron curvas de peligro sísmico así como Espectros de Peligro Uniforme (EPU) para sistemas con porcentaje de amortiguamiento crítico del 5% y con los diferentes disipadores de energía estudiados. Los factores de reducción se obtienen a partir de la relación entre EPU's correspondientes a sistemas convencionales con 5% de amortiguamiento crítico y EPU's o Espectros de Tasa de Excedencia Uniforme, ETEU's, para estructuras con disipadores de energía viscosos o histeréticos, respectivamente. Las expresiones matemáticas de los correspondientes factores de reducción derivan en una función del periodo estructural, del periodo dominante de vibrar del suelo así como de las características del disipador, y son aplicables a sistemas estructurales lineales con disipadores histeréticos o viscosos lineales, que se localicen en cualquier sitio del valle de México.

ABSTRACT

A methodology for the seismic analysis of structures with energy dissipating devices is presented here. The goal underlying the methodology is to control the lateral displacement by the addition of energy dissipating devices in a structure designed for gravity loads. Two types of dampers are studied: hysteretic dampers and viscous linear dampers. The methodology herein proposed has as its main goal that the structural components (beam, columns, walls, etc.) Remain in its elastic behavior interval, having at the same time the damage due to the earthquake be taken by the damper. Inter-story drift is used as performance index. The design parameters of the dampers are obtained out of a modal dynamic analysis of an equivalent system representing the system structure-damper.

Rules are also presented for reduction factors for the design spectra, included in the *Normas Técnicas Complementarias para diseño por Sismo del 2004*, these rules were obtained from a study of seismic hazard in the valley of Mexico defining seismic hazard curves and Uniform Hazard Spectra (UHS) for systems with a percentage of critical damping of 5% and for each kind of energy dissipating device studied. The reduction factors were obtained from the relationship between UHS for a conventional systems corresponding to 5% of critical damping and UHS or Exceedance Rate Spectra Uniform, ERSU, for structures with viscous dampers or hysteretic dampers, respectively. The mathematical expressions of the corresponding reduction factors result in a function of the main structural period, the dominant period of vibration of the soil and the characteristics of the damper, and are applicable to linear structural systems with viscous dampers or hysteretic dampers placed in the valley of Mexico.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han desarrollado tecnologías que permiten disipar la energía sísmica de manera controlada y reducir los efectos de los sismos sobre las estructuras a fin de evitar el daño en sus elementos principales. Dichos dispositivos tienen la función de disipar la energía de forma estable, además de que deben repararse o sustituirse con relativa facilidad y bajo costo. En este trabajo se presenta el desarrollo de una metodología para diseñar estructuras con disipadores de energía. Se estudian dos tipos de disipadores: histeréticos y viscosos lineales. El estudio se enfoca principalmente a sistemas cuya deformación lateral está gobernada principalmente a cortante, desplantadas en el valle de México.

La metodología que se propone en esta tesis consiste en determinar los parámetros de diseño de los disipadores a colocar en una estructura mediante un análisis dinámico modal. Esto se logra analizando una estructura equivalente que representa al sistema completo de la estructura convencional ó básica más el sistema de disipadores, los cuales, se representan a través de resortes elásticos ficticios cuya rigidez será proporcional a la rigidez del entrepiso en que se coloquen. Los parámetros de diseño de los disipadores reales se obtienen a través de una equivalencia entre la energía de deformación elástica de éstos resortes y la forma del lazo histerético del disipador que se trate. Además, se busca que el máximo valor de la distorsión de entrepiso no rebase un umbral para el cual los elementos estructurales comiencen a presentar daño, en otras palabras, se busca que los elementos estructurales (trabes, columnas, etc.) presenten en todo momento un comportamiento elástico mientras que el excedente de demanda en el sistema debido a un movimiento sísmico sea tomado por los disipadores. Por otro lado, algunas veces los disipadores no solo proveen a la estructura de un amortiguamiento adicional sino que además representan un incremento en la rigidez lateral, debido a lo cual se modifican las propiedades dinámicas iniciales de un sistema estructural.

A lo largo de este trabajo de investigación se ha llegado a la conclusión de que una de las mayores incertidumbres que se tienen en el análisis de este tipo de estructuras es estimar la distribución de distorsiones de entrepiso máximas, ya que de ellas depende en gran medida los elementos mecánicos para el diseño de la estructura. Una estimación alejada de la realidad de las distorsiones de entrepiso, puede derivar en un diseño demasiado conservador o en el peor de los casos en un diseño inseguro, en el cual la capacidad del disipador sea menor que la soicitación ante un sismo intenso. En la literatura existen algunas metodologías que corrigen estos errores a través de iteraciones que gradualmente se van acercando al diseño final de la estructura.

La metodología que se presenta en este trabajo se enfoca en definir los parámetros de diseño de los disipadores al mismo tiempo que se busca que la adición de estos dispositivos no modifiquen significativamente las formas modales de la estructura básica (estructura sin disipadores). De esta manera es posible acelerar el proceso de diseño debido a que, como se verá más adelante, el diseño final de la estructura se puede llevar a cabo a partir de un análisis dinámico modal con un espectro de diseño que se reduce en función de las características del sistema de disipadores, teniendo la certeza de que los desplazamientos laterales máximos que resulten de este análisis corresponderán a los desplazamientos máximos que se tendrían en el sistema completo (estructura básica más disipadores) cuando éste sea sometido a las acciones de un sismo intenso.

Así mismo, para poder evaluar el desempeño de la estructura mediante un análisis modal espectral es necesario contar con las herramientas necesarias que permitan al estructurista obtener un espectro de diseño reducido que tome en cuenta la presencia de los disipadores en la estructura. Por tal motivo se presentan también reglas para obtener factores de reducción para los espectros de diseño incluidos en las Normas Técnicas Complementarias para diseño por Sismo del 2004.

Las reglas de reducción de los espectros de diseño se obtuvieron a partir de un estudio de peligro sísmico en el valle de México en donde se definieron curvas de peligro sísmico así como Espectros de Peligro Uniforme (EPU) para sistemas con porcentaje de amortiguamiento crítico del 5% y con los diferentes disipadores de energía estudiados. Los factores de reducción se obtienen a partir de la relación entre EPU's correspondientes a sistemas convencionales con 5 % de amortiguamiento crítico y EPU'so Espectros de Tasa de Excedencia Uniforme, ETEU's, para estructuras con disipadores de energía viscosos o histeréticos, respectivamente. Las expresiones matemáticas de los correspondientes factores de reducción resultan función del periodo estructural, del periodo dominante de vibrar del suelo así como de las características del disipador, y son aplicables a sistemas estructurales lineales con disipadores histeréticos o viscosos lineales, que se localicen en cualquier sitio del valle de México.

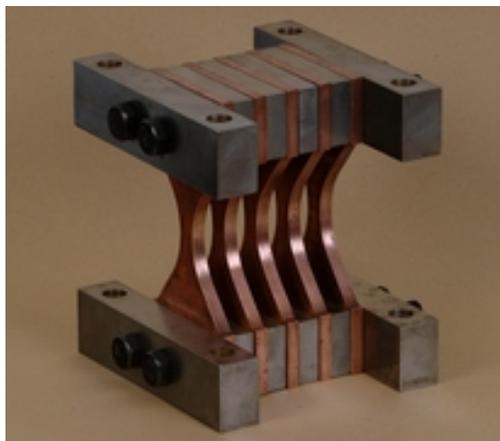
CAPÍTULO 1

CONCEPTOS PRELIMINARES

1.1 TIPOS DE DISIPADORES ESTUDIADOS

En el presente trabajo se estudiarán principalmente dos tipos de disipadores: histeréticos y viscosos lineales, a continuación se describe brevemente cada uno de ellos.

Los disipadores histeréticos se componen por algún material que presente deformación plástica (acero, plomo, cobre, etc.) cuya capacidad de disipar energía depende principalmente del desplazamiento relativo entre los extremos del disipador. Dentro de este grupo de disipadores existen por ejemplo los disipadores tipo ADAS, TADAS, de óvalo, etc. En esencia, este tipo de disipadores suponen un incremento interno del amortiguamiento estructural mediante la disipación de energía histerética, y al mismo tiempo proporcionan un incremento tanto en la rigidez como en la resistencia del sistema estructural. Por lo general los disipadores histeréticos se comportan elásticamente para resistir las cargas laterales producidas por viento y sismos de poca intensidad; sin embargo, presentan comportamiento inelástico ante la acción de eventos intensos, disipando energía mediante comportamiento histerético (Ruiz Gómez S.E., 2011). La metodología propuesta en esta tesis se enfoca principalmente a los disipadores de tipo ADAS y TADAS los cuales se muestran en la figura 1a y 1b.



a) disipador tipo ADAS



b) disipador tipo TADAS

Figura 1.1. Disipadores de tipo histerético estudiados en esta tesis

Los disipadores viscosos generalmente están constituidos por un cilindro con un fluido (viscoso) de silicona en su interior y un émbolo que reacciona contra el fluido cuando se aplica con cierta velocidad un desplazamiento relativo en los extremos del dispositivo. Los parámetros más importantes para la caracterización de estos disipadores son el parámetro de amortiguamiento, C_d , el cual tiene unidades de fuerza por velocidad, y el exponente de amortiguamiento de no linealidad, a_d . La variación del valor de este parámetro se debe principalmente al tamaño de los orificios por los que pasa el fluido de silicona, los cuales alteran la magnitud de la velocidad del fluido (Constantinou y Symans, 1995). En el caso de disipadores de tipo viscoso lineal, el valor del exponente a_d es igual a la unidad.

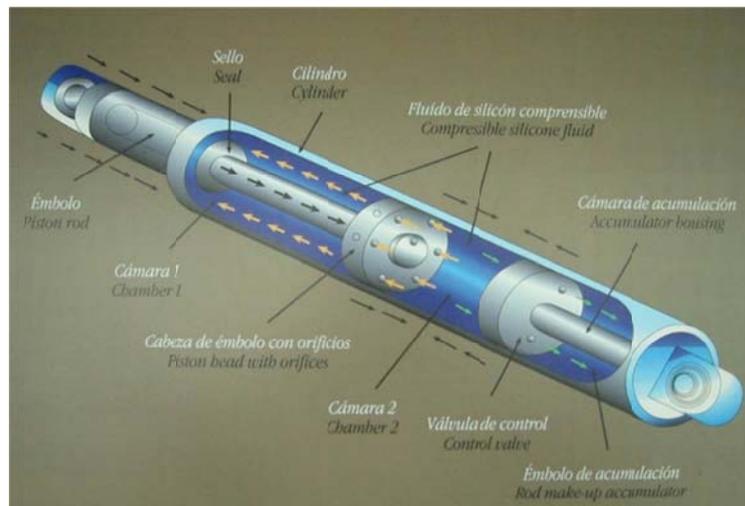


Figura 1.2. Disipadores de tipo viscoso

1.2 BALANCE DE ENERGÍA EN LAS ESTRUCTURAS

La física clásica define a la energía como la capacidad de un cuerpo para realizar un trabajo. La ley universal de la conservación de la energía establece que la energía asociada a un sistema aislado permanece constante en el tiempo. Akiyama (1989) establece que el equilibrio de energía en una estructura sujeta a un movimiento sísmico puede escribirse como sigue

$$E(t) = W_e(t) + W_p(t) + W_h(t) \quad (1.1)$$

En la cual $E(t)$ es la energía de entrada en el tiempo t , $W_e(t)$ es la energía de vibración elástica, $W_p(t)$ es la energía por deformación inelástica y $W_h(t)$ es la energía debida al amortiguamiento inherente de la estructura.

Para que la estructura sea capaz de mantener el balance de energía, la capacidad para absorber energía del sistema estructura-disipador debe ser mayor o igual que la energía de entrada debida al movimiento sísmico. La energía de entrada en una estructura puede cuantificarse a través del área bajo la curva de la relación carga-desplazamiento de cada uno de los elementos que

componen el sistema global. De esta manera, la energía total de entrada en la estructura será la suma del área bajo la curva fuerza-desplazamiento del sistema básico más el área bajo la curva fuerza-desplazamiento del sistema de disipadores. En la figura 1.3 se muestran las relaciones fuerza-desplazamiento de cada uno de los elementos que componen el sistema, se muestran las curvas de comportamiento tanto a) para sistemas con disipadores histeréticos como para b) disipadores de tipo viscoso.

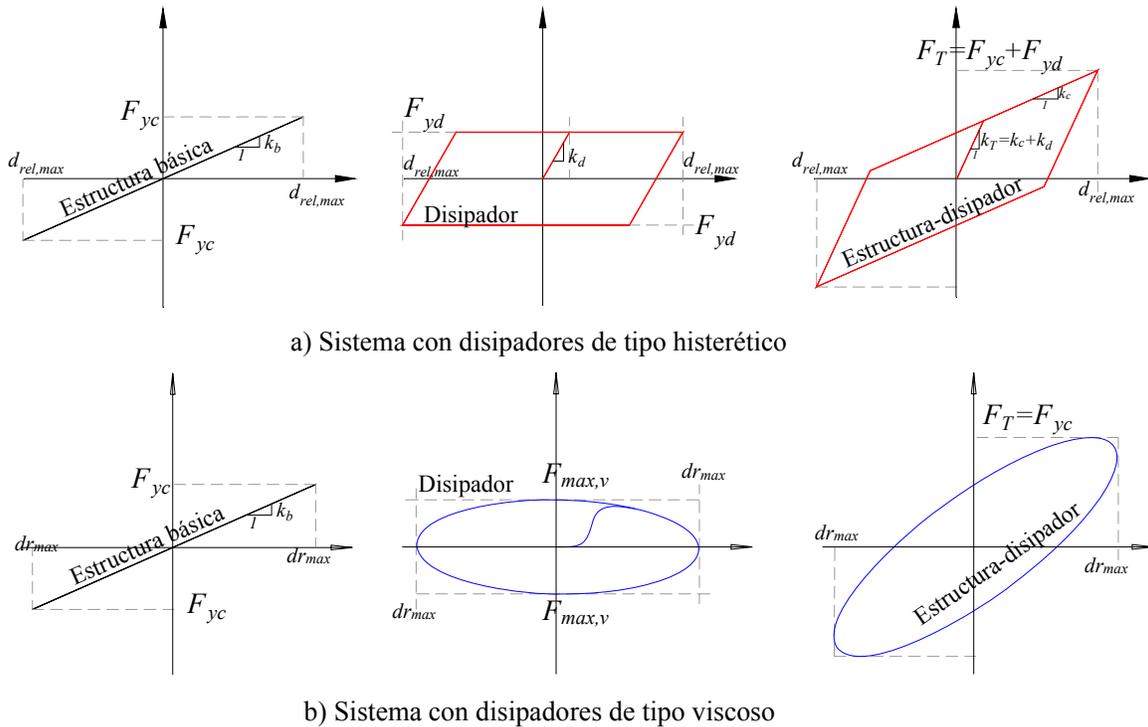


Figura 1.3. Relaciones fuerza desplazamiento de los elementos que componen el sistema estructura-disipador

Se puede ver que en ambos casos de estudio el sistema básico exhibe un comportamiento lineal, esto se debe a la condición inicial impuesta de que la estructura básica permanezca siempre dentro de su intervalo de comportamiento elástico, mientras que el excedente de energía será tomado por los disipadores. Así, la ecuación (1.1) se puede escribir de la siguiente manera

$$E(t) = W_e(t) + W_d(t) \tag{1.2}$$

donde $W_d(t)$ es la energía efectiva que los dispositivos debendisipar. La metodología que aquí se propone consiste en definir una estructura elástica equivalente en donde los disipadores de energía se sustituyen por resortes elásticos ficticios, los cuales aportan rigidez a la estructura básica y desarrollarán energía de deformación cuando la estructura se desplace lateralmente. La energía de deformación de los resortes ficticios se puede igualar con el área encerrada de la forma del lazo histerético de los diferentes tipos de disipadores, con lo cual es posible definir sus

propiedades de diseño a través de la manipulación de las ecuaciones que describen su comportamiento.

1.3 DESPLAZAMIENTO OBJETIVO DE LA ESTRUCTURA

Como primer paso de la metodología que se propone en este trabajo, se deberá fijar un desplazamiento objetivo de la estructura el cual corresponde al límite de desplazamiento elástico, el cual puede conocerse mediante un análisis estático no lineal, push-over o bien mediante recomendaciones encontradas en la literatura.

Por ejemplo, en la tesis doctoral de Carlos Reyes, 1999, se hace una revisión muy extensa de resultados experimentales obtenidos por diferentes investigadores, respecto a los valores de las distorsiones de entrepiso que pueden tomarse como índice para estimar el inicio del daño en estructuras de concreto. En estos valores índice se contempla que el daño en el concreto empieza a partir de que se presenta un agrietamiento considerable en el concreto. En la tabla 1.1 se muestra un resumen de los resultados reportados en la tesis doctoral mencionada, corresponden a valores de distorsión de entrepiso que inician el daño para diferentes sistemas estructurales.

Tabla 1.1. Distorsiones de entrepiso que inician el daño en diferentes sistemas estructurales (Carlos Reyes, 1999)

Sistema estructural	Distorsión de entrepiso que inicia el daño
Marcos de concreto detallados sísmicamente	0.0050
Marcos de concreto sin un buen detallado sísmico	0.0073
Losas planas*	0.008 para $V_g \leq 0.88 (f'_c)^{0.5}$
	0.004 para $V_g \geq 0.88 (f'_c)^{0.5}$
Muros de mampostería	
Piezas macizas	0.0010
Piezas tipo panal	0.0010
Piezas huecas con refuerzo interior confinadas por castillos y dalas	0.0007
Piezas huecas con refuerzo interior sin confinar	0.0005
Bloques de concreto confinados por castillos y dalas	0.0005
Piezas huecas pegadas con mortero pobre	0.0003
Muros de concreto	0.015 para $h/b \geq 2.0$
	0.010 para $h/b < 2.0$

* V_g es el esfuerzo cortante debido a carga gravitacional actuando en la sección crítica de la losa

CAPÍTULO 2

MÉTODO DE DISEÑO PARA ESTRUCTURAS CON DISIPADORES DE ENERGÍA DE TIPO HISTERÉTICO

Los dispositivos histeréticos que se estudian en este trabajo corresponden a los dispositivos tipo ADAS y TADAS. Estos dispositivos están formados por un sistema de placas paralelas que se flexionan alrededor de un eje ya sea en curvatura doble o sencilla. Estos dispositivos generalmente se instalan en contravientos tipo chevrón conectados a dos entrepisos adyacentes mediante una conexión articulada (ver figura 2.1). Este tipo de disipadores trabajan mediante comportamiento inelástico cuando se presenta un desplazamiento relativo entre los dos entrepisos. Si el desplazamiento relativo es suficiente, las placas del dispositivo comenzarán a fluir permitiendo que la energía se disipe mediante ciclos histeréticos.

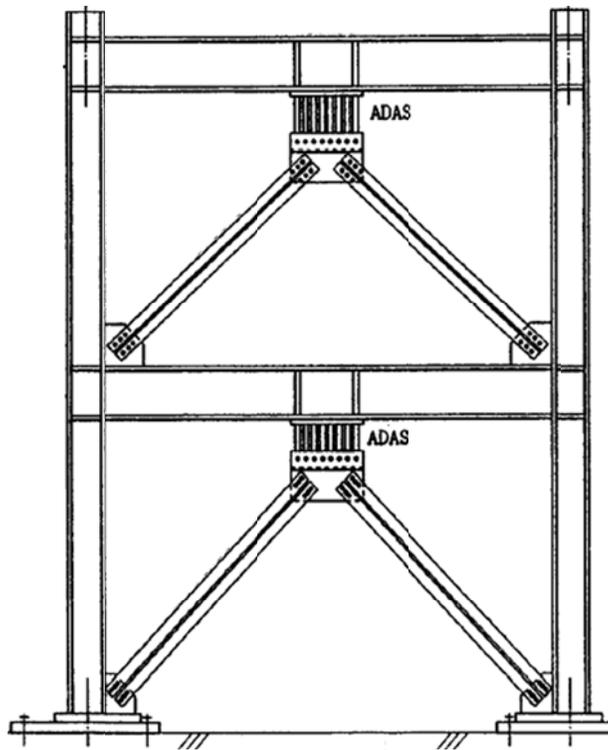


Figura2.1. Arreglo convencional de disipadores de tipo histerético (Tsai et al, 1993)

Estudios experimentales han comprobado que estos disipadores desarrollan ciclos estables ante condiciones de carga cíclica, además de que pueden ser sometidos a varios ciclos de carga y descarga antes de que se pueda detectar una degradación en la resistencia o rigidez del dispositivo (Tsai et al, 1993).

En ocasiones el desplazamiento relativo necesario para que las placas del disipador empiecen a presentar comportamiento inelástico suele ser del orden de milímetros por lo cual es necesario evaluar el comportamiento de los disipadores en las diferentes etapas de su vida útil, ya que es posible que los dispositivos se comporten inelásticamente aún para solicitaciones mucho menores que las que se esperarían para el sismo de diseño. Por tal motivo, en la metodología que aquí se propone, las dimensiones del sistema de disipación se acotan en función de dos estados de operación: un estado de prevención al colapso el cual determina la resistencia del dispositivo así como la máxima cantidad de energía que éste deberá ser capaz de disipar; y un estado límite de servicio con el cual se determina el umbral de los diferentes desplazamientos de fluencia requeridos en cada disipador de tal forma que se mantenga dentro de su intervalo de comportamiento elástico ante sismos de baja intensidad.

2.1 PROPIEDADES DE DISEÑO DE LOS DISIPADORES DE ENERGÍA

Como se mencionó en el capítulo 1 de esta tesis, el primer paso de la metodología consiste en definir el desplazamiento objetivo de la estructura el cual servirá para determinar las características del sistema de disipación.

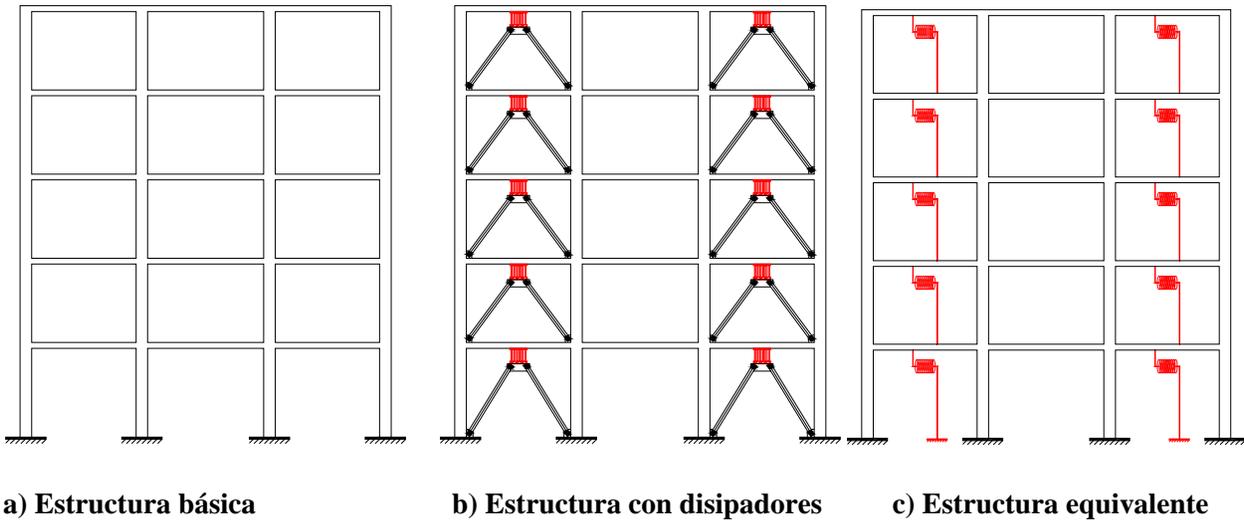
Como siguiente paso, la estructura básica se debe caracterizar mediante un sistema de masas y resortes; estimando en cada entrepiso tanto su rigidez como la masa correspondiente a la combinación de carga para el análisis sísmico. Posteriormente se genera una estructura equivalente colocando en el sistema de masas y resortes de la estructura elementos elásticos ficticios, los cuales representan a los disipadores y cuya rigidez es proporcional a la rigidez del entrepiso correspondiente. La rigidez axial de cada resorte ficticio, K_r , se define como

$$K_r^i = \eta K_b^i \quad (2.1)$$

donde K_b^i es la rigidez convencional del entrepiso- i , y η es un parámetro constante mediante el cual se regula el desplazamiento lateral de la estructura equivalente cuando se realiza el análisis modal espectral.

Los disipadores histeréticos como los ADAS o TADAS, trabajan en dirección horizontal acoplándose al desplazamiento de la estructura, de manera que los resortes elásticos ficticios

deben colocarse en la misma posición. En la figura 2.2 se muestra un ejemplo de una estructura básica y su correspondiente estructura equivalente.



a) Estructura básica b) Estructura con disipadores c) Estructura equivalente
Figura 2.2. Modelo de la estructura con disipadores histeréticos

Bajo estas condiciones, la matriz de rigidez del sistema con elementos ficticios se construye considerando la participación de cada resorte elástico como se muestra en la figura 2.3.

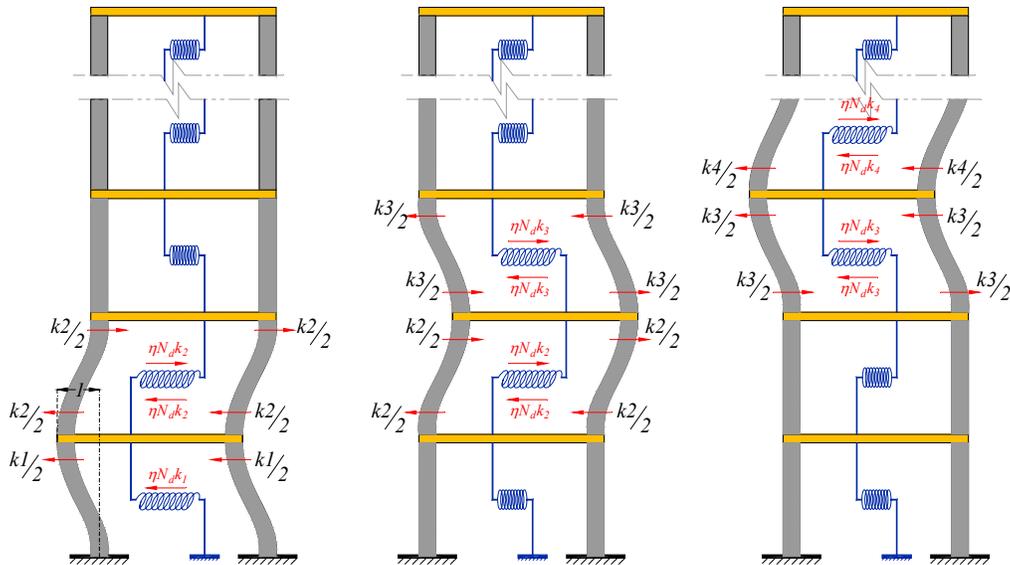


Figura 2.3. Construcción de la matriz de rigidez para estructuras con resortes elásticos ficticios.

Una vez que se cuenta con las propiedades dinámicas de la estructura equivalente, se realiza un análisis modal utilizando un espectro de diseño correspondiente al 5% de amortiguamiento crítico

(en este trabajo se estudian principalmente estructuras de concreto). En esta primera etapa del análisis el espectro de diseño no se reduce ni por comportamiento dúctil, $Q=1$, ni por sobre resistencia, $R=1$; en su lugar se hace variar el valor del parámetro η hasta que la máxima distorsión de entrepiso sea igual a la distorsión objetivo que se haya definido para la estructura (ver figura 2.4).

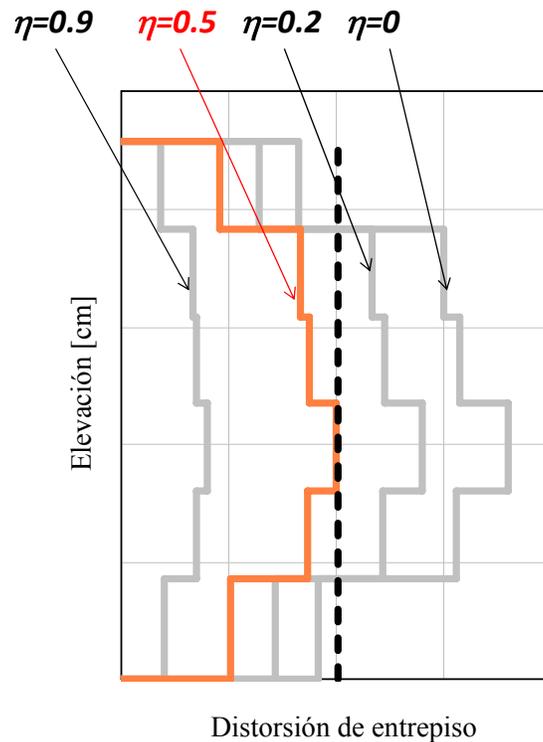


Figura 2.4. Variación de la distorsión de entrepiso con el parámetro

Dado que el desplazamiento lateral de la estructura se regula mediante el valor del parámetro η para que no se exceda el desplazamiento objetivo, la estructura básica se conservará dentro de su intervalo de comportamiento elástico y por lo tanto la cantidad de energía que desarrolla cada resorte elástico ficticio cuando se deforma junto con la estructura se puede estimar mediante la siguiente ecuación:

$$E_d^i = \frac{1}{2} \eta K_b^i (dr_{\max}^i)^2 \quad (2.2)$$

Donde dr_{\max}^i es el desplazamiento relativo máximo del i -ésimo entrepiso. Cabe mencionar que los disipadores de tipo histerético además de aportar rigidez a la estructura incrementan también el valor del porcentaje de amortiguamiento crítico, este efecto en principio se estaría ignorando en la estructura equivalente al considerar únicamente un aumento de la rigidez en la estructura. Por otro lado el hecho de que el disipador incremente el valor del amortiguamiento implica también

que la rigidez requerida en el disipador para llegar al desplazamiento objetivo deba ser diferente que la rigidez del resorte elástico.

Para tomar en cuenta el comportamiento real del disipador hysterético, la cantidad de energía calculada con la expresión 2.2 debe corregirse por un factor, que en este estudio, se expresa como una función de la relación entre las propiedades dinámicas de la estructura básica y su correspondiente estructura equivalente. El resultado de esta multiplicación da como resultado la cantidad de energía efectiva que el dispositivo deberá ser capaz de disipar, y a partir de conocer este valor es que se deducen las dimensiones físicas del disipador como se describe más adelante.

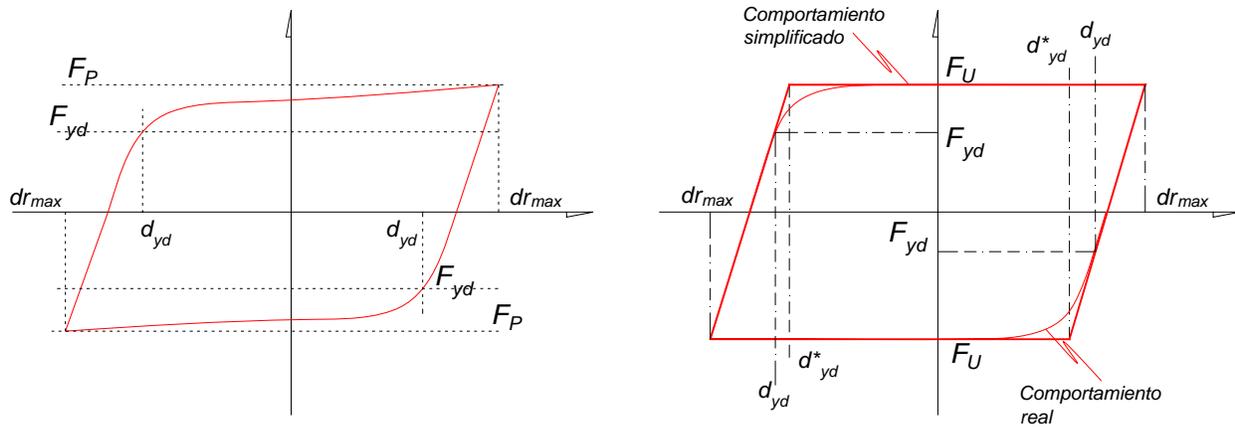
El factor de corrección para estimar la cantidad de energía efectiva que debe tomar cada disipador se define mediante la siguiente ecuación:

$$F_{EH} = 0.39 [\psi_H]^{2.0} \quad (2.3a)$$

$$\psi_H = \frac{C_{eq} \frac{T_{eq}}{T_o}}{C_o} \quad (2.3b)$$

En donde C_o y c_{eq} son la ordenada espectral correspondiente al periodo fundamental de la estructura básica y a la estructura equivalente, respectivamente, y T_o y T_{eq} son el periodo fundamental de la estructura básica y de la estructura equivalente respectivamente. En el capítulo 5 se presenta una discusión acerca de la deducción de la ecuación (2.3a y 2.3b).

Una vez que se conoce la cantidad de energía efectiva que debe tomar cada uno de los disipadores del entrepiso, se establece una equivalencia entre este valor de energía y el área que encierra el lazo hysterético del dispositivo. Para efectos de simplificar el análisis, el comportamiento de los disipadores hysteréticos se puede caracterizar mediante un comportamiento bilineal en el cual se van a definir los cuatro parámetros principales: rigidez, k_d , desplazamiento de fluencia, d_{yd} , fuerza de fluencia, F_{yd} , y fuerza resistente, F_U . En la figura 2.5 se muestra el comportamiento tipo de un disipador hysterético, se muestra a) la forma real de la curva y b) el comportamiento simplificado mediante un comportamiento bilineal.



a) Comportamiento real

b) Comportamiento simplificado

Figura 2.5. Relación Fuerza vs desplazamiento de un disipador histerético típico

La cantidad de energía total que debe disipar el dispositivo (calculada con las ecuaciones 2.2, 2.3a y 2.3b) deberá ser igual a la energía de deformación inelástica que desarrolla el disipador, esta cantidad de energía se representa mediante el área ashurada de la Figura 2.6.

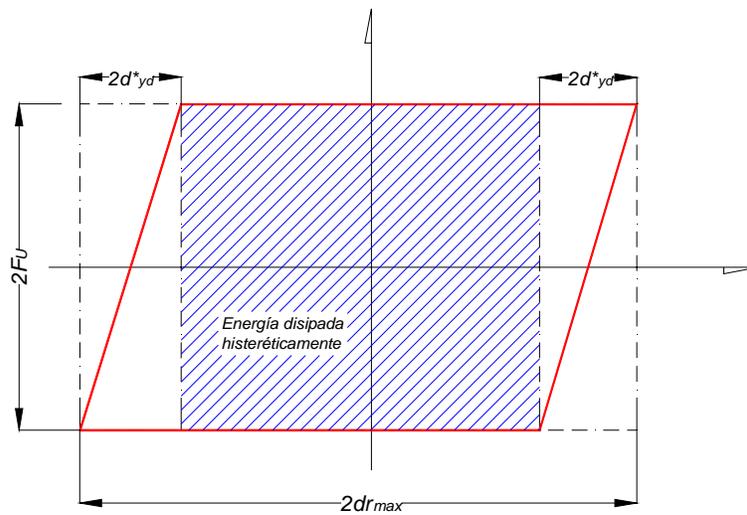


Figura 2.6. Energía inelástica de deformación de un disipador histerético

La energía disipada histeréticamente se puede obtener mediante la siguiente expresión

$$E_D = 2F_U(2dr_{max} - 4d_{yd}^*) = 4F_U(dr_{max} - 2d_{yd}^*) \quad (2.4)$$

donde d_{yd}^* es el desplazamiento de fluencia modificado del disipador y dr_{max} es el desplazamiento relativo permisible del entrepiso correspondiente. Tsai et al, 1989, establece que para una placa de sección rectangular, la relación entre su fuerza resistente y su fuerza de fluencia es 1.5, sustituyendo esta condición la ecuación 2.4 se tiene

$$E_D = 6F_{yd} (dr_{max} - 2d_{yd}^*) \quad (2.5)$$

de igual manera la misma proporción de 1.5 se mantiene entre el desplazamiento de fluencia d_{yd} y el desplazamiento de fluencia modificado d_{yd}^* por lo que la ecuación (2.5) se puede escribir de la forma

$$E_D = 6F_{yd} (dr_{max} - 3d_{yd}) \quad (2.6)$$

Además, el desplazamiento de fluencia del disipador se puede expresar en términos de su ductilidad mediante la siguiente expresión

$$d_{yd} = \frac{dr_{max}}{\mu_d} \quad (2.7)$$

sustituyendo la ecuación (2.7) en la ecuación(2.6) se tiene

$$E_D = 6F_{yd} dr_{max} \left[1 - \frac{3}{\mu} \right] \quad (2.8)$$

despejando la fuerza de fluencia

$$F_{yd}(\mu) = \frac{E_D}{6dr_{max} \left[1 - \frac{3}{\mu} \right]} \quad (2.9)$$

De la ecuación (2.9) se puede ver que la fuerza de fluencia del disipador se puede expresar como una función solo de la ductilidad del disipador debido a que los demás términos son conocidos. Si se selecciona un valor de la ductilidad para el disipador, se pueden definir, para cada nivel, la rigidez del disipador, K_d , mediante

$$K_d = \frac{F_{yd}}{dr_{max}} \quad (2.10)$$

Una vez que se cuentan con los valores de rigidez, fuerza de fluencia y desplazamiento de fluencia para cada disipador, se calcula la rigidez modificada de cada entrepiso, K_S , considerando el aporte de rigidez del sistema de disipación mediante

$$K_S = K_B + N_D K_D \quad (2.11)$$

donde K_B es la rigidez del i -ésimo entrepiso sin disipadores (sistema básico), N_D es el número de disipadores del i -ésimo entrepiso y K_D es la rigidez lateral individual del sistema de disipación del i -ésimo entrepiso la cual se calcula considerando la combinación de un sistema de placas más un sistema de brazos en diagonal que las soportan y se define como (Tsai, et al, 1993)

$$K_D = \frac{k_d k_b}{k_d + k_b} \quad (2.12)$$

donde k_d es la rigidez del disipador y k_b es la rigidez lateral del sistema de brazos que soportan las placas del disipador.

Debido a que los brazos deben diseñarse para permanecer elásticos durante la acción del sismo de diseño, su rigidez lateral debe ser mayor que la del sistema de placas. Whittaker, 1989, recomiendan que la rigidez lateral del sistema de brazos sea del orden de dos veces mayor que el conjunto de las placas ($k_b = 2 k_d$), de tal manera que la rigidez del sistema de disipación se puede expresar en forma directa mediante la siguiente expresión

$$K_D = \frac{2k_d}{3} \quad (2.13)$$

Como siguiente paso se debe analizar a la estructura con el espectro de diseño correspondiente al estado límite de servicio. En este paso se debe analizar a la estructura considerando la rigidez modificada de cada entrepiso calculada con la ecuación (2.13). Además se considera que tanto la estructura básica como el sistema de disipación tendrán comportamiento elástico. Dado que el espectro de diseño para servicio es mucho menor que el espectro de diseño para colapso, los desplazamientos relativos de la estructura serán demasiado bajos, del orden de milímetros, en teoría estos desplazamientos serán mucho menores que los desplazamientos permisibles para servicio, sin embargo, si uno compara los desplazamientos relativos de este análisis con la distribución de desplazamientos de fluencia obtenidos para cada disipador se puede ver que, dependiendo del valor de la ductilidad seleccionada para los disipadores, los desplazamientos relativos para servicio serán menores o mayores que los desplazamientos de fluencia de los disipadores.

En el caso de que los desplazamientos relativos que resultan del análisis con el espectro de servicio sean mayores que los desplazamientos de fluencia de los disipadores, esto quiere decir que el sistema de disipación propuesto podría presentar comportamiento inelástico aún para sismos de baja intensidad; dicho de otra manera, la ductilidad seleccionada para los disipadores implica que su capacidad elástica es poca ante las condiciones de servicio y rápidamente se alcanza la fluencia de las placas del disipador (para esa estructura en particular).

Por el contrario, cuando los desplazamientos relativos que resultan del análisis con el espectro de servicio son menores que los desplazamientos de fluencia de los disipadores, esto quiere decir que el sistema de disipación propuesto todavía tiene una cierta capacidad de deformación elástica que debería ser aprovechada, en otras palabras, la ductilidad seleccionada para los disipadores implica que su capacidad elástica está sobrada ante las condiciones de servicio y aún puede aprovecharse esta capacidad de deformación antes de que se alcance la fluencia de las placas del disipador (para esa estructura en particular).

Un disipador eficiente (en la metodología que aquí se propone) sería entonces el caso en el que los desplazamientos relativos que resultan del análisis con el espectro de servicio sean iguales a los desplazamientos de fluencia, debido a que, para sismos con intensidades similares a las de servicio el sistema de disipación permanece elástico mientras que para movimientos intensos el sistema tiene la capacidad necesaria para disipar la energía sísmica mediante el comportamiento inelástico de las placas.

Esto quiere decir que en la metodología que aquí se propone se deben realizar iteraciones a partir de la ecuación (2.9) hasta encontrar el valor de la ductilidad con el cual se logran empatar los desplazamientos relativos que resultan del análisis con el espectro de servicio y los desplazamientos de fluencia de los disipadores en los diferentes entrepisos.

Una vez que se cuenta con las propiedades requeridas del disipador para garantizar un buen comportamiento sísmico de la estructura, la siguiente parte del problema radica en encontrar el tamaño físico que tendrá el sistema de disipación.

2.2 GEOMETRÍA DEL SISTEMA DE DISIPACIÓN

La geometría del disipador se define a través de cuatro variables principales: altura, ancho, espesor y número de placas. En este trabajo se propone una forma preliminar de acotar la geometría de los diferentes sistemas de disipación en función de su capacidad de deformación, el espacio dónde se conectará la base de las placas así como también de recomendaciones que se han podido documentar en la literatura. La decisión final de la geometría de las placas deberá tomar en cuenta, además de lo que aquí se propone, el costo de fabricación, la existencia en el mercado del espesor de placa requerido así como también el costo de la mano de obra y el tiempo

que tomará habilitar los sistemas de disipación en cada entrepiso. Sin embargo, es importante mencionar que las fórmulas que aquí se proponen dan como resultado diferentes combinaciones de geometría y número de placas tales que se cumple con la rigidez, fuerza de fluencia, desplazamiento de fluencia y resistencia requeridas en el disipador y que cualquier combinación diferente dará lugar a un sistema de disipación del lado de la inseguridad o bien un sistema de disipación con una rigidez y resistencia mayores a las requeridas lo cual tampoco es conveniente debido a que disminuye la eficiencia del sistema de disipación.

2.2.1 Dispositivos tipo TADAS

Los dispositivos tipo TADAS están formados comúnmente por placas de geometría triangular cuya base se conecta rígidamente al entrepiso correspondiente mientras que el vértice del triángulo se conecta mediante una articulación al sistema de contraviento. Debido a su forma triangular la plastificación de la placa se produce mediante una curvatura simple distribuida uniformemente en toda la altura de la placa.

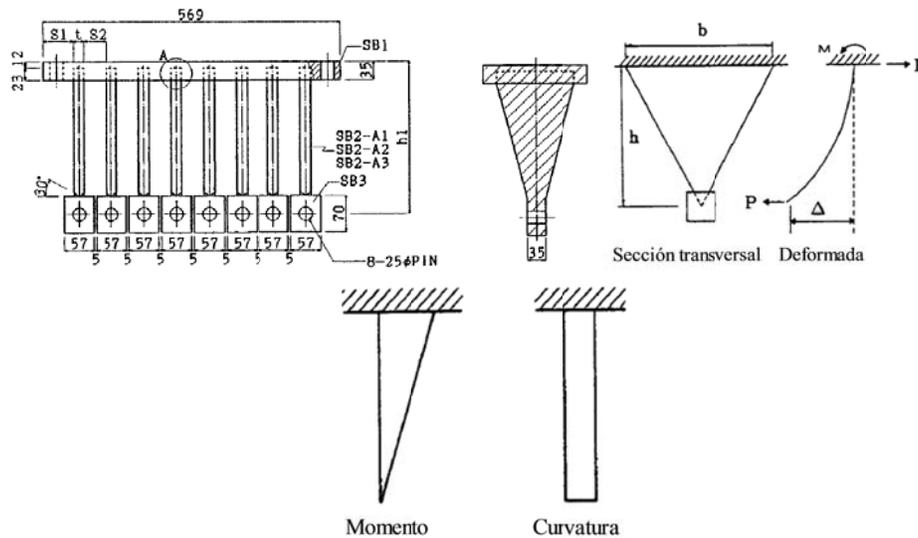


Figura 2.7. Configuración y comportamiento del disipador tipo TADAS (Tsai et al, 1993)

De acuerdo con Tsai et al (1989) la fuerza resistente de un sistema de placas triangulares se define de la siguiente manera:

$$F_u = \frac{f_y N b t^2}{4h} \quad (2.14)$$

donde f_y es el esfuerzo de fluencia del material, N es el número de placas y b , h y t son el ancho superior, la altura y el espesor de la placa, respectivamente. Se ha demostrado que un comportamiento eficiente del disipador se obtiene cuando la relación entre la altura y el ancho superior de la placa es del orden de 1.5 veces. Si se sustituye esta relación en la ecuación (2.14) se obtiene la siguiente expresión:

$$F_U = \frac{f_y N b t^2}{4(1.5b)} = \frac{f_y N t^2}{6} \quad (2.15)$$

despejando el espesor se tiene

$$t = \sqrt{\frac{6F_U}{f_y N}} \quad (2.16)$$

La expresión (2.16) indica que el espesor requerido en las placas del disipador depende únicamente de la fuerza resistente, del esfuerzo de fluencia del material y del número de placas.

Por otro lado, Tsai et al (1989) define también el desplazamiento de fluencia de una placa triangular de la siguiente manera

$$\Delta_y = \frac{f_y h^2}{Et} \quad (2.17)$$

donde E es el módulo de elasticidad del material. Despejando la altura de la placa se tiene

$$h = \sqrt{\frac{\Delta_y Et}{f_y}} \quad (2.18)$$

En este caso el desplazamiento de fluencia Δ_y corresponde al desplazamiento de fluencia, d_{yd} , calculado en la sección anterior y dado que el espesor se ha expresado como una función del número de placas, la altura de la placa resulta también una función que depende de este parámetro.

En la figura 2.8 se muestra el comportamiento típico de la variación del ancho superior, la altura y espesor en función del número de placas.

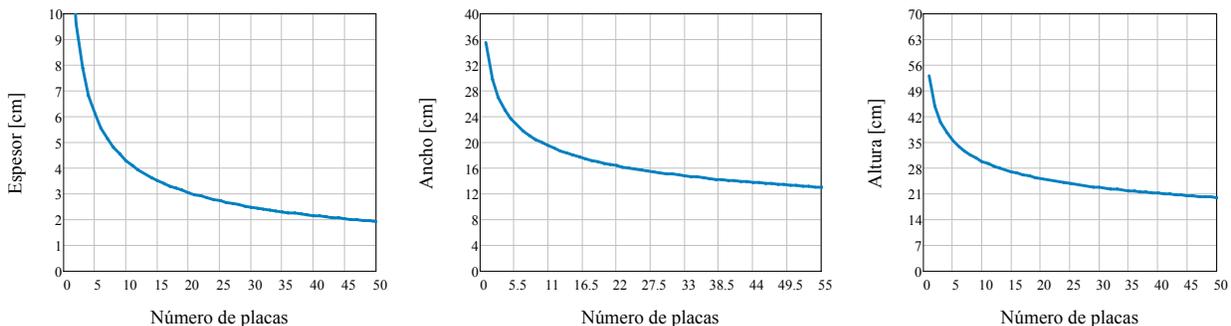


Figura 2.8. Combinaciones posibles para las dimensiones y números de placas

Como se mencionó, cada una de las combinaciones mostradas en las gráficas anteriores tiene la característica de que el disipador resultante cumple con las propiedades requeridas de rigidez, fuerza de fluencia y resistencia. Cualquier disipador fuera de estas combinaciones da como resultado un disipador del lado de la inseguridad o bien un dispositivo "sobrado".

2.2.2 Dispositivos tipo ADAS

Al igual que los dispositivos tipo TADAS, los dispositivos ADAS están formados por placas de acero con una forma similar a la de un reloj de arena (ver figura 2.9), a diferencia de los dispositivos anteriores, los extremos de las placas del disipador están conectados rígidamente tanto al entrepiso como al contraviento. Estos dispositivos trabajan básicamente a cortante, plastificándose casi en su totalidad en doble curvatura.

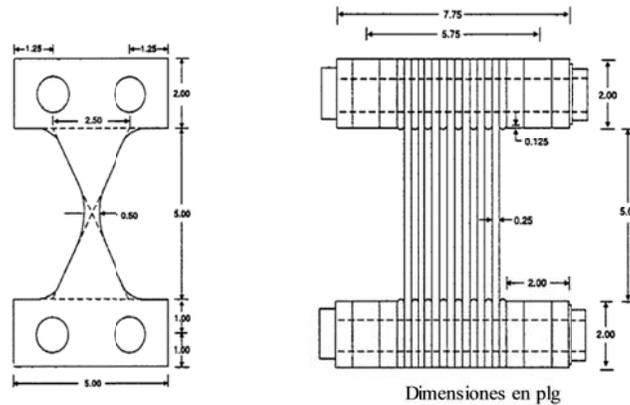


Figura 2.9. Configuración del disipador tipo ADAS (Whittaker et al, 1989)

Whittaker et al. (1989) definen la carga resistente del sistema de placas mediante la siguiente ecuación

$$F_U = \frac{f_y N b t^2}{2h} \quad (2.19)$$

Para este tipo de disipadores se recomienda tomar altura total del orden de dos veces el ancho de la placa de esta manera se tiene

$$F_U = \frac{f_y N b t^2}{4(2b)} = \frac{f_y N t^2}{8} \quad (2.20)$$

despejando el espesor se tiene

$$t = \sqrt{\frac{8F_U}{f_y N}} \quad (2.21)$$

Al igual que en el caso de los disipadores tipo TADAS, con la expresión anterior se define el espesor en función del número de placas.

En el caso de los disipadores tipo ADAS, el desplazamiento de fluencia de la placa se define de la siguiente manera

$$\Delta_y = \frac{3f_y h^2}{4Et} \quad (2.22)$$

Tal y como se hizo con los disipadores tipo TADAS, al despejar de la ecuación (2.22) la altura, esta queda en función del número de placas

$$h = \sqrt{\frac{4\Delta_y Et}{3f_y}} \quad (2.23)$$

En la figura 2.10 se muestra el comportamiento típico de la variación del ancho, la altura y espesor en función del número de placas. Se puede ver que la forma de las gráficas es similar a la que se obtuvo con los disipadores tipo TADAS. Así mismo, cada una de las combinaciones mostradas en las gráficas da como resultado un disipador con la rigidez, fuerza de fluencia y resistencia requeridas y cualquier combinación diferente dará como resultado un disipador del lado de la inseguridad o bien un dispositivo "sobrado".

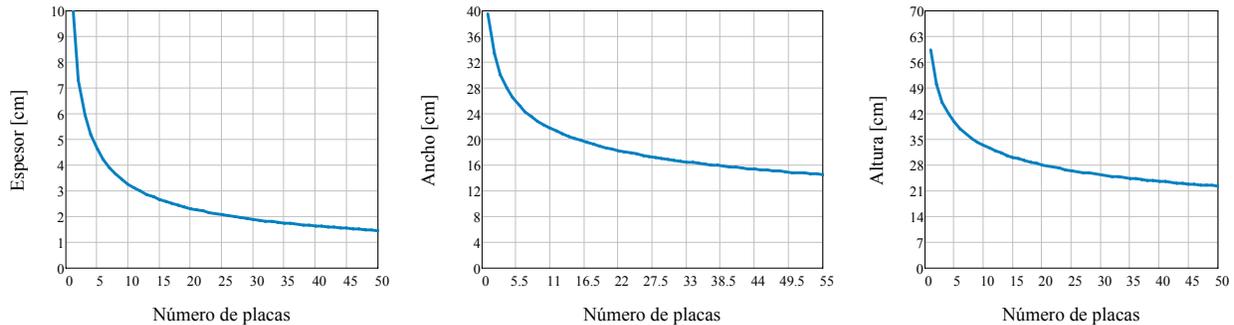


Figura 2.10. Combinaciones posibles para las dimensiones y números de placas

2.3 REDUCCIÓN DEL ESPECTRO DE DISEÑO CONSIDERANDO LA PRESENCIA DE DISIPADORES DE ENERGÍA HISTERÉTICOS

Una vez que se cuenta con los parámetros de diseño del sistema de disipación histerético, se puede evaluar el comportamiento de la estructura mediante un análisis modal espectral, a fin de conocer los elementos mecánicos de diseño que se desarrollarían en la estructura cuando se alcanza el desplazamiento objetivo. Esto es posible debido a que como se mencionó en las secciones anteriores, la metodología aquí planteada predice la configuración de la deformada final en la estructura cuando a ésta se le adicionan los disipadores, dicha configuración sigue el mismo patrón que la deformada de la estructura básica.

En este trabajo se proponen dos expresiones matemáticas (correspondientes a disipadores histeréticos y a disipadores viscosos) para estimar factores de reducción de los espectros de diseño que se especifican en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (2004) a fin de poder llevar a cabo el diseño de las estructuras habilitadas con disipadores mediante un análisis modal tradicional. En el anexo B de este trabajo se muestra la metodología empleada para el desarrollo de las reglas de reducción que aquí se proponen. Las expresiones matemáticas están en función del periodo del suelo, T_S , donde se desplanta la estructura en el

valle de México, del periodo fundamental de la estructura, T , así como de los parámetros de los diferentes sistemas de disipación estudiados.

El comportamiento tanto lineal como no lineal del sistema de disipación se puede caracterizar mediante su rigidez y resistencia, propiedades que se definen en este estudio a través de los parámetros α y γ . El parámetro α se define como la relación que existe entre la rigidez del disipador y la rigidez del sistema base:

$$\alpha_i = \frac{K_d^i}{K_B^i} \quad (2.24)$$

donde K_d^i es la rigidez del disipador y K_B^i es la rigidez del sistema básico para el i -ésimo entrepiso. El parámetro γ_i del i -ésimo entrepiso se define como la relación entre la fuerza de fluencia (F_{yd}^i) del disipador y la fuerza (F_T^i) que es capaz de resistir el sistema estructural-disipador.

$$\gamma_i = \frac{F_{yd}^i}{F_T^i} \quad (2.25)$$

En el capítulo 4 de este trabajo se explican en detalle las definiciones de estos parámetros.

Los parámetros que caracterizan de manera global al sistema de disipación en la estructura se pueden definir como el promedio de los parámetros α y γ , esto es

$$\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i ; \quad \gamma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_i \quad (2.26)$$

La ecuación para determinar el factor de reducción β_h para estructuras con disipadores histeréticos, se define de la siguiente manera

$$\beta_h = \begin{cases} 1 - \frac{T_o}{F_a T_a} \left(1 - e^{-(\gamma \alpha)^{\frac{1}{\lambda}}} \right) & ; \text{ si } T_o \leq F_a T_a \\ e^{-(\gamma \alpha)^{\frac{1}{\lambda}}} & ; \text{ si } F_a T_a < T_o < F_b T_b \\ 1 + \left(e^{-(\gamma \alpha)^{\frac{1}{\lambda}}} - 1 \right) \left(\frac{F_b T_b}{T} \right)^\psi & ; \text{ si } T_o > F_b T_b \end{cases} \quad (2.27)$$

donde el parámetro λ y F_b están dados por las siguientes expresiones:

$$\lambda = 0.47 T_s^2 - 2.3 T_s + 4.7 \quad (2.28)$$

$$F_b = \begin{cases} 2.5 & ; \text{ si } T_s < 1 \\ 1.0 & ; \text{ si } T_s \geq 1 \end{cases} \quad (2.29)$$

Los valores de los parámetros Ψ y F_a dependen de la zona en donde se localice el sistema estructura-disipador, como se indica en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Valores del parámetro Ψ y F_a

Zona	Ψ	F_a
A	0.7	2.0
B	0.3	1.5
C	0.7	1.2
D	0.7	1.2
E	1.5	1.2
F	2.0	1.5
G	1.6	1.5

La definición de las zonas (A-G) se presentan en el capítulo 4.

2.4 ELEMENTOS MECÁNICOS DE DISEÑO PARA ESTRUCTURAS CON DISIPADORES DE TIPO HISTERÉTICO

A los elementos mecánicos de las columnas obtenidos del análisis modal se deberán adicionar las acciones que generan las diagonales que sostienen al disipador como se muestra en la figura 2.11.

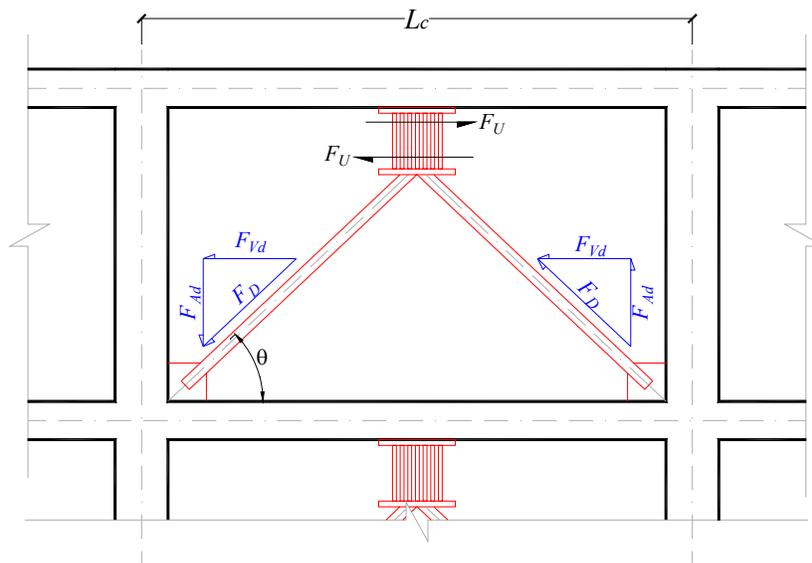


Figura 2.11. Transmisión de las fuerzas del disipador hacia las columnas.

Bajo estas condiciones una de las diagonales transmitirá fuerza de tensión a una columna mientras que la otra transmitirá fuerza de compresión, por lo que debe ponerse especial atención a la combinación que se esté analizando a fin de considerar el sentido correcto de las fuerzas en las columnas.

De acuerdo con la figura 2.11, la fuerza cortante adicional en cada columna tiene la magnitud

$$F_{vd} = \frac{1}{2} F_U \quad (2.30)$$

y la carga axial para la cual se deben revisar los elementos diagonales es

$$F_D = \frac{F_U}{2 \cos(\theta)} \quad (2.31)$$

donde θ es el ángulo de inclinación de la diagonal en el entrepiso correspondiente. La carga axial adicional en las columnas se puede calcular mediante

$$F_{Ad} = \frac{F_U \tan(\theta)}{2} \text{sgn}(F_D) \quad (2.32)$$

Donde el término $\text{sgn}(F_D)$ dependerá de la convención que se elija para la dirección de la fuerza (tensión o compresión).

En la figura 2.12 se muestra un esquema de la suma de las fuerzas propias del análisis modal y de las fuerzas que genera el sistema de disipación histerético.

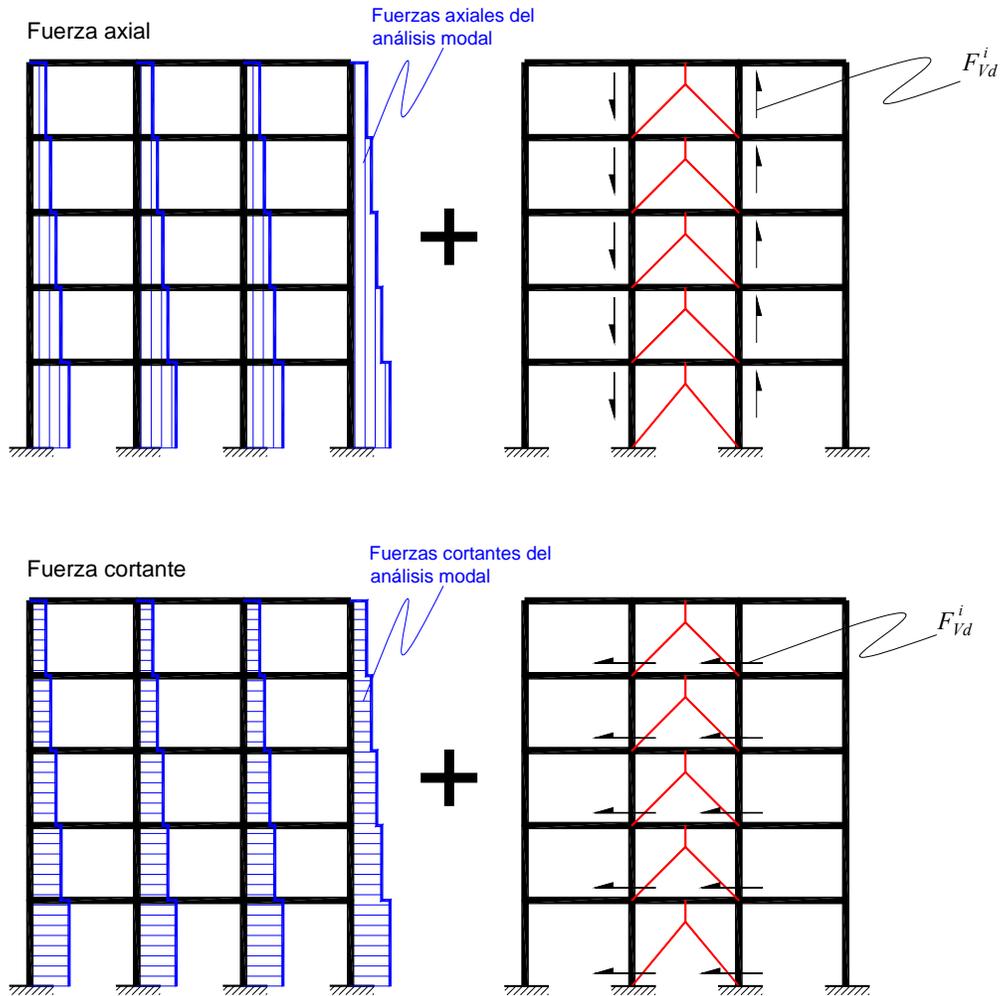


Figura 2.12. Fuerzas adicionales en las columnas de los marcos con los disipadores

Adicionalmente debe verificarse que tanto la trabe portante del disipador como el sistema de sujeción a ésta tengan la resistencia necesaria para transmitir efectivamente la fuerza horizontal entre una columna y otra.

2.4.1 Fuerzas en la cimentación

La fuerza cortante adicional en la cimentación de los marcos donde se colocan los disipadores se puede estimar como

$$V_d = \sum_{i=1}^n N_D^i F_U^i \quad (2.33)$$

Donde N_D es el número de disipadores del i -ésimo entrepiso.

Las fuerzas verticales adicionales que bajan a la cimentación será la suma de las fuerzas axiales adicionales multiplicadas por su signo correspondiente

$$F_d = \sum_{i=1}^n F_{Ad}^i \quad (2.34)$$

Así mismo las fuerzas de tensión y compresión en las columnas de los marcos con disipadores transmitirán un momento de volteo adicional al sistema de cimentación del marco, este momento de volteo adicional se puede cuantificar de manera conservadora como la suma de las fuerzas verticales F_{Ad} en un eje de columna multiplicado por la longitud del claro de la crujía; de esta manera el momento de volteo adicional en la cimentación se calcula como

$$M_d = \sum_{i=1}^n F_{Ad}^i L_C \quad (2.35)$$

Debe decirse que las ecuaciones mostradas en esta sección corresponden a un arreglo convencional de los disipadores histeréticos, en caso de que dicho arreglo sea diferente, el diseñador deberá evaluar la transmisión de las fuerzas en los disipadores de acuerdo con la geometría del arreglo que se proponga.

CAPÍTULO 3

MÉTODO DE DISEÑO PARA ESTRUCTURAS CON DISIPADORES DE ENERGÍA DE TIPO VISCOSO LINEAL

Los disipadores de energía viscosos se conocen también como amortiguadores viscosos (similares a los utilizados en la industria automotriz) y funcionan a partir del desplazamiento de un pistón a través de un fluido viscoso (ver figura 3.1). La fricción del pistón con el líquido genera fuerzas que se oponen al movimiento del elemento cuya magnitud es proporcional a la velocidad de reacción. El líquido que los disipadores contienen en su interior es un fluido viscoso que puede ser siliconas, aceites, etc. La metodología que se propone para este tipo de sistemas es muy similar al caso de sistemas con disipadores de tipo histerético.

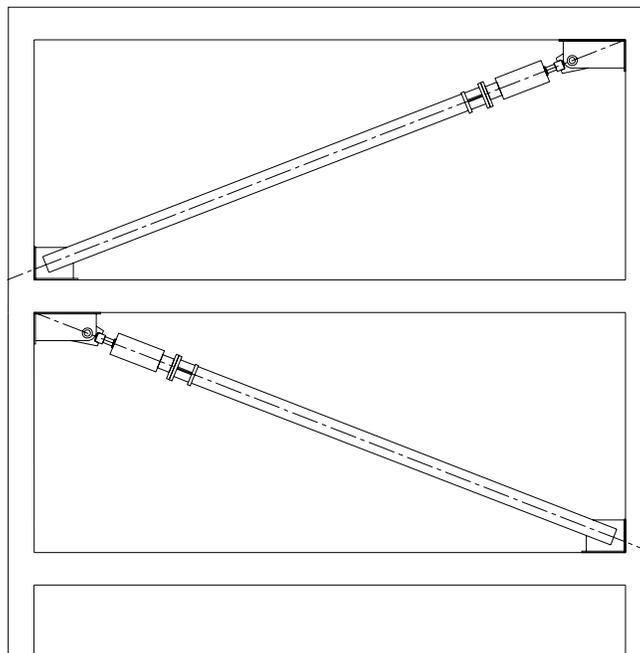


Figura 3.1. Arreglo convencional de los disipadores de tipo viscoso

3.1 PARÁMETROS DE DISEÑO DE LOS DISIPADORES VISCOSOS

Como primer paso, la estructura básica se debe caracterizar mediante un sistema de masas y resortes en el cual se colocan elementos ficticios que representan al sistema de disipación.

Por lo general los disipadores viscosos se colocan de manera diagonal conectando a dos entrepisos consecutivos, por lo cual los resortes ficticios se colocarán en la misma posición como se muestra en la figura 3.2.

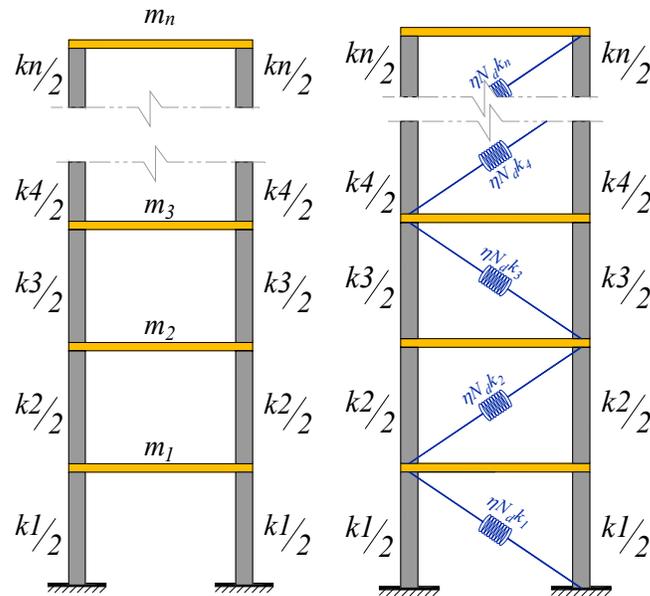


Figura 3.2. Modelo de la estructura equivalente para disipadores de tipo viscoso lineal

En este caso, la matriz de rigidez del sistema se construye considerando la participación de cada resorte elástico como se muestra en la figura 3.3.

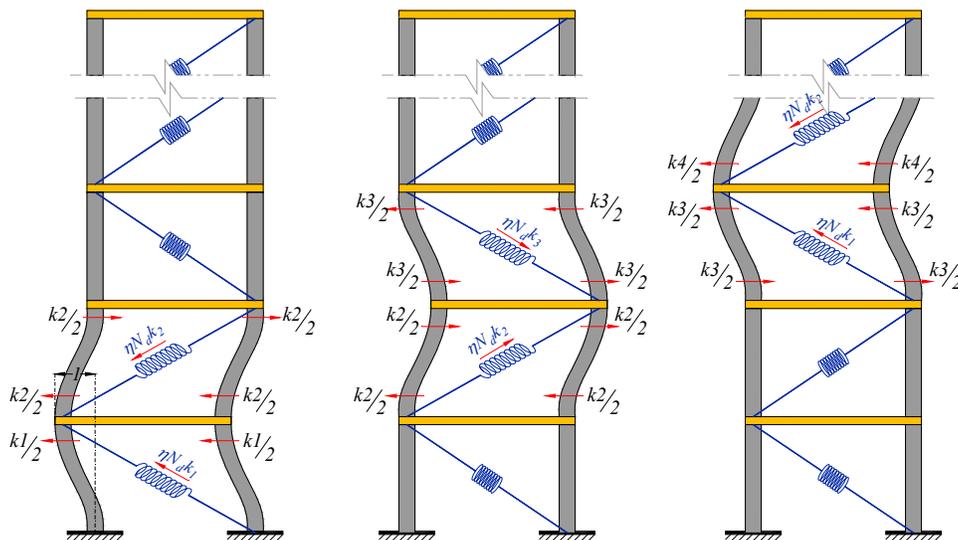


Figura 3.3. Construcción de la matriz de rigidez para estructuras con disipadores viscosos

La rigidez lateral de cada uno de los resortes elásticos ficticios se define mediante la siguiente expresión

$$K_r = \eta K_b^i \cos^2(\theta) \quad (3.1)$$

donde K_b^i es la rigidez convencional del entrepiso- i , θ es el ángulo de inclinación de la diagonal en el entrepiso correspondiente y η es un parámetro constante mediante el cual se regula el desplazamiento lateral de la estructura equivalente cuando se realiza el análisis modal espectral.

Una vez que se cuenta con las propiedades dinámicas de la estructura equivalente, se realiza un análisis modal con el espectro de diseño del sitio. En esta primera etapa de análisis no se hace ningún tipo de reducción al espectro de diseño y solamente se hace variar el valor del parámetro η hasta que la máxima distorsión de entrepiso sea igual a la distorsión objetivo que se haya establecido para la estructura.

La cantidad de energía que desarrolla cada resorte elástico ficticio cuando se deforma junto con la estructura se puede estimar mediante la siguiente ecuación:

$$E_d^i = \frac{1}{2} \eta K_b^i \cos^2(\theta) (dr_{\max}^i)^2 \quad (3.2)$$

donde dr_{\max}^i es el desplazamiento relativo máximo del entrepiso i . Al igual que con los disipadores de tipo histerético, la energía efectiva que debe disipar el amortiguador dependerá tanto de las características del movimiento sísmico como de su interacción con la estructura. En el caso de los disipadores viscosos lineales, la energía calculada con la expresión anterior debe corregirse mediante el siguiente factor:

$$F_{EH} = 0.75 [\psi_H]^{-1.43} \quad (3.3a)$$

$$\psi_V = \frac{C_{eq}}{C_o} \quad (3.3b)$$

En donde C_o y C_{eq} son la ordenada espectral correspondiente al periodo fundamental de la estructura básica y a la estructura equivalente, respectivamente. En el capítulo 5 se presenta la deducción de la ecuación (3.3a y 3.3b).

Una vez que se conoce la cantidad de energía efectiva que debe tomar el sistema de disipación, se pueden determinar sus propiedades de diseño a partir de establecer una equivalencia entre dicha cantidad de energía y el valor del área que encierra su lazo histerético que en el caso de disipadores viscosos corresponde a una forma elíptica.

Considérese por ejemplo el caso de un elemento puramente viscoso, sujeto a una historia de desplazamiento del tipo armónica con la siguiente forma

$$x(t) = X_o \sin(\omega t) \quad (3.4)$$

Donde X_o es la amplitud del desplazamiento la cual, en este caso, corresponde a la deformación axial máxima del elemento ficticio, ω es la frecuencia de la excitación, la cual se puede suponer igual a la frecuencia fundamental de la estructura básica debido a que el disipador estará sujeto a las condiciones dinámicas de este sistema, la frecuencia de la excitación se calcula mediante:

$$\omega = \frac{2\pi}{T_o} \quad (3.5)$$

donde T_o es el periodo fundamental de la estructura básica.

Por otro lado, la fuerza axial que se induce a un elemento con comportamiento puramente viscoso es proporcional a la velocidad, y tiene la siguiente forma

$$F(t) = C_L \dot{x}(t) \quad (3.6)$$

donde C_L es la constante de amortiguamiento viscoso lineal y $\dot{x}(t)$ la derivada del desplazamiento respecto al tiempo. Sustituyendo la ecuación (3.4) en (3.6) se obtiene:

$$F(t) = C_L \omega X_o \cos(\omega t) \quad (3.7)$$

considerando la siguiente identidad trigonométrica:

$$\cos(\omega t) = \pm \sqrt{1 - \sin^2(\omega t)} \quad (3.8)$$

sustituyendo (3.8) en (3.7):

$$F(t) = \pm C_L \omega \sqrt{X_o^2 - x^2(t)} \quad (3.9)$$

lo anterior es equivalente a escribir:

$$F(t) = \pm X_o C_L \omega \sqrt{1 - \left(\frac{x(t)}{X_o}\right)^2} \quad (3.10)$$

La ecuación (3.10) representa una elipse que describe el comportamiento del elemento viscoso lineal como el que se muestra en la figura 3.4.

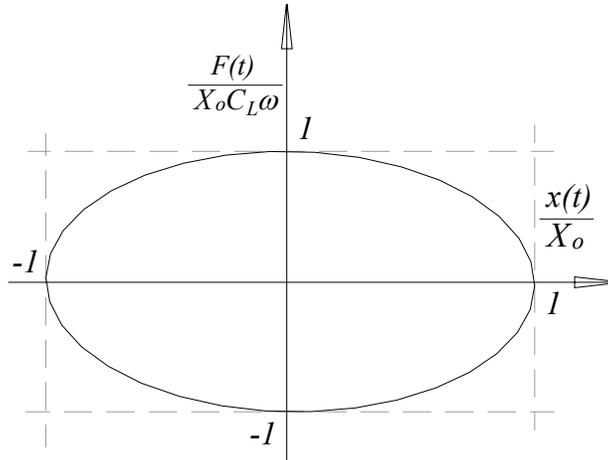


Figura 3.4. Comportamiento tipo de un elemento viscoso

Por otro lado, el área de una elipse es:

$$A = \pi a b \quad (3.11)$$

donde a y b son los semiejes de la elipse. En el caso de la elipse que describe el comportamiento viscoso estos semiejes a y b son, respectivamente, el desplazamiento máximo en los extremos del dispositivo y la fuerza máxima que se desarrolla en el disipador. En este estudio el desplazamiento máximo del disipador es conocido debido a que se obtiene del análisis modal de la estructura equivalente, mientras que la fuerza máxima demandada en el disipador se obtiene al sustituir $x(t)=0$ en la ecuación (3.10), es decir:

$$F_{max} = \pm X_o C_L \omega \quad (3.12)$$

Al igualar la mitad del área total que encierra la curva del lazo histerético del disipador con la cantidad de energía efectiva del disipador, se obtiene la siguiente ecuación:

$$A_v = \frac{1}{2} \pi C_L^i \omega (X_o^i)^2 = E_{ef_d}^i \quad (3.13)$$

Se puede ver que la única incógnita en la ecuación (3.13) es la constante de amortiguamiento C_L^i . De esta manera, la constante de amortiguamiento requerida en los disipadores para cada entrepiso se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$C_L^i = \frac{2E_{ef_d}^i}{\pi \omega (X_o^i)^2} \quad (3.14)$$

Y la velocidad de diseño del amortiguador se obtiene como

$$v_L^i = \frac{F_{max}}{C_L^i} \quad (3.15)$$

3.2 REDUCCIÓN DEL ESPECTRO DE DISEÑO PARA ESTRUCTURAS CON DISIPADORES DE TIPO VISCOSO

El amortiguamiento adicional que proporciona el sistema de disipación en la estructura se puede estimar mediante la siguiente expresión (Ramírez et al, 2001)

$$\zeta_D = \frac{W_D}{4\pi W_S} \quad (3.16)$$

La energía disipada por el sistema de amortiguadores se obtiene como la suma de las energías efectivas desarrolladas por los disipadores en cada entrepiso es decir:

$$W_D = N_D \sum_{i=1}^N E_D^i \quad (3.17)$$

donde N_D es el número de disipadores en cada entrepiso y N el número de niveles de la estructura.

La energía potencial disipada por el sistema estructural básico en cada ciclo de vibración armónica, se puede obtener mediante

$$W_S = \frac{K \Delta_{az}^2}{2} \quad (3.18)$$

Donde Δ_{az} es el desplazamiento lateral de azotea y K es la rigidez global o promedio de la estructura y se puede estimar de la siguiente manera

$$K = 4 \left(\frac{\pi}{T_o} \right)^2 \left(\frac{W_T}{g} \right) \quad (3.19)$$

Donde W_T es el peso total de la estructura y T_o corresponde al periodo fundamental de la estructura.

La ecuación para determinar el factor de reducción β_v para estructuras con disipadores viscosos, se define de la siguiente manera (su deducción se presenta en el capítulo 4 y en el Apéndice A).

$$\beta_v = \begin{cases} 1 - \left[1 - \frac{1}{F_a T_a} \left(\sqrt{\frac{0.05}{\zeta}} \right)^\lambda \right] T_o & ; \text{ si } T_o \leq F_a T_a \\ \left(\sqrt{\frac{0.05}{\zeta}} \right)^\lambda & ; \text{ si } F_a T_a < T_o \leq F_b T_b \\ 1 + \left[\left(\sqrt{\frac{0.05}{\zeta}} \right)^\lambda - 1 \right] \times \left(\frac{T_b}{T_o} \right)^\varepsilon & ; \text{ si } T_o > F_b T_b \end{cases} \quad (3.20)$$

donde T_o es el periodo estructural, ζ es el porcentaje de amortiguamiento crítico efectivo de la estructura ($\zeta_p + 5\%$) el cual, no se recomienda que sea mayor a 35% debido a que un valor del amortiguamiento más alto no disminuye sustancialmente la respuesta y aumenta el costo del diseño. (Ruiz Gómez S.E, 2011), T_b es el periodo donde termina la segunda rama (parte plana) del espectro de diseño, y λ , ε y F son parámetros que dependen del tipo de terreno. Los valores de los parámetros λ , ε y F se presentan en la tabla 3.1 (ver Apéndice A).

Tabla 3.1. Valores de los parámetros λ , ε , F_a y F_b

Zona	□	□	F_a	F_b
A	0.80	0.80	2.50	2.5
B	0.90	0.20	1.90	1.0
C	0.90	0.30	1.20	1.0
D	1.00	1.20	1.70	1.0
E	1.00	1.80	1.70	1.0
F	1.10	3.00	2.00	1.0
G	1.00	4.00	3.5	1.2

3.3 ELEMENTOS MECÁNICOS DE DISEÑO PARA ESTRUCTURAS CON DISIPADORES DE TIPO VISCOSO

A diferencia de lo que pasa con los disipadores de tipo histerético, los disipadores de tipo viscoso trabajan de manera desacoplada al comportamiento de la estructura: cuando la estructura alcanza su máximo desplazamiento durante un sismo, la fuerza en el disipador vale cero mientras que la fuerza en la estructura es máxima; de manera contraria, cuando la estructura pasa por su posición inicial, el disipador alcanza su fuerza máxima mientras que la fuerza en la estructura vale cero (ver figura 1.3 b). Para evaluar las acciones sobre los elementos estructurales de los marcos que contienen a los disipadores, se debe considerar la interacción entre la fuerza que desarrolla el disipador viscoso y la estructura en sí mediante la siguiente ecuación

$$F_{\max} = \sqrt{F_{\text{marco}}^2 + F_{\text{disipadores}}^2} \quad (3.21)$$

Así mismo, para garantizar un buen funcionamiento en el sistema de disipación la resistencia de cada uno de los nodos donde se conecta el disipador deberá ser igual o mayor que la fuerza máxima desarrollada en él, además debe garantizarse que la diagonal portante del dispositivo deberá permanecer elástica durante la transmisión de la fuerza para evitar problemas de pandeo durante el sismo.

CAPÍTULO 4

FACTORES DE REDUCCIÓN PARA ESPECTROS DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS CON DISIPADORES DE ENERGÍA

En este capítulo se muestra la deducción de las fórmulas (2.27) y (3.20) mediante las cuales es posible reducir los espectros de diseño para estructuras con disipadores, ya sea que se controle el desplazamiento mediante la adición de disipadores de tipo histerético o bien se incremente el porcentaje de amortiguamiento crítico a través de la adición de disipadores de energía de tipo viscoso lineal.

La propuesta se basa en el criterio de análisis incluido en el Anexo A de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, en donde se establece que el espectro de diseño se puede reducir mediante el parámetro adimensional β con el cual se pueden estimar los efectos de interacción Suelo-Estructura (Avilés y Pérez Rocha, 2004). En esta tesis, el factor de reducción involucra la modificación de la respuesta estructural a través de la adición de disipadores de tipo histerético o por el incremento del amortiguamiento a través de la adición de disipadores de energía de tipo viscoso lineal.

Los factores de reducción se propusieron a partir de un estudio de peligro sísmico en el Valle de México mediante el cual fue posible obtener cocientes espectrales entre Espectros de Peligro Uniforme (EPU) o Espectros de Tasa de Excedencia Uniforme (ETE) para sistemas con disipadores de energía correspondientes a una tasa anual de excedencia, $\nu = 0.008$.

En el caso de disipadores de tipo histerético el factor de reducción toma en cuenta diferentes combinaciones de dos parámetros: α y γ , el primero (α) representa la relación entre la rigidez del disipador y la rigidez de la estructura básica mientras que el segundo (γ) representa la relación entre las fuerzas de fluencia del disipador y de la estructura básica. Para disipadores histeréticos la ecuación para estimar el factor de reducción β_H es función del periodo estructural, de los valores de los parámetros α y γ así como del periodo fundamental del terreno en donde se ubica la estructura.

Para el caso de disipadores de tipo viscoso, se toman en cuenta diferentes valores de porcentaje de amortiguamiento crítico en las estructuras: 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 35%. La ecuación para estimar el factor de reducción β_v es función del periodo estructural, del porcentaje de amortiguamiento adicional y del periodo fundamental del terreno en donde se ubica la estructura.

4.1 ESTUDIO DE PELIGRO SÍSMICO EN EL VALLE DE MÉXICO

Como primera etapa se realizó un estudio de peligro sísmico en el valle de México con el objeto de obtener curvas de peligro sísmico en diferentes tipos de terreno toda vez que se conocían previamente las curvas de peligro sísmico para terreno firme en el valle de México (Alamilla, 1997). Se formó una base de datos con registros sísmicos reales registrados de manera simultánea en terreno firme y en distintas zonas del valle de México (ver figura 4.1). Se seleccionaron 134 movimientos sísmicos correspondientes a sismos de subducción con magnitudes (M) mayores que 6.9 y distancias epicentrales similares. Para cada registro se calculó el espectro de pseudo-aceleración determinando el periodo donde se presentaba el pico espectral, el cual puede asociarse al periodo de vibrar fundamental del terreno. En la tabla 4.1 se listan los acelerogramas que se utilizaron en el presente estudio.

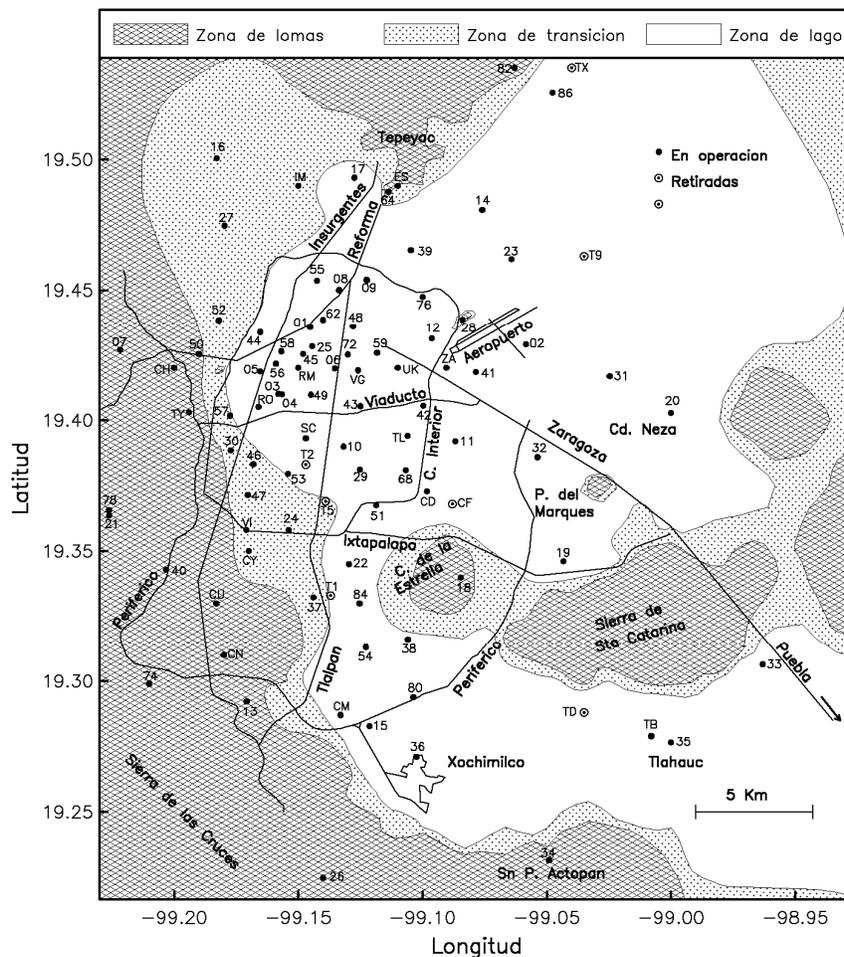


Figura 4.1. Red de acelerógrafos del valle de México. Base Mexicana de Sismos Fuertes (1999)

Tabla 4.1. Base de datos para encontrar funciones de transferencia

Nombre de la estación	Coordenadas de la estación		Institución encargada	Datos del sismo		
	Latitud (N)	Longitud (W)		Fecha	Registro	Magnitud
Iinst. Sísmica	19.33	99.183	IIUNAM	68-08-02	01i	7.1
Iinst. Sísmica	19.33	99.183	IIUNAM	79-03-14	03i	7.0
Sismex CU	19.326	99.182	IIUNAM	79-03-14	04i	7.0
Sismex hospital abc	19	99.205	IIUNAM	79-03-14	05i	7.0
Sismex CU	19.326	99.182	IIUNAM	81-10-25	06i	7.3
Iinst. Sísmica	19.33	99.183	IIUNAM	82-06-07	07i	6.9
Iinst. Sísmica	19.33	99.183	IIUNAM	85-09-19	08i	8.1
Ii patio	19.33	99.183	IIUNAM	85-09-19	09i	8.1
Mesa vibradora	19.33	99.183	IIUNAM	85-09-19	10i	8.1
Tacubaya	19.403	99.194	IIUNAM	85-09-19	11i	8.1
Ii patio	19.33	99.183	IIUNAM	85-09-21	12i	7.6
Mesa vibradora	19.33	99.183	IIUNAM	85-09-21	13i	7.6
Tacubaya	19.403	99.194	IIUNAM	85-09-21	14i	7.6
Iinst. Sísmica	19.33	99.183	IIUNAM	89-04-25	15i	6.9
Lab de desarrollo	19.33	99.183	IIUNAM	85-09-21	16i	6.9
F. Javier Barros Sierra	19.299	99.21	CIRES	85-09-21	17i	6.9
Mariscal tito	19.425	99.19	CIRES	85-09-21	18i	6.9
San Pedro Atocpan	19.202	99.049	CIRES	85-09-21	19i	6.9
Tacubaya	19.403	99.194	IIUNAM	85-09-21	20i	6.9
Tlalpan	19.292	99.171	Fundación ICA	85-09-21	21i	6.9
Est. # 14 Chapultepec	19.416	99.205	CENAPRED	95-09-14	22i	7.3
Colinas del Sur	19.366	99.226	CIRES(CIRES)	95-09-14	23i	7.3
ii patio 1	19.33	99.183	IIUNAM	95-09-14	24i	7.3
ii patio 4	19.33	99.183	IIUNAM	95-09-14	25i	7.3
F Javier Barros Sierra	19.299	99.21	CIRES	95-09-14	26i	7.3
San Pedro Atocpan	19.202	99.049	CIRES	95-09-14	27i	7.3
Campo libre	19.351	99.186	CIRES	95-09-14	28i	7.3
Tacubaya	19.403	99.194	IIUNAM	95-09-14	29i	7.3
Tlalpan	19.292	99.171	Fundación ICA	95-09-14	30i	7.3
Univ Iberoamericana	19.365	99.226	CIRES	95-09-14	31i	7.3
Sismex Viveros	19.358	99.171	IIUNAM	81-10-25	01ii	7.3
Sismex Viveros	19.358	99.171	IIUNAM	85-09-19	02ii	8.1
Angel Urraza	19.383	99.168	CIRES	89-04-25	03ii	6.9
Coyoacán	19.371	99.17	Fundación ICA	89-04-25	04ii	6.9
Deportivo Reynoso	19.501	99.183	CIRES	89-04-25	05ii	6.9
Xotepingo	19.332	99.144	Fundación ICA	89-04-25	06ii	6.9
Esparza Oteo	19.389	99.177	CIRES	89-04-25	07ii	6.9
Escandón	19.402	99.177	Fundación ICA	89-04-25	08ii	6.9
Granjas	19.475	99.18	Fundación ICA	89-04-25	09ii	6.9
Mariano Escobedo	19.438	99.182	CIRES	89-04-25	10ii	6.9
Alberca olímpica	19.359	99.154	CIRES	95-09-14	11ii	7.3
Angel Urraza	19.383	99.168	CIRES	95-09-14	12ii	7.3
Coyoacán	19.371	99.17	Fundación ICA	95-09-14	13ii	7.3
Est. # 6 Coyoacán	19.348	99.169	CENAPRED	95-09-14	14ii	7.3
Xotepingo	19.332	99.144	Fundación ICA	95-09-14	15ii	7.3
Escandón	19.402	99.177	Fundación ICA	95-09-14	16ii	7.3

Tabla 4.1 (Continuación). Base de datos para encontrar funciones de transferencia

Nombre de la estación	Coordenadas de la estación		Institución encargada	Datos del sismo		Magnitud
	Latitud (N)	Longitud (W)		Fecha	Registro	
Est. # 15 IMP	19.488	99.149	CENAPRED	95-09-14	17ii	7.3
Mariano Escobedo	19.438	99.182	CIRES	95-09-14	18ii	7.3
Alberca olímpica	19.359	99.154	CIRES	97-01-11	20ii	6.9
Ángel Urraza	19.383	99.168	CIRES	97-01-11	21ii	6.9
Deportivo Reynoso	19.501	99.183	CIRES	97-01-11	22ii	6.9
Xotepingo	19.332	99.144	Fundación ICA	97-01-11	23ii	6.9
Granjas	19.475	99.18	Fundación ICA	97-01-11	24ii	6.9
Est. # 15 IMP	19.488	99.149	CENAPRED	97-01-11	25ii	6.9
Mariano Escobedo	19.438	99.182	CIRES	97-01-11	26ii	6.9
Culhuacán	19.33	99.125	CIRES	89-04-25	01a	6.9
Roma	19.405	99.166	IIUNAM	89-04-25	02a	6.9
Jardines de Coyoacán	19.313	99.127	CIRES	89-04-25	04a	6.9
Lindavista	19.493	99.128	Fundación ICA	89-04-25	05a	6.9
Miramontes	19.283	99.125	Fundación ICA	89-04-25	06a	6.9
San Simón	19.375	99.148	Fundación ICA	89-04-25	07a	6.9
Culhuacán	19.33	99.125	CIRES	95-09-14	09a	7.3
Jardines de Coyoacán	19.313	99.127	CIRES	95-09-14	12a	7.3
Miramontes	19.283	99.125	Fundación ICA	95-09-14	13a	7.3
Culhuacán	19.33	99.125	CIRES	97-01 -11	14a	6.9
Roma	19.405	99.166	IIUNAM	97-01 -11	15a	6.9
Jardines de Coyoacán	19.313	99.127	CIRES	97-01 -11	16a	6.9
iiinst. sísmica	19.33	99.183	IIUNAM	68-08-02	01i	7.1
iiinst. sísmica	19.33	99.183	IIUNAM	79-03-14	03i	7.0
Sismex CU	19.326	99.182	IIUNAM	79-03-14	04i	7.0
Sismex Hospital ABC	19	99.205	IIUNAM	79-03-14	05i	7.0
Sismex CU	19.326	99.182	IIUNAM	81-10-25	06i	7.3
iiinst. sísmica	19.33	99.183	IIUNAM	82-06-07	07i	6.9
iiinst. sísmica	19.33	99.183	IIUNAM	85-09-19	08i	8.1
ii patio	19.33	99.183	IIUNAM	85-09-19	09i	8.1
Mesa vibradora	19.33	99.183	IIUNAM	85-09-19	10i	8.1
Tacubaya	19.403	99.194	IIUNAM	85-09-19	11i	8.1
ii patio	19.33	99.183	IIUNAM	85-09-21	12i	7.6
Mesa vibradora	19.33	99.183	IIUNAM	85-09-21	13i	7.6
Tacubaya	19.403	99.194	IIUNAM	85-09-21	14i	7.6
iiinst. sísmica	19.33	99.183	IIUNAM	89-04-25	15i	6.9
Lab. de desarrollo	19.33	99.183	IIUNAM	85-09-21	16i	6.9
F Javier Barros Sierra	19.299	99.21	CIRES	85-09-21	17i	6.9
Mariscal Tito	19.425	99.19	CIRES	85-09-21	18i	6.9
San Pedro Atocpan	19.202	99.049	CIRES	85-09-21	19i	6.9
Tacubaya	19.403	99.194	IIUNAM	85-09-21	20i	6.9
Tlalpan	19.292	99.171	Fundación ICA	85-09-21	21i	6.9
Est. # 14 Chapultepec	19.416	99.205	CENAPRED	95-09-14	22i	7.3
Colinas del Sur	19.366	99.226	CIRES	95-09-14	23i	7.3
ii patio 1	19.33	99.183	IIUNAM	95-09-14	24i	7.3
ii patio 4	19.33	99.183	IIUNAM	95-09-14	25i	7.3
F Javier Barros Sierra	19.299	99.21	CIRES	95-09-14	26i	7.3

Tabla 4.1 (Continuación). Base de datos para encontrar funciones de transferencia

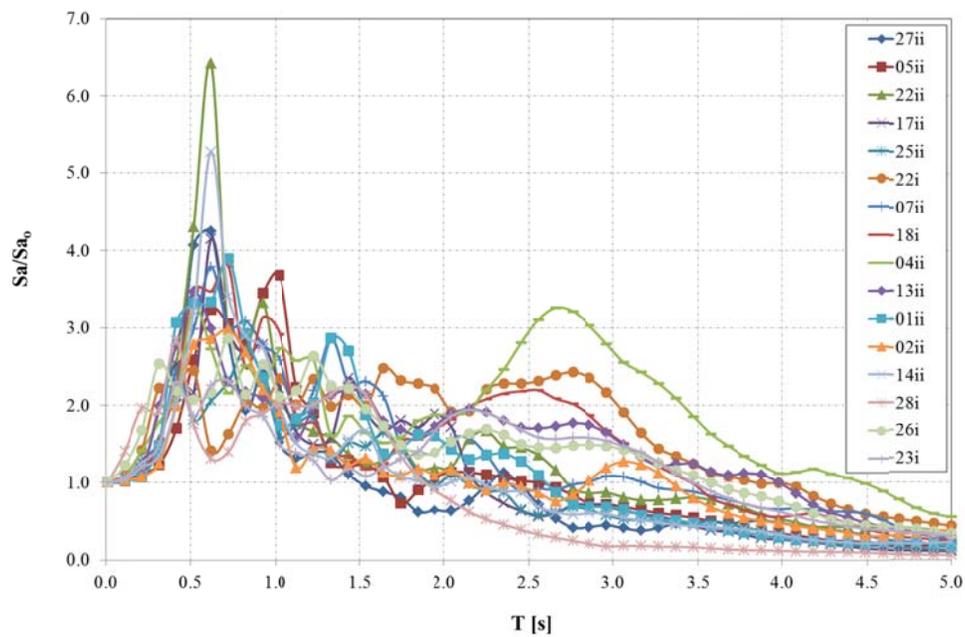
Nombre de la estación	Coordenadas de la estación		Institución encargada	Datos del sismo		
	Latitud (N)	Longitud (W)		Fecha	Registro	Magnitud
San Pedro Atocpan	19.202	99.049	CIRES	95-09-14	27i	7.3
Campo libre	19.351	99.186	CIRES	95-09-14	28i	7.3
Tacubaya	19.403	99.194	IIUNAM	95-09-14	29i	7.3
Tlalpan	19.292	99.171	Fundación ICA	95-09-14	30i	7.3
Univ Iberoamericana	19.365	99.226	CIRES	95-09-14	31i	7.3
Sismex Viveros	19.358	99.171	IIUNAM	81-10-25	01ii	7.3
Sismex Viveros	19.358	99.171	IIUNAM	85-09-19	02ii	8.1
Ángel Urraza	19.383	99.168	CIRES	89-04-25	03ii	6.9
Coyoacán	19.371	99.17	Fundación ICA	89-04-25	04ii	6.9
Deportivo Reynoso	19.501	99.183	CIRES	89-04-25	05ii	6.9
Xotepingo	19.332	99.144	Fundación ICA	89-04-25	06ii	6.9
Esparza Oteo	19.389	99.177	CIRES	89-04-25	07ii	6.9
Escandón	19.402	99.177	Fundación ICA	89-04-25	08ii	6.9
Granjas	19.475	99.18	Fundación ICA	89-04-25	09ii	6.9
Mariano Escobedo	19.438	99.182	CIRES	89-04-25	10ii	6.9
Alberca olímpica	19.359	99.154	CIRES	95-09-14	11ii	7.3
Ángel Urraza	19.383	99.168	CIRES	95-09-14	12ii	7.3
Coyoacán	19.371	99.17	Fundación ICA	95-09-14	13ii	7.3
Est. # 6 Coyoacán	19.348	99.169	CENAPRED	95-09-14	14ii	7.3
Xotepingo	19.332	99.144	Fundación ICA	95-09-14	15ii	7.3
Escandón	19.402	99.177	Fundación ICA	95-09-14	16ii	7.3
Est. # 15 IMP	19.488	99.149	CENAPRED	95-09-14	17ii	7.3
Mariano Escobedo	19.438	99.182	CIRES	95-09-14	18ii	7.3
Alberca olímpica	19.359	99.154	CIRES	97-01-11	20ii	6.9
Ángel Urraza	19.383	99.168	CIRES	97-01-11	21ii	6.9
Deportivo Reynoso	19.501	99.183	CIRES	97-01-11	22ii	6.9
Xotepingo	19.332	99.144	Fundación ICA	97-01-11	23ii	6.9
Granjas	19.475	99.18	Fundación ICA	97-01-11	24ii	6.9
Est. # 15 IMP	19.488	99.149	CENAPRED	97-01-11	25ii	6.9
Mariano Escobedo	19.438	99.182	CIRES	97-01-11	26ii	6.9
Culhuacán	19.33	99.125	CIRES	89-04-25	01a	6.9
Roma	19.405	99.166	IIUNAM	89-04-25	02a	6.9
Jardines de Coyoacán	19.313	99.127	CIRES	89-04-25	04a	6.9
Lindavista	19.493	99.128	Fundación ICA	89-04-25	05a	6.9
Miramontes	19.283	99.125	Fundación ICA	89-04-25	06a	6.9
San Simón	19.375	99.148	Fundación ICA	89-04-25	07a	6.9
Culhuacán	19.33	99.125	CIRES	95-09-14	09a	7.3
Jardines de Coyoacán	19.313	99.127	CIRES	95-09-14	12a	7.3
Miramontes	19.283	99.125	Fundación ICA	95-09-14	13a	7.3
Culhuacán	19.33	99.125	CIRES	97-01 -11	14a	6.9
Roma	19.405	99.166	IIUNAM	97-01 -11	15a	6.9
Jardines de Coyoacán	19.313	99.127	CIRES	97-01 -11	16a	6.9

Los movimientos sísmicos se clasificaron en siete zonas dentro del valle de México, según el periodo donde se presentó la pseudoaceleración espectral máxima y la ubicación de la estación sísmica dentro de la red acelerométrica del valle. La tabla 4.2 lista las zonas (A-G) y sus correspondientes intervalos de periodos dominantes del suelo (T_S).

Tabla 4.2. Definición de las zonas del valle de México

Zona	Periodo, T_S [s]
A	$T_S < 0.5$
B	$0.5 < T_S \leq 1.0$
C	$1.0 < T_S \leq 1.5$
D	$1.5 < T_S \leq 2.0$
E	$2.0 < T_S \leq 2.5$
F	$2.5 < T_S \leq 3.0$
G	$3.0 < T_S \leq 4.0$

En las figuras 4.2 a 4.8 se muestran los espectros de respuesta para 5 % del amortiguamiento crítico normalizados con respecto a la aceleración máxima del terreno (S_a/S_{a0}), correspondientes a cada zona.

**Figura 4.2. Espectros de respuesta normalizados. Zona A**

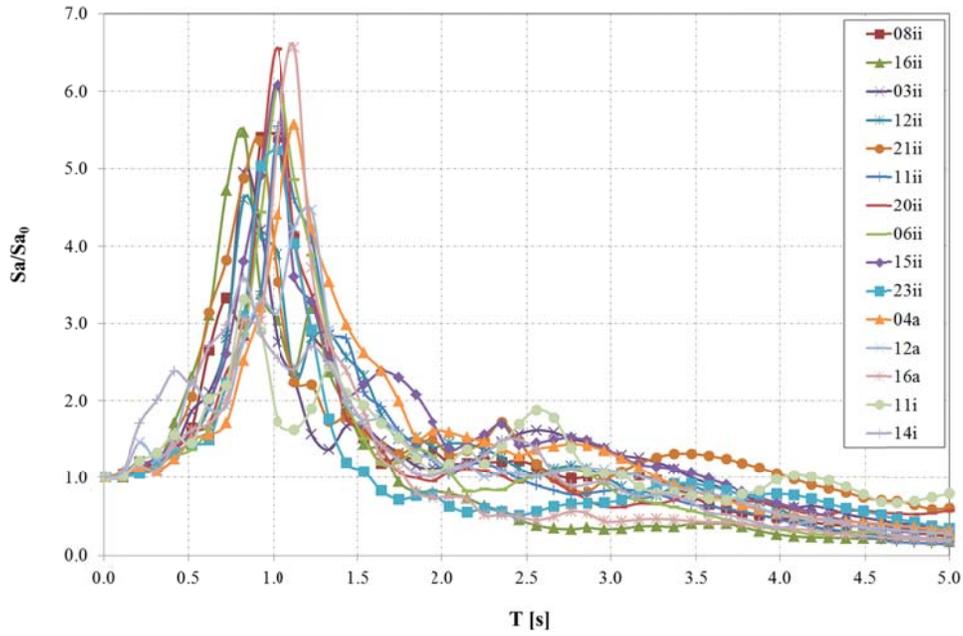


Figura 4.3. Espectros de respuesta normalizados. Zona B

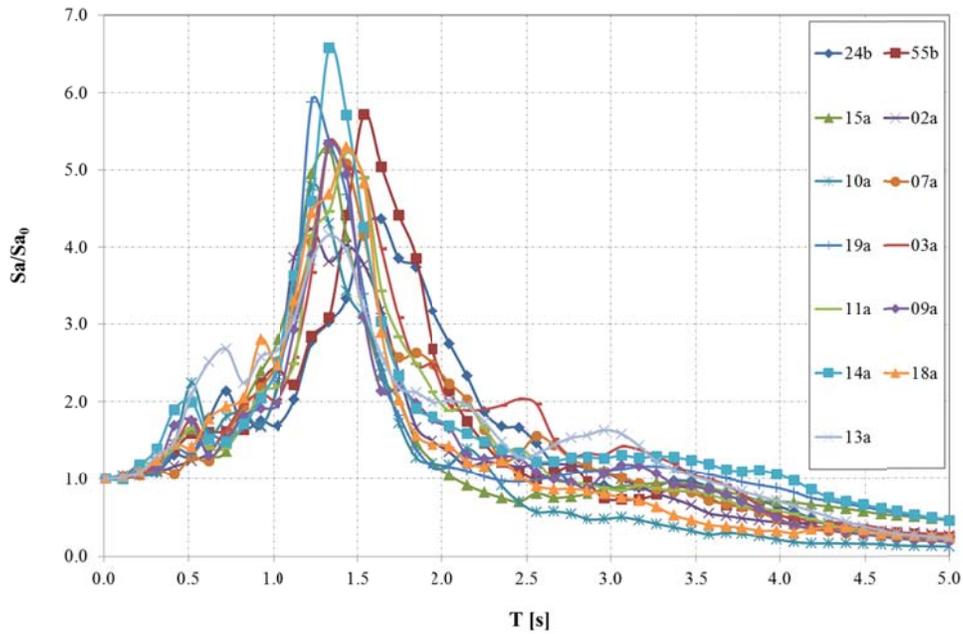


Figura 4.4. Espectros de respuesta normalizados. Zona C

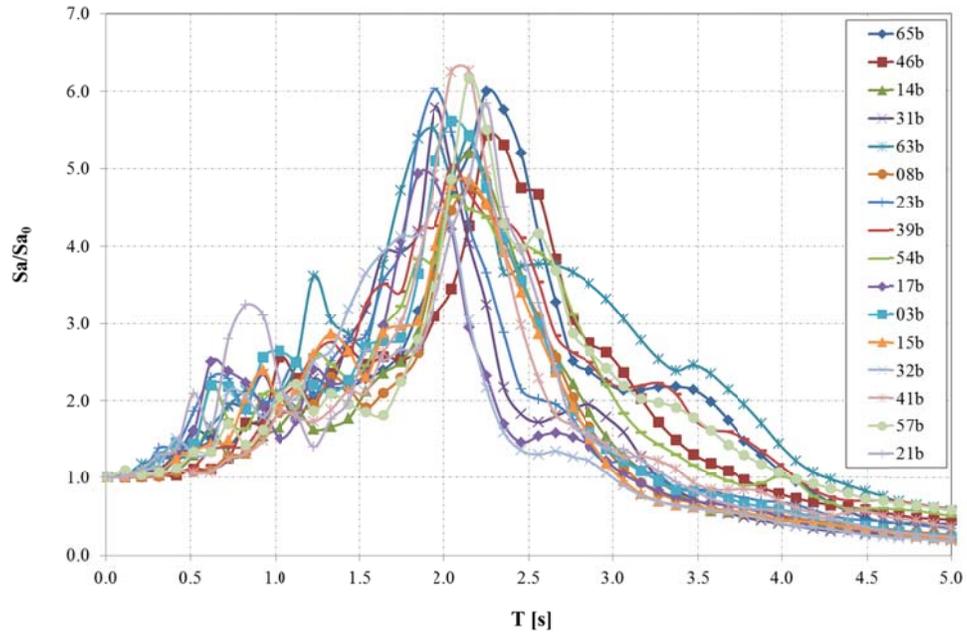


Figura 4.5. Espectros de respuesta normalizados. Zona D

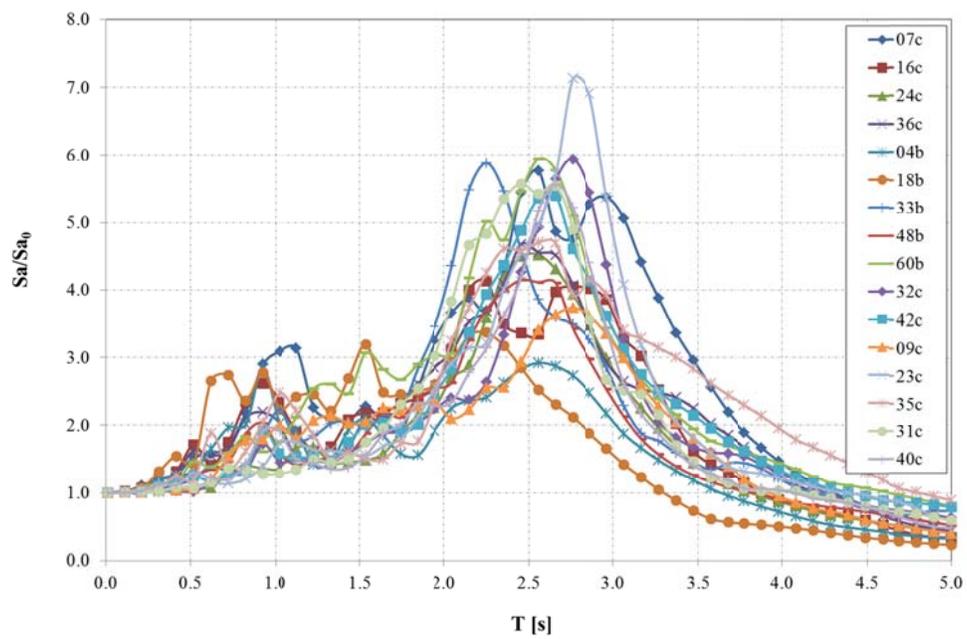


Figura 4.6. Espectros de respuesta normalizados. Zona E

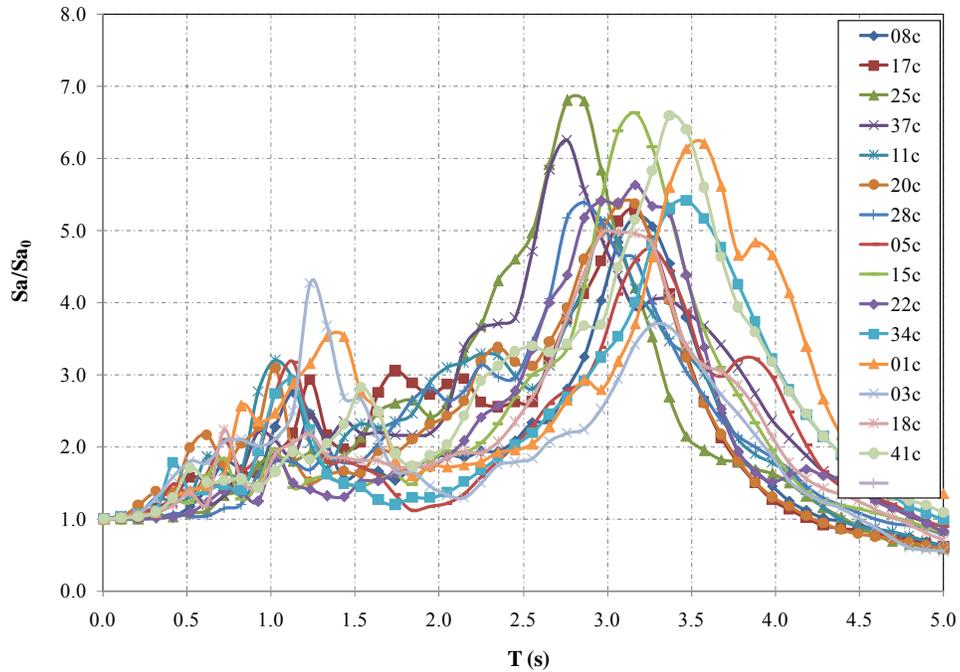


Figura 4.7. Espectros de respuesta normalizados. Zona F

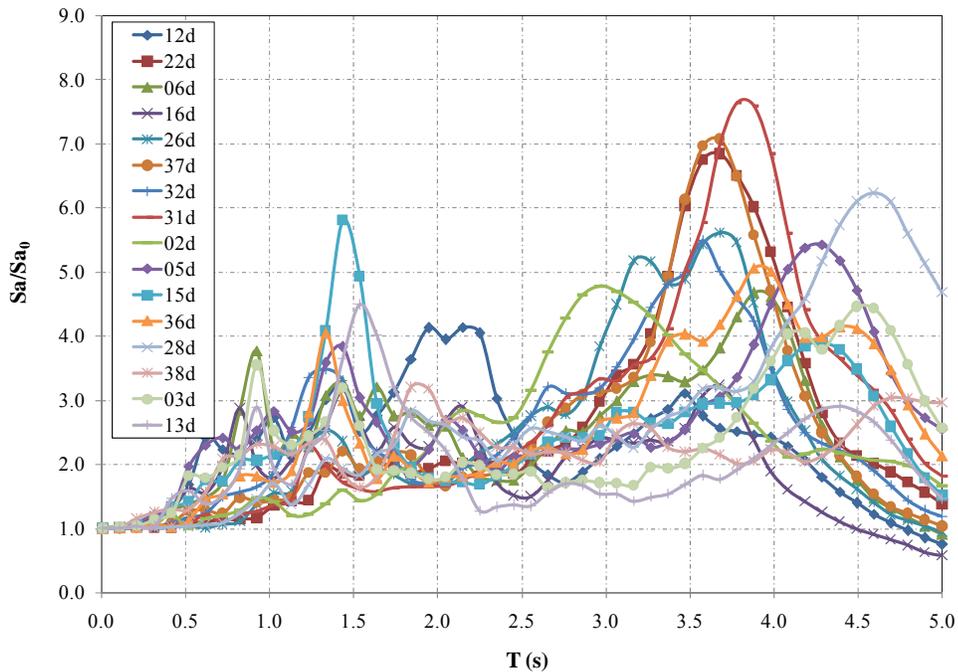


Figura 4.8. Espectros de respuesta normalizados. Zona G

Para el cálculo de curvas de peligro sísmico se empleó la formulación planteada por Esteva (1968) en donde a partir de las curvas de peligro sísmico conocidas de un sitio en particular es posible determinar las curvas de peligro para otro lugar, si se cuenta con registros sísmicos

obtenidos simultáneamente en ambos sitios, esto es posible a través de parámetros estadísticos de los cocientes espectrales entre ambos sitios, mediante la expresión:

$$v_Y(y) = \int_0^{\infty} v_X\left(\frac{y}{z}\right) f_Z(z) dz = E_Z\left(v_X\left(\frac{y}{z}\right)\right) \quad (4.1)$$

donde

X intensidad en el sitio correspondiente a la curva de peligro sísmico conocida

Y intensidad en el sitio de interés; y es un valor específico que puede adoptar dicha intensidad

Z relación aleatoria Y/X; z es un valor específico que puede adoptar dicha relación

$E_Z[\cdot]$ valor esperado con respecto a la variable aleatoria Z.

La ecuación 4.1 es útil para calcular las curvas de peligro sísmico en un sitio destino a partir de la información disponible en el sitio origen. Para ello se debe contar con acelerogramas que hayan sido obtenidos en ambos sitios durante el mismo evento sísmico, de esta manera se puede obtener una función de transferencia empírica mediante el cociente de los espectros de respuesta de cada evento sísmico. También se debe conocer la curva de peligro sísmico correspondiente al sitio origen y al periodo estructural para el cual se esté buscando calcular las tasas de excedencia. Esto quiere decir que para poder construir el espectro de peligro uniforme correspondiente a una zona, se debe contar con tantas curvas de peligro como periodos se desean. En el presente estudio se utilizaron como referencia los movimientos sísmicos registrados en la estación Ciudad Universitaria (CU), debido a que este sitio se encuentra instrumentado desde hace varias décadas.

Una de las desventajas que hubo al inicio de este estudio fue que solamente se contaba con un número limitado (cinco periodos estructurales en promedio) de curvas de peligro sísmico (Alamilla, 1997) así como la falta de información para poder calcular curvas a partir de leyes de atenuación adecuadas; por lo que aquí se propuso usar una variante de la ecuación 4.1, la cual consiste en calcular a partir de una curva de periodo T la curva de peligro para un periodo $T+\Delta T$, donde ΔT es un incremento pequeño del periodo. Esto se hace para el mismo sitio, con lo cual se puede decir que se calculan curvas de peligro periodo a periodo en el mismo sitio. Siguiendo esta metodología se pudieron estimar las curvas de peligro para un intervalo de periodos entre cero y ocho segundos, con un incremento del periodo estructural $\Delta T=0.2$ s. En la figura 4.9 se muestran las curvas de peligro sísmico entre 0 y 5s, con intervalos $\Delta T = 0.4$ s correspondientes a la estación CU, calculadas periodo a periodo

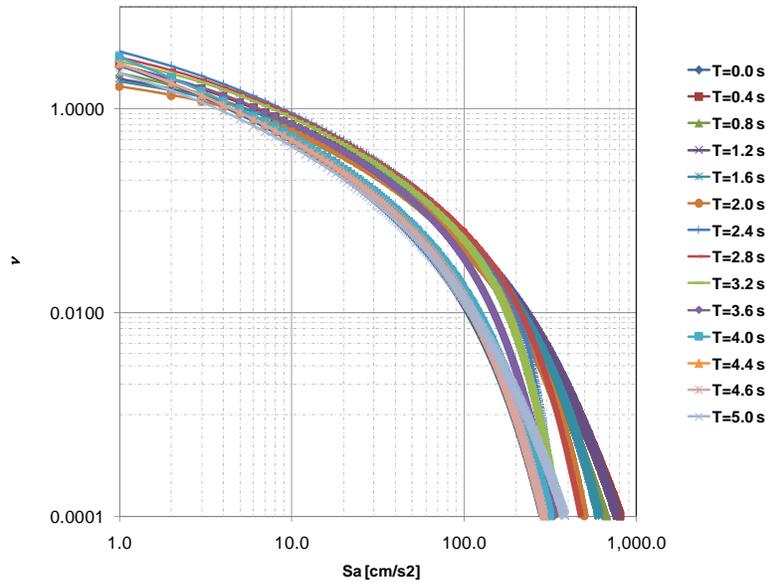


Figura 4.9. Curvas de peligro sísmico correspondientes a la estación CU, calculadas periodo a periodo

Las curvas de peligro sísmico correspondientes a las distintas zonas se calcularon a partir de la relación entre los espectros de respuesta de acelerogramas obtenidos en cada zona y los espectros de respuesta de los registros obtenidos en la estación Ciudad Universitaria (CU) que se localiza en terreno duro del valle de México.

Para tomar en cuenta la presencia de los disipadores de energía en las estructuras, la ecuación (4.1) se aplicó para calcular las curvas de peligro sísmico en cada una de las zonas en que se dividió el valle de México asociadas a sistemas con disipadores histeréticos con múltiples combinaciones de valores de α y γ , y por otro lado para porcentajes de amortiguamiento crítico de 10, 15, 20, 25, 30 y 35% para el caso de sistemas con disipadores de tipo viscoso lineal. A partir de las curvas de peligro calculadas en cada zona fue posible obtener Espectros de Peligro Uniforme (EPU) correspondientes a una tasa de excedencia prefijada $v=0.008$, este valor de tasa de excedencia corresponde a un periodo de retorno de 125 años.

4.2 EXPRESIÓN DEL FACTOR DE REDUCCIÓN PARA SISTEMAS CON DISIPADORES DE TIPO HISTERÉTICO

4.2.1 Caracterización de los sistemas con disipadores de tipo histerético y Espectros de Peligro Uniforme

La ecuación general de movimiento para un sistema de un grado de libertad puede expresarse como sigue (Baber y Wen, 1981):

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + K\Gamma_2 x + (1 - \Gamma_2)Kz = -M\alpha(t) \quad (4.2)$$

donde M es la masa, C es el coeficiente de amortiguamiento, K es la rigidez del sistema, $a(t)$ la aceleración en la base del sistema, x , \dot{x} y \ddot{x} son el desplazamiento, la velocidad y la aceleración de la masa respectivamente. El término Γ_2 representa la relación entre la rigidez de postfluencia y la rigidez inicial del sistema, z es la componente histerética, la cual se modela mediante una ecuación diferencial de primer orden, como se indica más adelante.

Para el caso de sistemas con disipadores de energía y comportamiento inelástico, la ecuación de movimiento resulta como sigue:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + K_c\Gamma_{2c}x + (1-\Gamma_{2c})K_c z_c + K_d\Gamma_{2d}\dot{x} + (1-\Gamma_{2d})K_d z_d = -Ma(t) \quad (4.3)$$

Los términos $K\Gamma_2 x$ y $(1-\Gamma_2)Kz$ representan la fuerza restauradora: el primer término depende del desplazamiento, x , mientras que el segundo de su componente histerética, z . Nótese que para un sistema con disipadores de energía, la fuerza restauradora está formada por la fuerza restauradora del sistema convencional (términos con subíndice c) más la de los disipadores (términos con subíndice d).

En este trabajo se supone que el sistema base presenta comportamiento elástico lineal, por lo que los términos correspondientes a la fuerza restauradora inelástica en el sistema convencional desaparecen, y solo se admite comportamiento inelástico en el disipador, por lo que la ecuación se transforma en:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + K_c x + K_d\Gamma_{2d}\dot{x} + (1-\Gamma_{2d})K_d z_d = -Ma(t) \quad (4.4)$$

La ecuación 4.4 se puede expresar mediante el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales (Rivera y Ruiz, 2007):

$$\ddot{x} = -2\omega_0 \dot{x} - \left(\frac{K_c}{M}\right)x - \Gamma_{2d} \left(\frac{K_d}{M}\right)\dot{x} - (1-\Gamma_{2d}) \left(\frac{K_d}{M}\right)z_d - a(t) \quad (4.5)$$

$$\dot{z}_d = \frac{\Gamma_{3d}\dot{x} - \nu_d \left(\Gamma_{4d} z_d |\dot{x}| |z_d|^{\Gamma_{6d}-1} + \Gamma_{5d} \dot{x} |z_d|^{\Gamma_{6d}} \right)}{\eta_d} \quad (4.6)$$

donde Γ_3 , Γ_4 , Γ_5 y Γ_6 son parámetros del modelo que controlan la amplitud, forma del ciclo histerético, y la suavidad de la transición entre el intervalo elástico e inelástico; η y ν son parámetros que controlan el deterioro de la rigidez y de la resistencia, respectivamente (en el presente estudio no se considera la degradación de la rigidez ni de la resistencia). Al resolver el sistema de ecuaciones diferenciales para un acelerograma en particular, se obtiene la historia en el tiempo de los desplazamientos, velocidades y aceleraciones del sistema.

Para el análisis de estructuras con disipadores de tipo histerético se debe caracterizar el comportamiento tanto lineal de la estructura como no lineal de los disipadores. Esto se realiza aquí mediante dos propiedades: rigidez y resistencia, propiedades que se definen en este estudio a través de los parámetros α y γ .

El parámetro α se define como la relación que existe entre la rigidez del disipador y la rigidez del sistema base:

$$\alpha = \frac{K_d}{K_b} \quad (4.7)$$

donde K_d es la rigidez del disipador y K_b es la rigidez del sistema básico.

El parámetro γ se define como la relación entre la fuerza de fluencia (F_{yd}) del disipador y la fuerza (F_T) que es capaz de resistir el sistema estructura-disipador.



(4.8)

El sistema estructura-disipador se modela a través de un sistema de un grado de libertad con fracción del amortiguamiento crítico $\xi = 5\%$ más un elemento disipador, como se ilustra en las figuras 4.10 y 4.11.

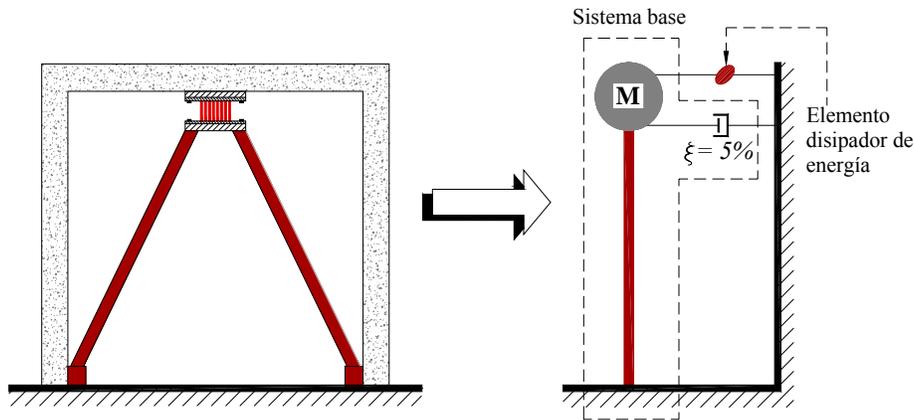


Figura 4.10. Modelo de un sistema estructura-disipador

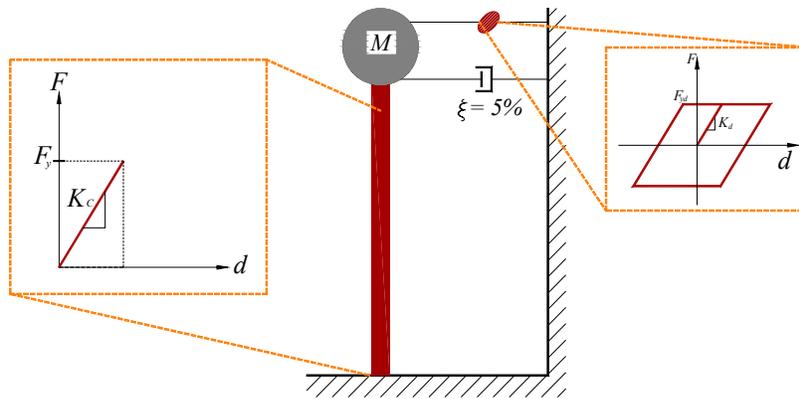


Figura 4.11. Comportamiento de las partes que constituyen al sistema estructura-disipador

En este estudio se considera que el sistema básico trabaja dentro del intervalo elástico lineal, mientras que el disipador presenta comportamiento elastoplástico

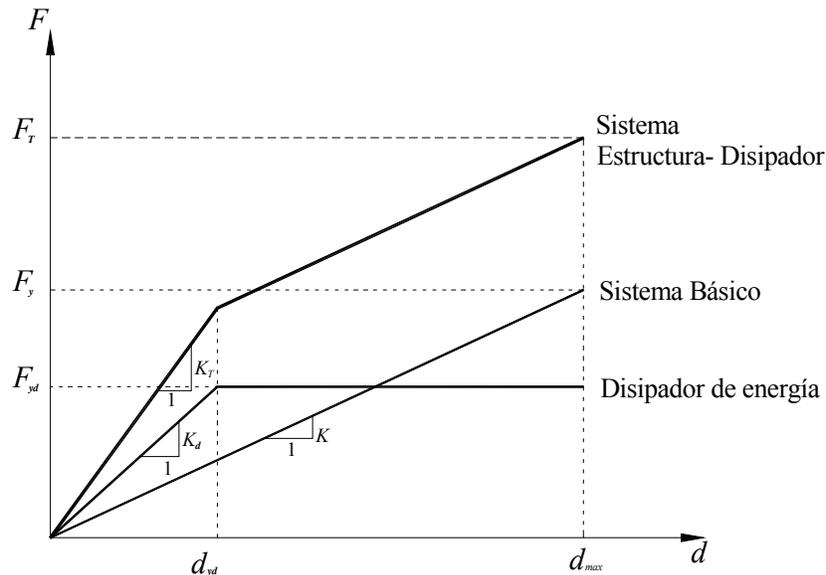


Figura 4.12. Relaciones fuerza-desplazamiento de las partes que constituyen al sistema estructura-disipador

En la fig 4.12 se muestra el comportamiento de manera simplificada de un sistema estructura-disipador ante carga monótonicamente creciente. Las curvas corresponden al sistema básico y al elemento disipador de energía. El sistema básico presenta un comportamiento lineal elástico, mientras que el disipador muestra comportamiento elastoplástico. La suma de las ordenadas de las curvas correspondientes al sistema básico y al disipador da lugar al comportamiento bi-lineal del sistema estructura-disipador.

Para caracterizar a los diferentes sistemas estructurales se proponen los valores del periodo de vibración fundamental y se determina la rigidez nominal del sistema base para un valor de masa unitaria mediante la expresión:

$$K_c = \frac{4\pi^2 M}{T^2} \quad (4.9)$$

Una vez que se cuenta con los valores de la rigidez convencional y con el valor de α correspondiente, se obtiene el valor de la rigidez del sistema combinado y del disipador, esto es:

$$K_T = K_c (1 + \alpha) \quad (4.10)$$

$$K_d = \alpha K_c \quad (4.11)$$

donde K_T y K_d son la rigidez del sistema combinado y del disipador respectivamente.

La fuerza de fluencia permisible de la estructura básica se obtiene mediante:

$$F_{yc} = C_y W \tag{4.12}$$

donde C_y es el coeficiente sísmico correspondiente a la estructura.

Finalmente, la fuerza total del sistema combinado se calcula mediante:

$$F_T = F_{yc} (1 + \gamma) \tag{4.13}$$

Una vez que se tienen los parámetros anteriores, los sistemas estructurales se someten a los movimientos sísmicos de la base de datos formada anteriormente y aplicando la ecuación 4.5 y 4.6 se calculan las curvas de peligro sísmico a partir de la relación de cocientes de ordenadas espectrales entre un sistema convencional (amortiguamiento del 5% y parámetros nulos del disipador) y sistemas con diferentes valores para los parámetros α y γ .

En las figs. 4.13 a 4.18 se muestran, como ejemplo, curvas de peligro sísmico calculadas en este estudio para las zonas A, D y G del valle de México, respectivamente. Para cada zona se presentan curvas correspondientes a las parejas de valores a) $\alpha=0.5$ con $\gamma=0.3$ y b) $\alpha=0.5$ con $\gamma=5$.

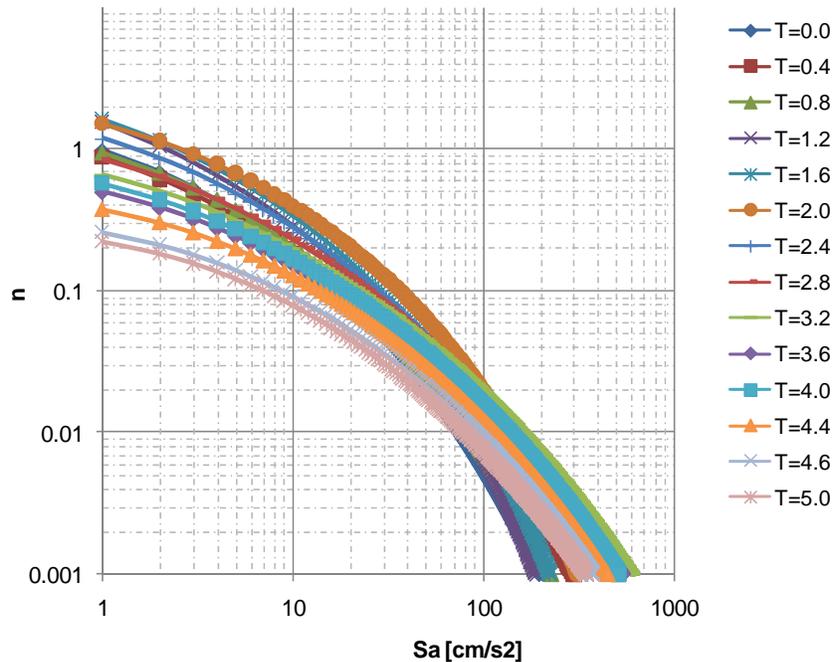


Figura 4.13. Curvas de peligro para la zona A. $\gamma = 0.3$ y $\alpha = 5$

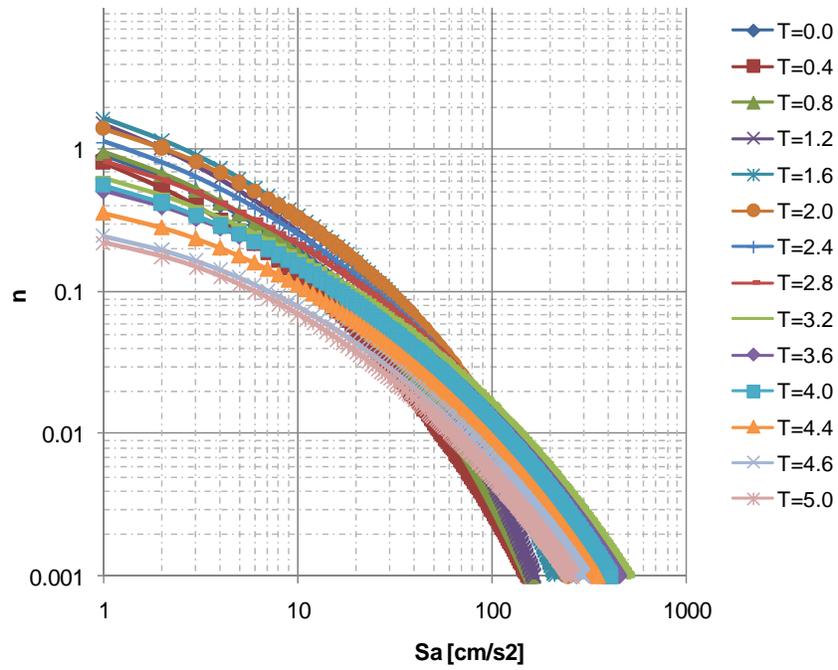


Figura 4.14. Curvas de peligro para la zona A. $\gamma = 0.5$ y $\alpha = 5$

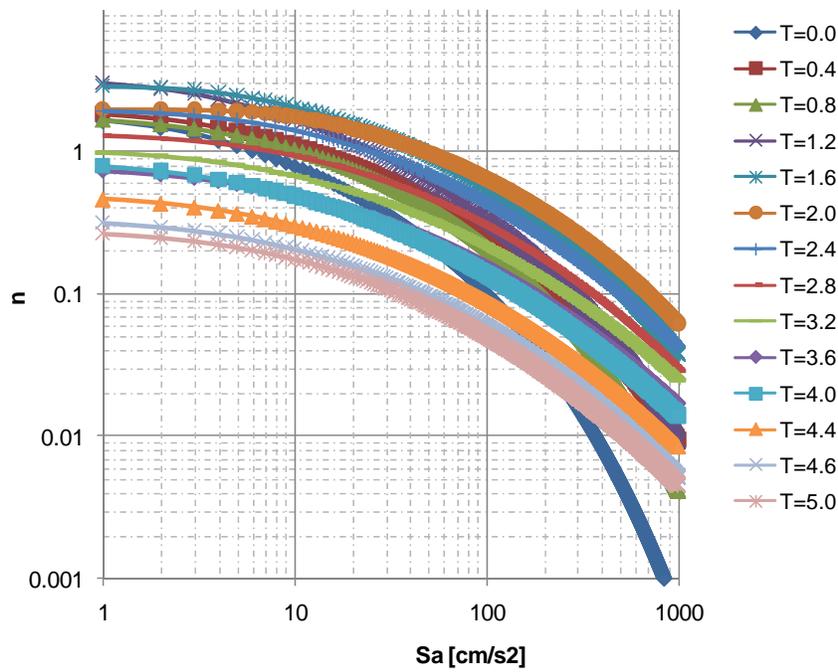


Figura 4.15. Curvas de peligro para la zona D. $\gamma = 0.3$ y $\alpha = 5$

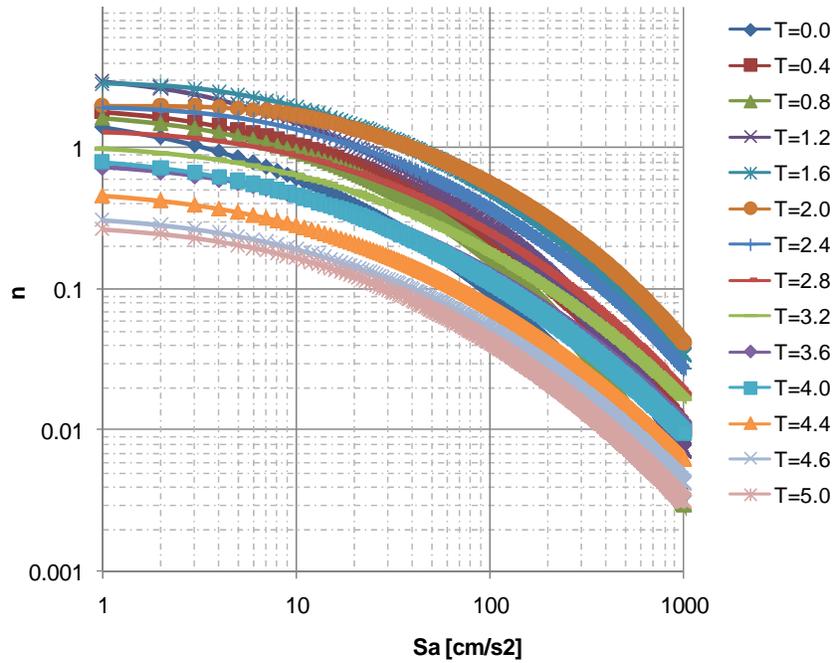


Figura 4.16. Curvas de peligro para la zona D. $\gamma = 0.5$ y $\alpha = 5$

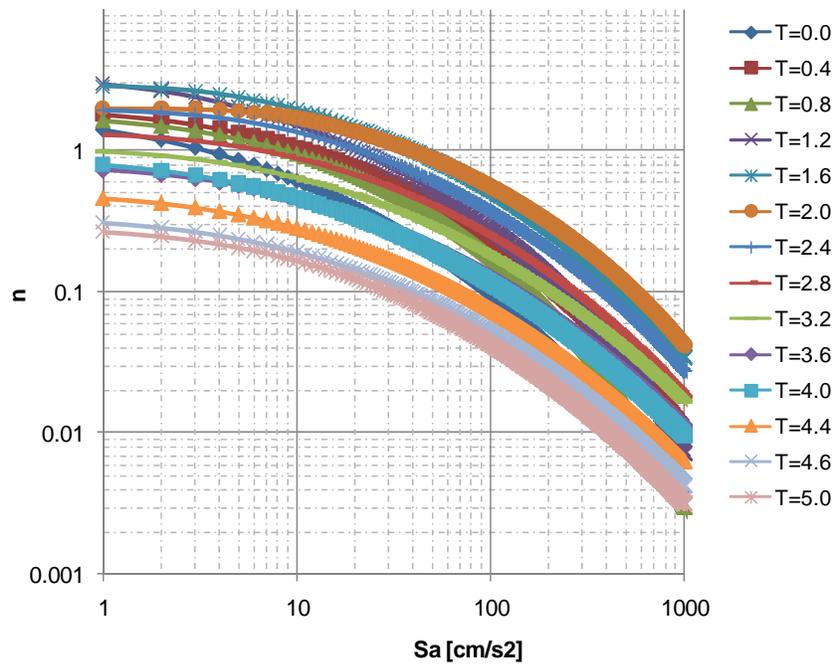


Figura 4.17. Curvas de peligro para la zona G. $\gamma = 0.3$ y $\alpha = 5$

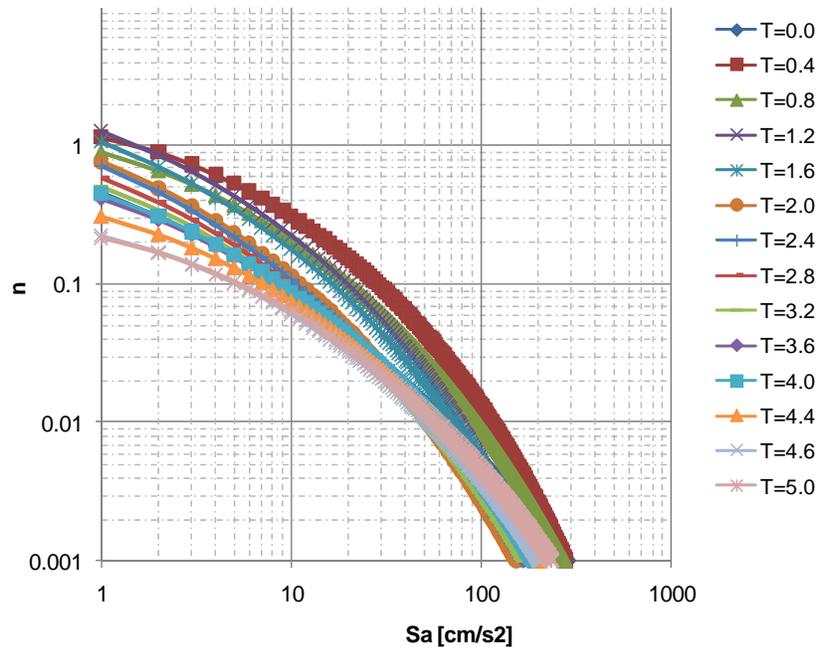


Figura 4.18. Curvas de peligro para la zona G. $\gamma = 0.5$ y $\alpha = 5$

A partir de las curvas de peligro sísmico se graficaron los ETEU's para cada zona y para diferentes periodos estructurales, seleccionando una tasa de excedencia constante y leyendo de cada curva de peligro la intensidad sísmica correspondiente. En este estudio se seleccionó una tasa media anual $\square\square\square 0.008$, lo que equivale a un periodo de retorno esperado de 125 años el cual corresponde al periodo de retorno para el cual fueron construidos los espectros de diseño de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del 2004. En las figuras 4.19 a 4.25 se muestran los ETEU's calculados para las siete zonas del valle de México, correspondientes a distintos valores de α y γ .

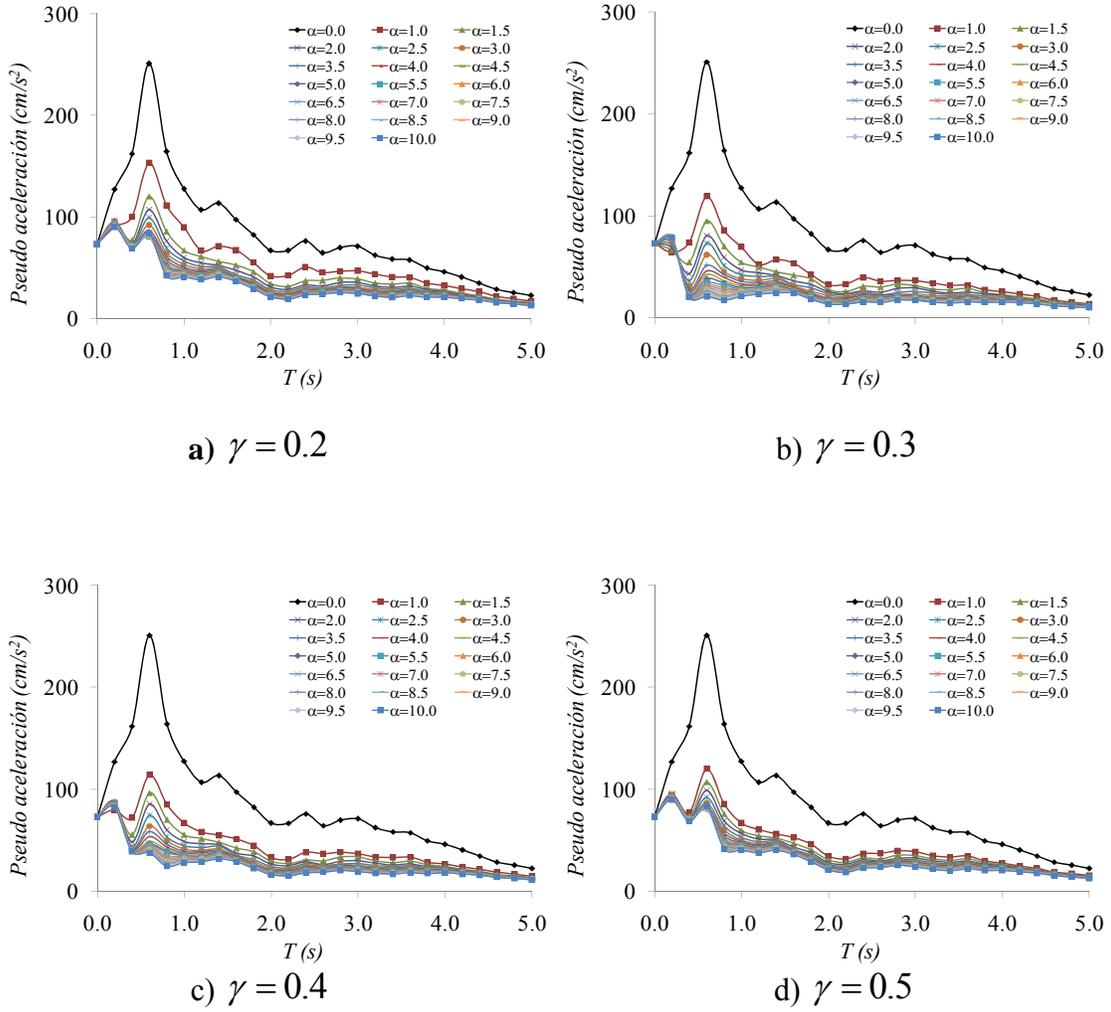


Figura 4.19. Espectros de Peligro Uniforme para la zona A

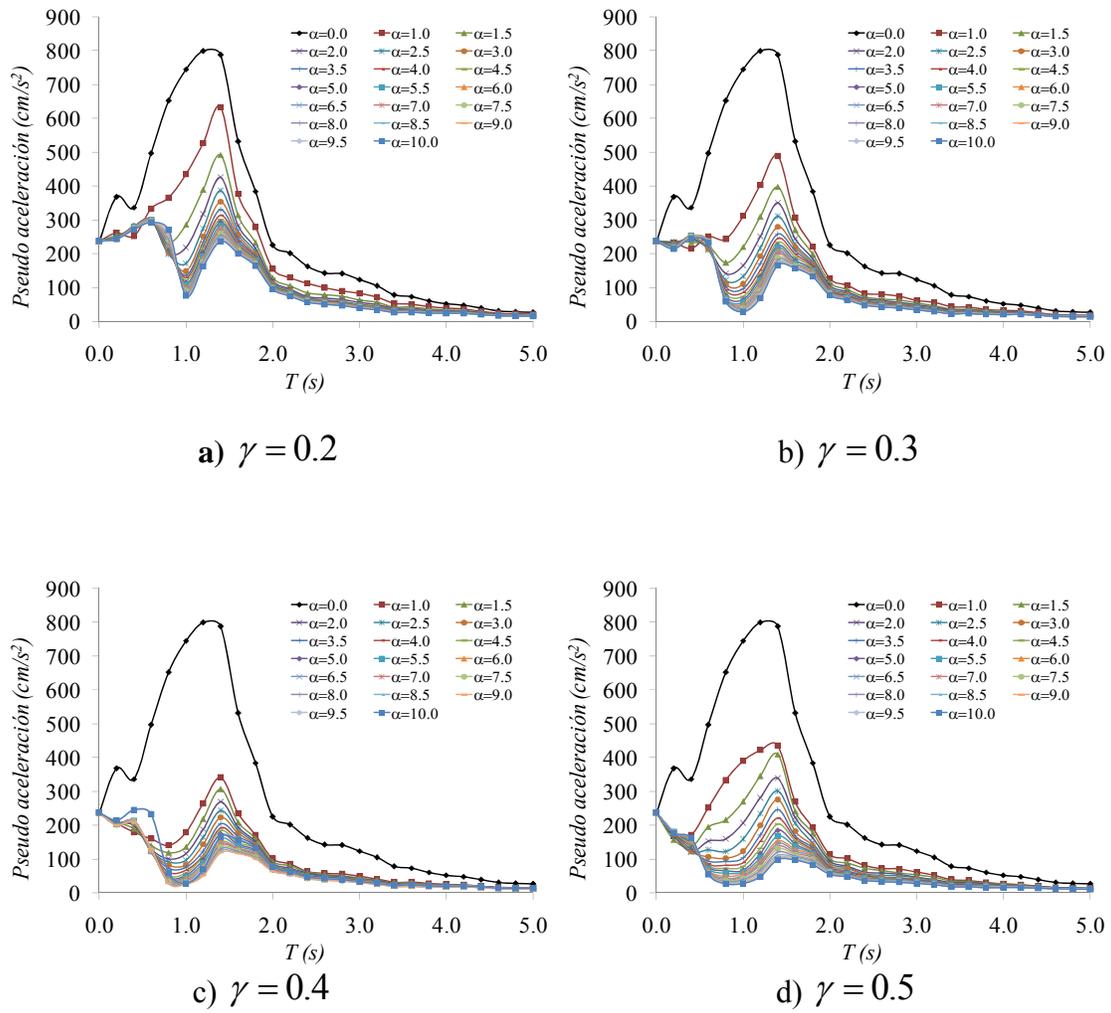
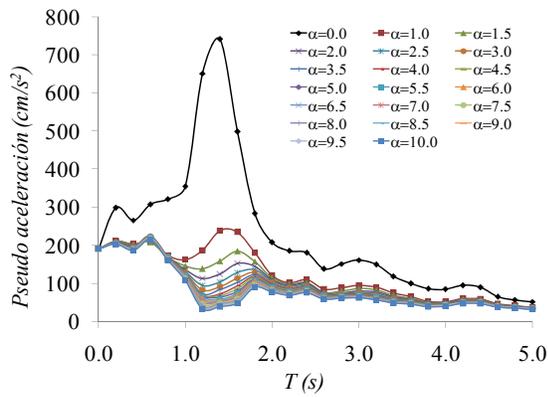
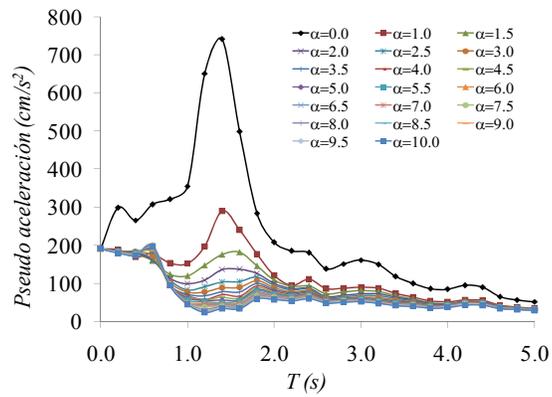


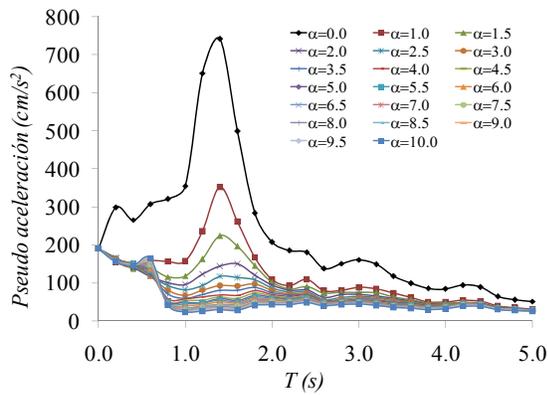
Figura 4.20. Espectros de Peligro Uniforme para la zona B



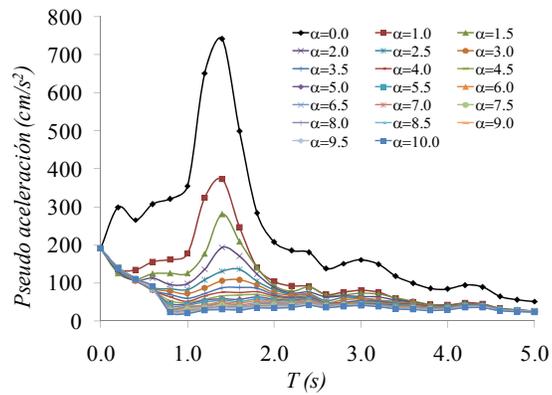
a) $\gamma = 0.2$



b) $\gamma = 0.3$



c) $\gamma = 0.4$



d) $\gamma = 0.5$

Figura 4.21. Espectros de Peligro Uniforme para la zona C

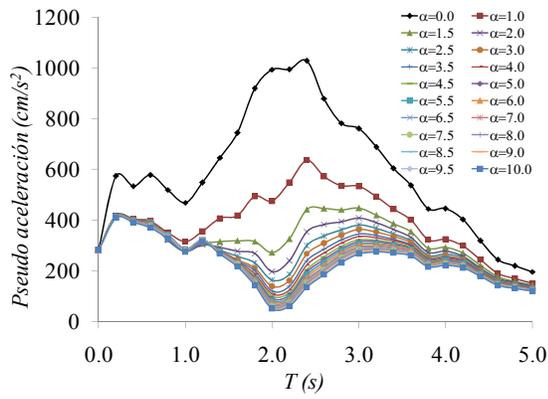
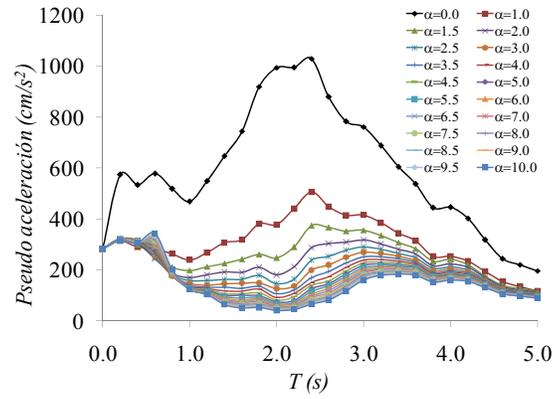
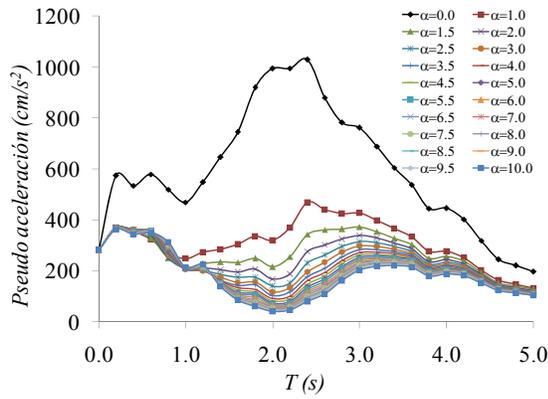
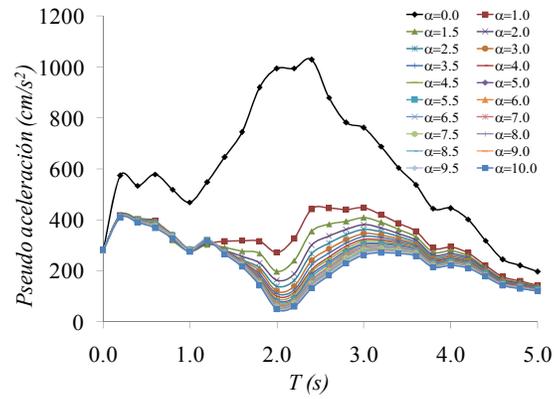
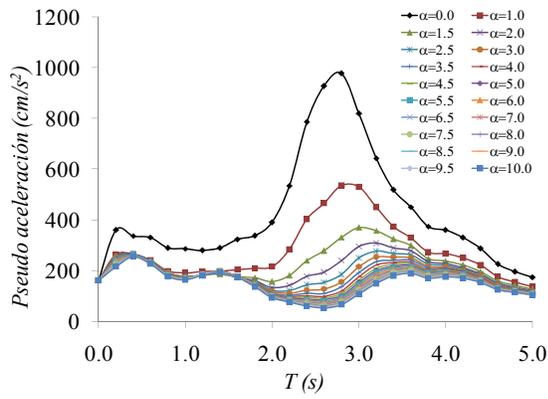
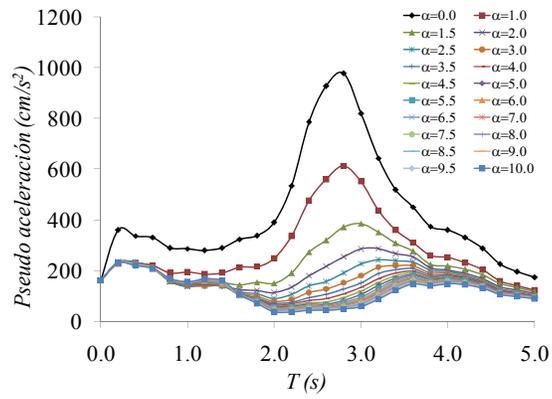
a) $\gamma = 0.2$ b) $\gamma = 0.3$ c) $\gamma = 0.4$ d) $\gamma = 0.5$

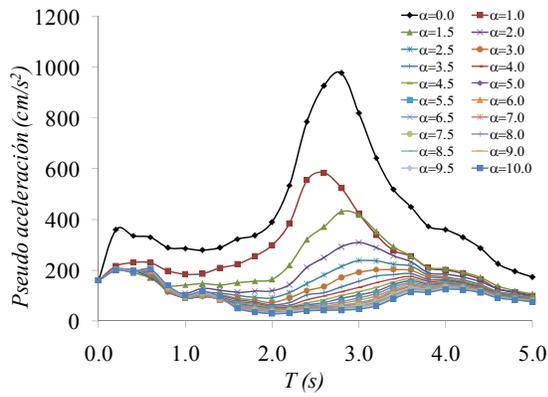
Figura 4.22. Espectros de Peligro Uniforme para la zona D



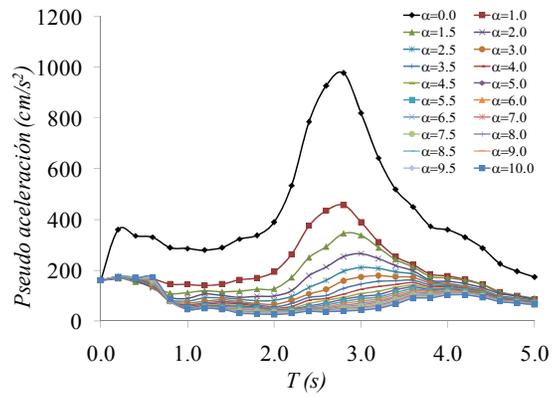
a) $\gamma = 0.2$



b) $\gamma = 0.3$



c) $\gamma = 0.4$



d) $\gamma = 0.5$

Figura 4.23. Espectros de Peligro Uniforme para la zona E

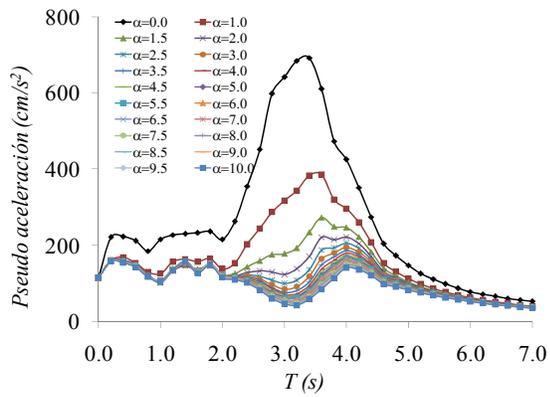
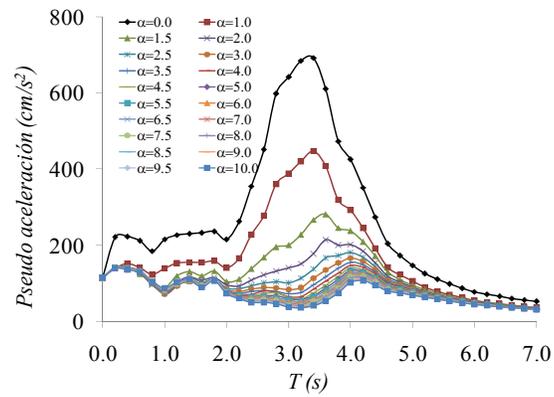
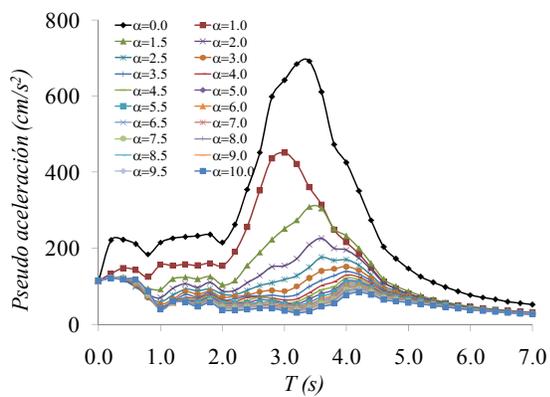
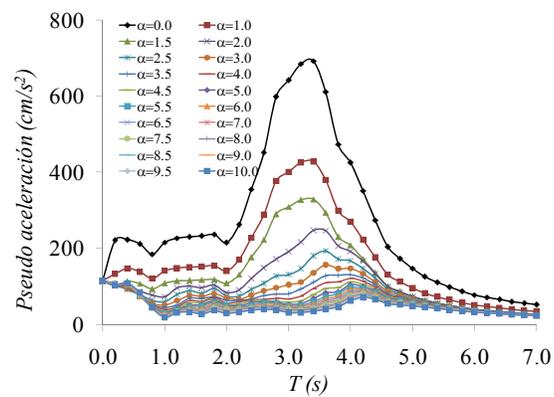
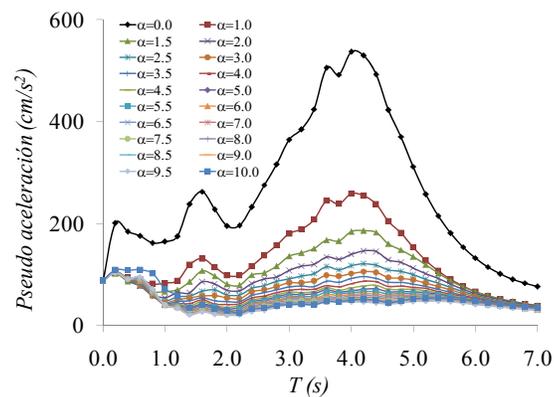
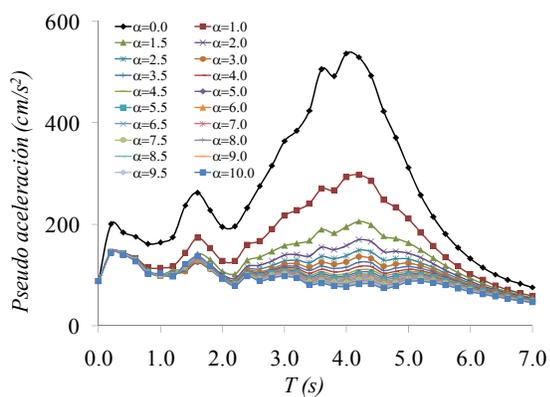
a) $\gamma = 0.2$ b) $\gamma = 0.3$ c) $\gamma = 0.4$ d) $\gamma = 0.5$

Figura 4.24. Espectros de Peligro Uniforme para la zona F



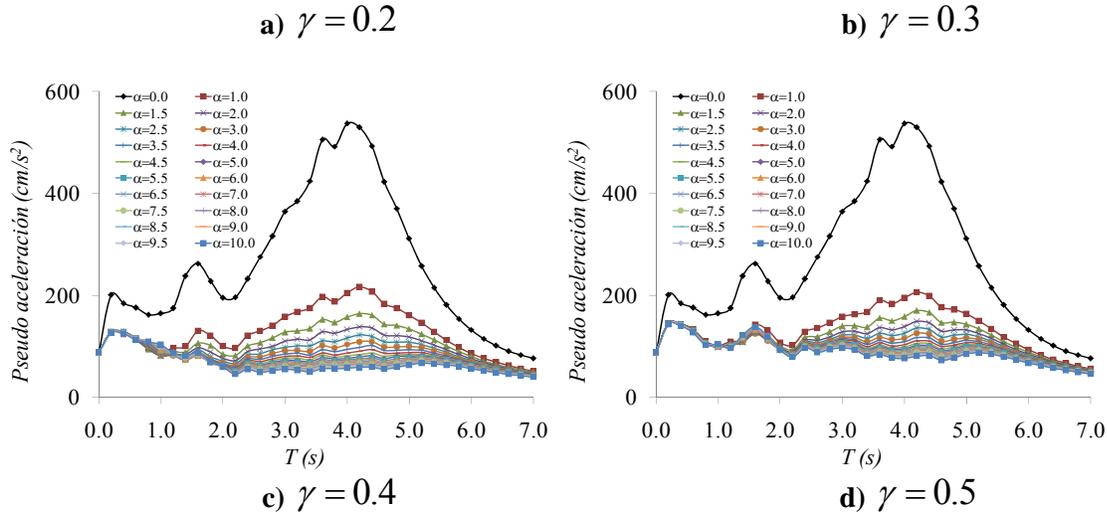


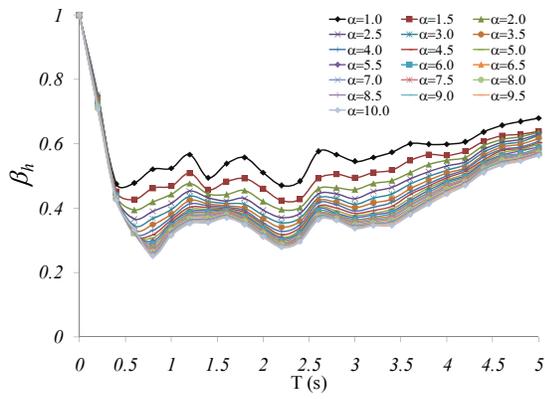
Figura 4.25. Espectros de Peligro Uniforme para la zona G

4.2.2 Factores de reducción para estructuras con disipadores de tipo histerético

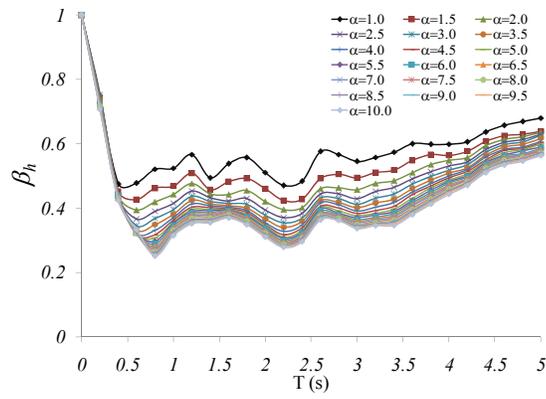
El factor de reducción debido a la presencia de disipadores histeréticos (β_h), para cada zona, se obtuvo a partir del cociente entre el ETEU para sistemas con disipador histerético y el EPU para sistemas sin disipador, con $\xi = 0.05$:

$$\beta_H = \frac{S_{a,ETEUE}(T_E, \alpha, \gamma)}{S_{a,ETEUE}(T, \xi = 5\%)} \quad (4.14)$$

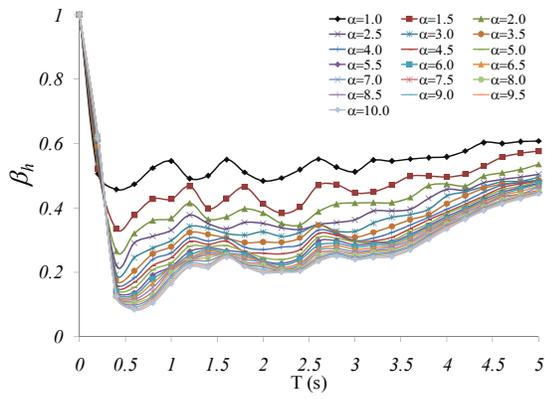
donde $S_{a,ETEUE}(T_E, \alpha, \gamma)$ es el ETEU de los sistemas con disipadores histeréticos y $S_{a,ETEUE}(T, \xi = 5\%)$ es el EPU para sistemas convencionales y T_E corresponde al periodo equivalente de la estructura considerando el disipador. En las figuras 4.26 a 4.32 se muestra la forma de los cocientes de ordenadas espectrales para las siete zonas del valle de México, respectivamente, correspondientes a distintos valores de α y γ .



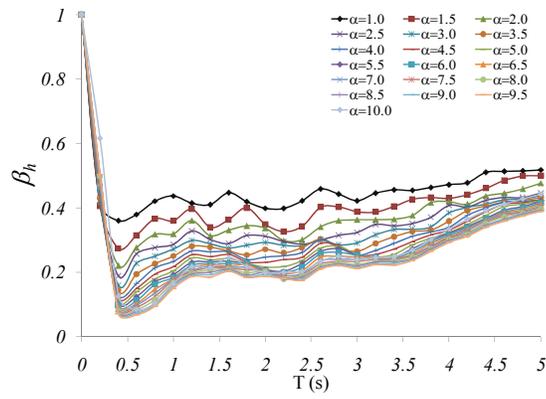
a) $\gamma = 0.2$



b) $\gamma = 0.3$

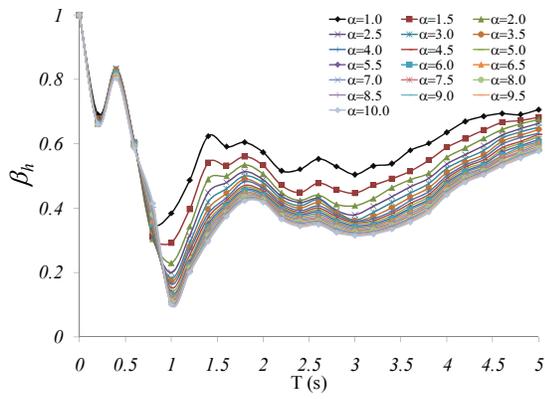


c) $\gamma = 0.4$

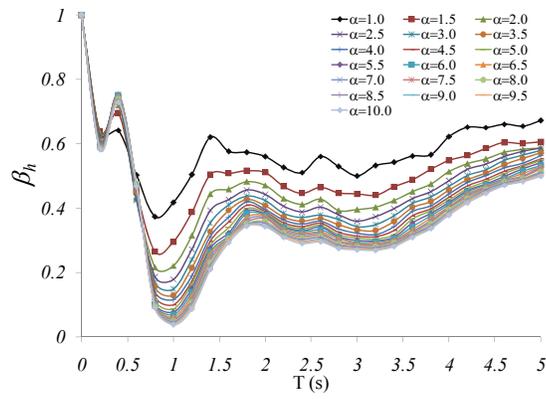


d) $\gamma = 0.5$

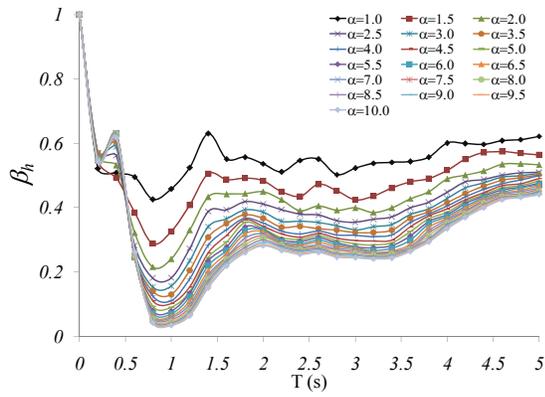
Figura 4.26. Cocientes espectrales para la zona A



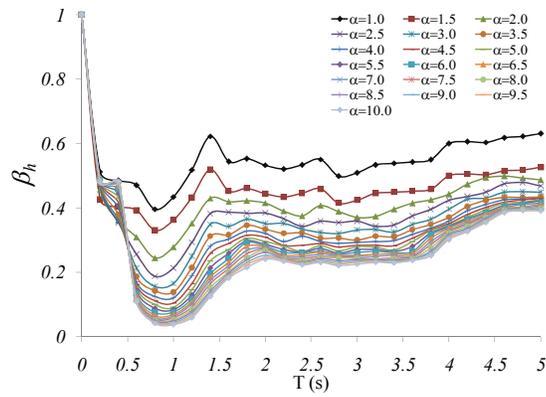
a) $\gamma = 0.2$



b) $\gamma = 0.3$



c) $\gamma = 0.4$



d) $\gamma = 0.5$

Figura 4.27. Cocientes espectrales para la zona B

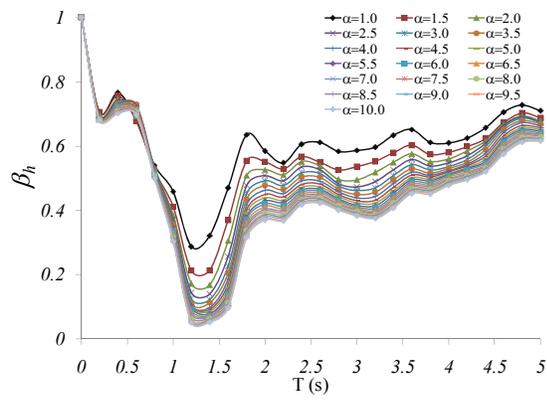
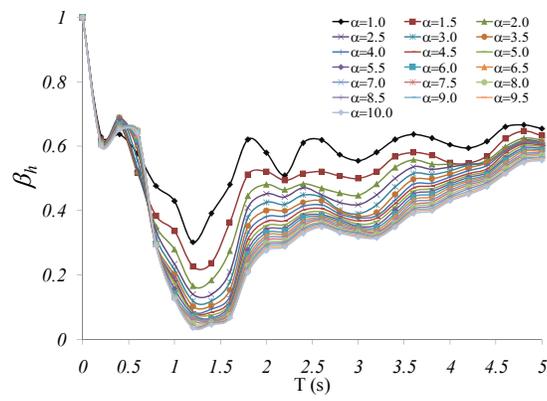
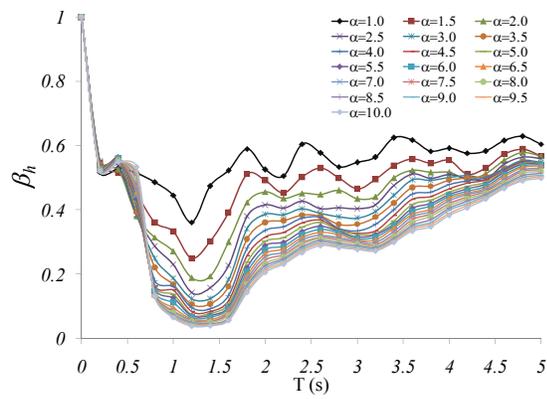
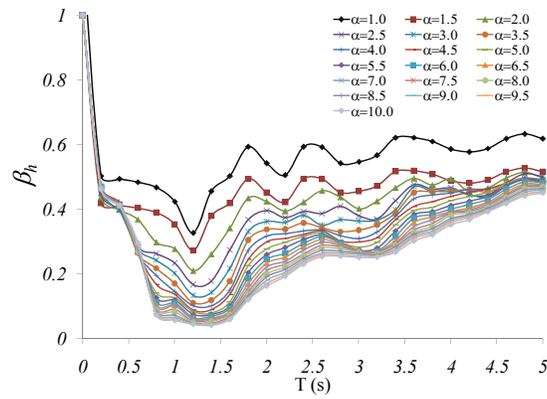
a) $\gamma = 0.2$ b) $\gamma = 0.3$ c) $\gamma = 0.4$ d) $\gamma = 0.5$

Figura 4.28. Cocientes espectrales para la zona C

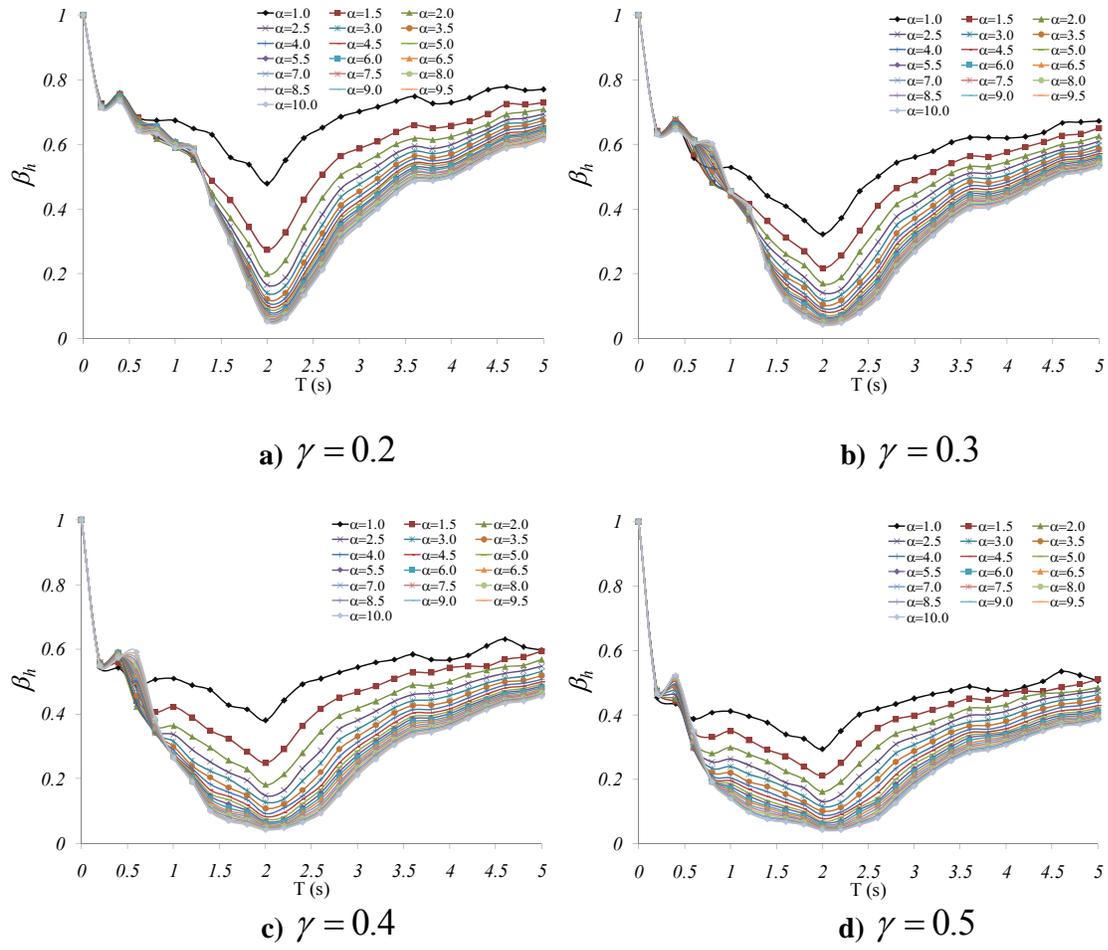
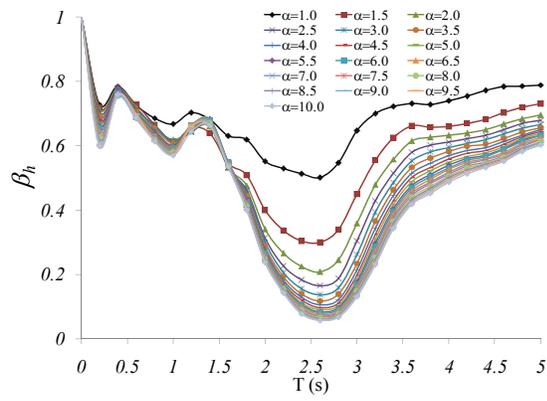
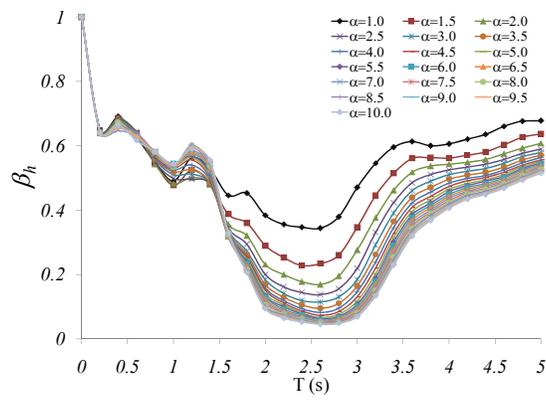


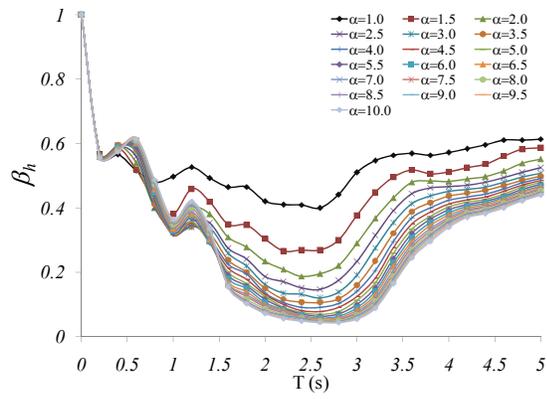
Figura 4.29. Cocientes espectrales para la zona D



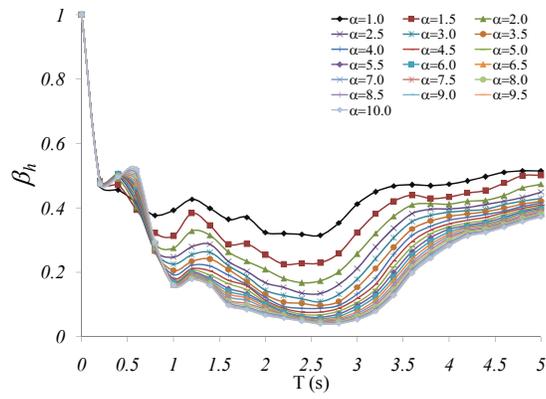
a) $\gamma = 0.2$



b) $\gamma = 0.3$

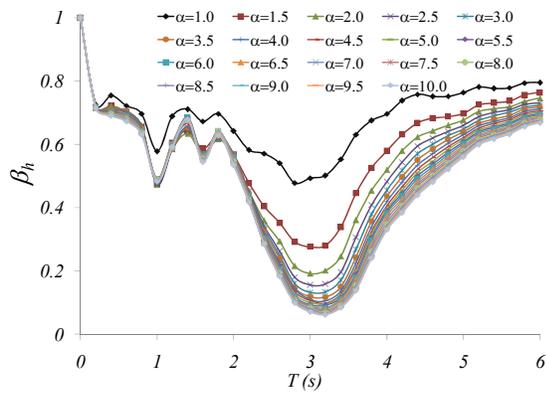


c) $\gamma = 0.4$

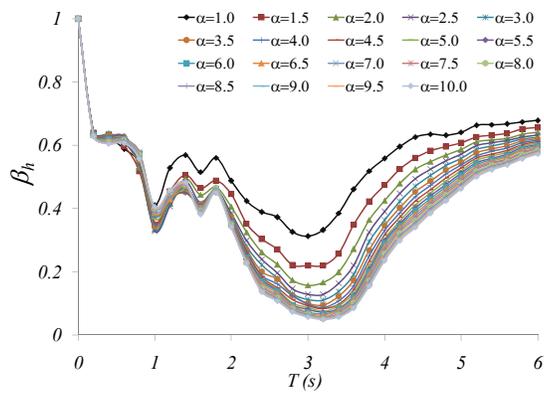


d) $\gamma = 0.5$

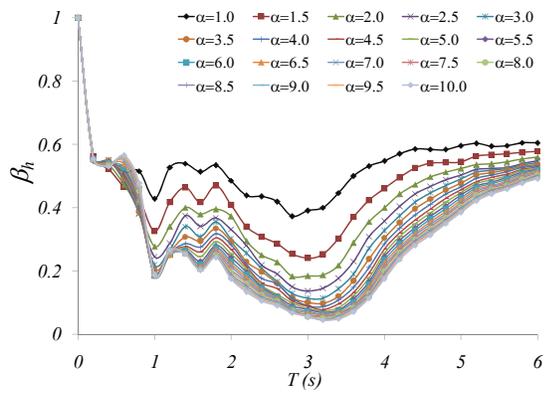
Figura 4.30. Cocientes espectrales para la zona E



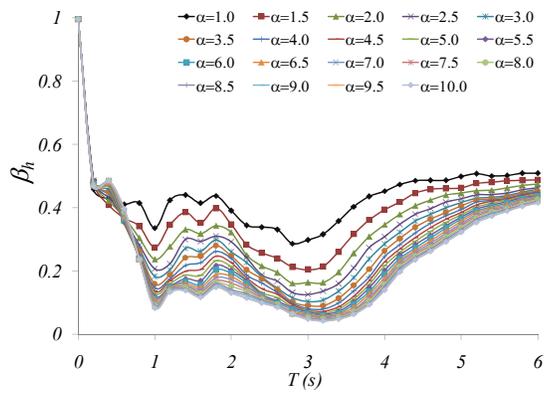
a) $\gamma = 0.2$



b) $\gamma = 0.3$



c) $\gamma = 0.4$



d) $\gamma = 0.5$

Figura 4.31. Cocientes espectrales para la zona F

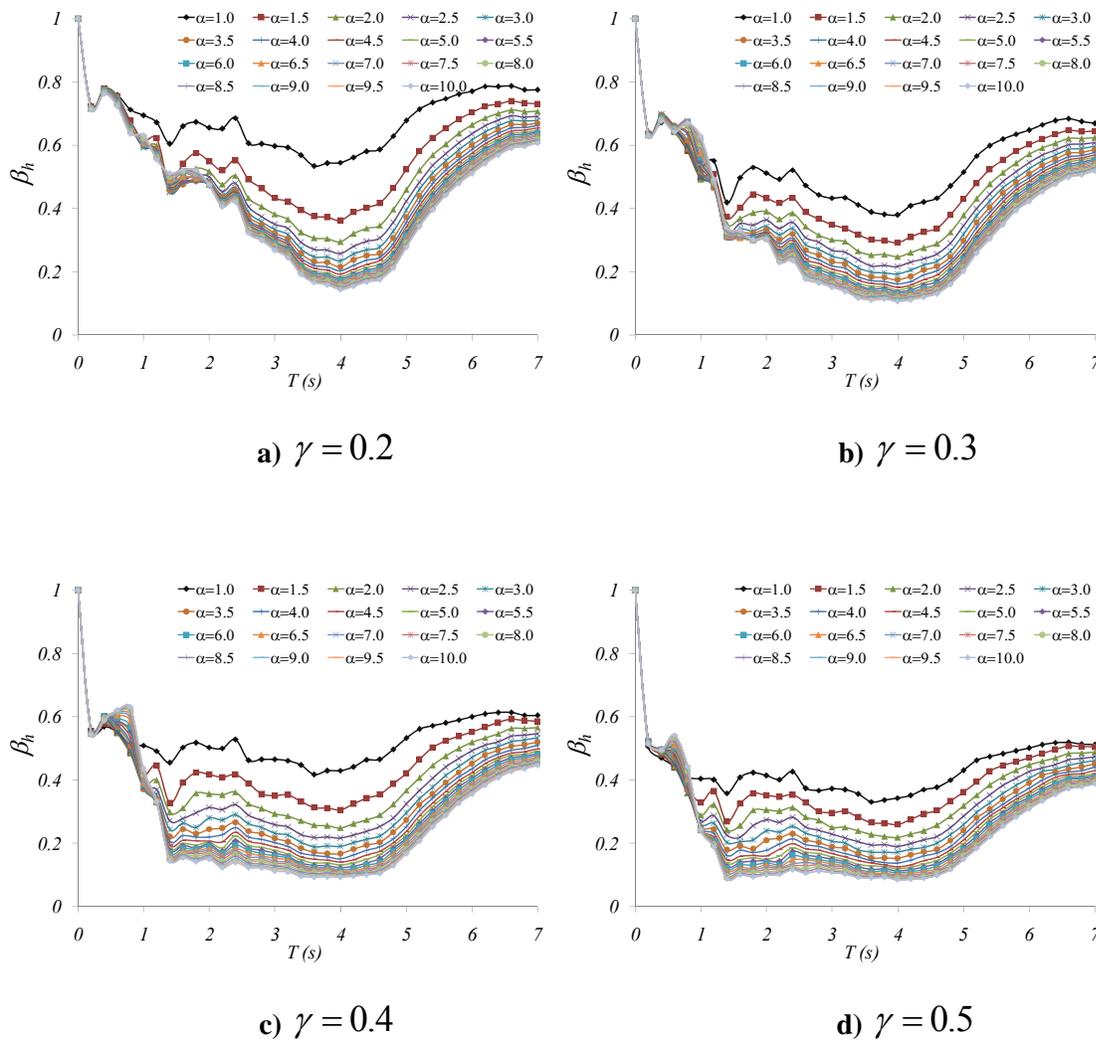


Figura 4.32. Cocientes espectrales para la zona G

4.2.3 Expresión matemática propuesta para el factor de amortiguamiento β_h

Los cocientes espectrales de cada zona se ajustaron mediante el método de mínimos cuadrados a una ecuación que describe su comportamiento. La ecuación se ajustó de manera conveniente para que pueda aplicarse a los espectros de diseño especificados en el apéndice A de las NTC-Sismo-2004.

La ecuación propuesta se divide en tres partes: la primera de ellas corresponde a la envolvente del factor de reducción β_h , la segunda parte toma en cuenta las características del periodo del suelo, la última parte comprende un parámetro que depende de las formas de los cocientes espectrales y tiene un valor particular para cada tipo de terreno. A continuación se muestra la ecuación propuesta para determinar el factor de reducción β_h para estructuras con disipadores histeréticos, localizados en el valle de México.

$$\beta_h = \begin{cases} 1 - \frac{T_o}{F_a T_a} \left(1 - e^{-(\gamma \alpha)^{\frac{1}{\lambda}}} \right) & ; \text{ si } T_o \leq F_a T_a \\ e^{-(\gamma \alpha)^{\frac{1}{\lambda}}} & ; \text{ si } F_a T_a < T_o < F_b T_b \\ 1 + \left(e^{-(\gamma \alpha)^{\frac{1}{\lambda}}} - 1 \right) \left(\frac{F_b T_b}{T} \right)^\psi & ; \text{ si } T_o > F_b T_b \end{cases} \quad (4.15)$$

donde T_o es el periodo fundamental de la estructura básica y el parámetro λ esta dado por la siguiente expresión:

$$\lambda = 0.47 T_s^2 - 2.3 T_s + 4.7 \quad (4.16)$$

Los valores de los parámetros Ψ y F dependen de la zona en donde se localice el sistema estructura-disipador, como se indica en la ecuación (4.17) y en la tabla 4.3.

$$F_b = \begin{cases} 2.5 & ; \text{ si } T < 1 \\ & s \\ 1.0 & ; \text{ si } T \geq 1 \\ & s \end{cases} \quad (4.17)$$

Tabla 4.3. Valores del parámetro Ψ y F_a

Zona	Ψ	F_a
A	0.7	2.0
B	0.3	1.5
C	0.7	1.2
D	0.7	1.2
E	1.5	1.2
F	2.0	1.5
G	1.6	1.5

La ecuación para determinar el factor de reducción por la presencia de disipadores de tipo histerético en la estructura es función del periodo estructural, de los parámetros α y γ , así como del periodo del suelo de cada zona en particular. En las figs 4.33 a 4.39 se muestra el ajuste de la función propuesta para los factores de reducción β_h correspondientes a las siete zonas para distintos valores de α y γ .

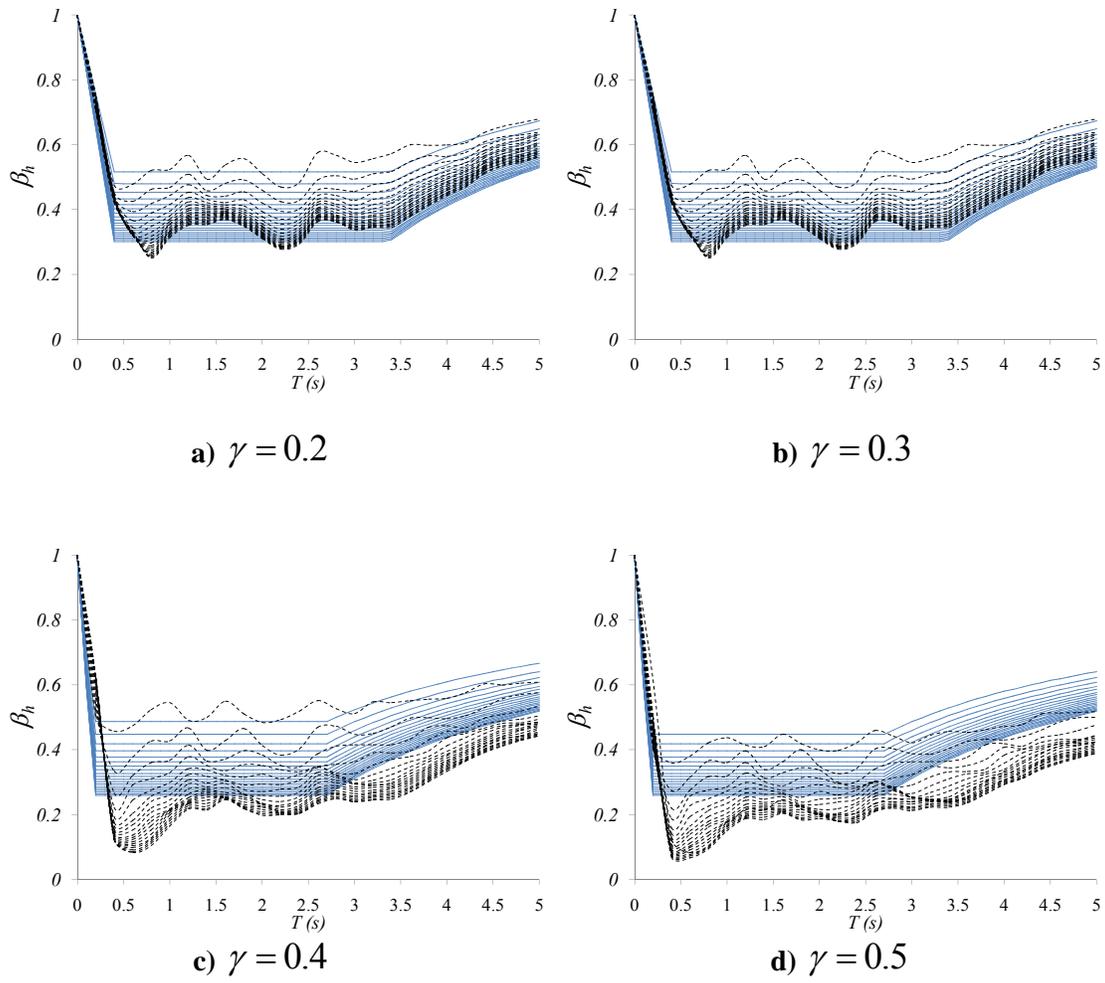
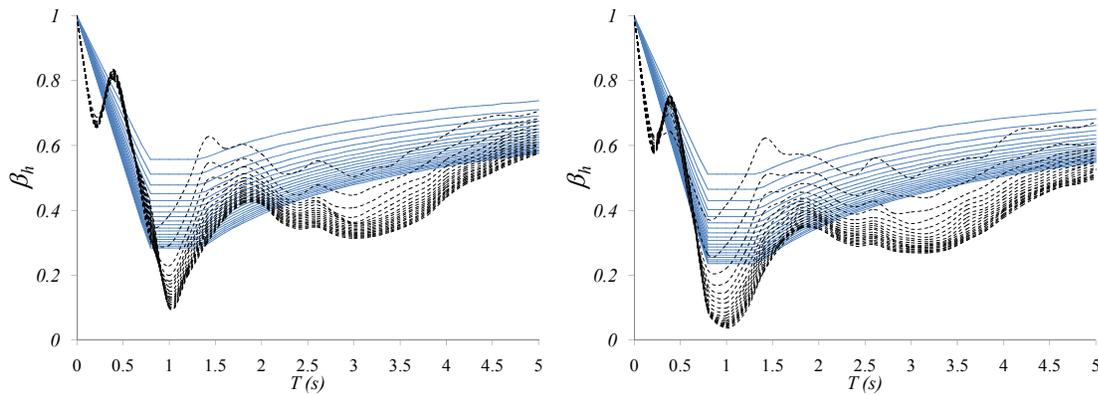


Figura 4.33. Ajustes para la zona A



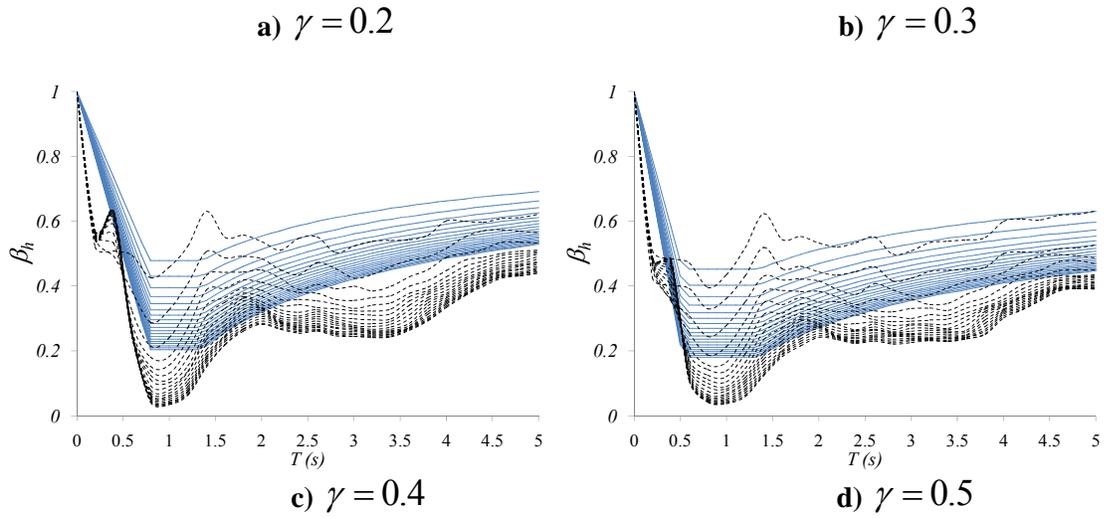
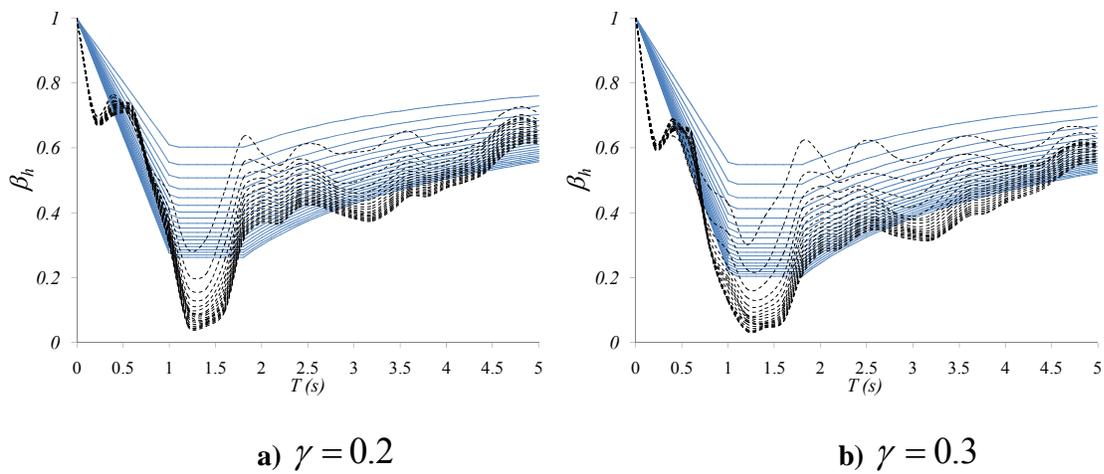


Figura 4.34. Ajustes para la zona B



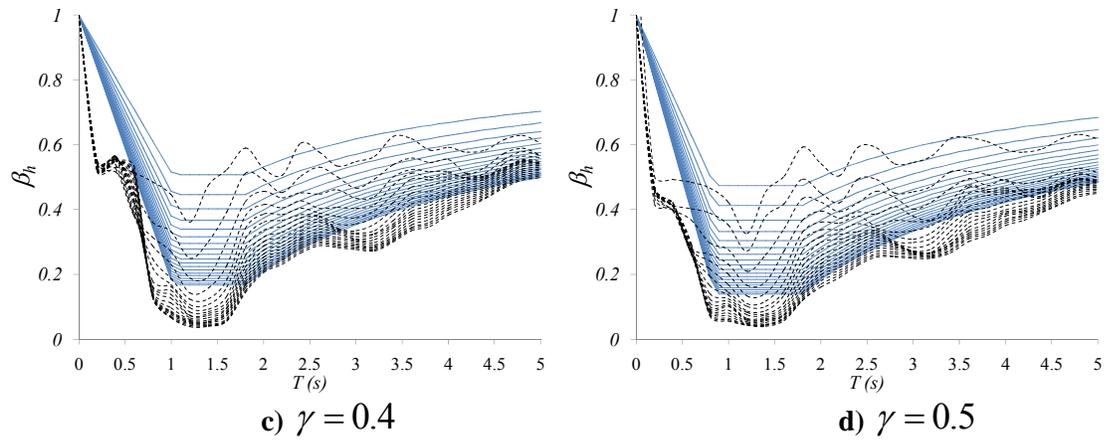
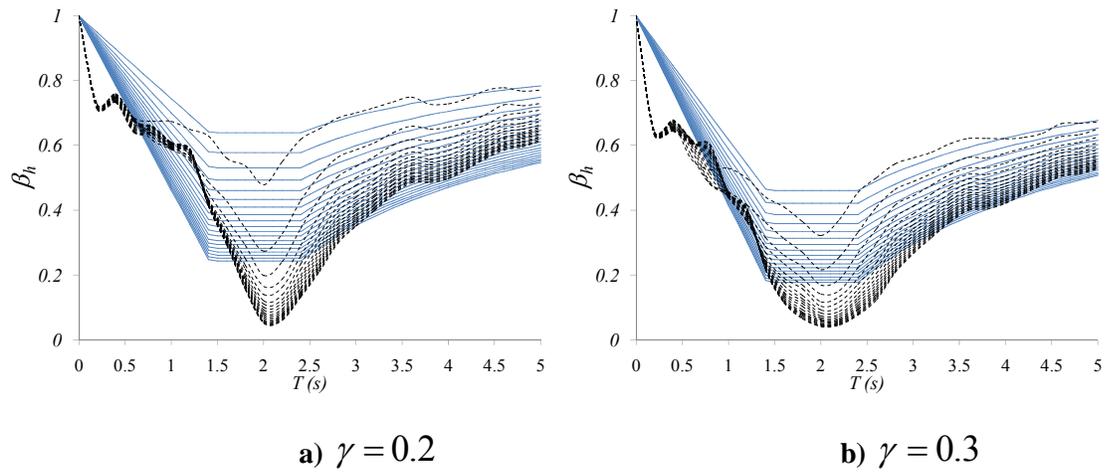


Figura 4.35. Ajustes para la zona C



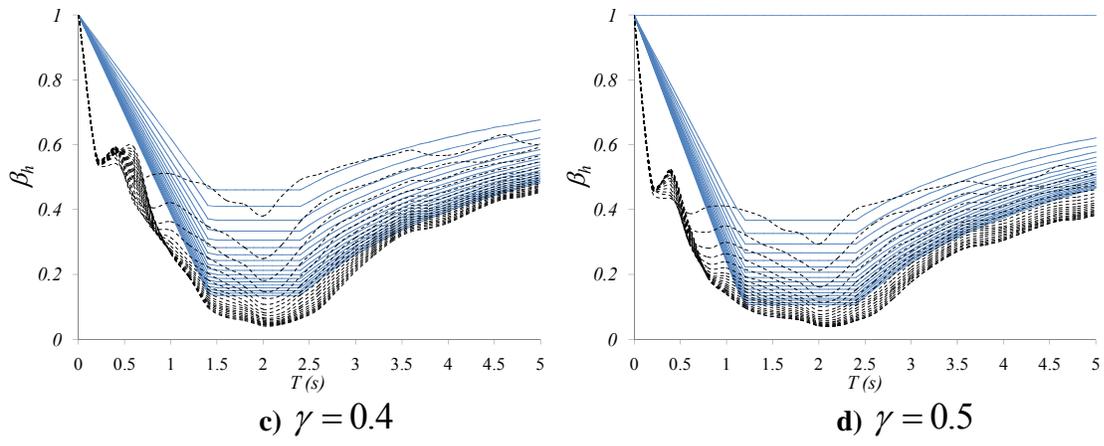
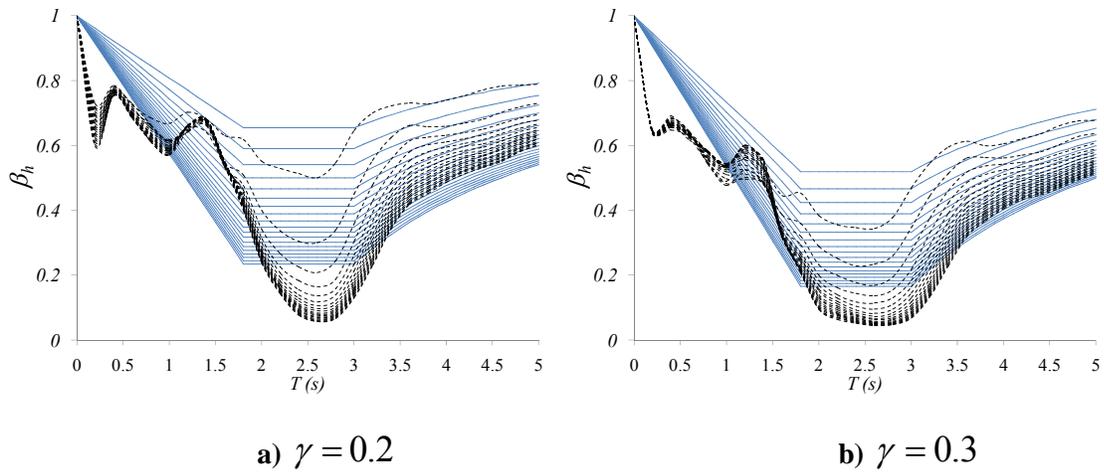


Figura 4.36. Ajustes para la zona D



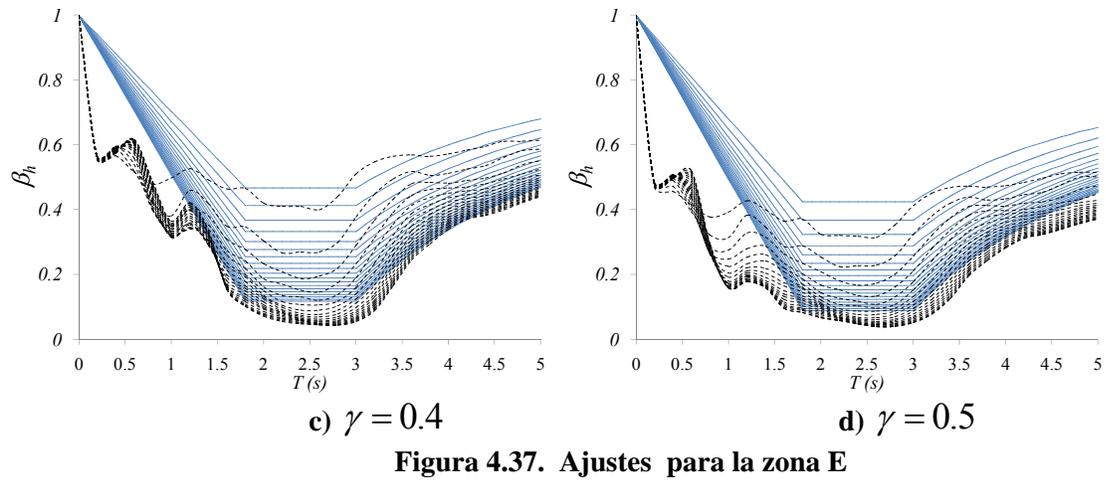
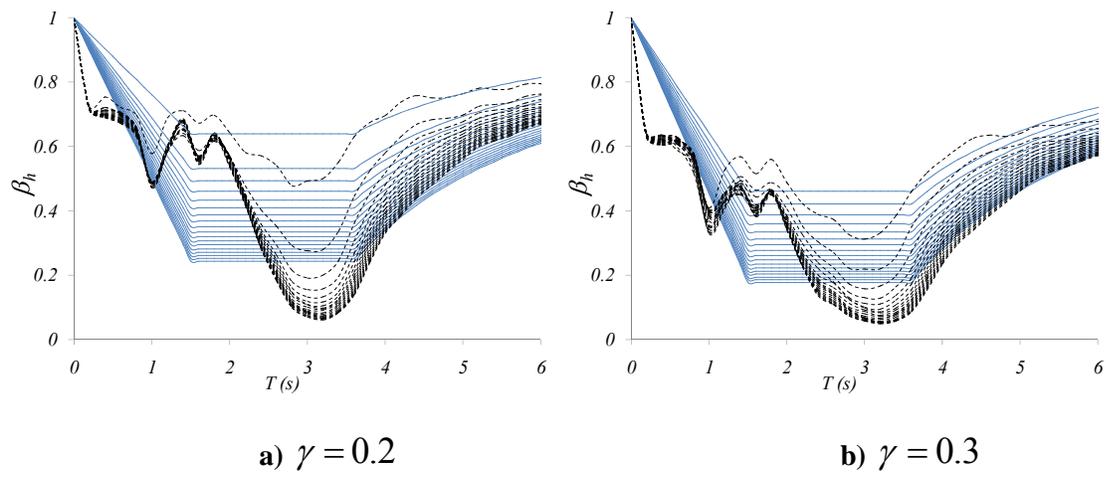


Figura 4.37. Ajustes para la zona E



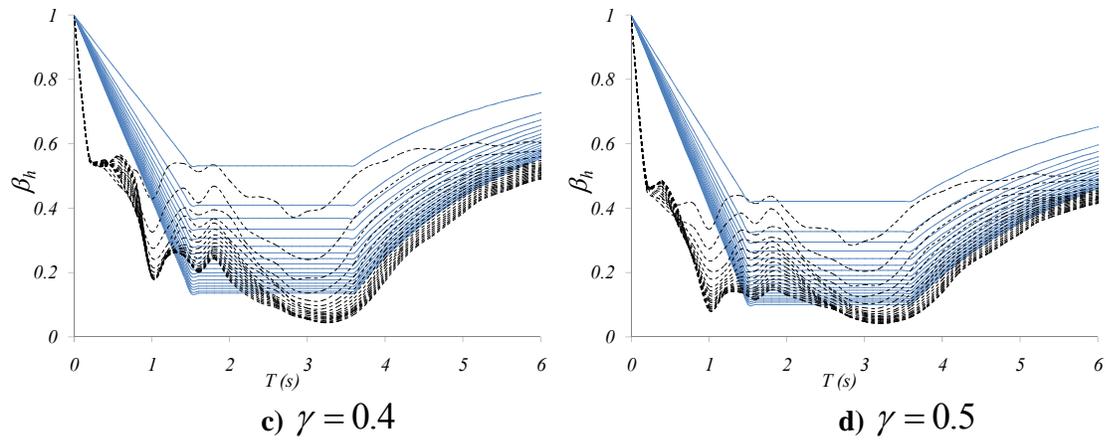
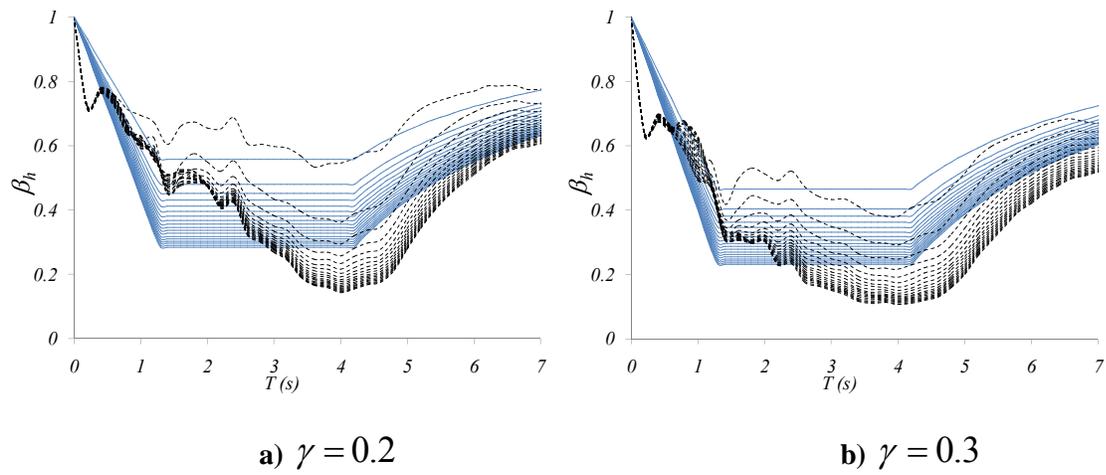


Figura 4.38. Ajustes para la zona F



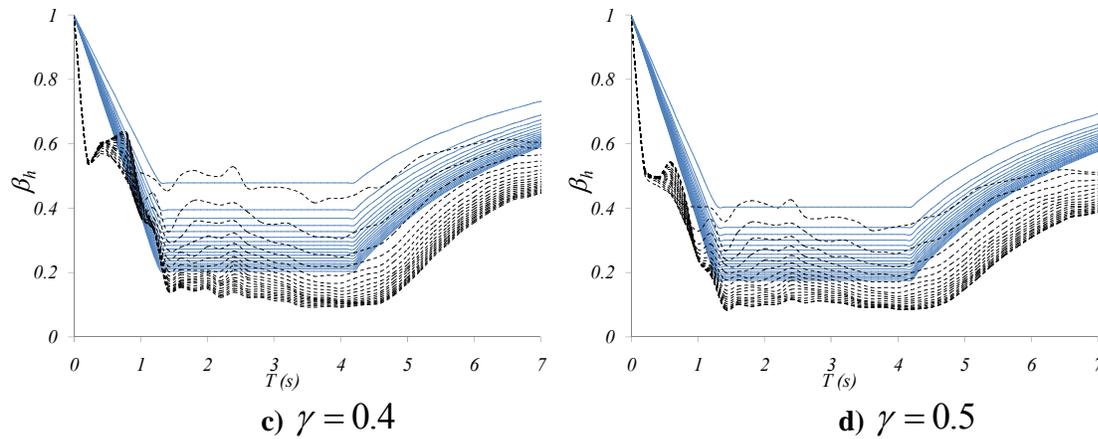


Figura 4.39. Ajustes para la zona G

4.3 EXPRESIÓN DEL FACTOR DE REDUCCIÓN PARA SISTEMAS CON DISIPADORES DE TIPO VISCOSO LINEAL

De la misma manera como se hizo con los disipadores de tipo histerético, se sometieron sistemas con porcentajes de amortiguamiento crítico de 10, 15, 20, 25, 30 y 35% a los movimientos sísmicos de la base de datos formada anteriormente y aplicando la ecuación 4.1 se calcularon las curvas de peligro sísmico a partir de la relación de cocientes de ordenadas espectrales entre un sistema convencional (amortiguamiento del 5%) y sistemas con diferentes valores de porcentaje de amortiguamiento crítico. □ A partir de estas curvas se obtuvieron EPU's para cada zona correspondientes a una tasa de excedencia prefijada.

En las figuras 4.40, 4.41 y 4.42 se muestran, como ejemplo, curvas de peligro sísmico calculadas en este estudio para las zonas A, D y G del valle de México, respectivamente, a diferentes valores de porcentaje de amortiguamiento crítico.

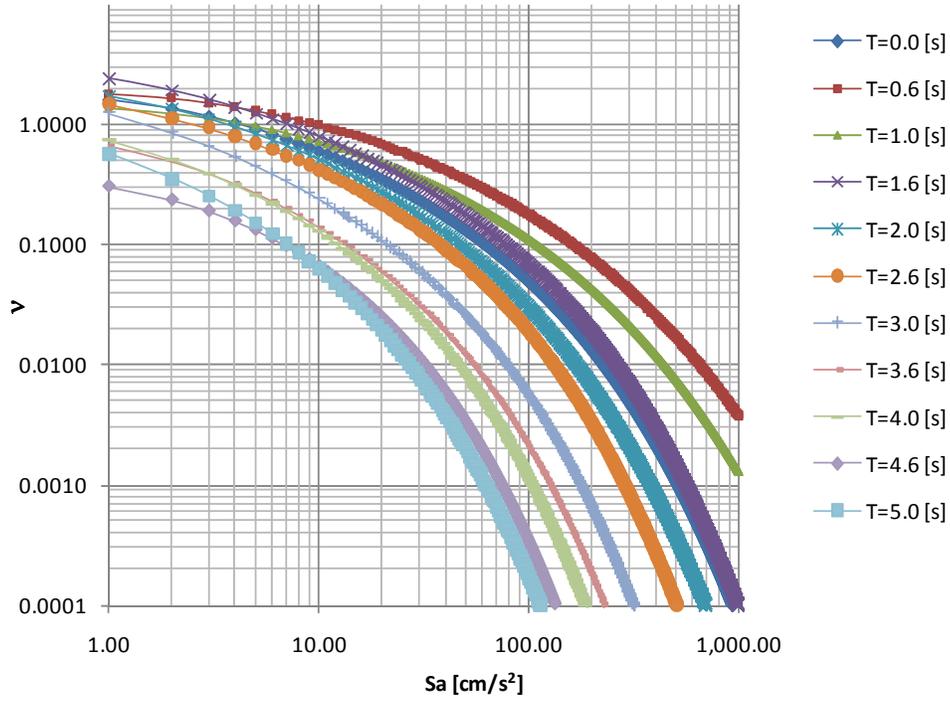


Figura 4.40. Curvas de peligro para la Zona A

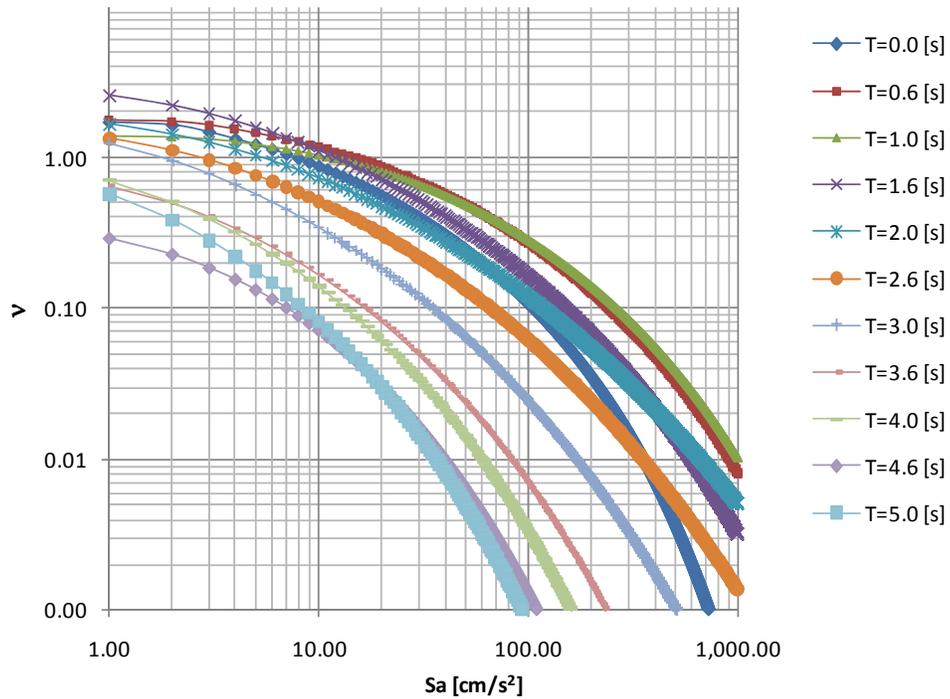


Figura 4.41. Curvas de peligro para la Zona D

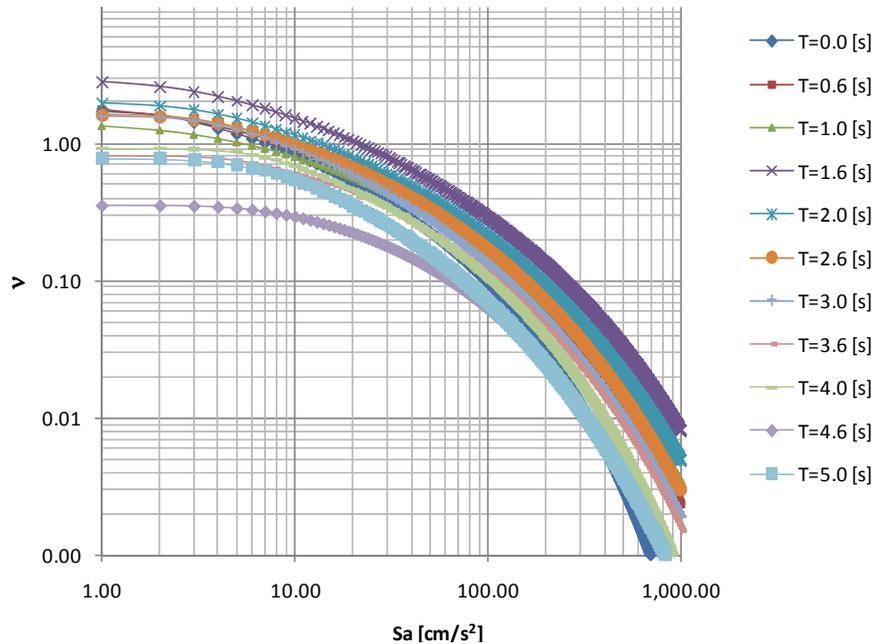


Figura 4.42. Curvas de peligro para la Zona G

Los EPU's correspondientes a cada zona y diferentes porcentaje de amortiguamiento crítico se extrajeron a partir de las curvas de peligro sísmico calculadas; seleccionando una tasa de falla constante y leyendo de cada curva la intensidad sísmica correspondiente. En este estudio se seleccionó una tasa media anual $\nu=0.008$, lo que equivale a un periodo de retorno esperado de 125 años. En las figuras 4.43 a 4.49 se muestran los EPU's calculados para las siete zonas del valle de México, correspondientes a valores de porcentaje de amortiguamiento crítico de 10, 15, 20, 25, 30 y 35%.

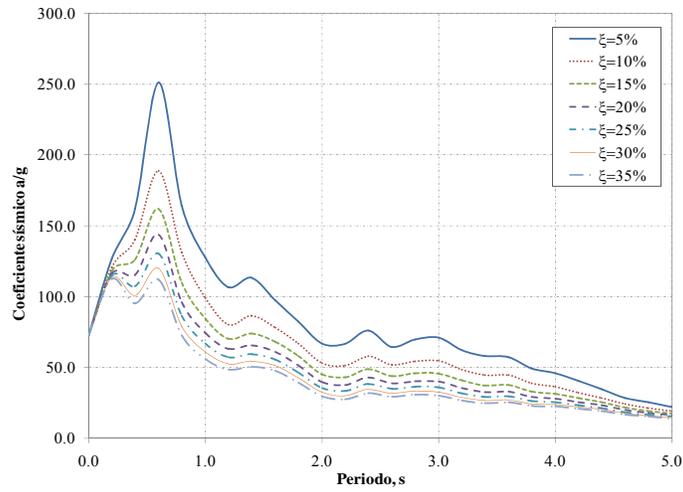


Figura 4.43. Espectros de Peligro Uniforme para la zona A para diferentes valores de porcentaje de amortiguamiento crítico.

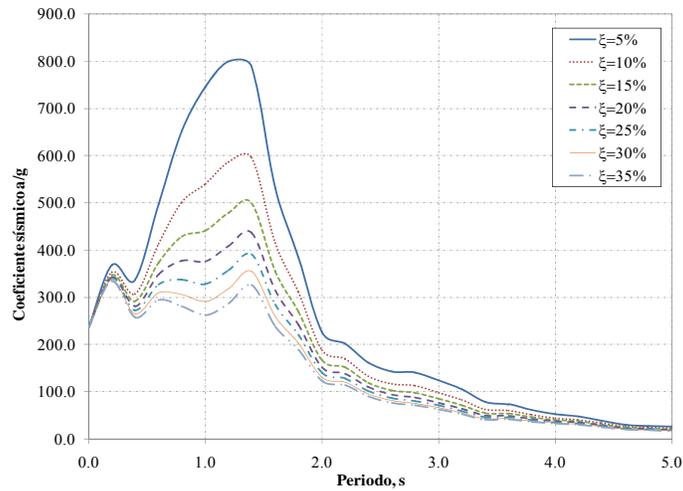


Figura 4.44. Espectros de Peligro Uniforme para la zona B para diferentes valores de porcentaje de amortiguamiento crítico

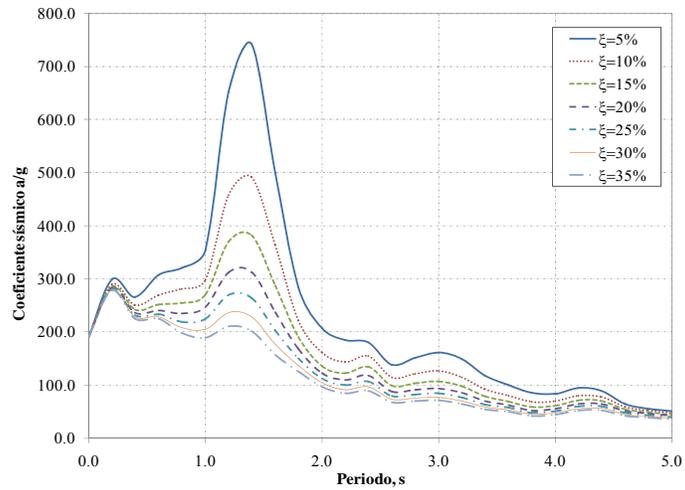


Figura 4.45. Espectros de Peligro Uniforme para la zona C para diferentes valores de porcentaje de amortiguamiento crítico

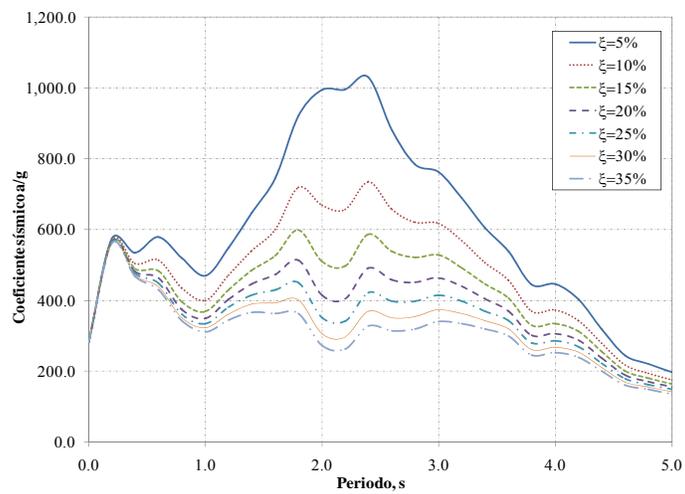


Figura 4.46. Espectros de Peligro Uniforme para la zona D para diferentes valores de porcentaje de amortiguamiento crítico

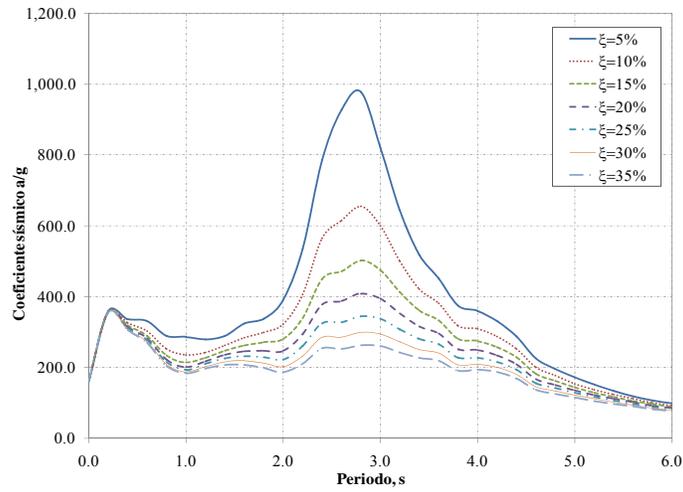


Figura 4.47. Espectros de Peligro Uniforme para la zona E para diferentes valores de porcentaje de amortiguamiento crítico

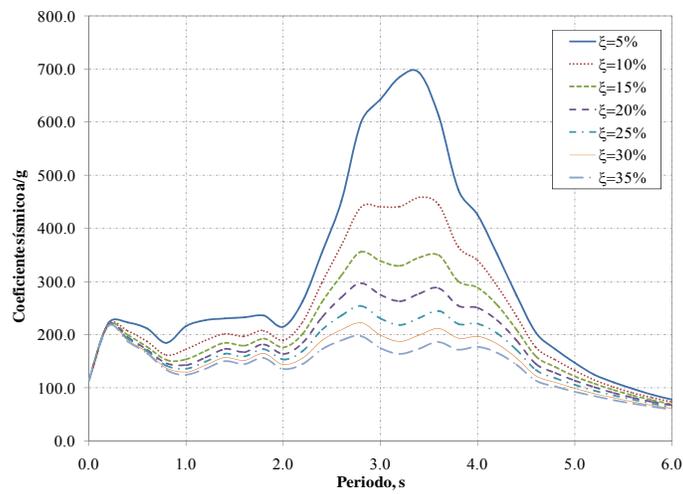


Figura 4.48. Espectros de Peligro Uniforme para la zona F para diferentes valores de porcentaje de amortiguamiento crítico

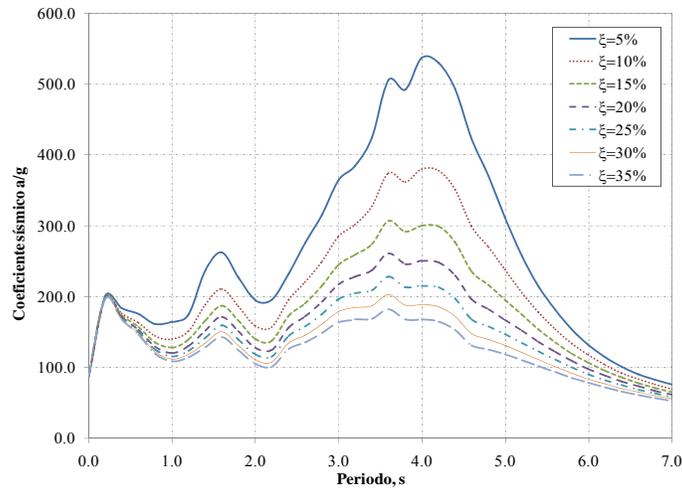


Figura 4.49. Espectros de Peligro Uniforme para la zona G para diferentes valores de porcentaje de amortiguamiento crítico

4.3.1 Factores de reducción para estructuras con disipadores de tipo viscoso lineal

Los factores de reducción se obtuvieron mediante el cociente entre el EPU correspondiente a sistemas con un porcentaje de amortiguamiento crítico efectivo, ζ , mayor de 5%, y el EPU con un porcentaje $\zeta = 5\%$:

$$\beta_v = \frac{S_{a,EPU}(T, \zeta)}{S_{a,EPU}(T, \zeta = 5\%)} \quad (4.18)$$

donde $S_{a,EPU}(T, \zeta)$ representa el EPU correspondiente a sistemas con un nivel de amortiguamiento efectivo mayor de 5 %, y $S_{a,EPU}(T, \zeta = 5\%)$ es el EPU para sistemas con $\zeta = 5\%$ y sin amortiguamiento adicional. En las figuras 4.50 a 4.56 se muestran los cocientes de ordenadas espectrales para las siete zonas del valle de México, respectivamente, correspondientes a valores de porcentaje de amortiguamiento crítico de 10, 15, 20, 25, 30 y 35%.

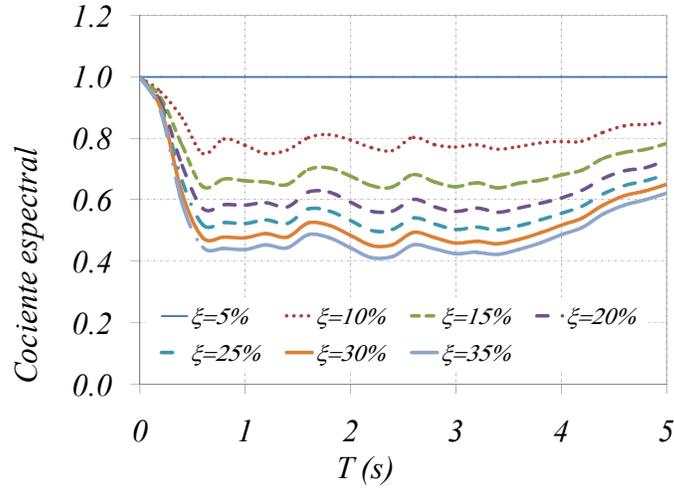


Figura 4.50 Cocientes espectrales para la zona A para diferentes valores de porcentaje de amortiguamiento crítico

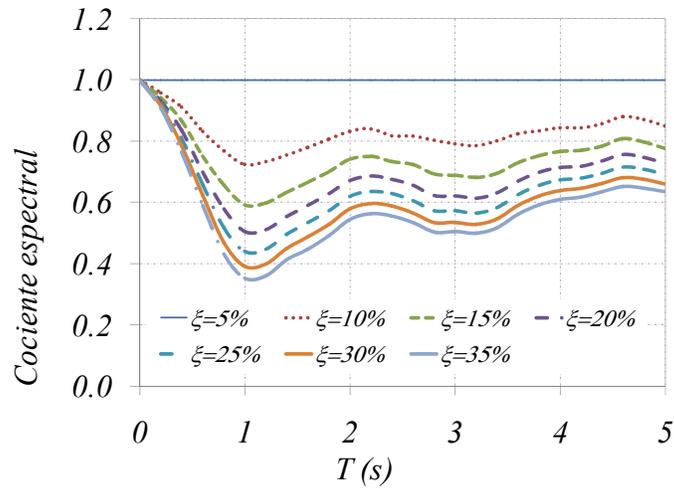


Figura 4.51 Cocientes espectrales para la zona B para diferentes valores de porcentaje de amortiguamiento crítico

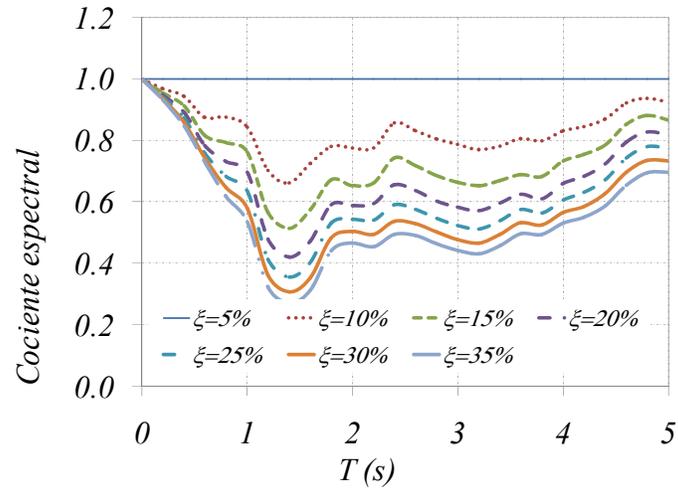


Figura 4.52 Cocientes espectrales para la zona C para diferentes valores de porcentaje de amortiguamiento crítico

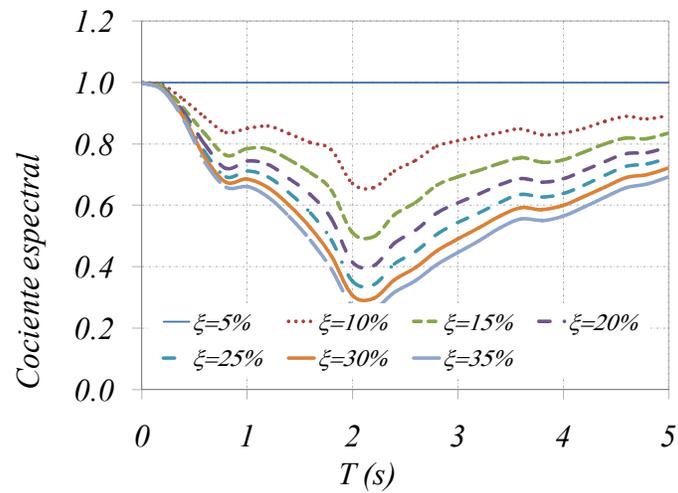


Figura 4.53 Cocientes espectrales para la zona D para diferentes valores de porcentaje de amortiguamiento crítico

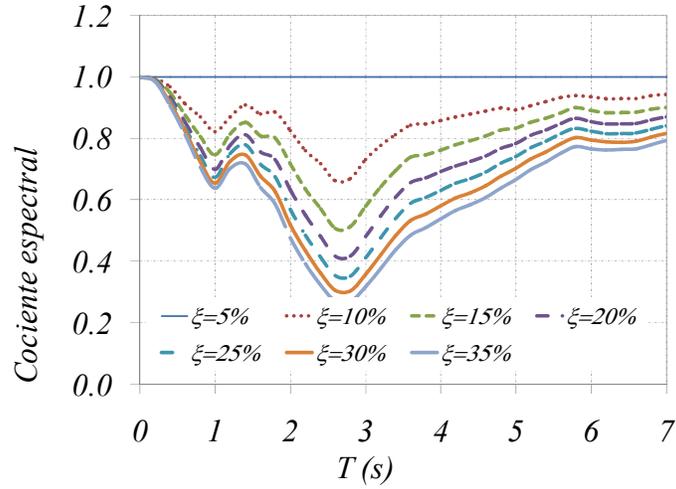


Figura 4.54 Cocientes espectrales para la zona E para diferentes valores de porcentaje de amortiguamiento crítico

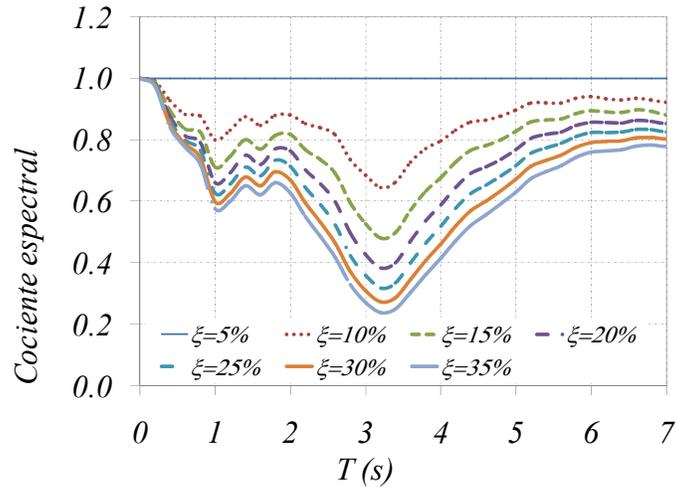


Figura 4.55 Cocientes espectrales para la zona F para diferentes valores de porcentaje de amortiguamiento crítico

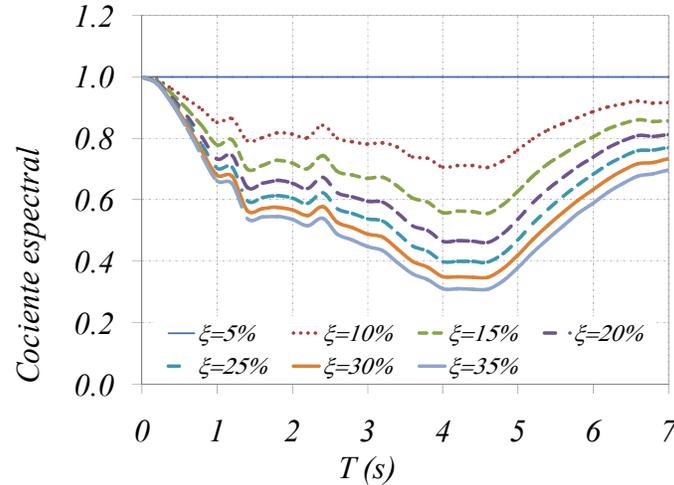


Figura 4.56 Cocientes espectrales para la zona G para diferentes valores de porcentaje de amortiguamiento crítico

4.3.2 Expresión matemática propuesta para el factor de amortiguamiento β_v

Los cocientes espectrales de las figuras 4.50 a 4.56 se ajustaron a una expresión matemática mediante el método de mínimos cuadrados. El factor de reducción que resulta está dado por una función envolvente que depende de tres parámetros principales: el periodo fundamental del suelo, el periodo estructural y el porcentaje de amortiguamiento adicional en la estructura. La función propuesta para el factor de amortiguamiento es:

$$\beta_v = \begin{cases} 1 - \left[1 - \frac{1}{F_a T_a} \left(\sqrt{\frac{0.05}{\zeta}} \right)^\lambda \right] T_o & ; \text{ si } T_o \leq F_a T_a \\ \left(\sqrt{\frac{0.05}{\zeta}} \right)^\lambda & ; \text{ si } F_a T_a < T_o \leq F T_b \\ 1 + \left[\left(\sqrt{\frac{0.05}{\zeta}} \right)^\lambda - 1 \right] \times \left(\frac{T_b}{T_o} \right)^\varepsilon & ; \text{ si } T_o > F T_b \end{cases} \quad (4.19)$$

donde T_o es el periodo estructural, ζ es el porcentaje de amortiguamiento crítico efectivo de la estructura, T_b es el periodo donde termina la meseta del espectro de diseño, y λ , ε y F son parámetros que dependen del tipo de terreno y se presentan en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Valores de los parámetros λ , ε , F_a y F_b

Zona	λ	ε	F_a	F_b
A	0.80	0.80	2.50	2.5
B	0.90	0.20	1.90	1.0
C	0.90	0.30	1.20	1.0
D	1.00	1.20	1.70	1.0
E	1.00	1.80	1.70	1.0
F	1.10	3.00	2.00	1.0
G	1.00	4.00	3.5	1.2

Al igual que para el caso de los disipadores histeréticos, la ecuación para determinar el factor de reducción por la presencia de disipadores viscosos lineales en la estructura, queda expresada como función del periodo estructural, del porcentaje de amortiguamiento crítico efectivo, así como del periodo del suelo de cada zona en particular. Debe decirse que el amortiguamiento crítico efectivo es la suma del amortiguamiento que proporciona la estructura más el que proporcionan los disipadores de tipo viscoso (calculado con la expresión 3.16).

En las figs 4.57 a 4.63 se muestra el ajuste de la función propuesta para los factores de reducción β_v correspondientes a las siete zonas para valores de porcentaje de amortiguamiento crítico de 10, 15, 20, 25, 30 y 35%.

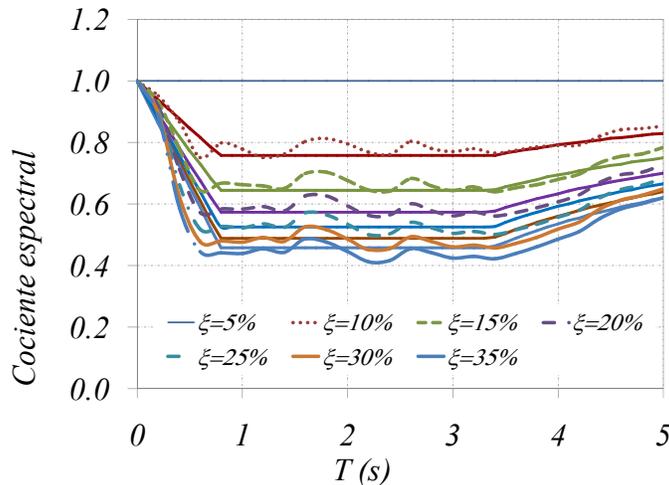


Figura 4.57. Ajustes para la zona A para diferentes valores de porcentaje de amortiguamiento crítico

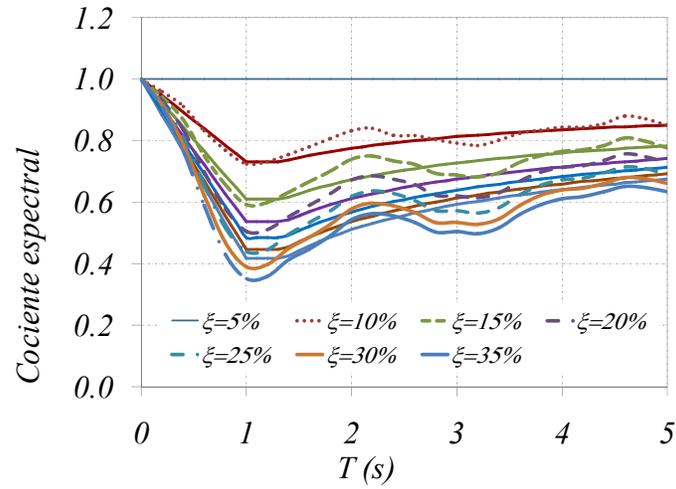


Figura 4.58. Ajustes para la zona B para diferentes valores de porcentaje de amortiguamiento crítico

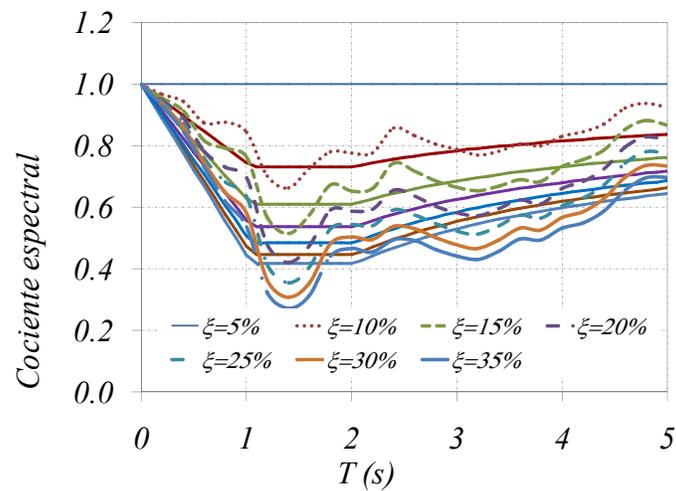


Figura 4.59. Ajustes para la zona C para diferentes valores de porcentaje de amortiguamiento crítico

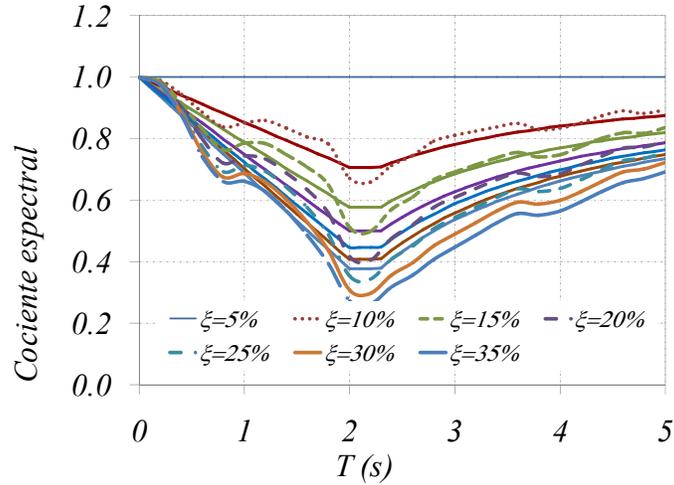


Figura 4.60. Ajustes para la zona D para diferentes valores de porcentaje de amortiguamiento crítico

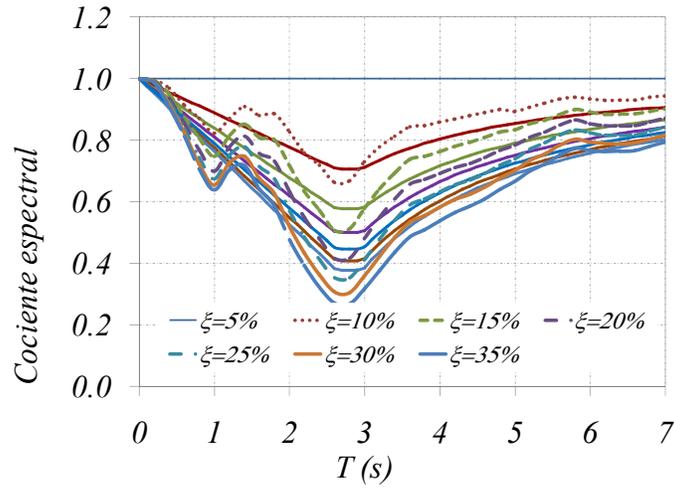


Figura 4.61. Ajustes para la zona E para diferentes valores de porcentaje de amortiguamiento crítico

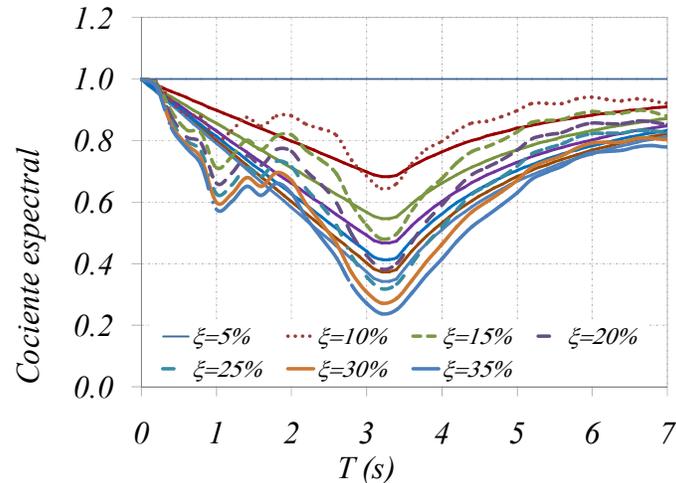


Figura 4.62. Ajustes para la zona F para diferentes valores de porcentaje de amortiguamiento crítico

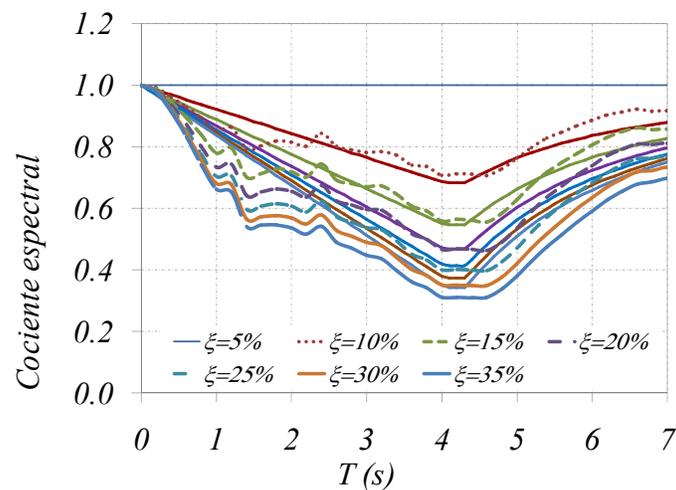


Figura 4.63. Ajustes para la zona G para diferentes valores de porcentaje de amortiguamiento crítico

Como puede verse, tanto para sistemas con disipadores de tipo histerético como de tipo viscoso lineal, la expresión matemática que se propone para la reducción de las ordenadas espectrales es relativamente simple y depende de parámetros que se pueden conocer o controlar de manera adecuada durante el proceso de diseño de la estructura. Esta simplificación tiene la ventaja de que la ecuación se puede utilizar de manera directa y sin necesidad de conocer parámetros que en algunas ocasiones quedan fuera del alcance del ingeniero estructurista teniendo por consecuencia que suponer o inferir ciertas propiedades ya sea del terreno, o bien del dispositivo disipador.

CAPÍTULO 5

FACTORES DE CORRECCIÓN DE LA ENERGÍA PARA CADA TIPO DE DISIPADOR

Se ha comentado que si no se excede la distorsión permisible, entonces la estructura básica tendrá un comportamiento elástico y por lo tanto la cantidad de energía que desarrolla cada resorte cuando se deforma junto con la estructura para el caso de estructuras con disipadores de tipo histerético se puede estimar mediante la siguiente expresión (ver ecuación 2.2):

$$E_d = \frac{1}{2} \eta K_b (dr_{\max})^2 \quad (5.3)$$

y para estructuras con disipadores de tipo viscoso se tiene (ver ecuación 3.2):

$$E_d^i = \frac{1}{2} \eta K_c \cos^2(\theta) (dr_{\max}^i)^2 \quad (5.4)$$

donde dr_{\max} es el desplazamiento relativo máximo del entrepiso correspondiente, y θ es el ángulo de inclinación de la diagonal en el entrepiso.

Sin embargo la cantidad de energía efectiva que deberá tomar el disipador dependerá tanto de las características del movimiento sísmico como de las propiedades dinámicas de la estructura, de tal forma que la energía calculada con las expresiones anteriores debe multiplicarse por un factor de corrección cuya ecuación se determinó en esta tesis a partir del análisis de diferentes sistemas estructurales desplantados en tres tipos de terreno: terreno duro, terreno medio y terreno blando.

Los sistemas estructurales corresponden a edificios regulares en planta y elevación con 4, 6, 8, 10 y 12 niveles formados por marcos de concreto reforzado y conectados mediante un sistema de piso de losa maciza de 12 [cm] de espesor. Cada estructura cuenta con 4 crujías en la dirección X y 3 crujías en la dirección Y con 5.0 [m] de claro entre cada crujía. La altura de los entrepisos es de 4.0 [m] para el primer nivel y de 3.5 [m] para el resto de los entrepisos.

Las estructuras se consideran con uso de oficinas cuyas acciones de diseño se listan a continuación.

Carga muerta en entresijos			Carga muerta en azotea		
Muros divisorios	100	kg/m ²	Relleno	180	kg/m ²
Acabados en piso	80	kg/m ²	Impermeabilización	100	kg/m ²
Instalaciones	20	kg/m ²	Instalaciones	20	kg/m ²
Plafón	20	kg/m ²	Plafón	20	kg/m ²
Sobrecarga reglamento	40	kg/m ²	Sobrecarga reglamento	40	kg/m ²
Total	260	kg/m ²	Total	360	kg/m ²

Carga muerta en entresijos			Carga muerta en azotea		
Carga viva máxima	250	kg/m ²	Carga viva máxima	100	kg/m ²
Carga viva accidental	180	kg/m ²	Carga viva accidental	70	kg/m ²
Carga viva media	200	kg/m ²	Carga viva media	15	kg/m ²

Se consideró un concreto estructural tipo 1 con una resistencia a la compresión $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ y un módulo de elasticidad $E_c = 14000\sqrt{f'_c} = 221359.4 \text{ kg/cm}^2$, el acero de refuerzo se consideró con una resistencia $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ y un módulo de elasticidad de $E_s = 2000000 \text{ kg/cm}^2$.

Las trabes de las estructuras tienen una sección transversal de 50x25 [cm] constantes en todos los casos. Para las secciones transversales de las columnas se hicieron dos arreglos: en el primero se mantuvo constante su sección transversal en toda la altura de la estructura. Esto obedece a que hoy en día las nuevas tendencias en la construcción buscan optimizar los tiempos de ejecución de las obras lo cual se logra al estandarizar las dimensiones de los diferentes elementos estructurales.

El segundo caso contempla una reducción en la sección transversal de las columnas respecto a la altura de las edificaciones. Esta técnica de diseño era muy frecuente en el pasado y hoy en día existen estructuras en operación en las cuales se pueden apreciar estas características. Por tal motivo era necesario buscar que la metodología que aquí se propone fuera válida también para este tipo de estructuras a fin de que pudiera aplicarse a una eventual rehabilitación para una estructura existente.

Para evaluar el comportamiento de los sistemas estructurales, cada uno de los modelos se analizó "paso a paso" con veinte registros sísmicos reales tomados de la misma base de datos que se utilizó para determinar los factores de reducción de los espectros de diseño en el capítulo 4. En este caso los registros reales se escalan de tal forma que su correspondiente espectro de respuesta tuviera pseudo aceleraciones similares a la del espectro de diseño del Anexo A de las NTC-Sismo-2004 correspondiente a un terreno con periodo fundamental de $T_S = 0.5 \text{ [s]}$ en el caso de terreno duro, $T_S = 1.0 \text{ [s]}$ en el caso de terreno medio y $T_S = 2 \text{ [s]}$ en el caso de terreno blando.

En la figura 5.1 se muestra una comparación, para cada tipo de terreno, entre el espectro de diseño calculado con las fórmulas del anexo A y los espectros de respuesta para cada uno de los sismos utilizados en la validación de la metodología propuesta.

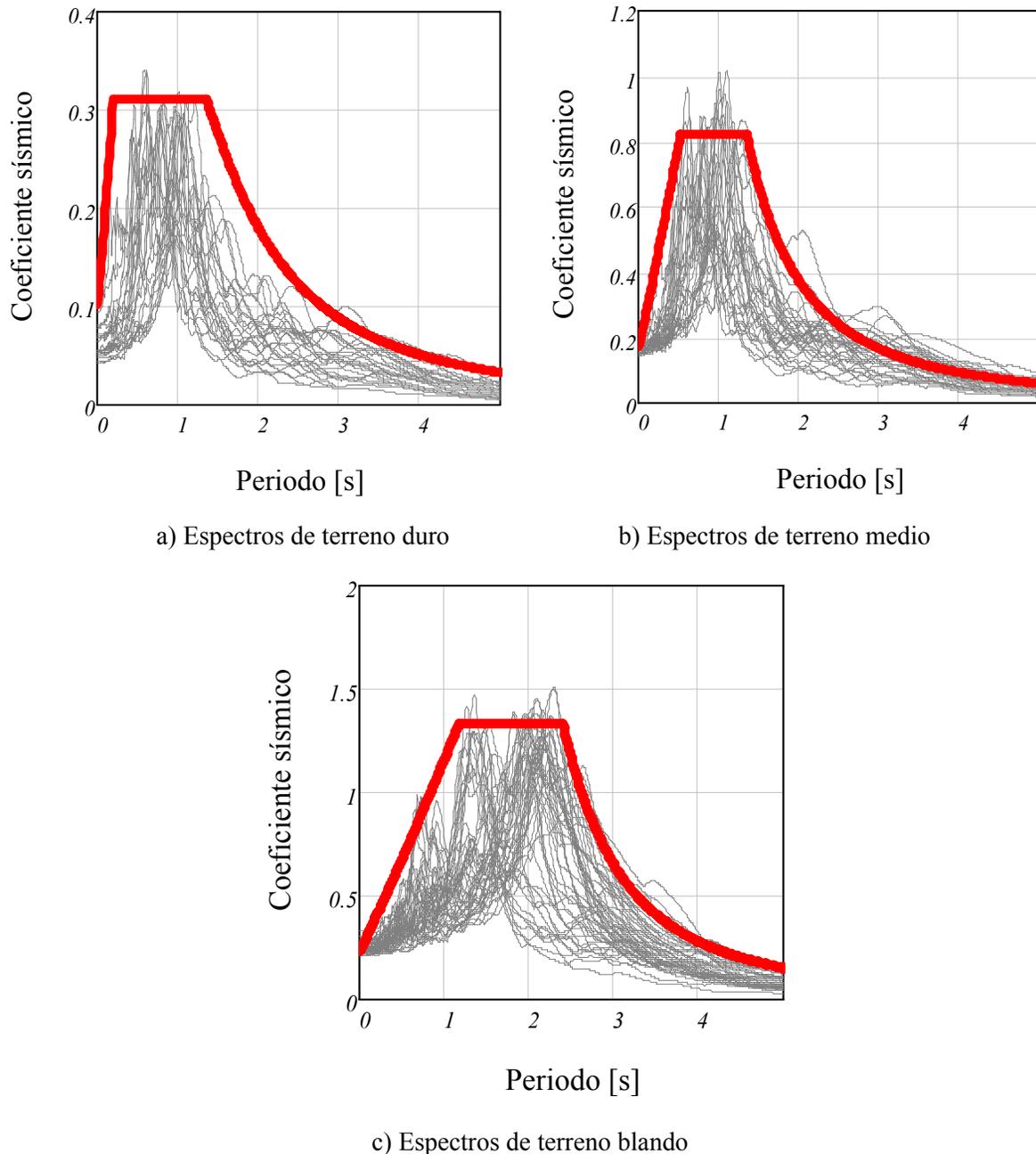


Figura 5.1. Espectros de respuesta de los sismos utilizados para la calibración de la metodología

Cada uno de los sistemas estructurales se analizó para que cumpliera con diferentes valores permisibles de la distorsión de entrepiso, ($\square_{permisible}$). En la tabla 5.1 se muestran las diferentes condiciones de desplazamiento permisible de los casos analizados, en total se analizaron 29 casos.

Tabla 5.1. Distorsiones permisibles para los casos analizados

Terreno	Niveles	Distorsión permisible		
Duro	4	0.004		
	6	0.004	0.006	
	8	0.004	0.006	
Medio	4	0.004	0.006	
	6	0.004	0.006	0.008
	8	0.004	0.006	0.008
	10	0.004	0.006	0.008
Blando	6	0.004	0.006	0.008
	8	0.004	0.006	0.008
	10	0.004	0.006	0.008
	12	0.004	0.006	0.008

Para encontrar los diferentes factores de corrección, correspondiente a cada caso en particular, se llevó a cabo un proceso de prueba y error en el cual se proponía primero un factor de corrección (generalmente con un valor unitario al inicio) con el cual se calculaban las propiedades de los disipadores (siguiendo la metodología propuesta en el capítulo 2 ó 3 mediante el análisis modal de una estructura equivalente); posteriormente el sistema estructura-disipador se excitaba en su base con veinte movimientos sísmicos correspondientes al tipo de terreno en donde se considerara desplantada la estructura.

Las distorsiones de entrepiso obtenidas mediante los análisis "paso a paso" se comparaban con las distorsiones de entrepiso obtenidas del análisis modal de su correspondiente estructura equivalente. A continuación se proponía un nuevo factor de corrección cuyo valor dependía de si las distorsiones de la estructura equivalente eran mucho mayores o mucho menores que las que resultaban de los diferentes análisis "paso a paso". El proceso se repetía hasta que se encontrara un valor de corrección de la energía para el cual las distorsiones de entrepiso de los análisis paso a paso quedaran apenas cubiertas por las distorsiones obtenidas del análisis modal de las estructuras equivalentes con lo cual se definía el factor de corrección de la energía (F_{EH} , para disipadores de tipo histerético, y F_{EV} , para disipadores de tipo viscoso) para ese sistema estructura-disipador en particular.

Los resultados de los análisis paso a paso para los disipadores de tipo histerético se muestran en las figuras 5.2 a 5.12. El resultado del análisis modal de la correspondiente estructura equivalente se muestra con línea gruesa (ver figura 2.4).

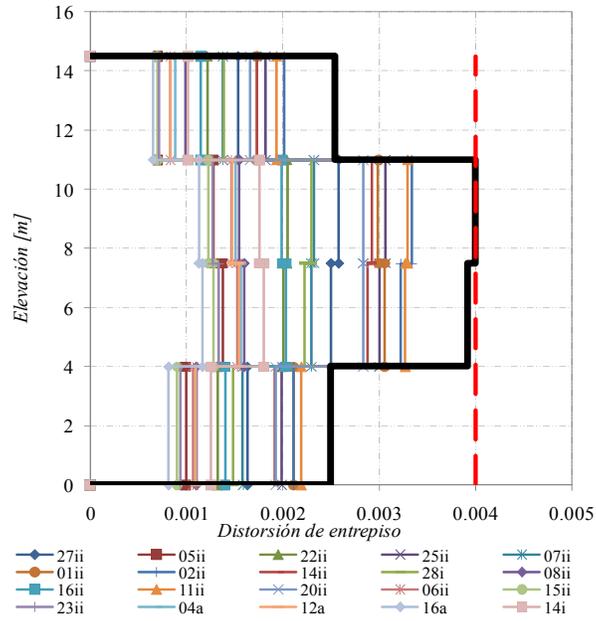


Figura 5.2. Resultados de los análisis paso a paso. Estructura de 4 niveles en terreno duro con disipadores histeréticos. Distorsión permisible 0.004

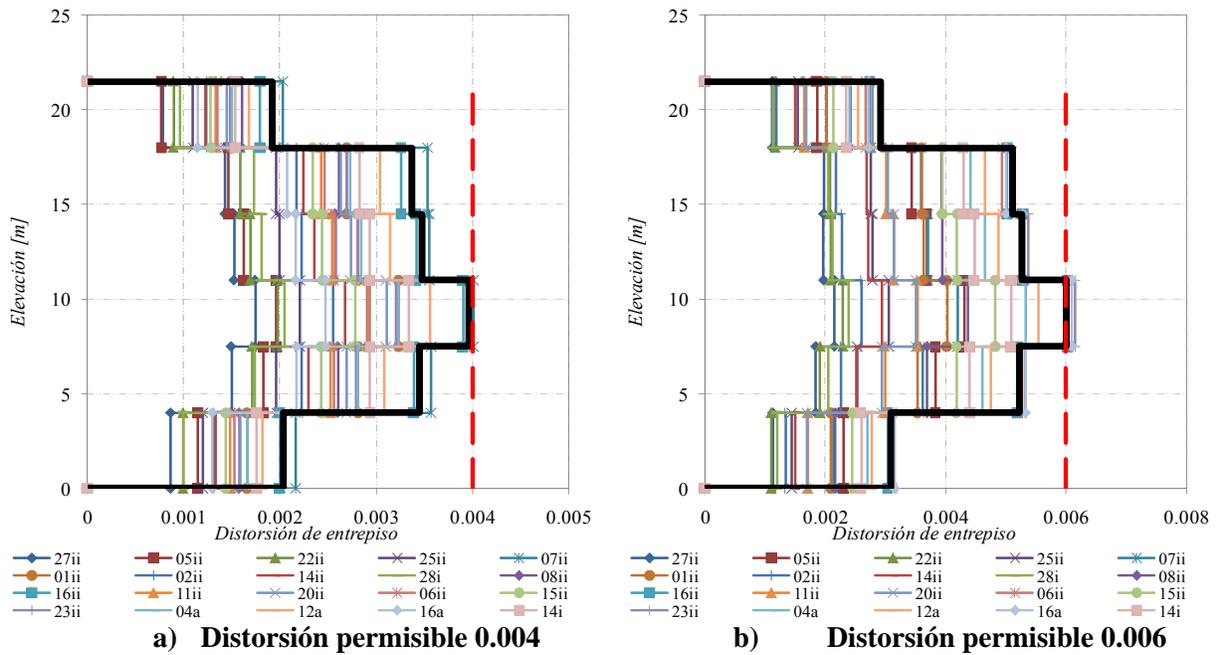


Figura 5.3. Resultados de los análisis paso a paso. Estructura de 6 niveles en terreno duro con disipadores histeréticos

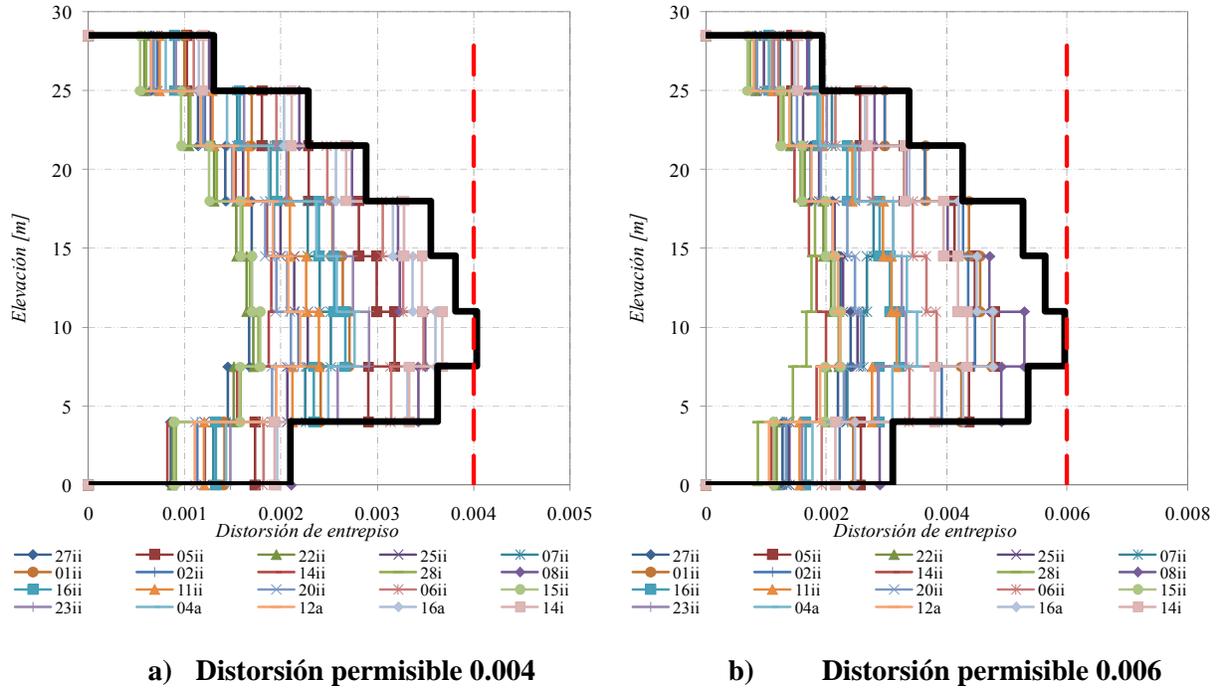


Figura 5.4. Resultados de los análisis paso a paso. Estructura de 8 niveles en terreno duro con disipadores histeréticos

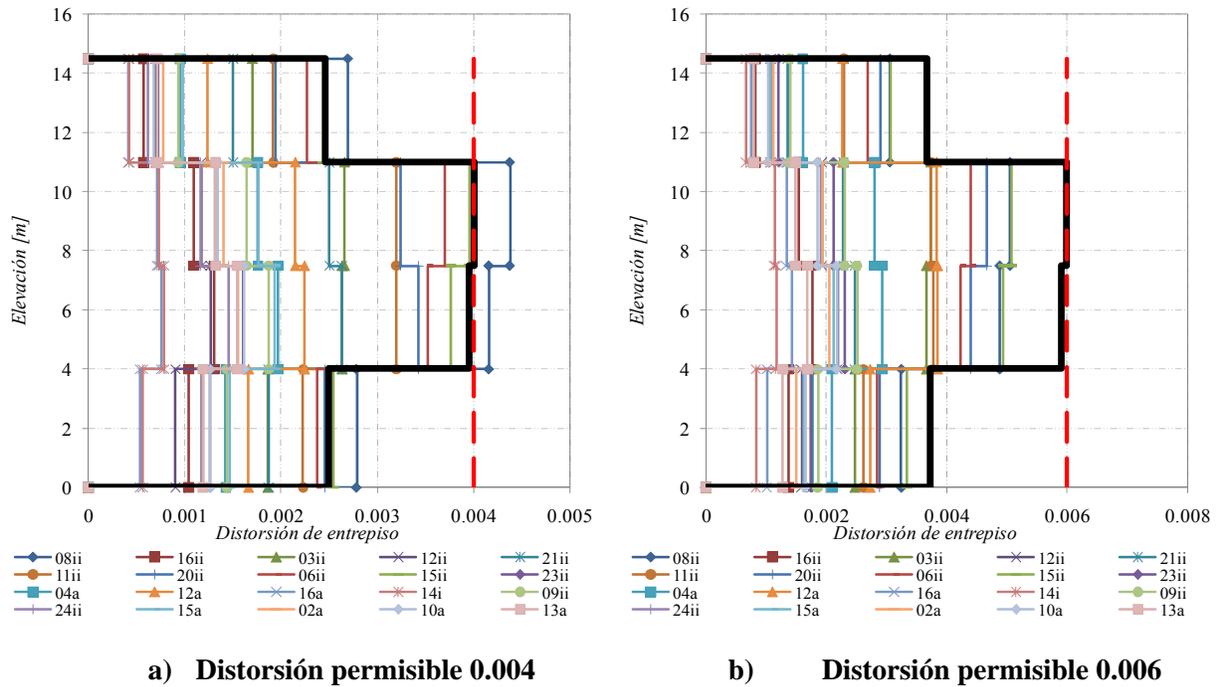


Figura 5.5. Resultados de los análisis paso a paso. Estructura de 4 niveles en terreno medio con disipadores histeréticos

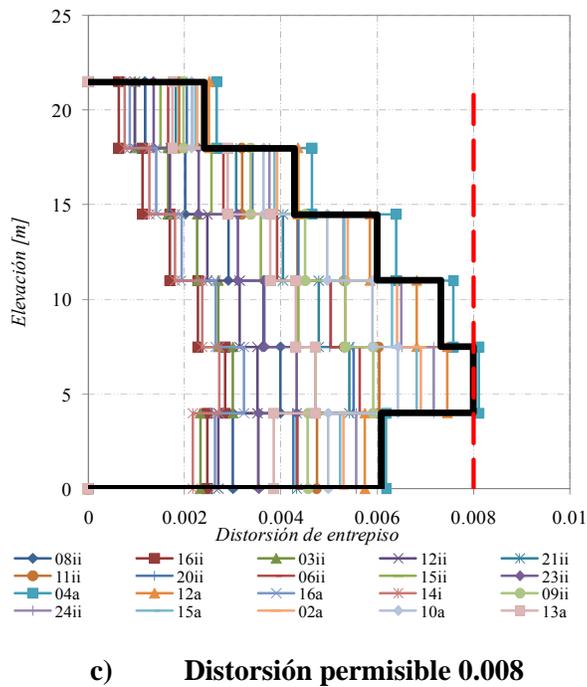
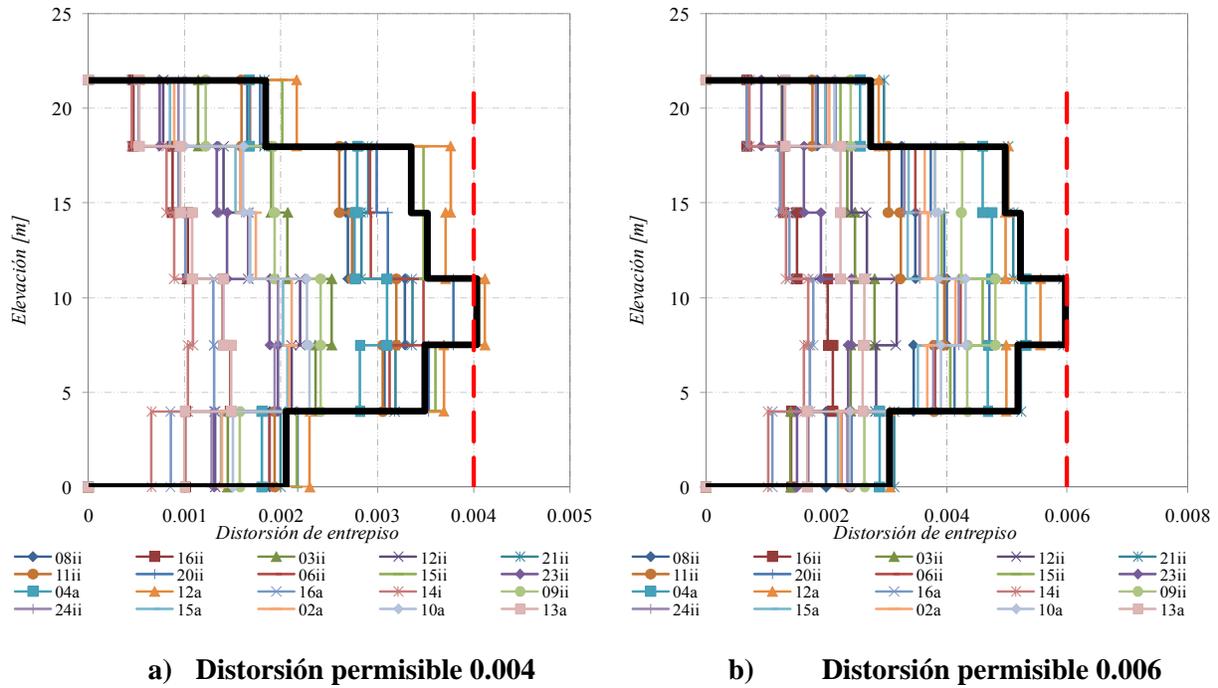
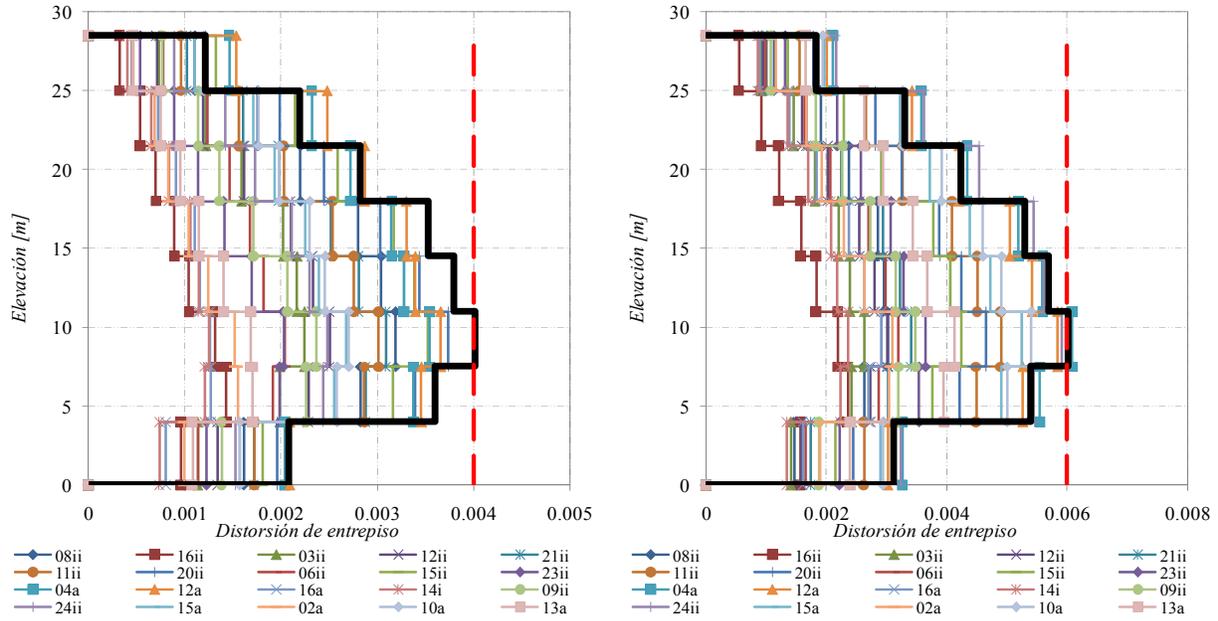
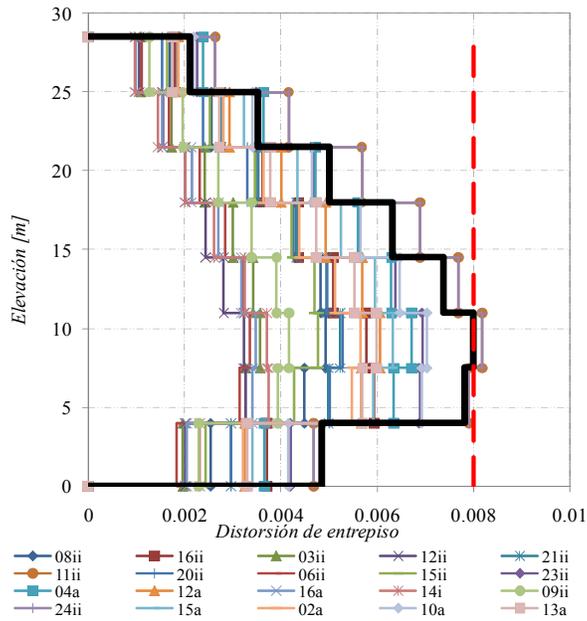


Figura 5.6. Resultados de los análisis paso a paso. Estructura de 6 niveles en terreno medio con disipadores histeréticos



a) Distorsión permisible 0.004

b) Distorsión permisible 0.006



c) Distorsión permisible 0.008

Figura 5.7. Resultados de los análisis paso a paso. Estructura de 8 niveles en terreno medio con disipadores histeréticos

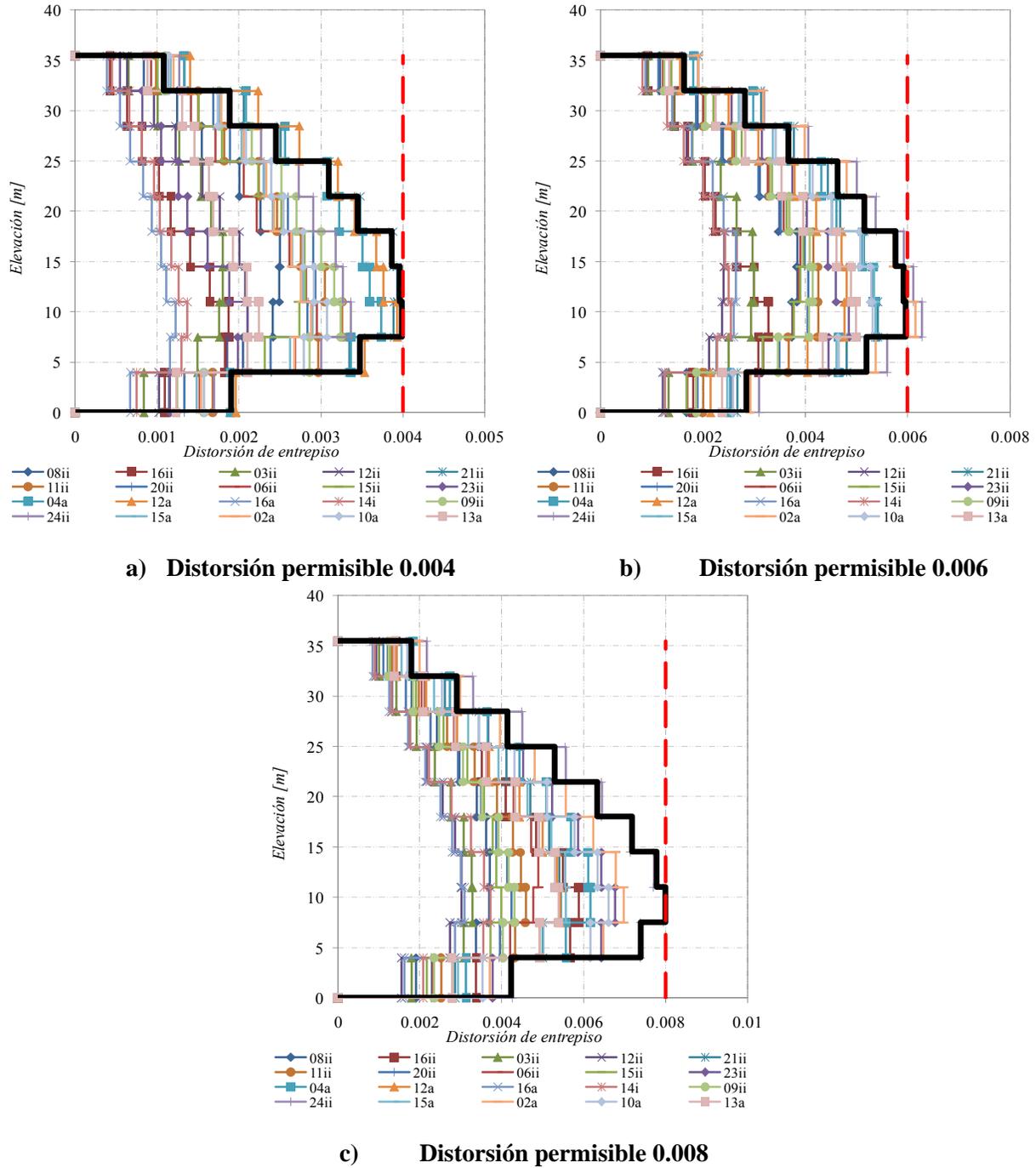
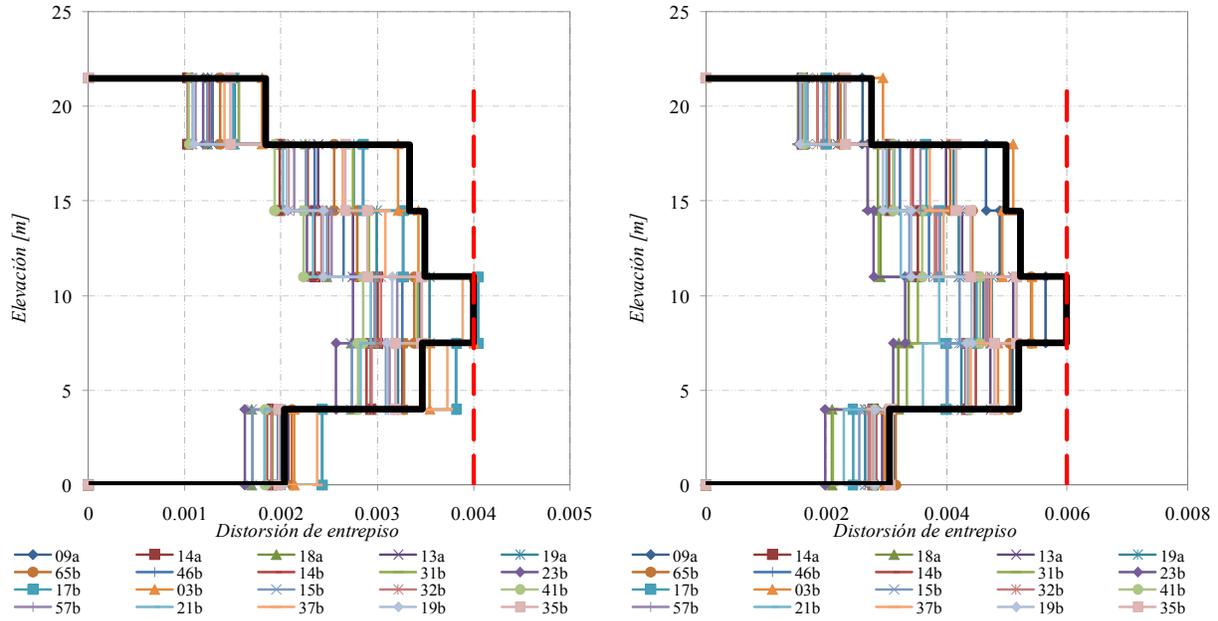
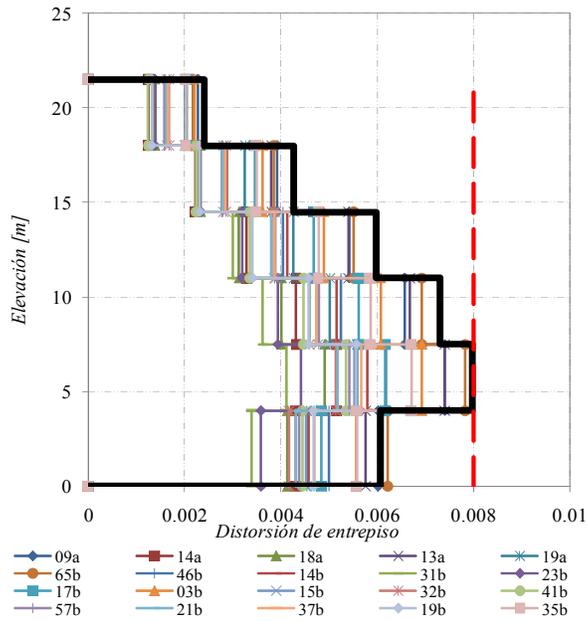


Figura 5.8. Resultados de los análisis paso a paso. Estructura de 10 niveles en terreno medio con disipadores histeréticos



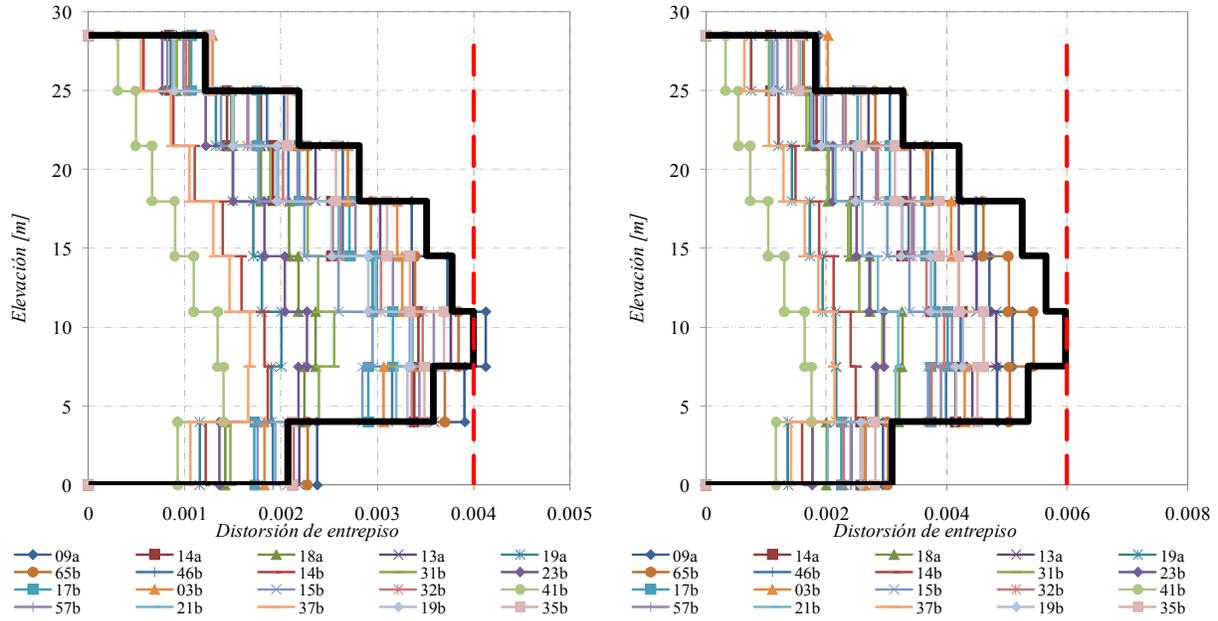
a) Distorsión permisible 0.004

b) Distorsión permisible 0.006



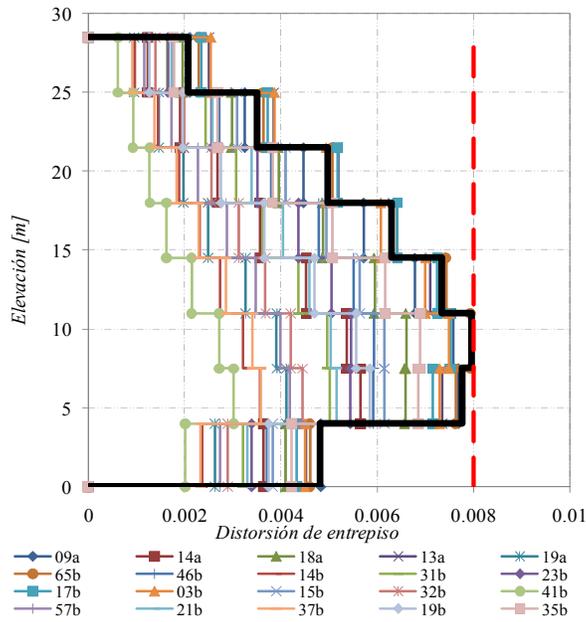
c) Distorsión permisible 0.008

Figura 5.9. Resultados de los análisis paso a paso. Estructura de 6 niveles en terreno blando con disipadores histeréticos



a) Distorsión permisible 0.004

b) Distorsión permisible 0.006



c) Distorsión permisible 0.008

Figura 5.10. Resultados de los análisis paso a paso. Estructura de 8 niveles en terreno blando con disipadores histeréticos

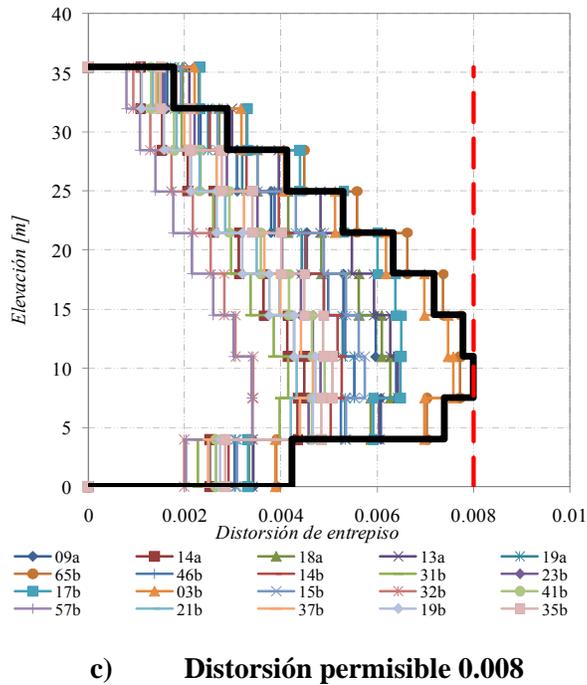
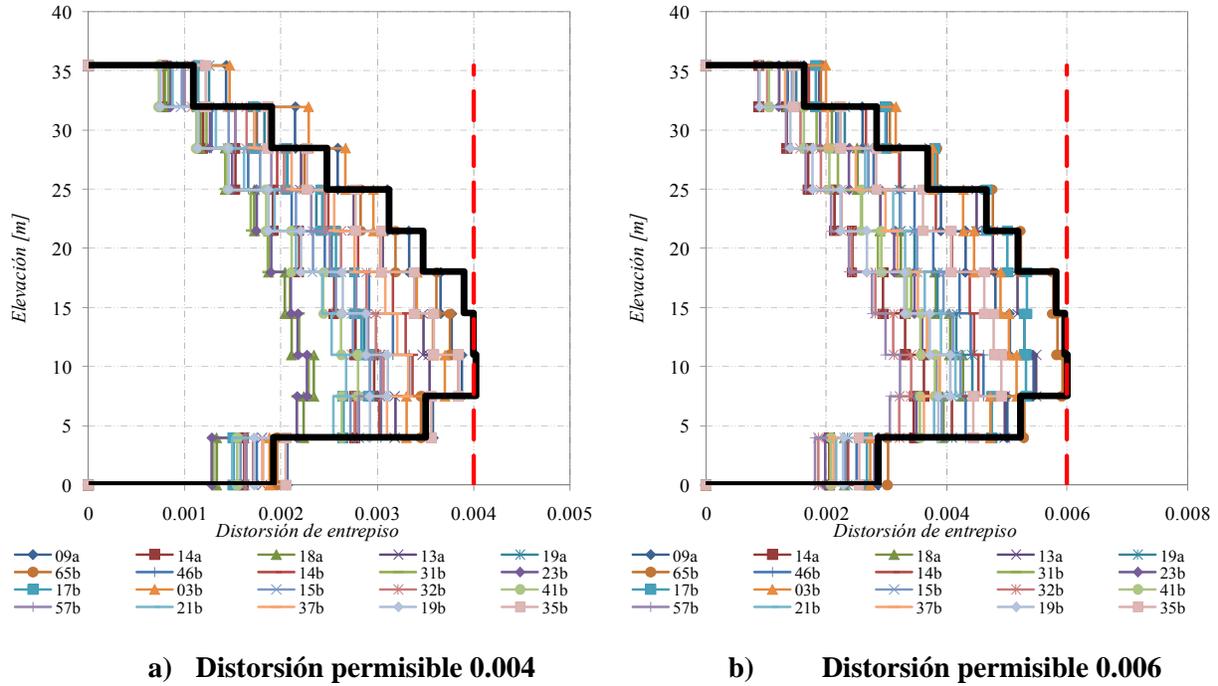


Figura 5.11. Resultados de los análisis paso a paso. Estructura de 10 niveles en terreno blando con disipadores histeréticos

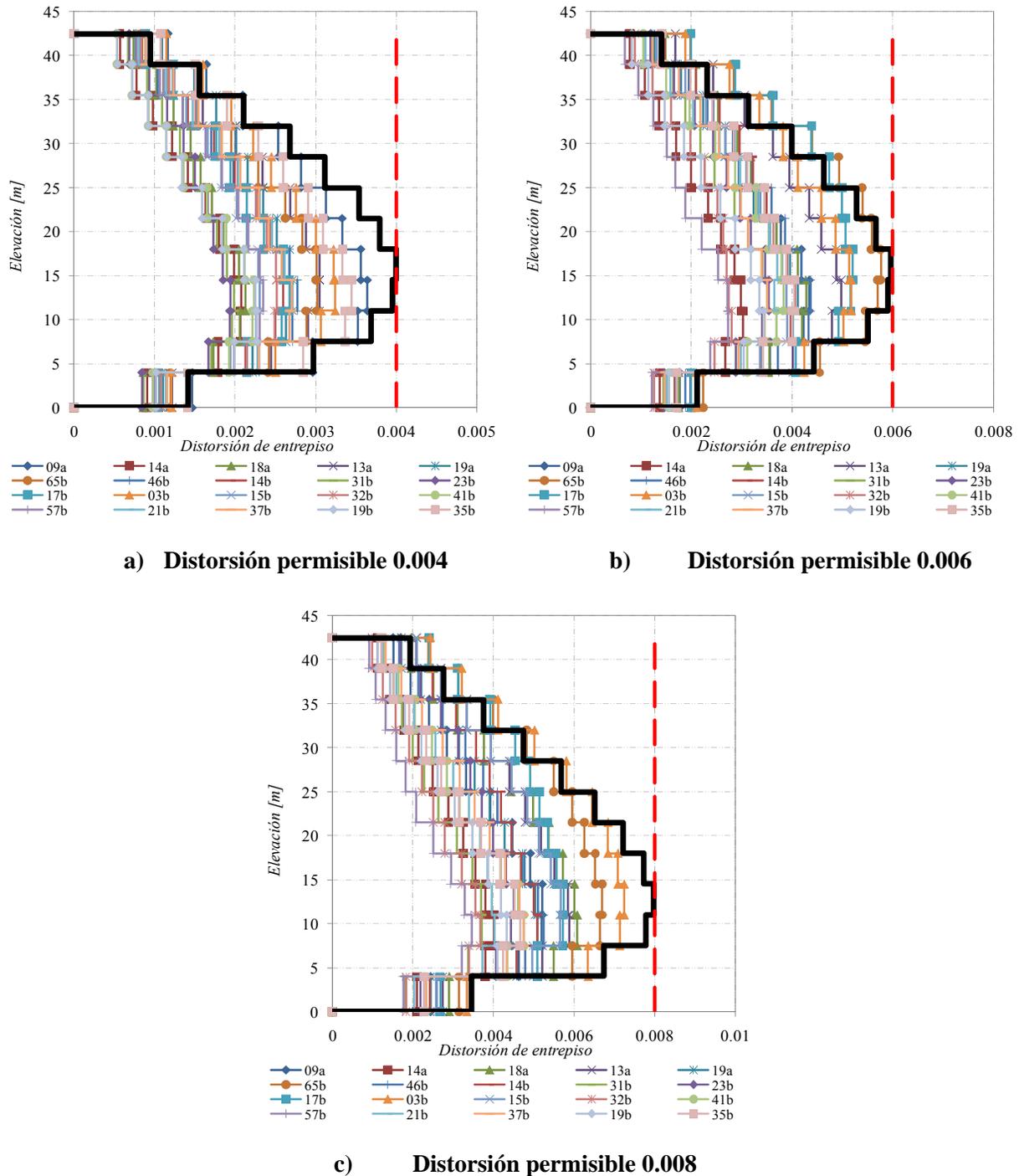


Figura 5.12. Resultados de los análisis paso a paso. Estructura de 12 niveles en terreno blando con disipadores histeréticos

Una vez que se tuvo calibrado el factor de corrección de la energía, F_{EH} , para que las distorsiones de entrepiso de los análisis paso a paso quedaran apenas cubiertas por las distorsiones obtenidas del análisis modal de las estructuras equivalentes para cada caso en particular, se formó una base de datos con las propiedades dinámicas tanto de las estructura

básicas como de las estructuras equivalentes para buscar una ecuación que describiera el comportamiento de los factores de corrección en función de las propiedades de las diferentes estructuras.

En la tabla 5.1 se muestran los valores de las propiedades dinámicas de los sistemas estructurales básicos y sus correspondientes estructuras equivalentes. Se muestran también los valores de los factores de corrección, F_{EH} , para cada una de los sistemas analizados obtenidos del proceso de prueba y error.

Tabla 5.2. Propiedades dinámicas de los sistemas básicos y equivalentes para sistemas con disipadores hysteréticos

T_S	$\square_{permissible}$	N	T_o	c_o	\square	T_{eq}	c_{eq}	F_{EH}
2	0.004	6	1.09	1.24	0.82	0.53	0.70	0.91
	0.006	6	1.09	1.24	0.55	0.61	0.78	0.81
	0.004	8	1.45	1.33	1.33	0.58	0.75	0.74
	0.006	8	1.45	1.33	0.93	0.67	0.84	0.73
	0.004	10	1.56	1.33	1.30	0.63	0.80	0.59
	0.006	10	1.56	1.33	0.91	0.73	0.89	0.47
	0.004	12	2.04	1.33	2.15	0.66	0.83	0.55
	0.006	12	2.04	1.33	1.55	0.76	0.92	0.45
	0.008	6	1.25	1.33	0.60	0.68	0.84	0.59
	0.008	8	1.49	1.33	0.77	0.74	0.90	0.52
	0.008	10	1.83	1.33	1.08	0.80	0.96	0.47
	0.008	12	2.16	1.33	1.38	0.85	1.01	0.47
1	0.004	4	0.79	0.82	0.54	0.45	0.72	0.33
	0.006	4	0.79	0.82	0.35	0.51	0.81	0.40
	0.004	6	1.09	0.82	0.94	0.50	0.79	0.36
	0.006	6	1.09	0.82	0.59	0.59	0.82	0.39
	0.004	8	1.45	0.71	1.47	0.55	0.82	0.32
	0.006	8	1.45	0.71	0.90	0.68	0.82	0.34
	0.004	10	1.56	0.61	1.36	0.62	0.82	0.33
	0.006	10	1.56	0.61	0.83	0.75	0.82	0.30
	0.008	6	1.25	0.82	0.58	0.68	0.82	0.43
	0.008	8	1.49	0.67	0.67	0.78	0.82	0.32
0.008	10	1.83	0.45	0.89	0.86	0.82	0.30	
0.5	0.004	4	0.79	0.31	0.10	0.67	0.31	0.40
	0.004	6	1.09	0.31	0.23	0.78	0.31	0.40
	0.006	6	1.09	0.31	0.07	0.97	0.31	0.30
	0.004	8	1.45	0.29	0.40	0.90	0.31	0.33
	0.006	8	1.45	0.29	0.19	1.09	0.31	0.30

Si tomamos los valores de la tabla 5.2 y se grafica el factor de corrección contra las diferentes propiedades dinámicas tanto de la estructura básica como de la estructura equivalente se tiene una distribución como la que se muestra en la figura 5.13.

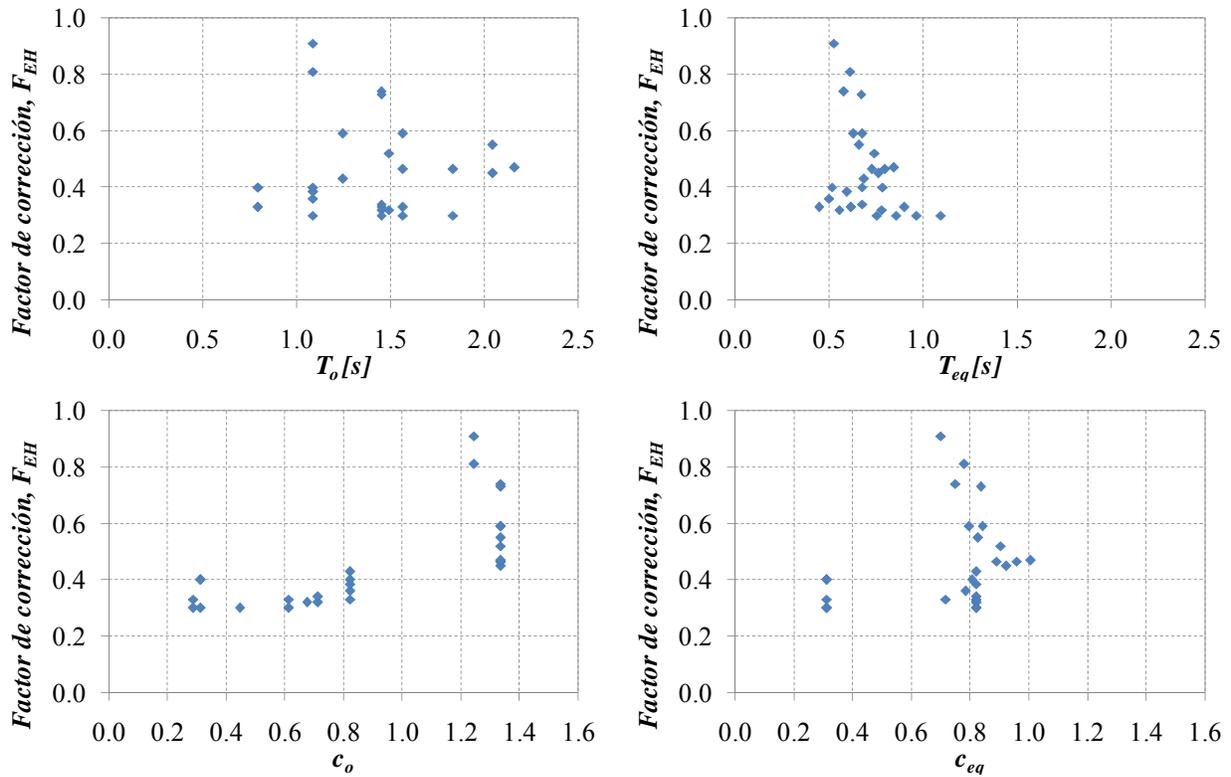


Figura 5.13. Comportamiento del factor de corrección, F_{EH} , respecto a diferentes propiedades dinámicas

De la figura 5.13 puede verse que los valores de los factores de corrección no tienen una tendencia definida "a priori", sin embargo si se hacen interactuar las diferentes propiedades dinámicas entre sí, es posible definir una variable cuyo valor exhiba un comportamiento con una tendencia definida que pueda ajustarse a una ecuación analítica.

Se encontró que la mejor manera de describir el comportamiento de los factores de corrección era a través de una variable, ψ_H , la cual está en función del periodo fundamental de la estructura básica, T_o , del periodo fundamental de la estructura equivalente, T_{eq} , y de las ordenadas espectrales correspondientes a cada periodo (c_o para la estructura básica y c_{eq} para la estructura equivalente), dicha variable tiene la forma:

$$\psi_H = \left(\frac{c_{eq}}{c_o} \right)^{\left(\frac{T_{eq}}{T_o} \right)} \quad (5.5)$$

En la figura 5.14 se muestra la variación de la variable ψ_H respecto a los valores de los factores de corrección.

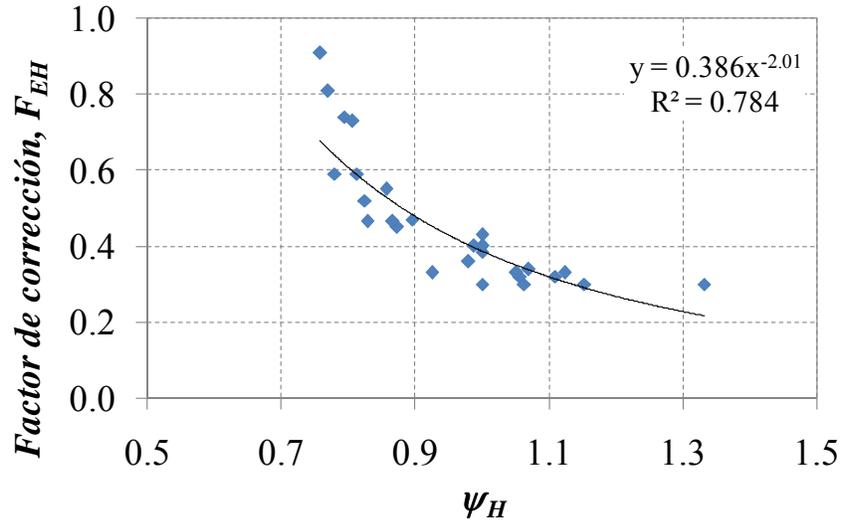


Figura 5.14. Comportamiento de la variable ψ_H para sistemas con disipadores histeréticos

De la figura 5.14 se puede ver que los diferentes factores de corrección de la energía siguen una tendencia definida cuando se les grafica contra la variable ψ_H , calculada con la ecuación (5.3). De esta manera la ecuación que describe el comportamiento del factor de corrección para los disipadores de tipo histerético se representa mediante una función exponencial cuyo ajuste a la dispersión de puntos da un coeficiente de correlación del 78% y tiene la forma:

$$F_{EH} = 0.39 \psi_H^{-2.0} \quad (5.6)$$

El procedimiento aplicado a sistemas con disipadores de tipo histerético se aplicó también a los sistemas con disipadores de tipo viscoso lineal. Los resultados de los análisis paso a paso para estas estructuras se muestran en las figuras 5.15 a 5.25. Con línea gruesa se muestra el resultado del análisis modal de la correspondiente estructura equivalente.

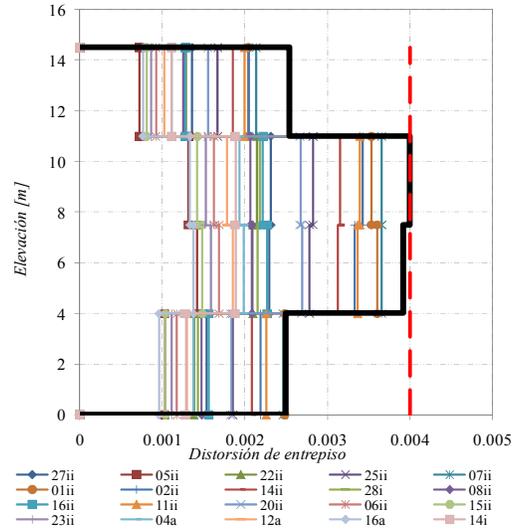
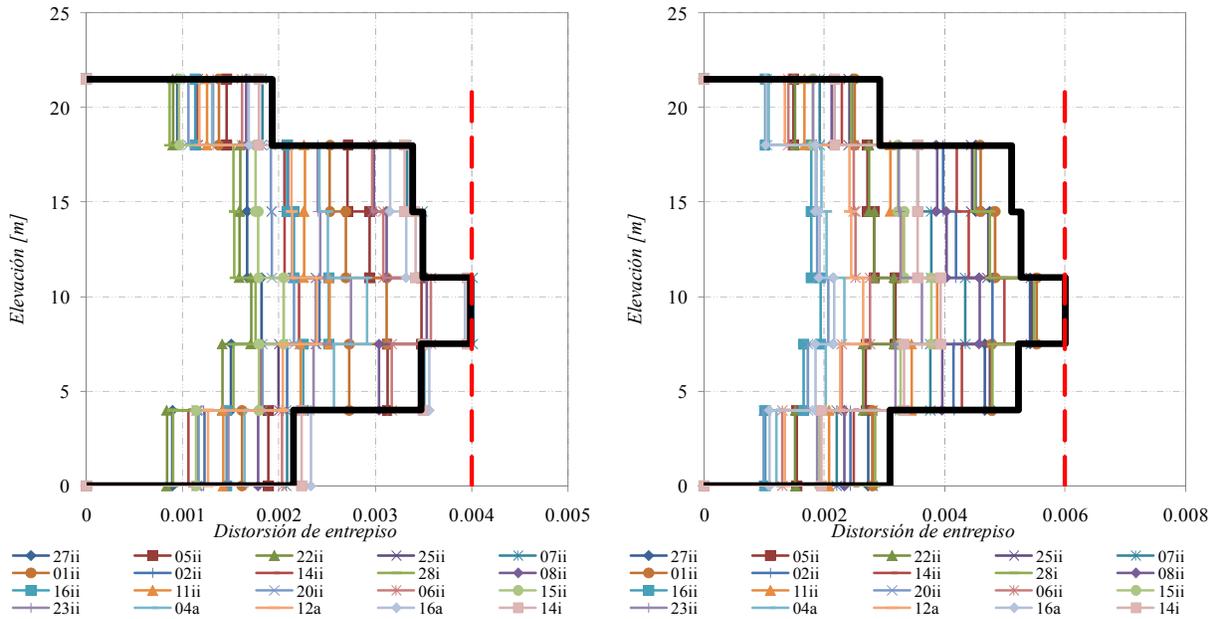


Figura 5.15. Resultados de los análisis paso a paso. Estructura de 4 niveles en terreno duro con disipadores viscosos. Distorsión permisible 0.004



a) Distorsión permisible 0.004

b) Distorsión permisible 0.006

Figura 5.16. Resultados de los análisis paso a paso. Estructura de 6 niveles en terreno duro con disipadores viscosos

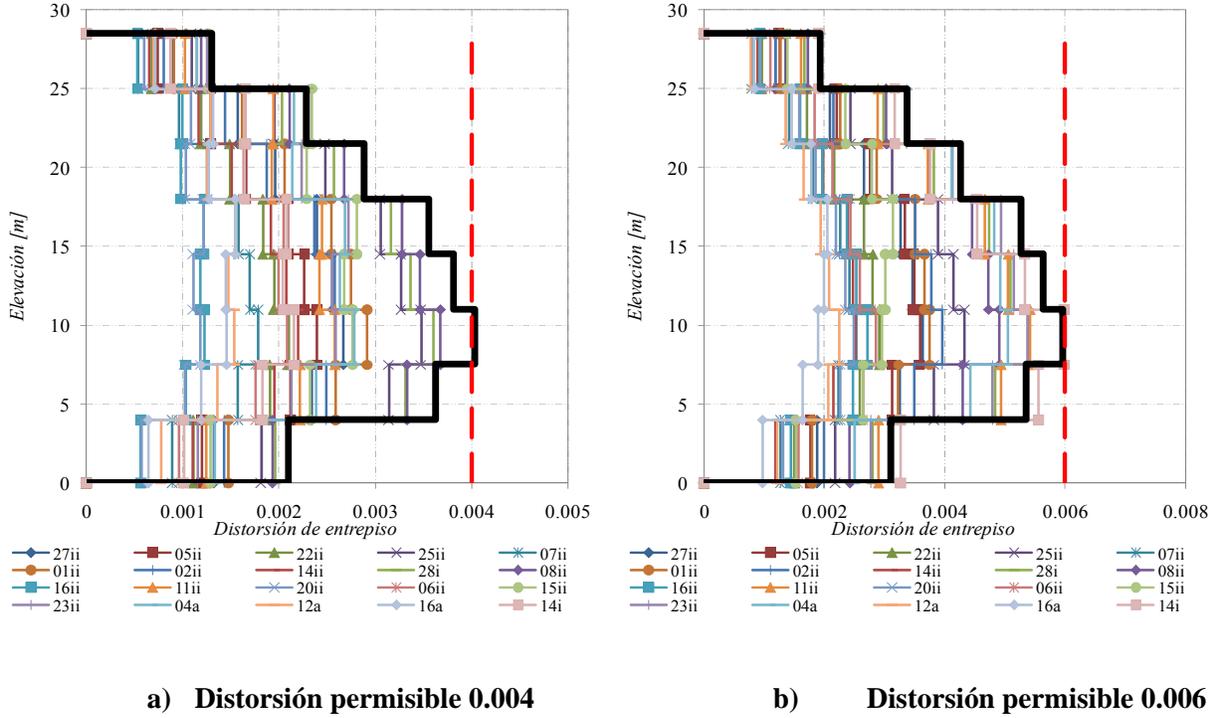


Figura 5.17. Resultados de los análisis paso a paso. Estructura de 8 niveles en terreno duro con disipadores viscosos

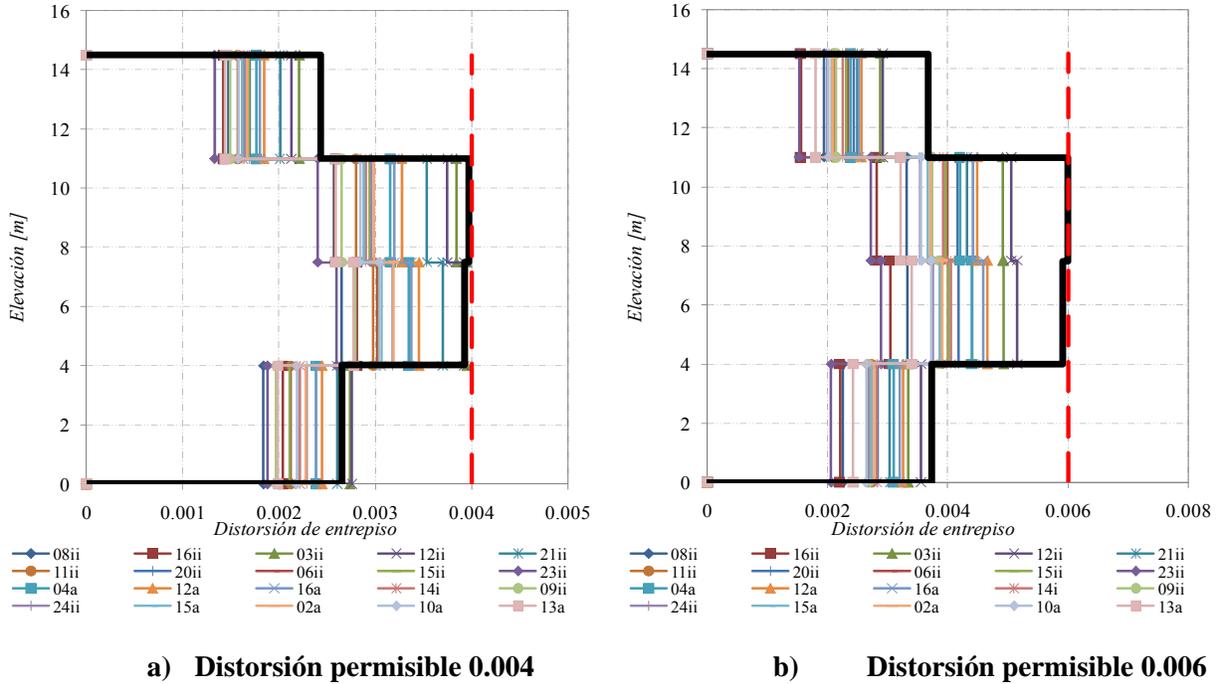


Figura 5.18. Resultados de los análisis paso a paso. Estructura de 4 niveles en terreno medio con disipadores viscosos

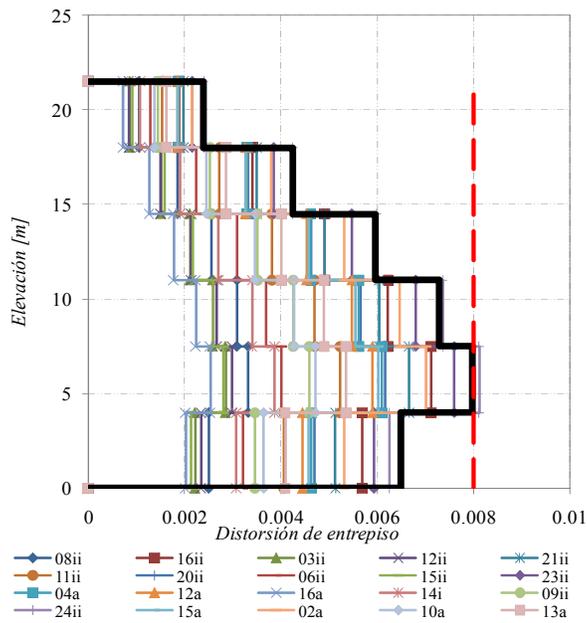
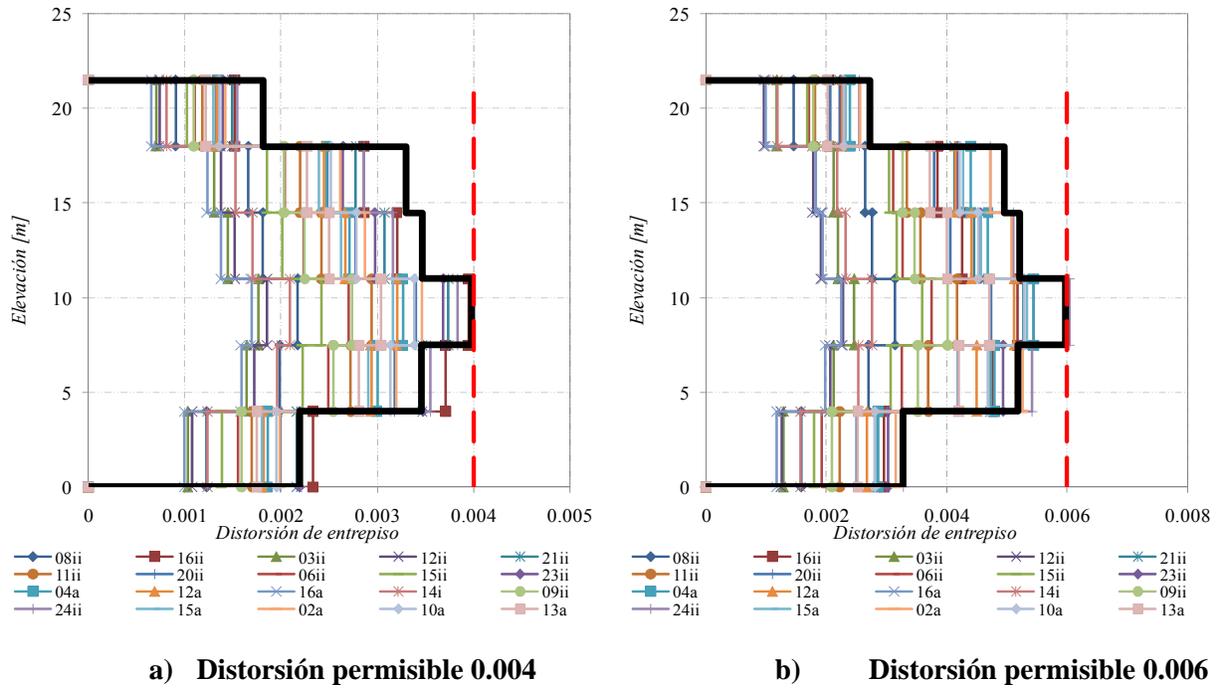


Figura 5.19. Resultados de los análisis paso a paso. Estructura de 6 niveles en terreno medio con disipadores viscosos

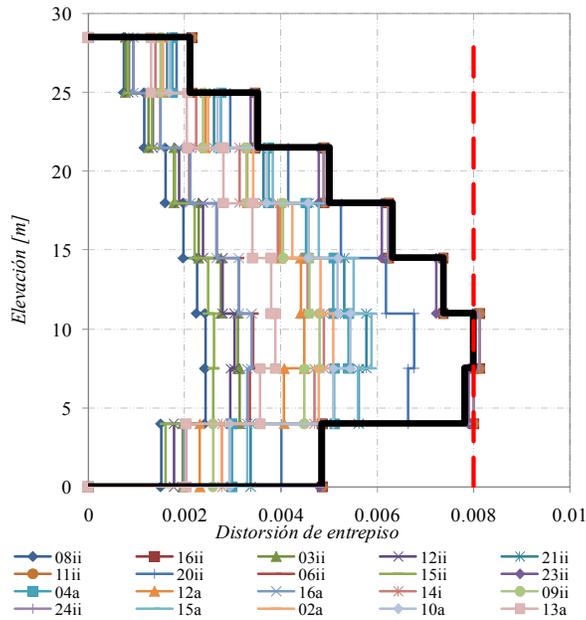
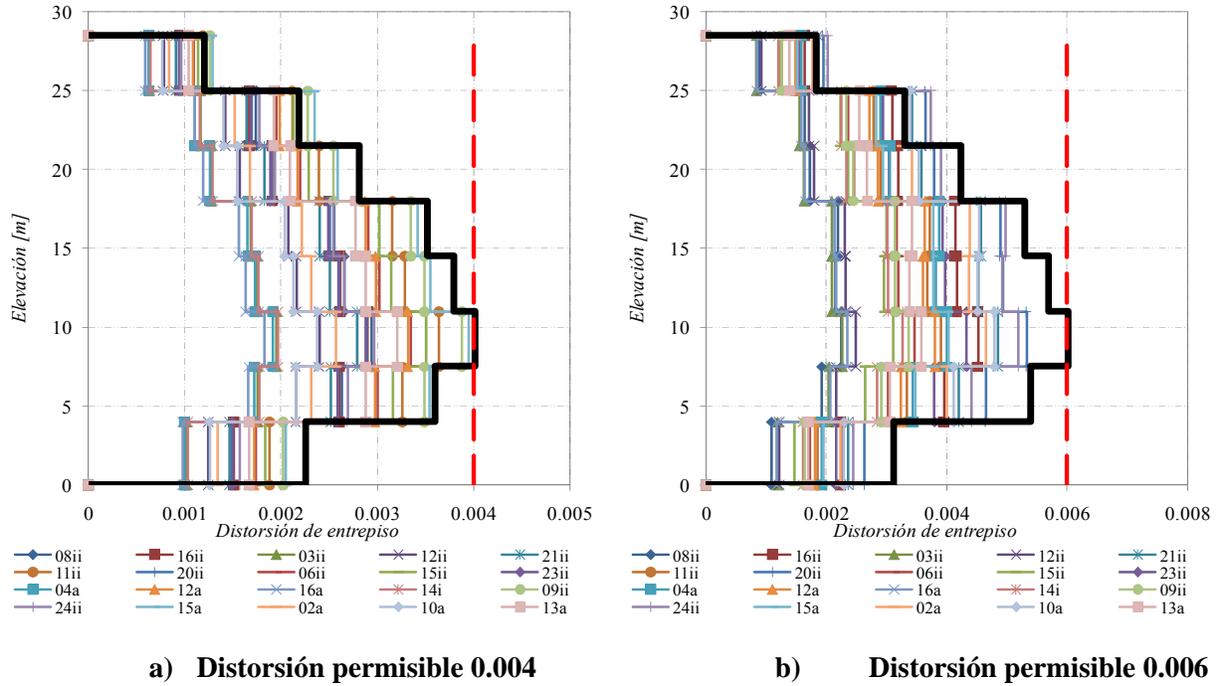
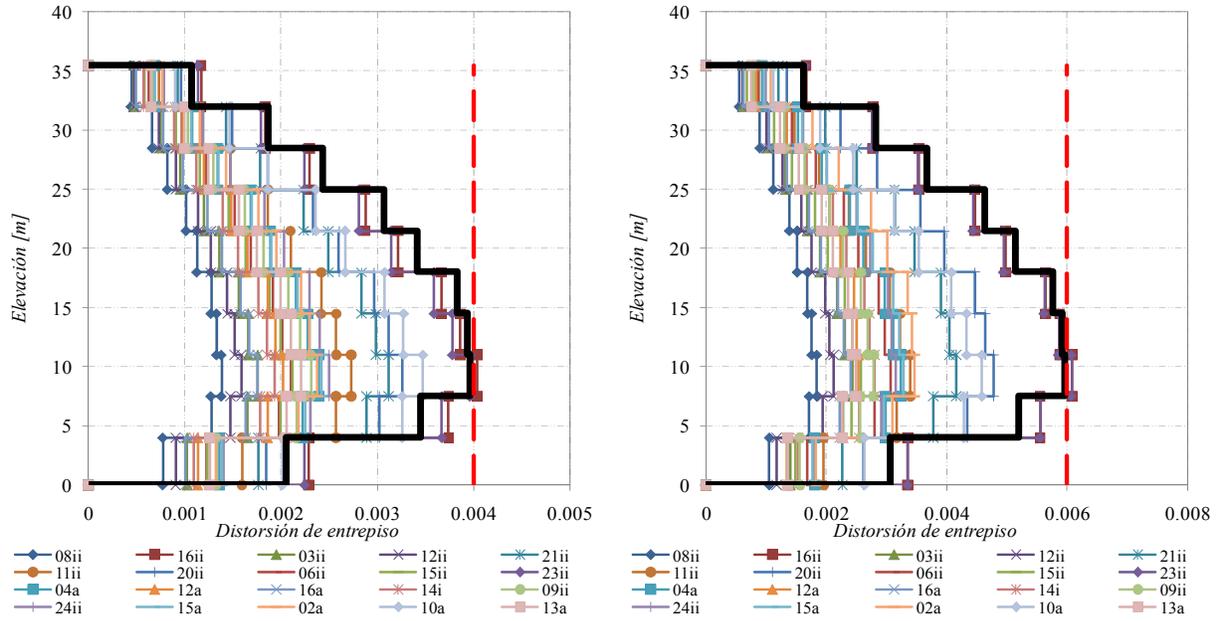
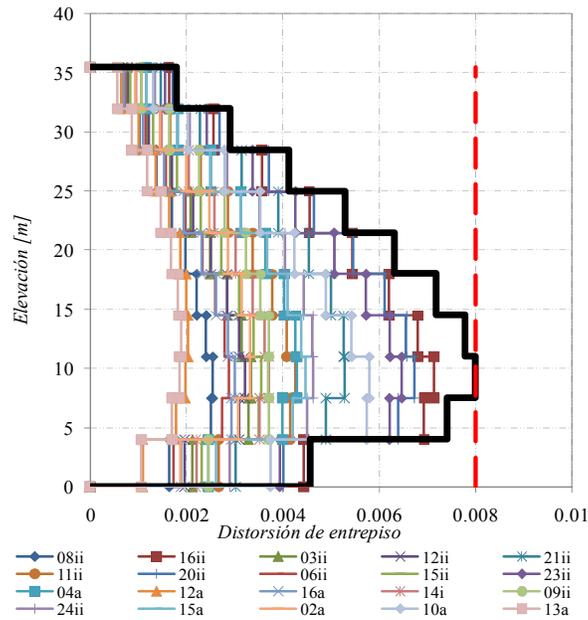


Figura 5.20. Resultados de los análisis paso a paso. Estructura de 8 niveles en terreno medio con disipadores viscosos



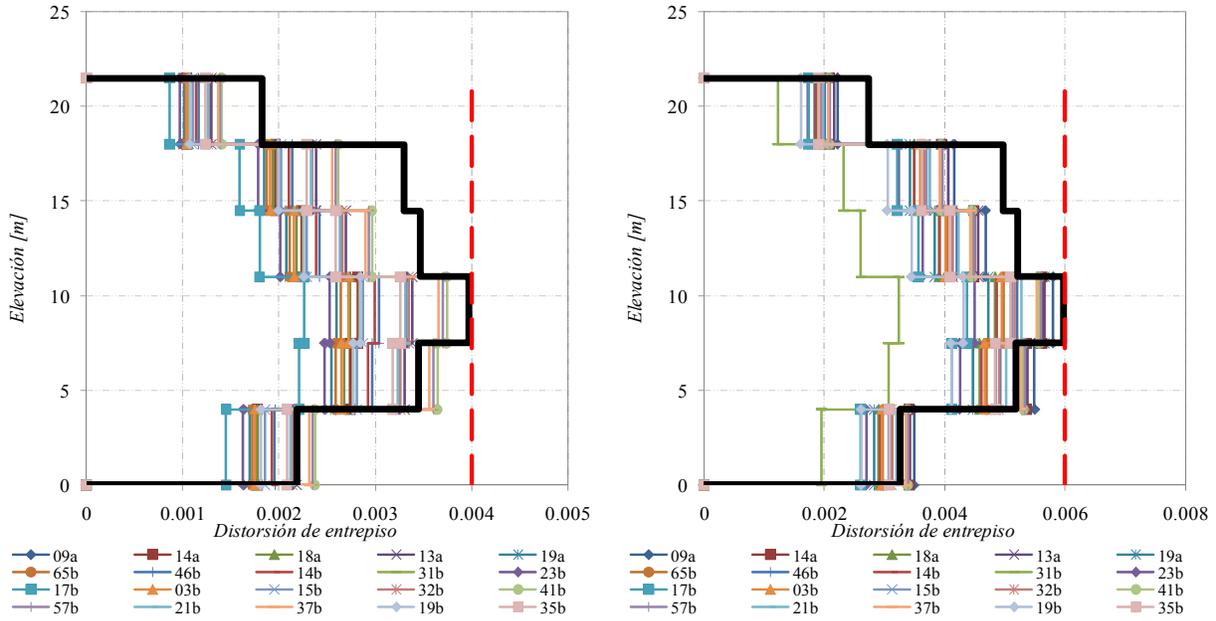
a) Distorsión permisible 0.004

b) Distorsión permisible 0.006



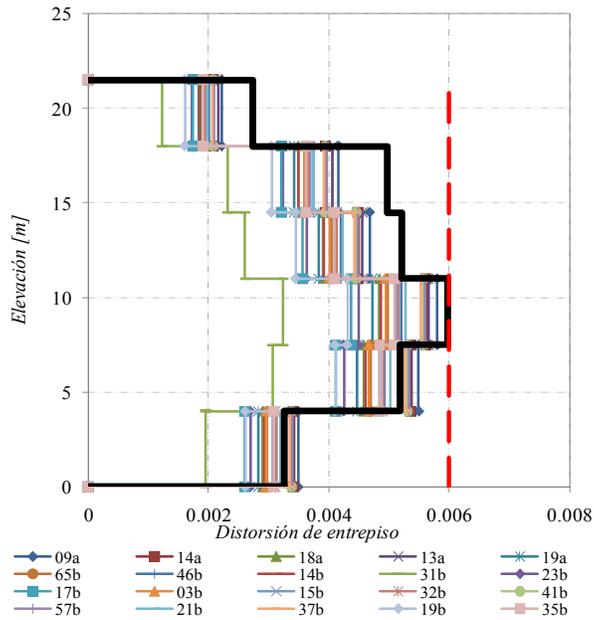
c) Distorsión permisible 0.008

Figura 5.21. Resultados de los análisis paso a paso. Estructura de 10 niveles en terreno medio con disipadores viscosos



a) Distorsión permisible 0.004

b) Distorsión permisible 0.006



c) Distorsión permisible 0.008

Figura 5.22. Resultados de los análisis paso a paso. Estructura de 6 niveles en terreno blando con disipadores viscosos

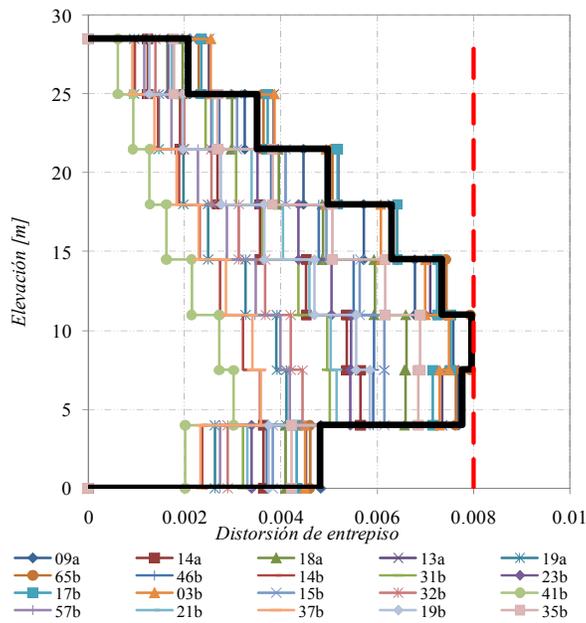
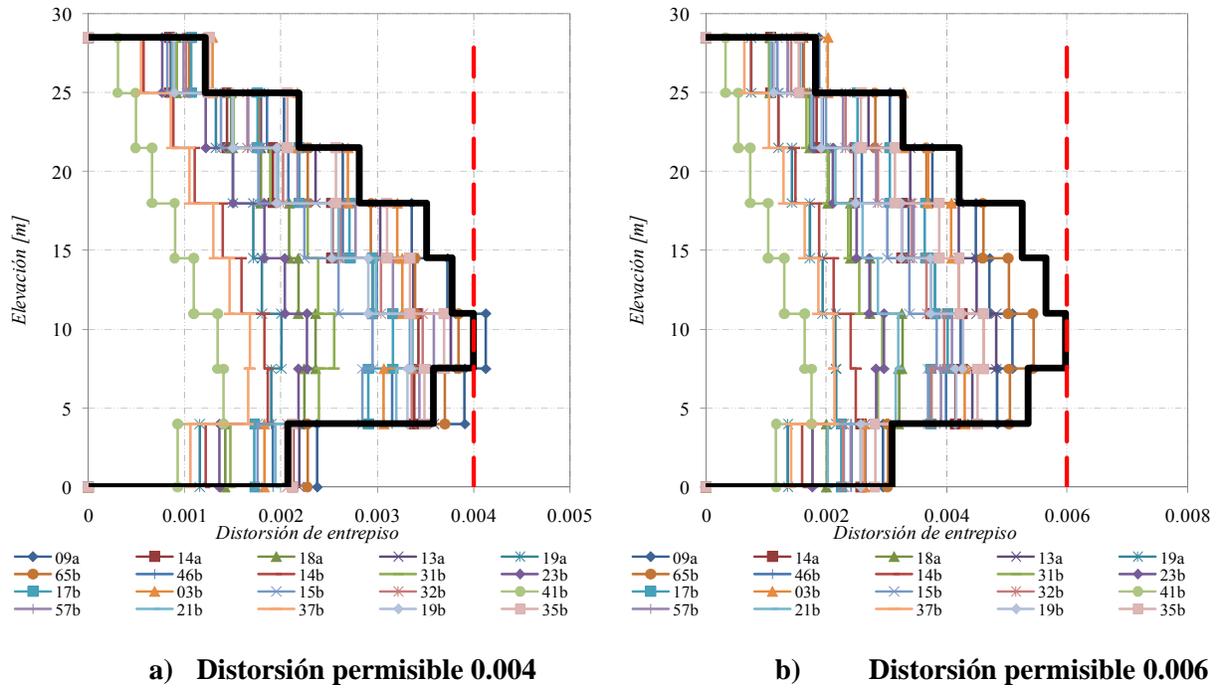


Figura 5.23. Resultados de los análisis paso a paso. Estructura de 8 niveles en terreno blando con disipadores viscosos

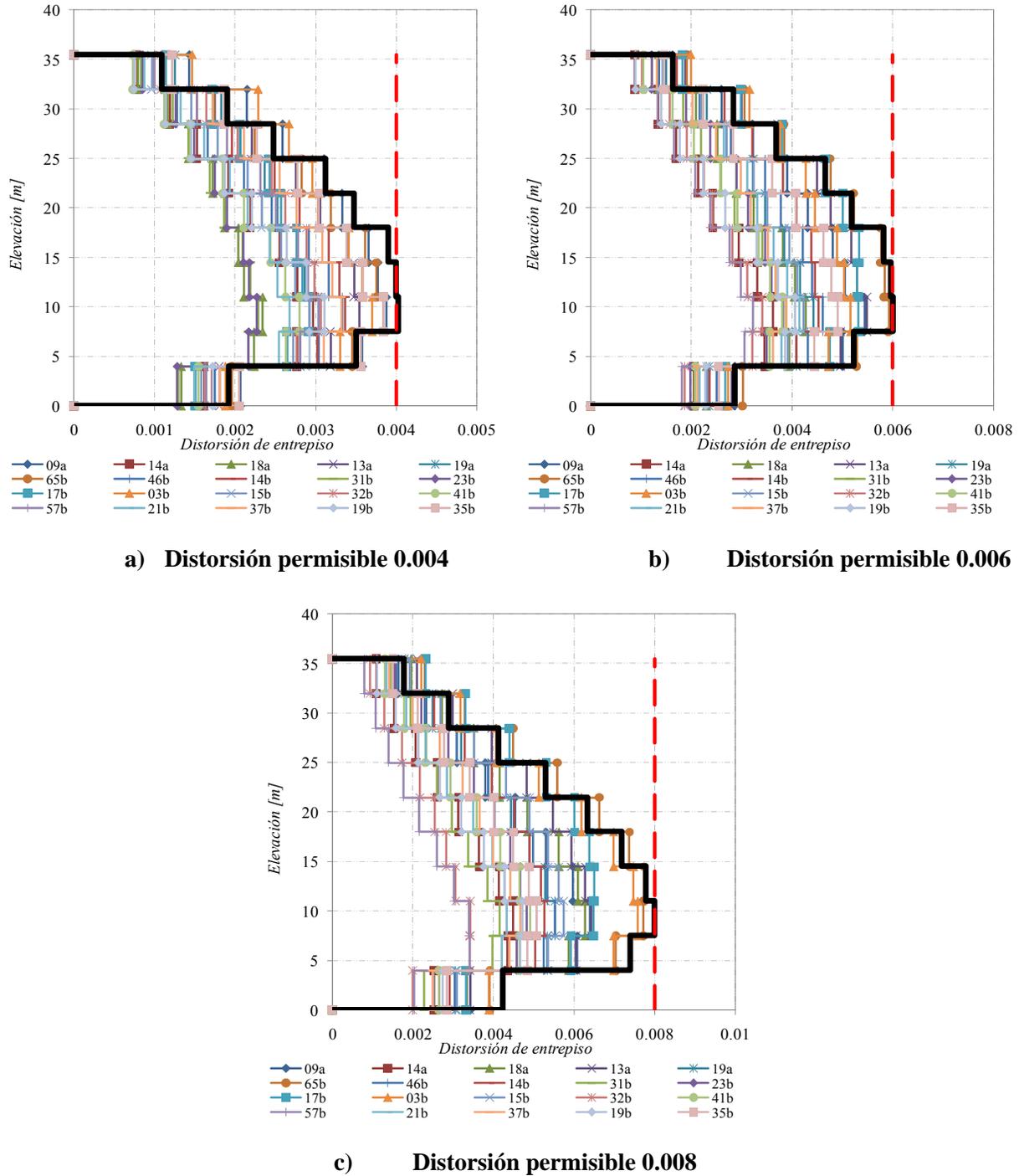


Figura 5.24. Resultados de los análisis paso a paso. Estructura de 10 niveles en terreno blando con disipadores viscosos

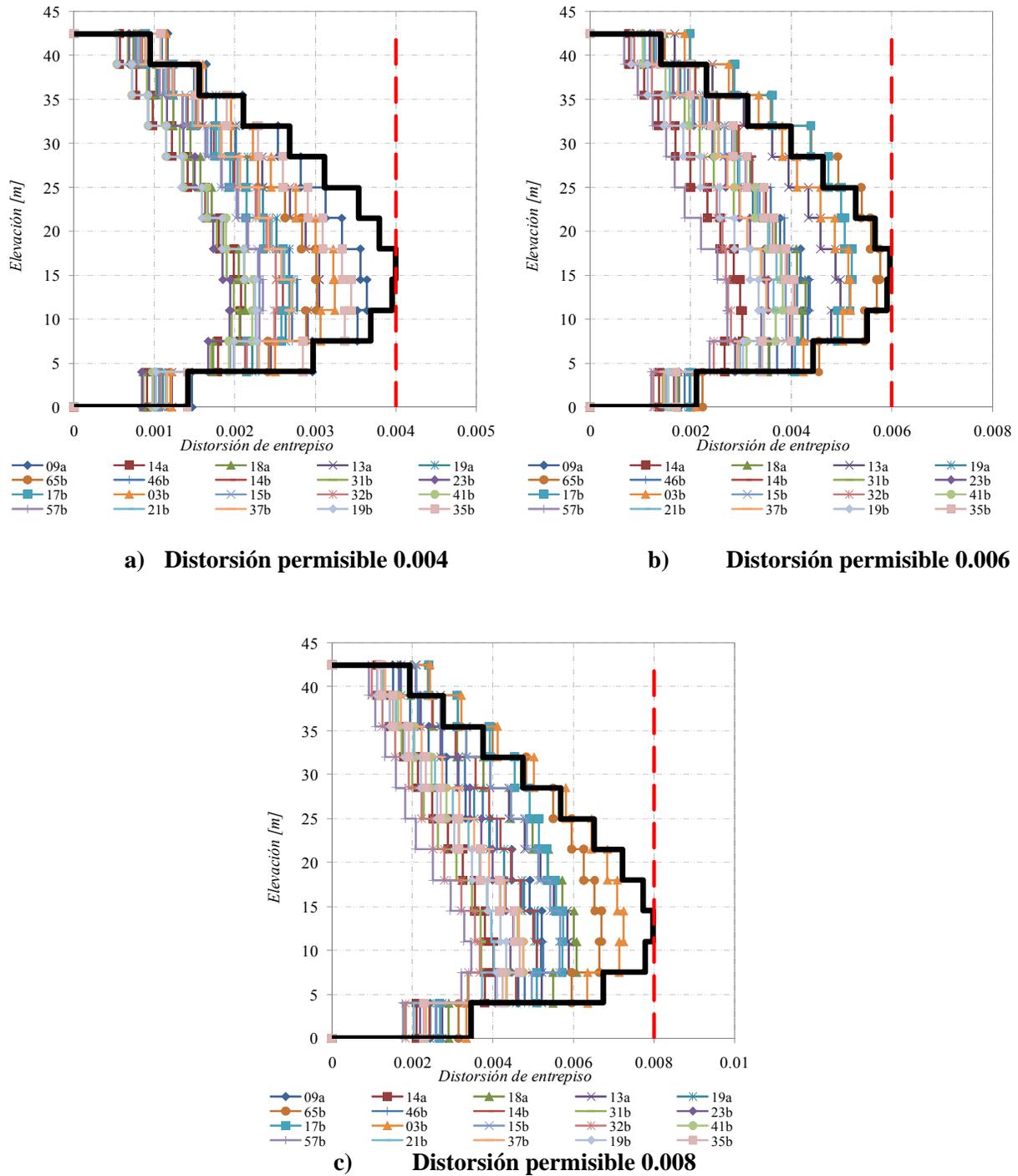


Figura 5.25. Resultados de los análisis paso a paso. Estructura de 12 niveles en terreno blando con disipadores viscosos

En la tabla 5.3 se muestran los valores de las propiedades dinámicas de los sistemas estructurales básicos y sus correspondientes estructuras equivalentes así como los valores de los factores de corrección para cada una de los sistemas analizados.

Tabla 5.3. Propiedades dinámicas de los sistemas básicos y equivalentes para sistemas con disipadores viscosos

T_S	$\square_{permissible}$	N	T_o	c_o	\square	T_{eq}	c_{eq}	F_{EV}
2	0.004	6	1.09	1.24	1.24	0.526	0.70	2.43
	0.006	6	1.09	1.24	0.82	0.611	0.78	1.80
	0.004	8	1.45	1.33	1.98	0.58	0.75	1.80
	0.006	8	1.45	1.33	1.38	0.672	0.84	1.50
	0.004	10	1.56	1.33	1.96	0.628	0.80	1.70
	0.006	10	1.56	1.33	1.37	0.726	0.89	1.50
	0.004	12	2.04	1.33	3.2	0.661	0.83	1.20
	0.006	12	2.04	1.33	2.31	0.763	0.93	1.05
	0.008	6	1.25	1.33	0.905	0.678	0.84	1.45
	0.008	8	1.49	1.33	1.14	0.745	0.91	1.50
	0.008	10	1.83	1.33	1.61	0.797	0.96	1.25
	0.008	12	2.16	1.33	2.06	0.847	1.01	0.95
1	0.004	4	0.79	0.82	0.82	0.447	0.72	1.00
	0.006	4	0.79	0.82	0.52	0.516	0.81	0.85
	0.004	6	1.09	0.82	1.43	0.497	0.79	0.80
	0.006	6	1.09	0.82	0.885	0.595	0.82	0.68
	0.004	8	1.45	0.71	2.2	0.555	0.82	0.55
	0.006	8	1.45	0.71	1.36	0.676	0.82	0.50
	0.004	10	1.56	0.61	2.05	0.616	0.82	0.70
	0.006	10	1.56	0.61	1.24	0.754	0.82	0.60
	0.008	6	1.25	0.82	0.87	0.688	0.82	0.60
	0.008	8	1.49	0.67	1	0.782	0.82	0.65
0.008	10	1.83	0.45	1.33	0.86	0.82	0.40	
0.5	0.004	4	0.79	0.31	0.145	0.675	0.31	0.40
	0.004	6	1.09	0.31	0.34	0.789	0.31	0.58
	0.006	6	1.09	0.31	0.3	0.97	0.32	0.72
	0.004	8	1.45	0.29	0.6	0.901	0.31	0.60
	0.006	8	1.45	0.29	0.4	1.09	0.32	0.65

Del mismo modo que se hizo para los disipadores histeréticos, si tomamos los valores de la tabla 5.3 y se grafica el factor de corrección contra las diferentes propiedades dinámicas tanto de la estructura básica como de la estructura equivalente se tiene una distribución como la que se muestra en la figura 5.26.

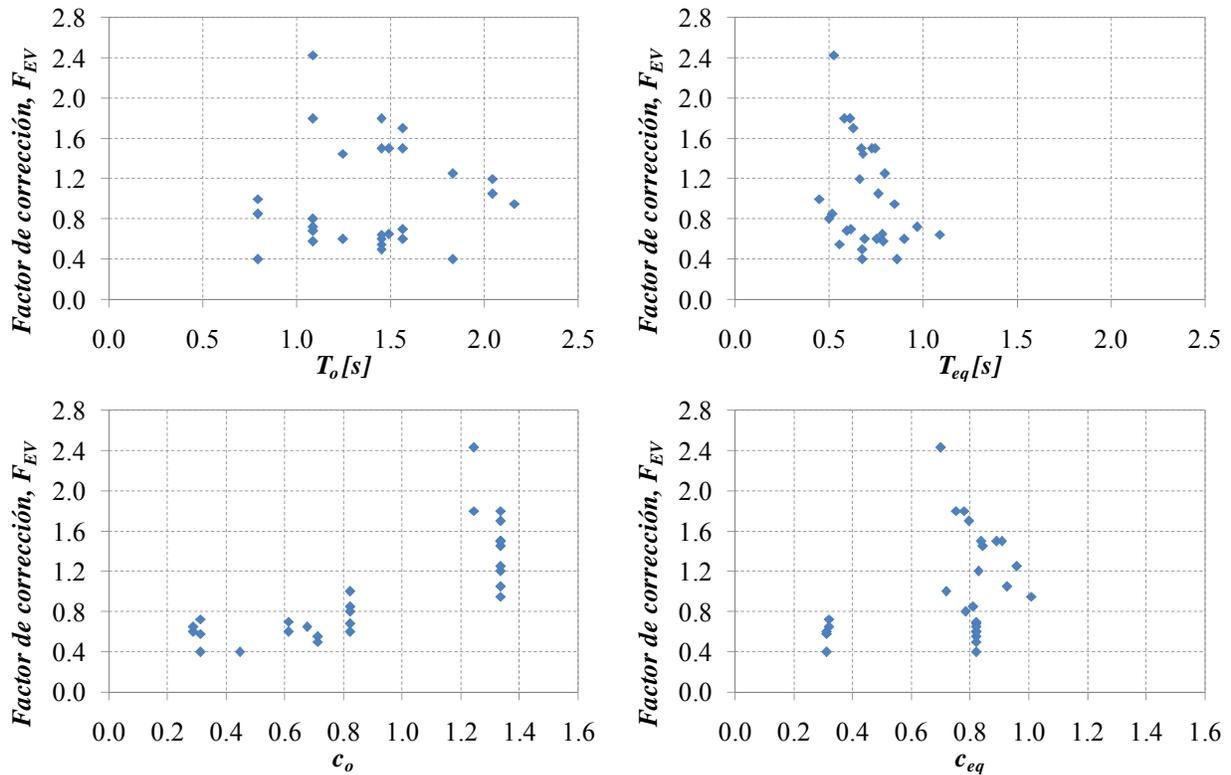


Figura 5.26. Comportamiento del factor de corrección, F_{EH} , respecto a diferentes propiedades dinámicas

De la figura 5.26 puede verse que los valores de los factores de corrección no tienen una tendencia definida "a priori", sin embargo si se hacen interactuar las diferentes propiedades dinámicas entre sí, es posible definir una variable cuyo valor exhiba un comportamiento con una tendencia definida que pueda ajustarse a una ecuación analítica.

Se encontró que la mejor manera de describir el comportamiento de los factores de corrección era a través de una variable, ψ_V , la cual está en función de la relación entre la ordenada espectral correspondiente al periodo de vibrar fundamental de la estructura equivalente, c_{eq} , y la ordenada espectral correspondiente al periodo de vibrar fundamental de la estructura básica, c_o , dicha variable tiene la forma:

$$\psi_V = \frac{c_{eq}}{c_o} \quad (5.7)$$

En la figura 5.14 se muestra la variación de la variable ψ_V respecto a los valores de los factores de corrección.

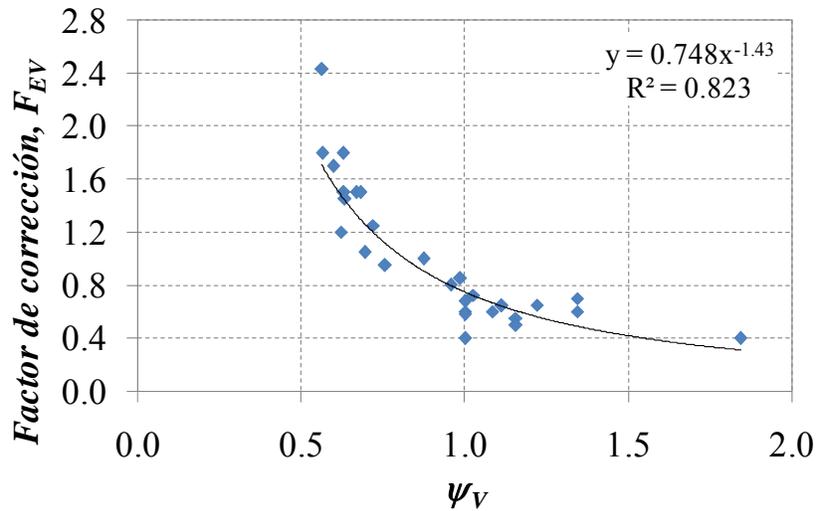


Figura 5.27. Comportamiento de la variable ψ_H para sistemas con disipadores histeréticos

De la figura 5.14 se puede ver que los diferentes factores de corrección de la energía siguen una tendencia definida cuando se les grafica contra la variable ψ_V , calculada con la ecuación (5.5). De esta manera la ecuación que describe el comportamiento del factor de corrección para los disipadores de tipo viscoso se representa mediante una función exponencial cuyo ajuste a la dispersión de puntos da un coeficiente de correlación del 82% y tiene la forma:

$$F_{EV} = 0.75 \psi_H^{-1.43} \quad (5.8)$$

CAPÍTULO 6

EJEMPLOS DE APLICACIÓN

A continuación se muestra un ejemplo de un edificio de 12 niveles desplantado en terreno blando. Se utiliza el espectro de diseño del anexo A de las NTC-sismo-2004 correspondiente a un terreno con periodo fundamental $T_5 = 2$ [s]. En la figura 6.1 se muestran los espectros para el estado límite de servicio y el estado límite de colapso. Corresponden a espectros originales sin reducir ($Q=1$, $R=1$) de acuerdo con las fórmulas indicadas en el anexo A.

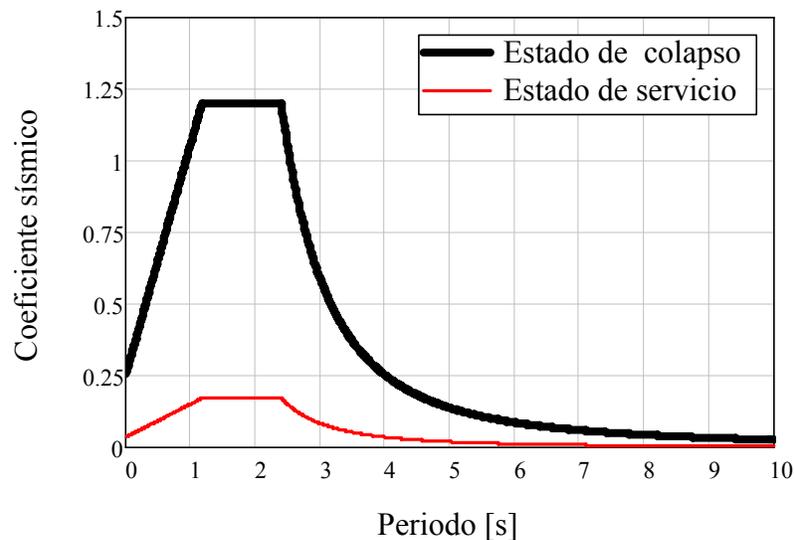


Figura 6.1. Espectro de diseño para terreno blando. Anexo A NTC-Sismo-2004.

La estructura se compone de marcos de concreto reforzado conectados mediante un sistema de piso de losa plana de 12 [cm] de espesor. El edificio cuenta con 4 crujías en la dirección longitudinal y 3 crujías en la dirección transversal. Las trabes tienen una sección transversal de 45x25 [cm] mientras que las columnas tienen una sección transversal constante de 50x50 cm. En la dirección longitudinal se han colocado muros de concreto de 15 cm de espesor en las crujías de las esquinas mientras que en la dirección transversal se tiene un muro de concreto de 15 cm de espesor colocado en la crujía central. Para este ejemplo en particular se seleccionó una distorsión de entrepiso máxima permisible de 0.008. En la figura 6.2 se muestran diferentes vistas del edificio en estudio.

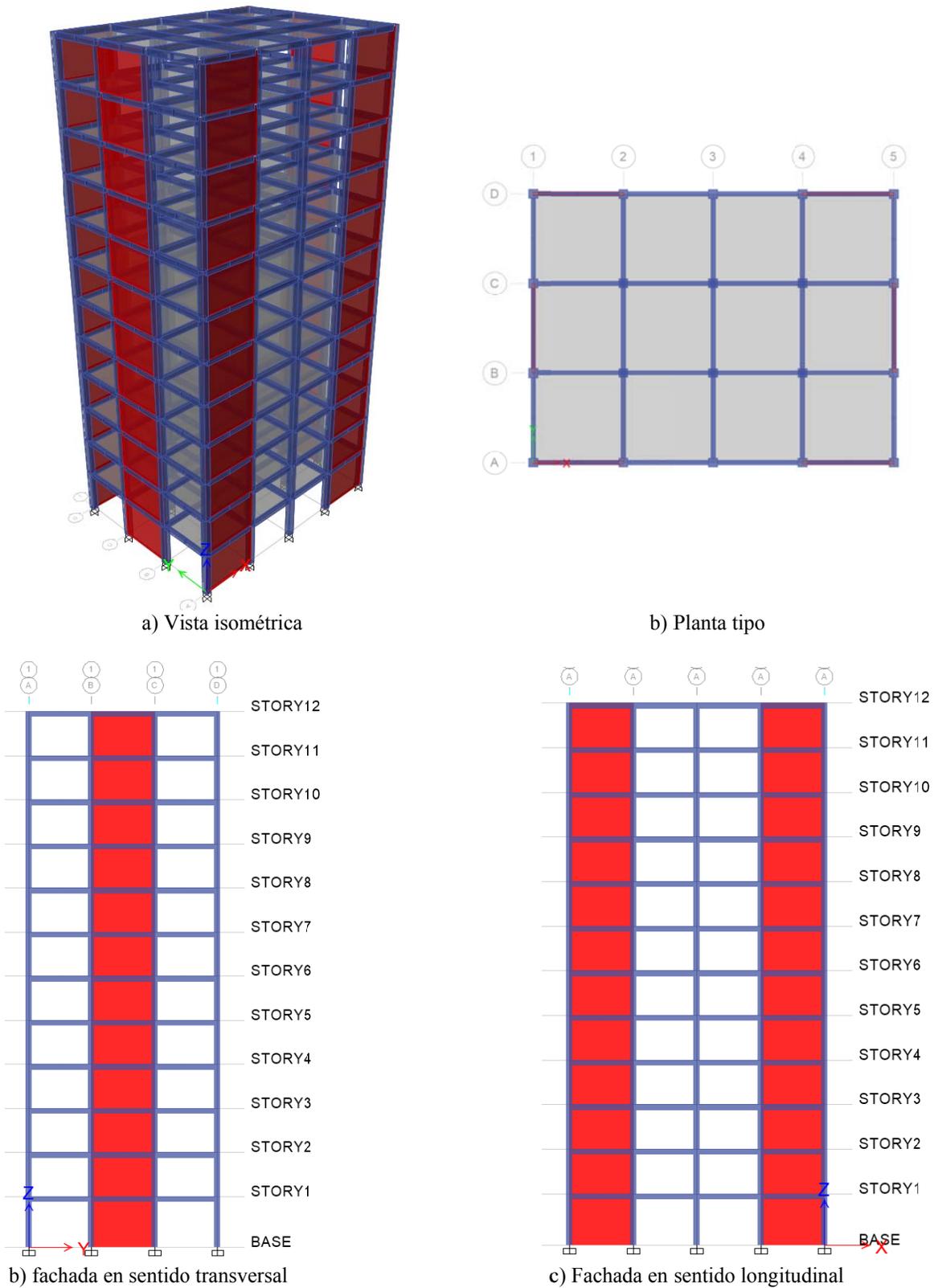


Figura 6.2. Vista de la estructura analizada.

La estructura se considera con uso de oficinas cuyas cargas de diseño se listan a continuación.

Carga muerta en entrepisos		Carga muerta en azotea	
Muros divisorios	100 kg/m ²	Relleno	180 kg/m ²
Acabados en piso	80 kg/m ²	Impermeabilización	100 kg/m ²
Instalaciones	20 kg/m ²	Instalaciones	20 kg/m ²
Plafón	20 kg/m ²	Plafón	20 kg/m ²
Sobrecarga reglamento	40 kg/m ²	Sobrecarga reglamento	40 kg/m ²
Total	260 kg/m ²	Total	360 kg/m ²

Carga muerta en entrepisos		Carga muerta en azotea	
Carga viva máxima	250 kg/m ²	Carga viva máxima	100 kg/m ²
Carga viva accidental	180 kg/m ²	Carga viva accidental	70 kg/m ²
Carga viva media	200 kg/m ²	Carga viva media	15 kg/m ²

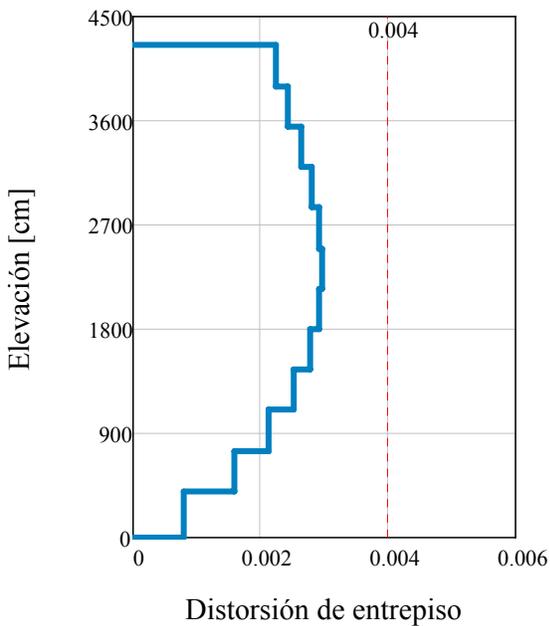
En el modelo se consideró un concreto estructural tipo 1 con una resistencia a la compresión $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ y un módulo de elasticidad $E_c = 14000 \sqrt{f'_c} = 221359.4 \text{ kg/cm}^2$. Así mismo, en el modelo de la estructura se considera un acero de refuerzo con una resistencia $f_y = 250 \text{ kg/cm}^2$ y un módulo de elasticidad de $E_s = 2000000 \text{ kg/cm}^2$.

Para este ejemplo en particular se estudia a la estructura en el sentido transversal (fachada con un solo muro). En la tabla 6.1 se muestran las propiedades de la estructura básica en el sentido transversal.

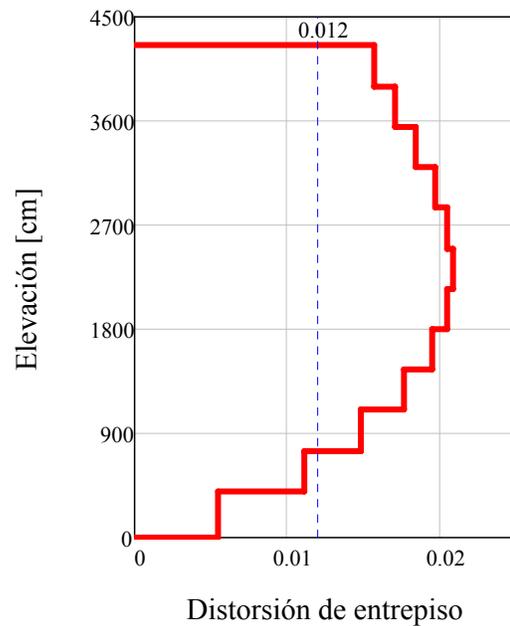
Tabla 6.1. Propiedades de la estructura básica

Nivel	Peso [T]	Rigidez [T/cm]	Altura [cm]	Elevación [cm]	Modo	Periodo [s]	Ordenada espectral
1	343.30	1740.85	350	350	1	1.22	1.33
2	337.60	979.28	350	700	2	0.48	0.66
3	337.60	719.68	350	1050	3	0.31	0.50
4	337.60	589.86	350	1400	4	0.23	0.43
5	337.60	509.59	350	1750	5	0.18	0.39
6	337.60	452.31	350	2100	6	0.15	0.36
7	337.60	405.99	350	2450	7	0.13	0.34
8	337.60	363.52	350	2800	8	0.12	0.33
9	337.60	319.11	350	3150	9	0.10	0.32
10	337.60	266.49	350	3500	10	0.09	0.31
11	337.60	198.12	350	3850	11	0.08	0.30
12	297.69	107.31	350	4200	12	0.06	0.28

Como primer paso, se realiza el análisis modal de la estructura básica a fin de verificar las distorsiones de entepiso correspondientes a los estados límite de servicio y colapso. En la figura 6.3 se muestran las distorsiones de entepiso. Se puede ver que las distorsiones de entepiso no exceden el umbral permisible para el estado límite de servicio, sin embargo el límite permisible para el estado límite de colapso se excede considerablemente.



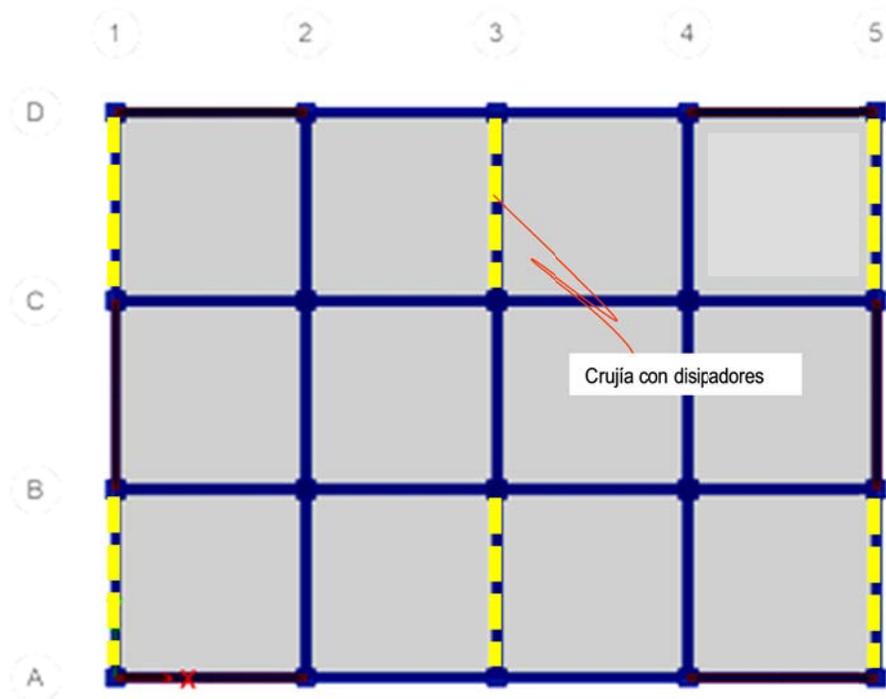
a) Estado límite de servicio



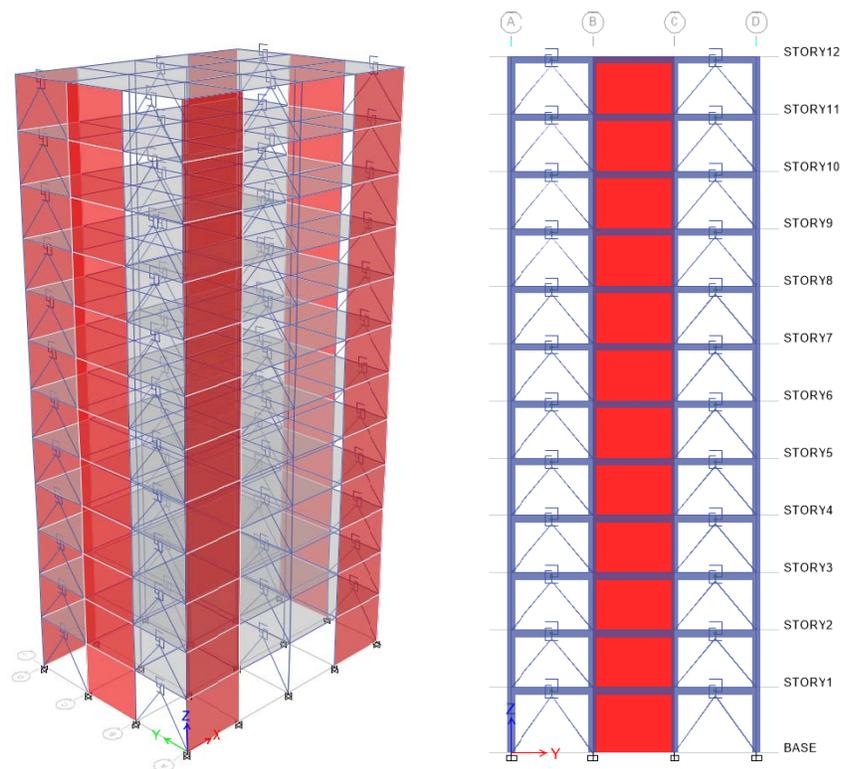
b) Estado límite de colapso

Figura 6.3. Espectro de diseño y resultados del análisis modal

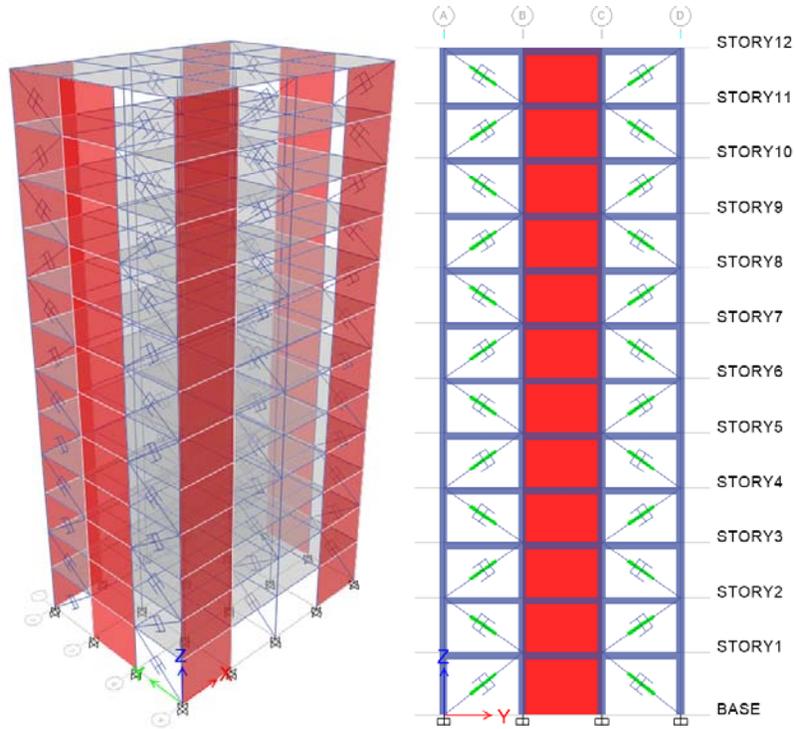
A continuación se propone una ubicación de los disipadores en la estructura. Dada la simetría del modelo, se pueden colocar disipadores en las crujías laterales de los marcos en la dirección analizada. Los disipadores se colocarán en los marcos exteriores y en el marco central del edificio de manera que se tienen seis disipadores por cada entrepiso ($N_D=6$). En la figura 6.4a a 6.4c se muestra la ubicación de los disipadores en la estructura.



a) Crujeas con disipadores en la estructura. Planta tipo



b) Ubicación de los disipadores en la estructura. Modelo con disipadores de tipo histerético
 Figura 6.4. Ubicación de los disipadores de energía en la estructura analizada



c) Ubicación de los disipadores en la estructura. Modelo con disipadores de tipo viscoso lineal
Figura 6.4 (Continuación). Ubicación de los disipadores de energía en la estructura analizada

Una vez que ha seleccionado una distribución de los disipadores, el siguiente paso consiste en definir la estructura equivalente sustituyendo los disipadores por resortes elásticos tal y como se muestra en las figuras 6.5 y 6.6

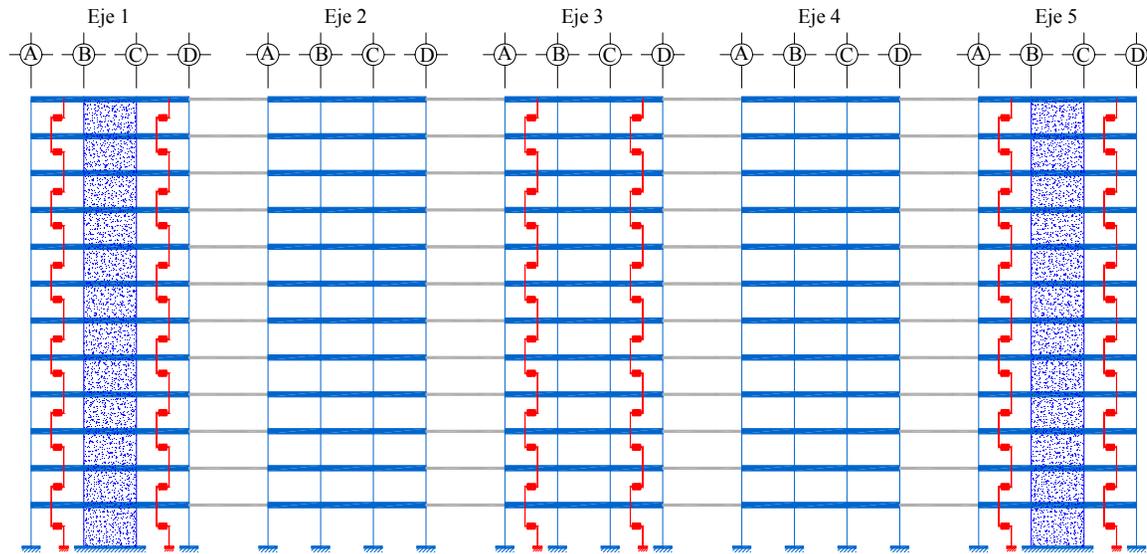


Figura 6.5. Estructura equivalente. Sistema con disipadores de tipo histerético

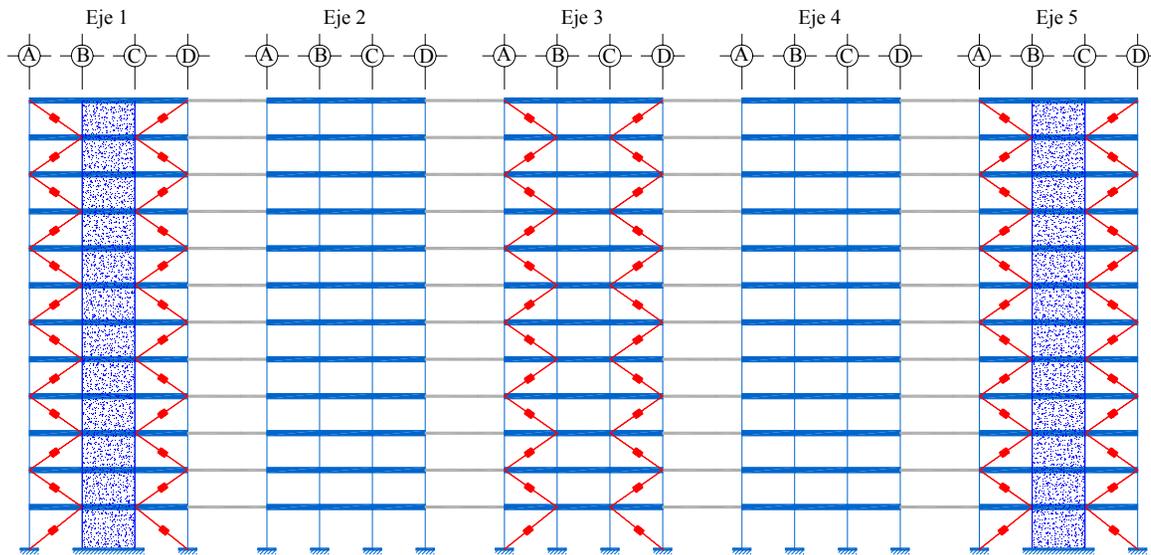


Figura 6.6. Estructura equivalente. Sistema con disipadores de tipo viscoso

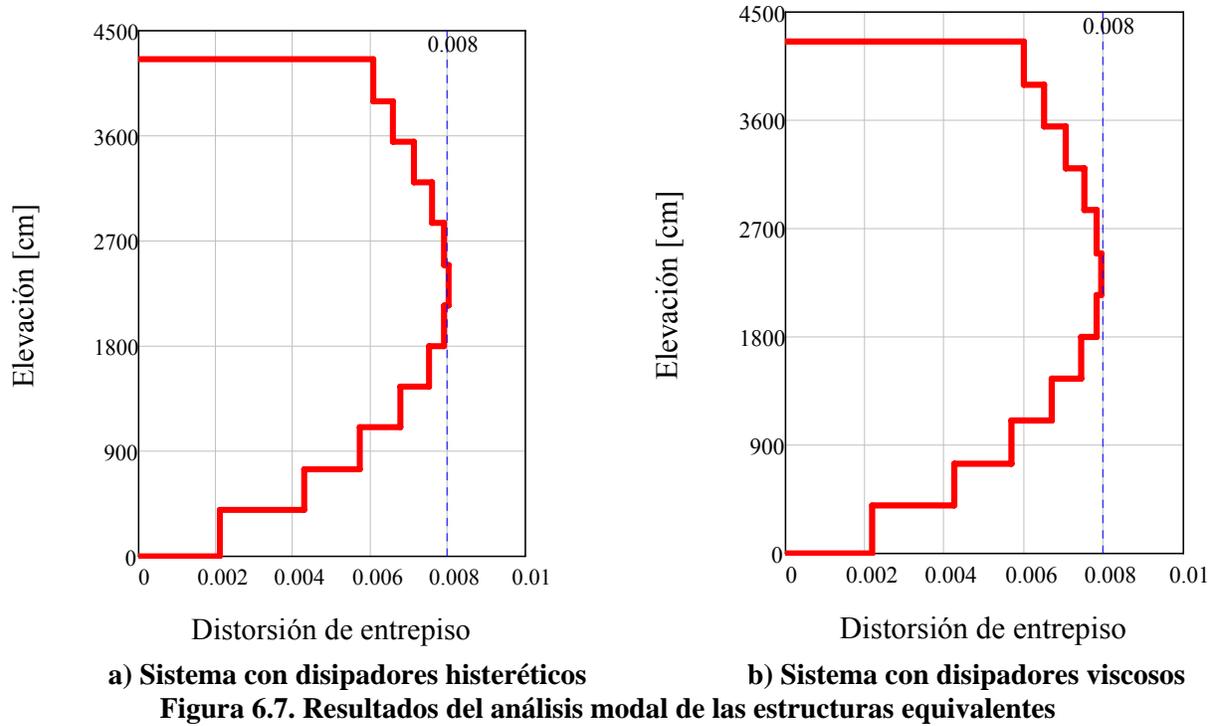
Como siguiente paso se realiza el análisis modal de la estructura equivalente haciendo variar el parámetro η para cada tipo de disipador hasta que la máxima distorsión de entrepiso no sobrepase la distorsión permisible (0.008 para este ejemplo). El valor del parámetro η fue de 0.165 para el caso de disipadores histeréticos y de 0.25 para el caso de disipadores viscosos lineales. En la tabla 6.2 y 6.3 se muestran las propiedades de las estructuras equivalentes para cada tipo de disipador y en la figura 6.7 se muestran los resultados del análisis modal de las estructuras equivalentes, debe notarse que la distribución de distorsiones de entrepiso de la estructura equivalente es muy similar a la de la estructura convencional mostrada en la figura 6.3.

Tabla 6.2. Propiedades de la estructura equivalente. Estructura con disipadores histeréticos

Nivel	Peso [T]	Rigidez [T/cm]	Altura [cm]	Elevación [cm]	Modo	Periodo [s]	Ordenada espectral
1	343.30	3464.30	350	350	1	0.86	1.02
2	337.60	1948.77	350	700	2	0.34	0.53
3	337.60	1432.17	350	1050	3	0.22	0.42
4	337.60	1173.82	350	1400	4	0.16	0.37
5	337.60	1014.07	350	1750	5	0.13	0.34
6	337.60	900.09	350	2100	6	0.11	0.32
7	337.60	807.93	350	2450	7	0.09	0.31
8	337.60	723.41	350	2800	8	0.08	0.30
9	337.60	635.02	350	3150	9	0.07	0.29
10	337.60	530.32	350	3500	10	0.07	0.29
11	337.60	394.26	350	3850	11	0.06	0.28
12	297.69	213.54	350	4200	12	0.05	0.27

Tabla 6.3. Propiedades de la estructura equivalente. Estructura con disipadores viscosos

Nivel	Peso [T]	Rigidez [T/cm]	Altura [cm]	Elevación [cm]	Modo	Periodo [s]	Ordenada espectral
1	343.30	3333.10	400	400	1	0.86	1.02
2	337.60	1965.14	350	750	2	0.34	0.53
3	337.60	1444.20	350	1100	3	0.22	0.42
4	337.60	1183.68	350	1450	4	0.16	0.37
5	337.60	1022.59	350	1800	5	0.13	0.34
6	337.60	907.65	350	2150	6	0.11	0.32
7	337.60	814.71	350	2500	7	0.09	0.31
8	337.60	729.48	350	2850	8	0.08	0.30
9	337.60	640.36	350	3200	9	0.07	0.29
10	337.60	534.77	350	3550	10	0.07	0.29
11	337.60	397.57	350	3900	11	0.06	0.28
12	297.69	215.33	350	4250	12	0.05	0.27



Una vez que se han definido las estructuras equivalentes, se obtienen las propiedades para cada tipo de disipador siguiendo las fórmulas presentadas anteriormente. A continuación se muestra el proceso de cálculo para cada tipo de disipador.

6.1 ESTRUCTURA CON DISIPADORES DE TIPO HISTERÉTICO

Con las distorsiones de entrepiso obtenidas del análisis modal (ver figura 6.7a) se calcula la energía elástica para cada resorte ficticio aplicando la ecuación (2.2). En la tabla 6.4 se muestra el cálculo de la energía elástica de los resortes ficticios.

Tabla 6.4. Energía de deformación de los resortes elásticos en cada entrepiso

Entrepiso	Altura [cm]	Distorsión de entrepiso del análisis modal	Desplazamiento relativo [cm]	Rigidez de entrepiso* [T/cm]	Valor del parámetro \square	Rigidez de resorte elástico [T/cm]	Energía de deformación elástica [J]
1	400	0.0021	0.85	1740.85		287.24	205.19
2	350	0.0043	1.49	979.28		161.58	360.73
3	350	0.0057	2.00	719.68		118.75	475.78
4	350	0.0068	2.37	589.86		97.33	547.74
5	350	0.0075	2.62	509.59		84.08	578.29
6	350	0.0079	2.76	452.31	0.165	74.63	570.28
7	350	0.0080	2.81	405.99		66.99	527.95
8	350	0.0079	2.76	363.52		59.98	458.22
9	350	0.0076	2.65	319.11		52.65	369.71
10	350	0.0071	2.49	266.49		43.97	271.91
11	350	0.0066	2.31	198.12		32.69	173.70
12	350	0.0061	2.12	107.31		17.71	79.57

* La rigidez del entrepiso corresponde a la estructura básica (estructura sin disipadores)

De acuerdo con las tabla 6.1 y 6.2 se tienen los siguientes valores para las ordenadas y periodos de vibrar fundamentales

Estructura equivalente	Estructura básica
$T_{eq}=0.86$ [s]	$T_o=1.22$ [s]
$c_{eq}=1.023$	$c_o=1.334$
$\square=0.165$	

El factor de corrección de la energía será:

$$\psi_H = \left(\frac{c_{eq}}{c_o} \right)^{\left(\frac{T_{eq}}{T_o} \right)} = 0.83$$

$$F_{EH} = 0.39 \psi^{-2.0} = 0.57$$

Como siguiente paso se evalúa la ecuación 2.9 para diferentes valores de ductilidad de los disipadores, de esta manera se van definiendo los parámetros que caracterizan al disipador: rigidez, desplazamiento de fluencia y fuerza resistente. Así mismo, para cada valor de ductilidad que se seleccione se obtendrán diferentes desplazamientos de fluencia en los disipadores de cada entrepiso cuya distribución a lo largo de la estructura será proporcional a la distribución de las distorsiones que se obtienen cuando la estructura se analiza para el estado límite de servicio.

Por ejemplo si analizamos a la estructura para una ductilidad del disipador $\square_d=8$ se obtienen los parámetros del disipador indicados en la tabla 6.5.

Tabla 6.5. Parámetros de los disipadores para $d=8$

Nivel	K_d [T/cm]	F_{yd} [T]	F_U [T]	d_{yd} [mm]
1	348.1	36.8	55.2	1.1
2	195.8	36.6	54.8	1.9
3	143.9	36.0	54.0	2.5
4	117.9	35.0	52.5	3.0
5	101.9	33.4	50.1	3.3
6	90.4	31.2	46.9	3.5
7	81.2	28.5	42.7	3.5
8	72.7	25.1	37.7	3.5
9	63.8	21.1	31.7	3.3
10	53.3	16.6	24.8	3.1
11	39.6	11.4	17.1	2.9
12	21.5	5.7	8.5	2.6

A continuación se calcula la rigidez modificada de los entrepisos debida a la adición de los disipadores de acuerdo a las ecuaciones 2.10 a 2.12. Las rigideces modificadas para cada entrepiso se muestran en la tabla 6.6. Con estas nuevas propiedades se realiza el análisis modal espectral para las condiciones de servicio.

Tabla 6.6. Rigidez modificada de los entrepisos para $d=8$

Entrepiso	Rigidez convencional del entrepiso [T/cm]	Rigidez del disipador [T/cm]	Rigidez lateral del contraventeo [T/cm]	Rigidez efectiva del sistema de disipación [T/cm]	Rigidez modificada del entrepiso [T/cm]
1	1740.85	348.05	696.10	232.03	3133.06
2	979.28	195.79	391.58	130.53	1762.44
3	719.68	143.89	287.78	95.93	1295.24
4	589.86	117.93	235.86	78.62	1061.59
5	509.59	101.88	203.76	67.92	917.11
6	452.31	90.43	180.86	60.29	814.03
7	405.99	81.17	162.34	54.11	730.68
8	363.52	72.68	145.36	48.45	654.24
9	319.11	63.80	127.60	42.53	574.31
10	266.49	53.28	106.56	35.52	479.61
11	198.12	39.61	79.22	26.41	356.56
12	107.31	21.45	42.91	14.30	193.12

En la figura 6.8 se muestra con línea continua la distribución de los desplazamientos relativos de entrepiso que resultan del análisis para servicio y con línea punteada se muestra la distribución de los desplazamientos de fluencia indicados en la tabla 6.5.

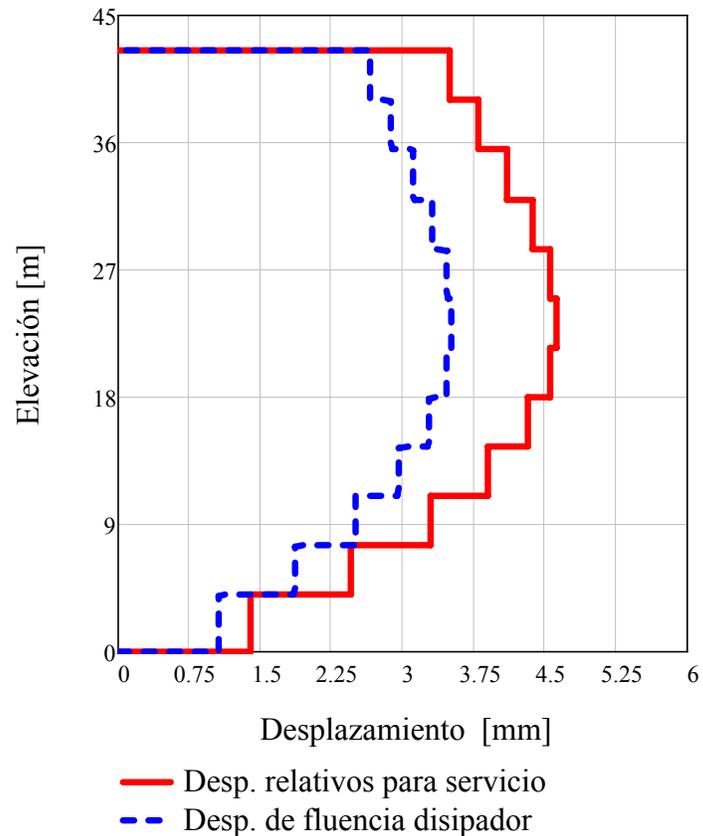


Figura 6.8. Desplazamientos relativos y de fluencia para $\mu_d=8$

Como puede verse en la figura 6.8, los desplazamientos relativos de la estructura bajo condiciones de servicio resultan mayores que los desplazamientos de fluencia de los disipadores, esto quiere decir que para el valor de la ductilidad seleccionada ($\mu_d=8$), el sistema de disipación resulta poco eficiente debido a que empezaría a presentar daños para sismos de baja intensidad. Si ahora se selecciona un valor de ductilidad del disipador $\mu_d=5.9$ se obtienen los parámetros de los disipadores indicados en la tabla 6.7.

Tabla 6.7. Parámetros de los disipadores para $\mu=5.9$

Nivel	K_d [T/cm]	F_{yd} [T]	F_U [T]	d_{yd} [mm]
1	326.51	47.18	70.77	1.44
2	183.67	46.91	70.36	2.55
3	134.98	46.19	69.28	3.42
4	110.63	44.86	67.30	4.06
5	95.58	42.85	64.27	4.48
6	84.83	40.09	60.13	4.73
7	76.15	36.54	54.81	4.80
8	68.18	32.21	48.32	4.72
9	59.85	27.11	40.66	4.53
10	49.98	21.25	31.87	4.25
11	37.16	14.64	21.96	3.94
12	20.13	7.29	10.94	3.62

Las rigideces modificadas para cada entrepiso con este valor de ductilidad se muestran en la tabla 6.8. Con estas nuevas propiedades se realiza de nuevo el análisis modal espectral para las condiciones de servicio.

Tabla 6.8. Rigidez modificada de los entresijos para $\mu=5.9$

Entrepiso	Rigidez convencional del entrepiso [T/cm]	Rigidez del disipador [T/cm]	Rigidez lateral del contraventeo [T/cm]	Rigidez efectiva del sistema de disipación [T/cm]	Rigidez modificada del entrepiso [T/cm]
1	1740.85	326.51	653.03	217.68	3046.90
2	979.28	183.67	367.35	122.45	1713.98
3	719.68	134.98	269.97	89.99	1259.62
4	589.86	110.63	221.27	73.76	1032.40
5	509.59	95.58	191.15	63.72	891.89
6	452.31	84.83	169.67	56.56	791.65
7	405.99	76.15	152.30	50.77	710.59
8	363.52	68.18	136.36	45.45	636.25
9	319.11	59.85	119.70	39.90	558.51
10	266.49	49.98	99.97	33.32	466.42
11	198.12	37.16	74.32	24.77	346.76
12	107.31	20.13	40.25	13.42	187.81

En la figura 6.9 se muestra con línea continua la distribución de los desplazamientos relativos de entrepiso que resultan del análisis para servicio, y con línea punteada la distribución de los desplazamientos de fluencia indicados en la tabla 6.7.

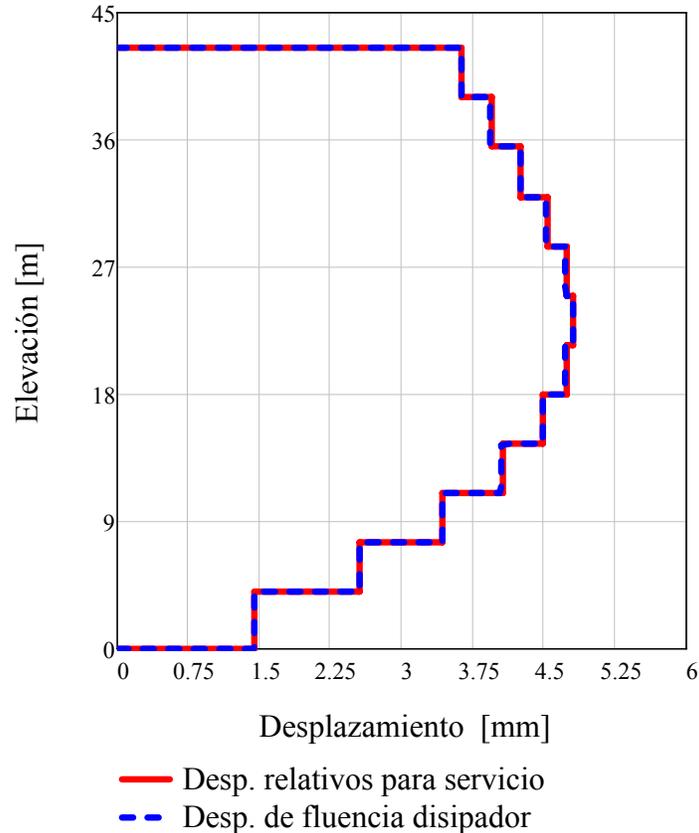


Figura 6.9. Desplazamientos relativos y de fluencia para $\mu=5.9$

Se puede ver que para una ductilidad del dissipador de 5.6 la distribución de los desplazamientos relativos en la estructura para condiciones de servicio son muy parecidos a los desplazamientos de fluencia de cada uno de los dissipadores de cada entrepiso. Con esto se ha encontrado el valor de ductilidad que hace más eficiente el sistema de disipación debido a que, para condiciones de servicio, tanto la estructura básica como los dissipadores permanecen dentro de su intervalo de comportamiento elástico; así mismo, las demás propiedades de los dissipadores (rigidez, fuerza de fluencia) deberían ser suficientes para cubrir las demandas ante condiciones más severas o cercanas al colapso debido a que se obtuvieron para el espectro de diseño correspondiente a ese estado. Más adelante se hace una evaluación del comportamiento del sistema estructura-dissipador ante sismos de intensidades similares a las del espectro de diseño para el estado límite de colapso.

Una vez que se cuenta con las propiedades del sistema de disipación, se selecciona una geometría de las placas del dissipador de acuerdo a las fórmulas de las secciones 2.2.1 ó 2.2.2. A continuación se muestra a manera de ejemplo el caso de definir el dispositivo mediante placas triangulares que corresponden a los dissipadores tipo TADAS (sección 2.2.1).

Se debe tener en cuenta que el ancho superior de la placa estará delimitado por el ancho de la trabe en la cual se conectarán los dispositivos. Para este caso particular las trabes en los entrepisos tienen una sección de 20x50 cm por lo tanto el ancho máximo de la placa deberá ser también de 20 cm. No obstante esta restricción en algunos casos se puede llegar a sobrepasar este

límite siempre y cuando el sistema de sujeción entre la base de las placas y la base portante sea adecuado para cubrir este excedente de dimensiones.

En las figuras 6.10a a 6.10h se muestran las geometrías requeridas de los disipadores de acuerdo al procedimiento indicado en la sección 2.2.1.

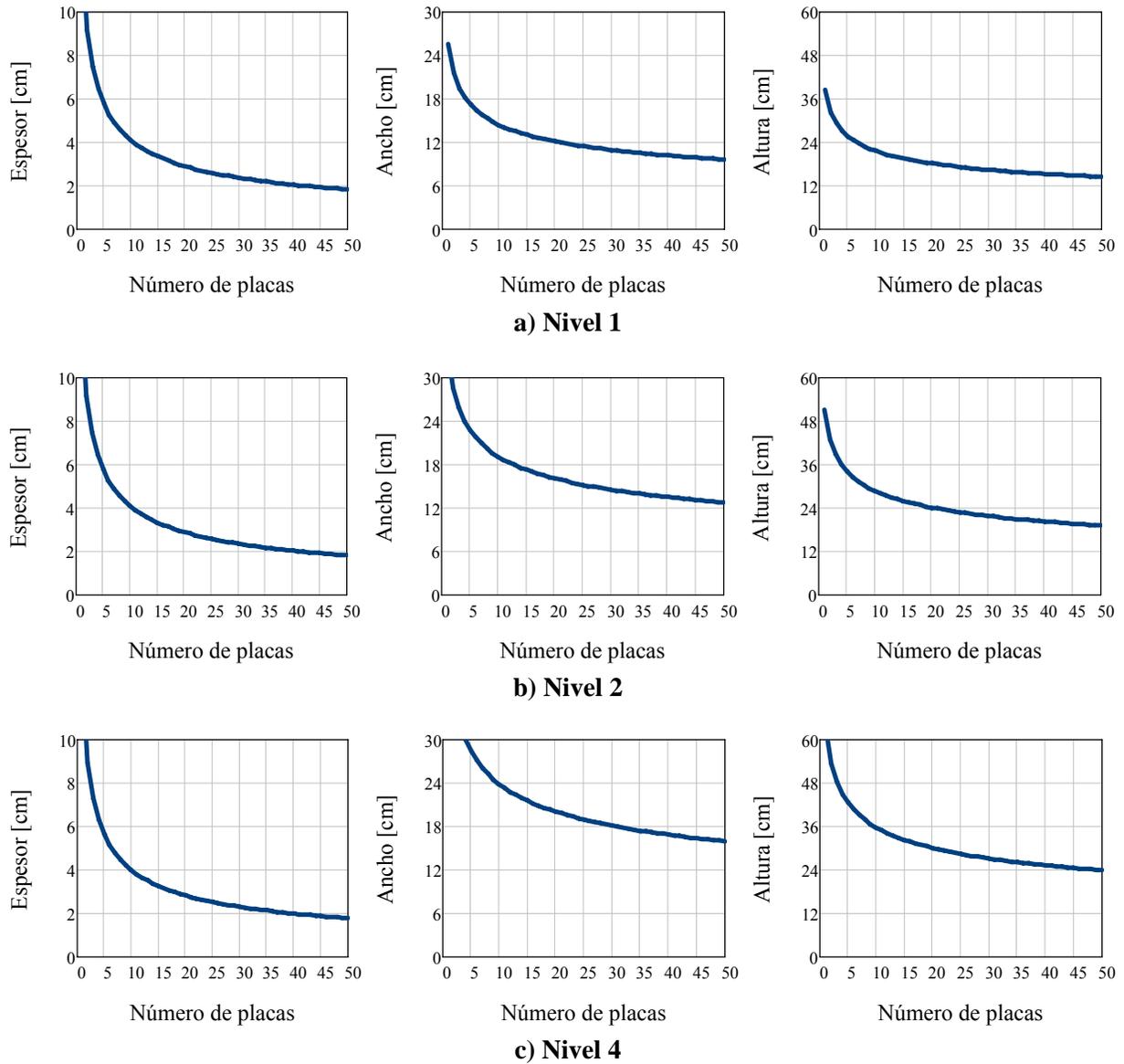
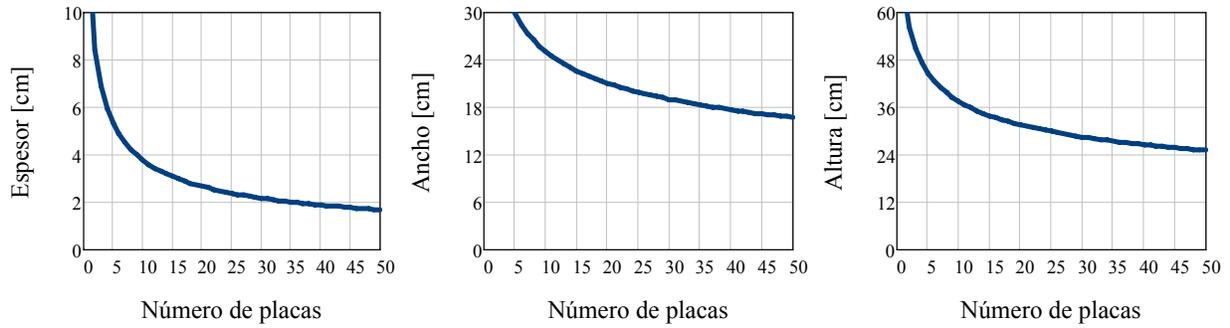
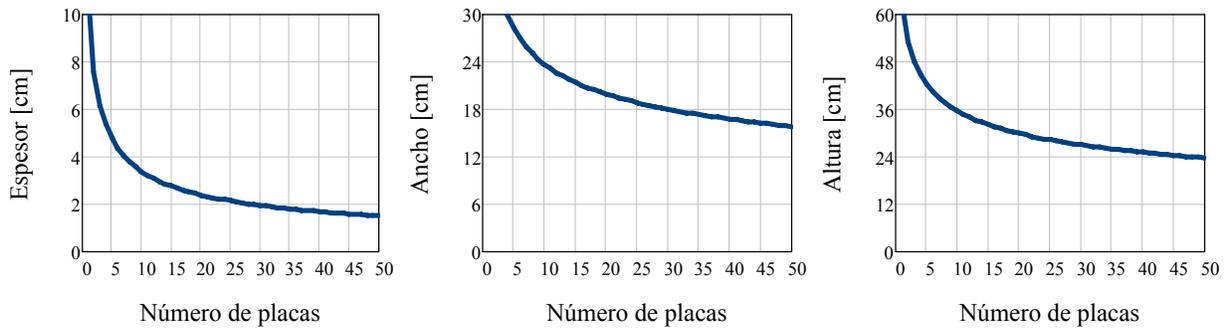


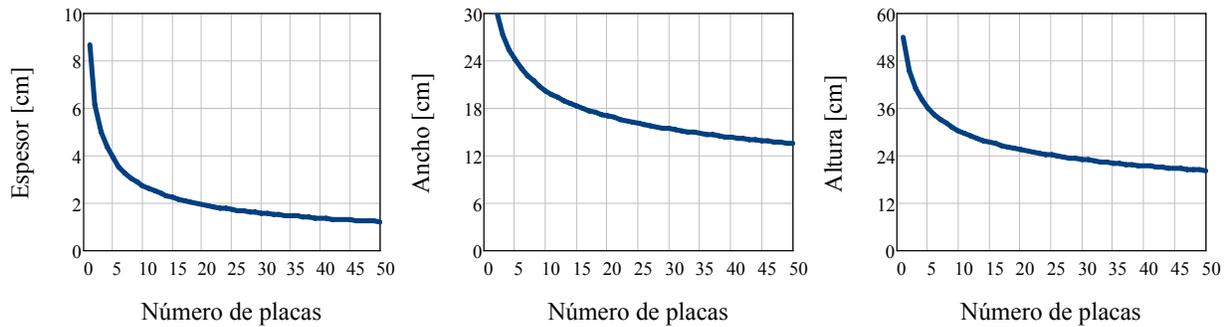
Figura 6.10. Dimensiones requeridas para las placas de disipadores tipo TADAS



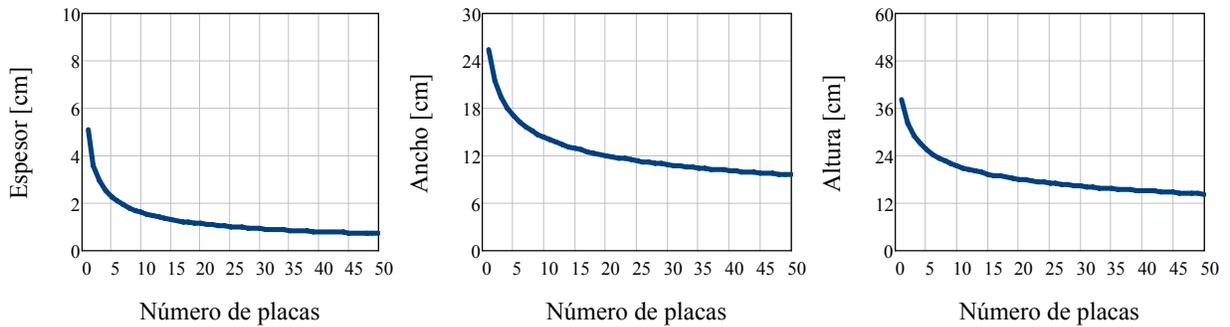
d) Nivel 6



e) Nivel 8



f) Nivel 10



g) Nivel 12

Figura 6.10 (Continuación). Dimensiones requeridas para las placas de disipadores tipo TADAS

De las graficas anteriores es posible seleccionar las dimensiones necesarias para el sistema de disipación, una combinación razonable puede ser la mostrada en la tabla 6.9

Tabla 6.9. Dimensiones de las placas para los disipadores tipo TADAS

Nivel	Espesor [cm]	Número de Placas	Altura [cm]	Ancho [cm]
1	3.81	12	20.7	13.8
2	3.81	12	27.4	18.3
3	3.81	12	31.6	21.1
4	3.81	11	34.9	23.3
5	3.81	11	36.3	24.2
6	3.81	10	37.6	25.0
7	3.81	9	38.0	25.3
8	3.81	8	37.6	25.1
9	3.81	7	36.5	24.3
10	3.81	6	34.5	23.0
11	3.81	4	33.5	22.4
12	3.81	2	32.1	21.4

6.1.1 Análisis modal considerando la presencia de disipadores histeréticos

Hasta ahora se han definido las características requeridas en el sistema de disipación, el siguiente paso consiste en revisar si las propiedades de los elementos que componen la estructura básica son suficientes para resistir las demandas sísmicas. Para tal motivo se deben obtener los elementos mecánicos en trabes y columnas a partir de un análisis modal con un espectro de diseño reducido por la adición de los disipadores. En la tabla 6.10 se muestra el cálculo de los valores paramétricos de los disipadores, β y β_0 definidos en la sección 2.3.

De la tabla 6.10 se puede ver que el promedio de los parámetros globales que caracterizan a los disipadores en la estructura son $\beta=1.13$ y $\beta_0=0.16$. Estos valores se utilizan como dato en las fórmulas indicadas en la sección 2.3 para reducir el espectro de diseño. En la gráfica 6.11a se muestra el espectro reducido para los valores de $\beta=2.9$ y $\beta_0=0.34$ y un periodo de suelo $T_S=2[s]$ y en la gráfica 6.11b se muestran las distorsiones de entrepiso obtenidas del análisis modal con el espectro reducido.

Tabla 6.10. Cálculo de los valores de los parámetros α y β

Entrepiso	Propiedades de la estructura básica					Propiedades de los disipadores						
	Altura [cm]	Distorsión máxima	Desplazamiento relativo máximo [cm]	Rigidez de la estructura básica [T/cm]	Fuerza máxima en la estructura [T]	Rigidez del disipador [T/cm]	Fuerza de fluencia [T]	Número de disipadores en el entrepiso	Rigidez total de los disipadores [T/cm]	Fuerza que aportan los disipadores [T]	α	β
1	400	0.0021	0.845	1740.85	1471.37	326.51	47.18	6.00	1959.08	283.07	1.13	0.16
2	350	0.0043	1.494	979.28	1463.20	183.67	46.91	6.00	1102.04	281.46	1.13	0.16
3	350	0.0057	2.002	719.68	1440.56	134.98	46.19	6.00	809.90	277.11	1.13	0.16
4	350	0.0068	2.372	589.86	1399.33	110.63	44.86	6.00	663.80	269.18	1.13	0.16
5	350	0.0075	2.623	509.59	1336.41	95.58	42.85	6.00	573.46	257.10	1.13	0.16
6	350	0.0079	2.764	452.31	1250.31	84.83	40.09	6.00	509.01	240.51	1.13	0.16
7	350	0.0080	2.807	405.99	1139.77	76.15	36.54	6.00	456.89	219.26	1.13	0.16
8	350	0.0079	2.764	363.52	1004.75	68.18	32.21	6.00	409.09	193.28	1.13	0.16
9	350	0.0076	2.650	319.11	845.59	59.85	27.11	6.00	359.11	162.65	1.13	0.16
10	350	0.0071	2.487	266.49	662.70	49.98	21.25	6.00	299.90	127.47	1.13	0.16
11	350	0.0066	2.305	198.12	456.68	37.16	14.64	6.00	222.95	87.85	1.13	0.16
12	350	0.0061	2.120	107.31	227.48	20.13	7.29	6.00	120.76	43.76	1.13	0.16

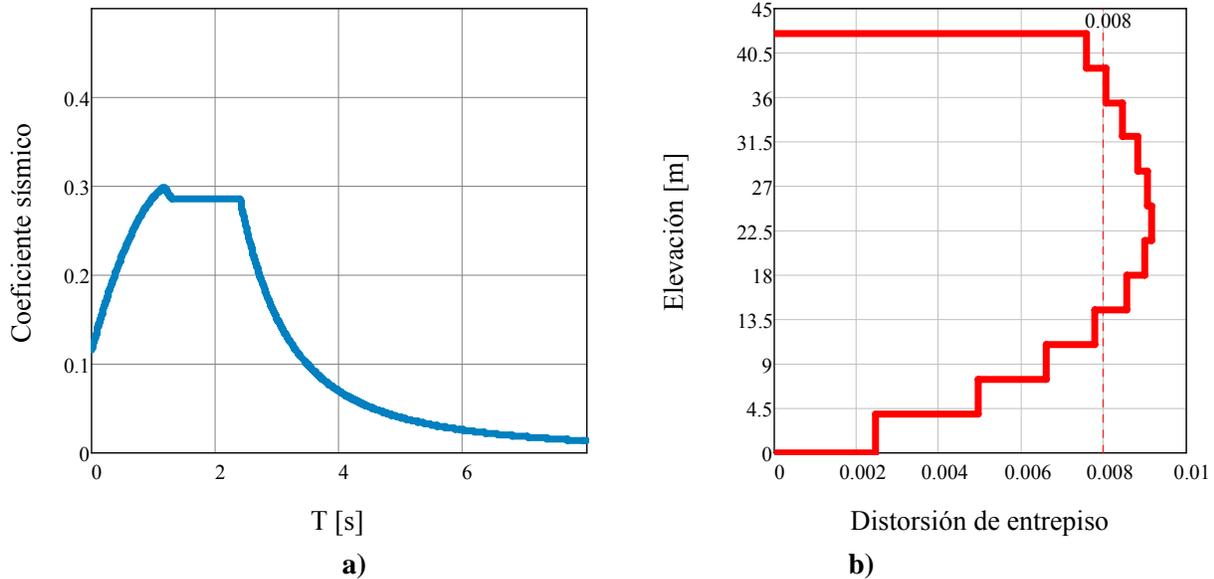


Figura 6.11. Espectro reducido y resultados del análisis modal para $\gamma=1.13$ y $\beta=0.16$

Del análisis modal se observa que la máxima distorsión de entrepiso es 0.009 la cual es aproximadamente 15% mayor que la distorsión permisible.

Una vez que se han obtenido los desplazamiento permisibles para la estructura con el espectro de diseño reducido, los elementos mecánicos obtenidos del análisis modal deben sumarse a las fuerzas inducidas por el sistema de disipación de acuerdo al procedimiento indicado en la sección 2.4. Se debe poner especial atención a la combinación de carga correspondiente ya que de ello dependerá si el contraventeo transmite una carga de tensión o compresión a la columna. Del mismo modo la condición de carga correspondiente determinará la magnitud y sentido de las cargas que bajan a la cimentación.

6.1.2 Comportamiento de la estructura ante movimientos sísmicos reales

A fin de evaluar el comportamiento del edificio con el sistema de disipación calculado, la estructura se modeló en un programa de cómputo junto con sus respectivos disipadores. Se verificó que el modelo de cómputo reprodujera adecuadamente el comportamiento de los dispositivos disipadores. El modelo de la estructura se analizó "paso a paso" con diez sismos reales registrados en terreno blando. En las figuras 6.12 a 6.21 se muestran los registros sísmicos utilizados para el análisis, se muestra también su correspondiente espectro de respuesta.

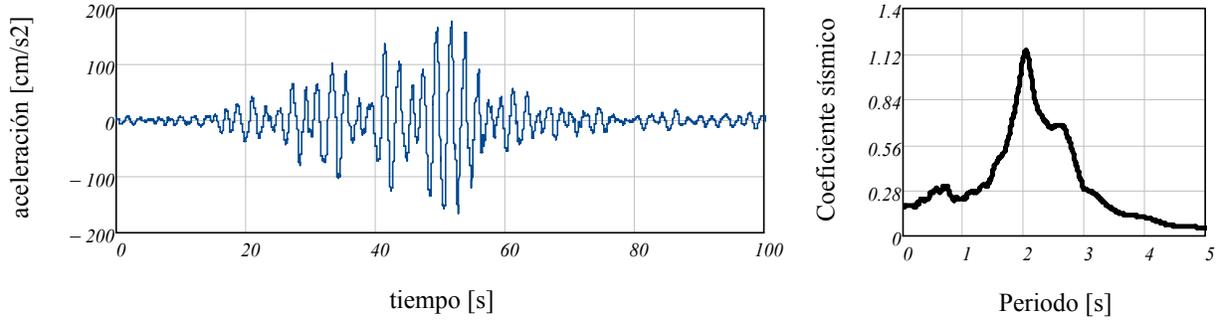


Figura 6.12. Sismo 1: Registro sísmico del 19/09/1985. Estación SC-T B1

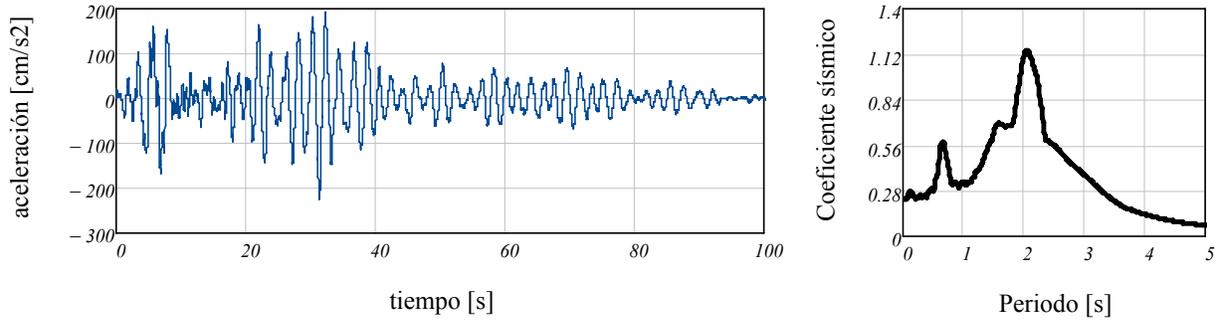


Figura 6.13. Sismo 2: Registro sísmico del 25/04/1989. Estación SC-T B2

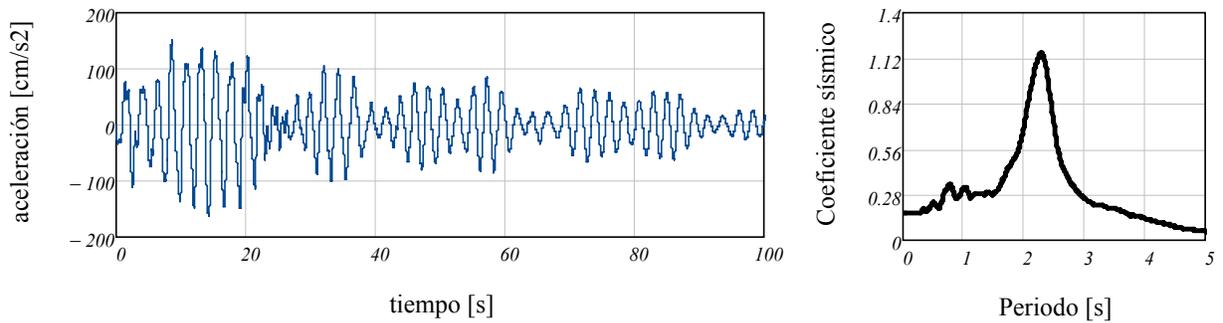


Figura 6.14. Sismo 3: Registro sísmico del 25/04/1989. Estación Sector Popular

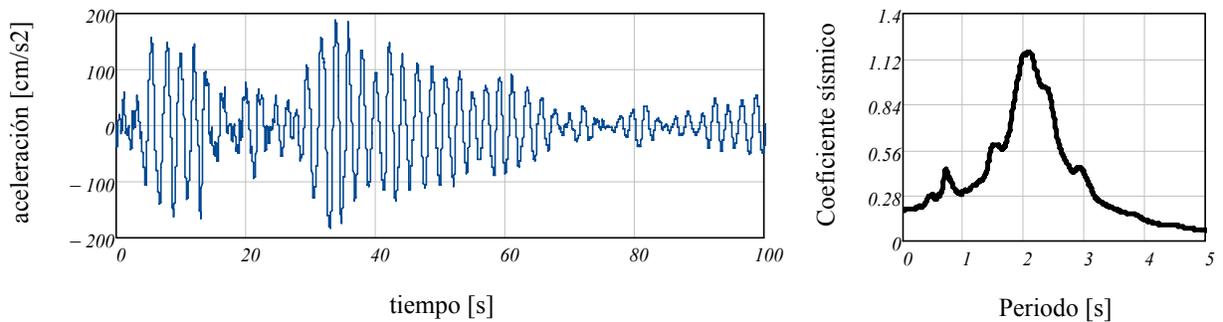


Figura 6.15. Sismo 4: Registro sísmico del 14/09/1995. Estación Sector Popular

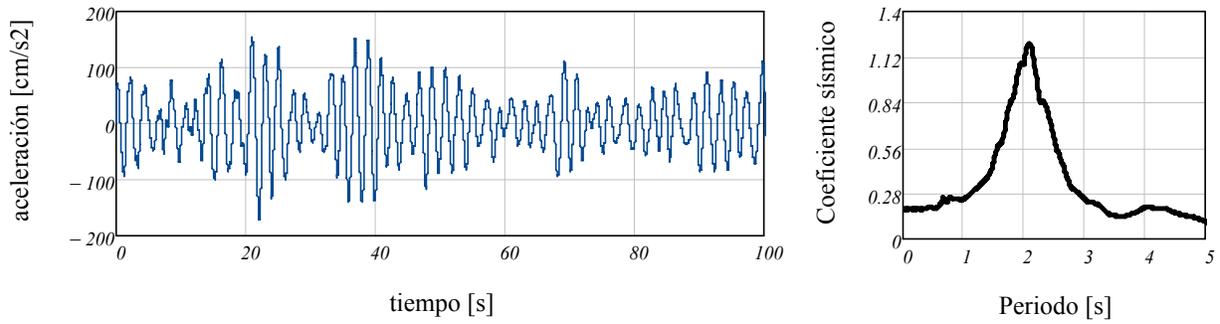


Figura 6.16. Sismo 5: Registro sísmico del 10/09/1995. Estación Sector Popular

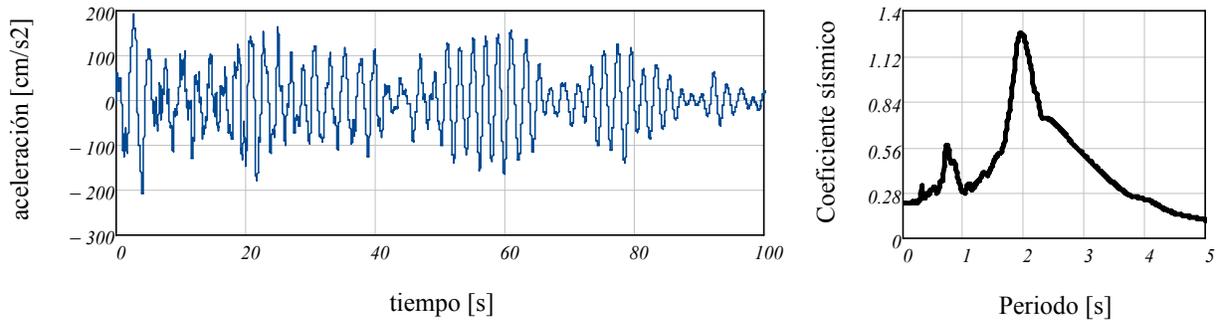


Figura 6.17. Sismo 6: Registro sísmico 1: 11/01/1997. Estación Sector Popular

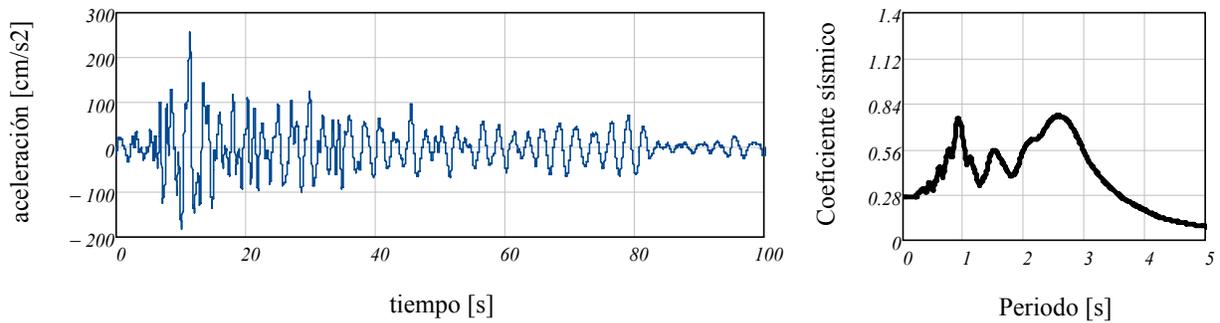


Figura 6.18. Sismo 7: Registro sísmico del 25/04/1989. Estación Balderas

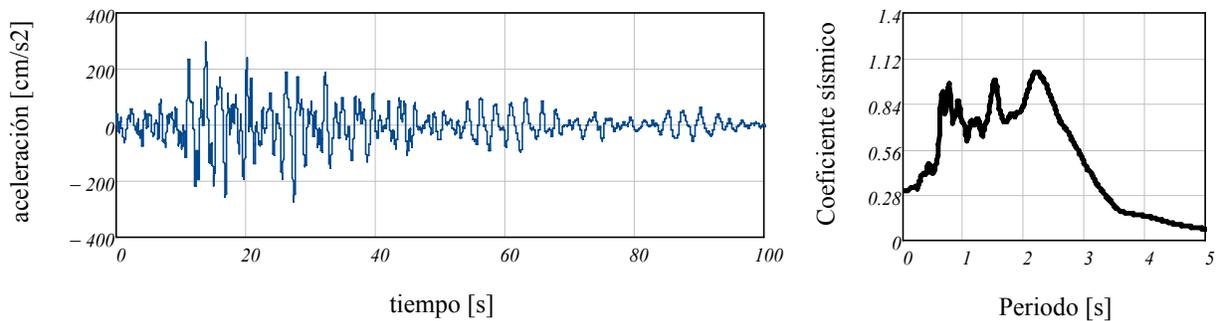


Figura 6.19. Sismo 8: Registro sísmico del 14/09/1995. Estación Balderas

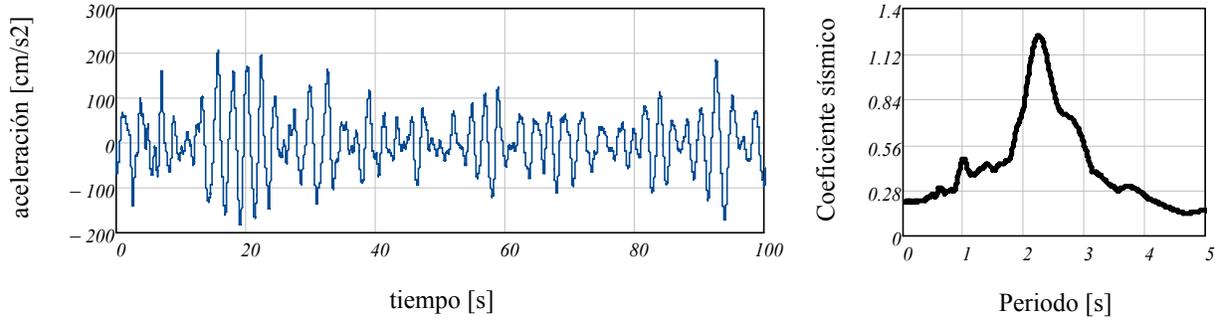


Figura 6.20. Sismo 9: Registro sísmico del 10/09/1995. Estación Balderas

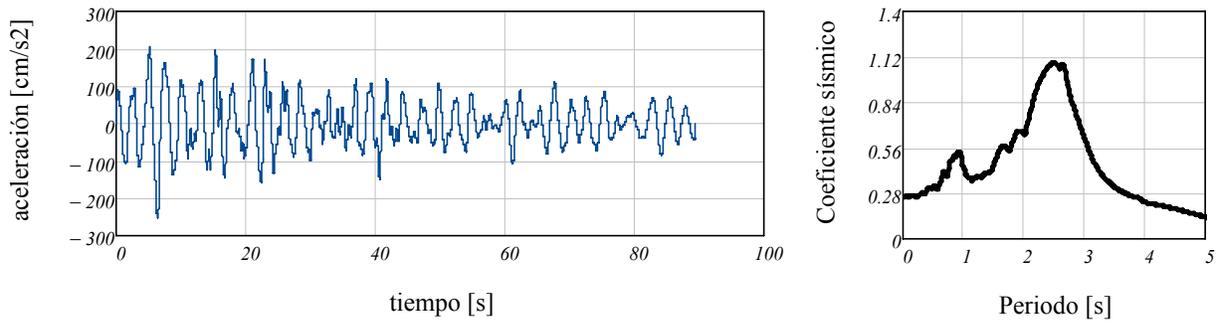


Figura 6.21. Sismo 10: Registro sísmico del 11/01/1997. Estación Balderas

Los resultados de los análisis "paso a paso" se presentan en la figura 6.22. Se muestra con línea gruesa la distorsión obtenida del análisis modal de la estructura real (con el espectro reducido).

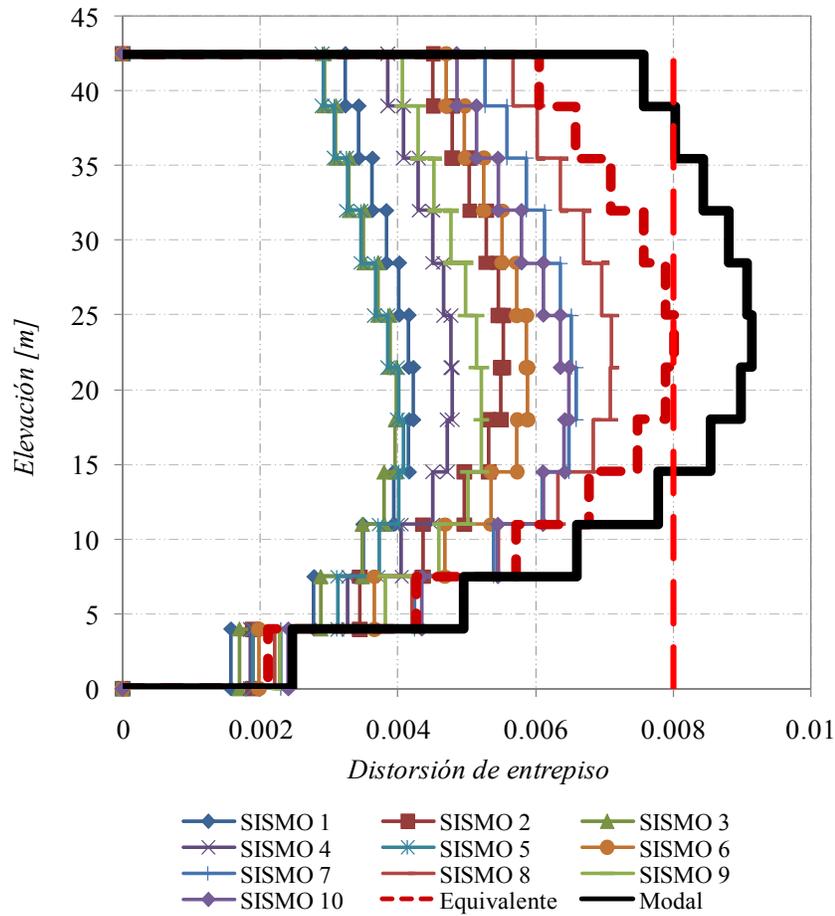


Figura 6.22. Resultados de los análisis "paso a paso" para diez sismos registrados en terreno blando

En la figura 6.22 se puede ver que con los parámetros de los disipadores obtenidos con la metodología aquí propuesta, es posible controlar los desplazamientos laterales en la estructura. Así mismo, las distorsiones de entrepiso calculadas "paso a paso" tienden a seguir la misma distribución que las distorsiones de entrepiso obtenidas con el análisis modal tradicional.

6.2 ESTRUCTURA CON DISIPADORES DE TIPO VISCOSO LINEAL

Como primer paso se calcula la cantidad de energía efectiva que deberá tomar cada disipador. En la tabla 6.11 se muestra el cálculo de la energía para cada resorte elástico ficticio en los entresijos de la estructura.

Tabla 6.11. Energía de deformación de los resortes elásticos en cada entresijo

h= 0.25 Factor de escala de la rigidez de entresijo									
Nivel	Altura [cm]	Longitud de claro [cm]	Ángulo de la diagonal [rad]	Desplazamiento relativo máximo [cm]	Elemento diagonal ficticio			Rigidez estructural básica [T/cm]	Energía elástica del resorte ficticio [J]
					Longitud inicial [cm]	Longitud final [cm]	Deformación [cm]		
1	400	500	0.675	0.878	640.31	641.00	0.69	1740.85	102.34
2	350	500	0.611	1.480	610.33	611.54	1.21	979.28	180.17
3	350	500	0.611	1.983	610.33	611.95	1.63	719.68	237.63
4	350	500	0.611	2.349	610.33	612.25	1.93	589.86	273.52
5	350	500	0.611	2.597	610.33	612.46	2.13	509.59	288.75
6	350	500	0.611	2.736	610.33	612.57	2.24	452.31	284.63
7	350	500	0.611	2.779	610.33	612.61	2.28	405.99	263.46
8	350	500	0.611	2.735	610.33	612.57	2.24	363.52	228.60
9	350	500	0.611	2.622	610.33	612.48	2.15	319.11	184.37
10	350	500	0.611	2.460	610.33	612.35	2.02	266.49	135.5
11	350	500	0.611	2.281	610.33	612.20	1.87	198.12	6
12	350	500	0.611	2.097	610.33	612.05	1.72	107.31	86.58
									39.66

De acuerdo con las tabla 6.2 y 6.4 se tienen los siguientes valores de las ordenadas y periodos de vibrar fundamentales:

Estructura equivalente

$$T_{eq}=0.86 \text{ [s]}$$

$$c_{eq}=1.02$$

$$\alpha=0.25$$

Estructura básica

$$T_o=1.22 \text{ [s]}$$

$$c_o=1.33$$

El factor de corrección de la energía es:

$$\Psi_V = \frac{c_{eq}}{c_o} = 0.77$$

$$F_{EV} = 0.75 \Psi_V^{-1.43} = 1.10$$

La energía efectiva que deberá disipar cada dispositivo deberá ser igual a la multiplicación de la energía elástica del resorte ficticio por el factor F_{EV} .

Con el valor de la energía efectiva para cada caso, la constante de amortiguamiento de cada disipador en cada entrepiso se puede obtener de manera directa mediante la ecuación (3.14). En la tabla 6.12 se muestran los valores de los parámetros para el diseño de los disipadores viscosos lineales para este ejemplo.

Tabla 6.12. Parámetros de diseño de los disipadores viscosos lineales

Periodo fundamental, $T_o=$	1.218	[s]	
Frecuencia fundamental, $w=$	5.159	[rad]	
Nivel	Desplazamientos en los extremos del amortiguador X_o [cm]	Energía efectiva del disipador [J]	Constante de amortiguamiento C [T-s/m]
1	0.69	112.57	29.53
2	1.21	198.18	16.61
3	1.63	261.37	12.21
4	1.93	300.85	10.01
5	2.13	317.60	8.65
6	2.24	313.07	7.67
7	2.28	289.78	6.89
8	2.24	251.44	6.17
9	2.15	202.79	5.41
10	2.02	149.10	4.52
11	1.87	95.23	3.36
12	1.72	43.62	1.82

6.2.1 Análisis modal considerando la presencia de disipadores viscosos lineales

Una vez que se tiene definido las características del amortiguador, el siguiente paso consiste en determinar el nivel de amortiguamiento efectivo en la estructura como se muestra a continuación

$\xi = 0.05$ Amortiguamiento convencional de la estructura

$W_T = 4016.99$ Peso total de la estructura, en [Ton]

$\omega = 5.16$ Frecuencia fundamental de la estructura, en [rad]

$D_{azotea} = 13.41$ Desplazamiento máximo en azotea, en [cm]

$K_C = \frac{W_T \omega^2}{g} = 108.99$ Rigidez de la estructura considerando un grado de libertad, en [T/cm]

$W_S = \frac{1}{2} K_C (D_{azotea})^2 = 9795.91$ Energía potencial disipada por el sistema estructural en cada ciclo de vibración armónica, en [rad]

$$W_D = N_d \sum_{i=1}^N (E_{D_i}) = 15213.59 \quad \text{Energía disipada por el sistema de amortiguadores, en [J]}$$

$$\zeta_{ad} = \frac{W_D}{4 \pi W_S} = 0.12 \quad \text{Amortiguamiento adicional que proporcionan los disipadores en la estructura (ecuación 3.16)}$$

$$\zeta = \zeta_{ad} + \xi = 0.17 \quad \text{Amortiguamiento efectivo de la estructura}$$

Con el valor del amortiguamiento en la estructura es posible reducir el espectro de diseño para la estructura utilizando las fórmulas indicadas en la sección 3.2. En la gráfica 6.23a se muestra el espectro reducido para el valor del amortiguamiento efectivo calculado y un periodo de suelo $T_S = 2[s]$ y en la gráfica 6.23b se muestran las distorsiones de entrepiso obtenidas del análisis modal con el espectro reducido.

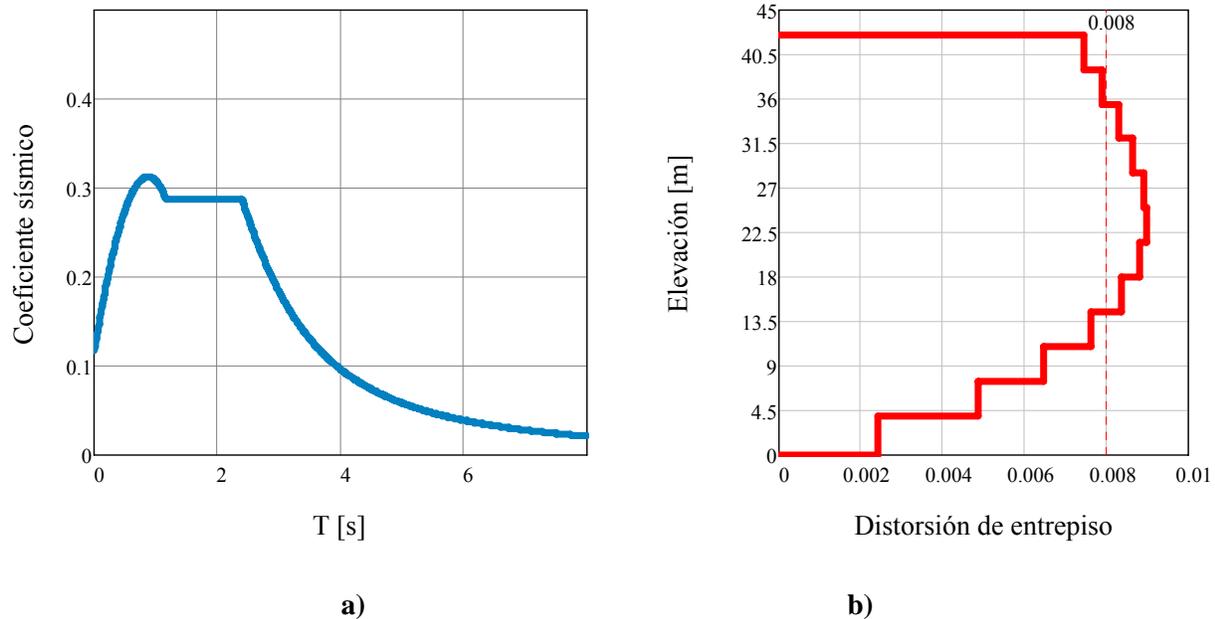


Figura 6.23. Espectro reducido y resultados del análisis modal

Del análisis modal se observa que la máxima distorsión de entrepiso es 0.009 la cual es aproximadamente 15% mayor que la distorsión permisible.

En el caso de los disipadores de tipo viscoso, las conexiones entre las columnas y traveses de la estructura deberán tener la resistencia suficiente para soportar tanto los elementos mecánicos de diseño obtenidos mediante el análisis modal con el espectro reducido como la fuerza máxima que transmite el disipador al nodo. El contraventeo diagonal deberá permanecer con comportamiento elástico en todo momento.

6.2.2 Comportamiento de la estructura ante movimientos sísmicos reales

La estructura se modeló en un programa de cómputo junto con sus respectivos disipadores. Se verificó que el modelo de cómputo reprodujera adecuadamente el comportamiento de los dispositivos disipadores. El modelo de la estructura se analizó "paso a paso" con los movimientos sísmicos de las figuras 6.13 a 6.22. Los resultados de los análisis "paso a paso" se presentan en la figura 6.24. Con línea gruesa se muestra la distorsión máxima obtenida del análisis modal de la estructura real (con el espectro reducido).

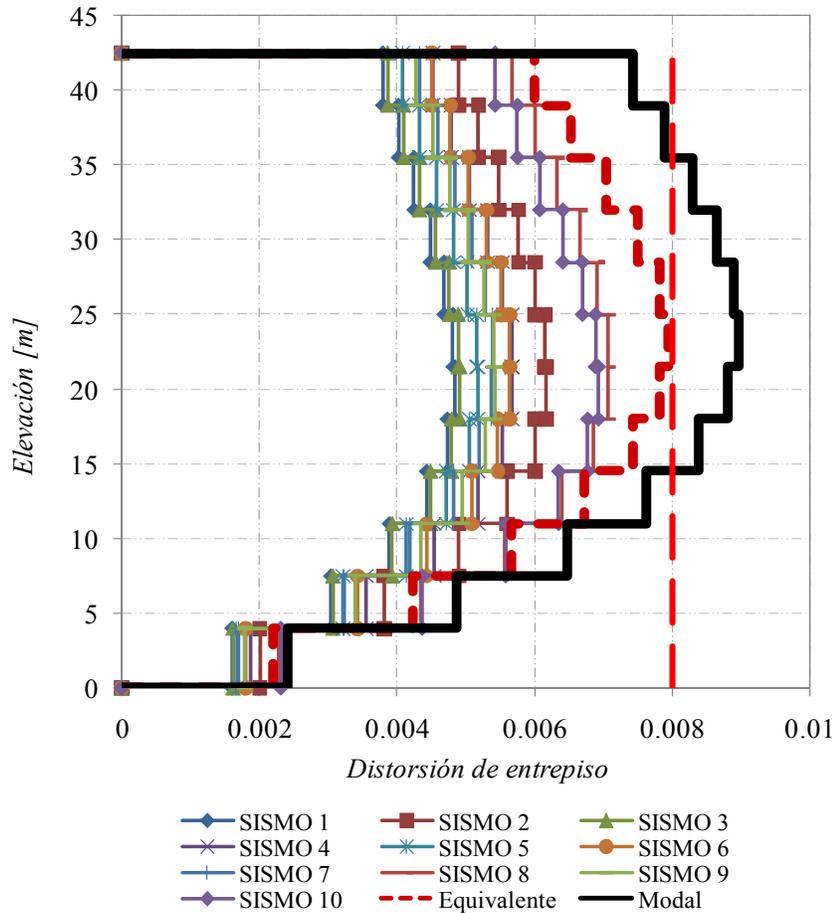


Figura 6.24. Resultados de los análisis "paso a paso" para diez sismos reales registrados en terreno blando

En la figura 6.24 se puede ver que con los parámetros de los disipadores obtenidos con la metodología aquí propuesta, es posible controlar los desplazamientos laterales en la estructura. Así mismo, las distorsiones máximas de entepiso calculadas "paso a paso" tienden a seguir la misma distribución que las distorsiones de entepiso obtenidas con el análisis modal tradicional.

CONCLUSIONES Y APORTACIONES

Se propone una metodología que permite estimar, mediante un análisis modal espectral las propiedades requeridas de los disipadores de energía para un determinado umbral de desplazamiento predefinido. La metodología se enfoca principalmente en conservar a los elementos estructurales dentro de su intervalo de comportamiento elástico mientras que la demanda sísmica no lineal se concentra en los elementos disipadores.

Así mismo, el sistema de disipadores que se obtiene al aplicar la metodología aquí presentada no modifica significativamente las formas modales de la estructura original.

Lo anterior resulta conveniente debido a que de esta manera es posible definir, para un sitio en particular, el sistema de disipación requerido mediante un análisis modal espectral tradicional, teniendo la ventaja de conocer con cierto grado de exactitud los desplazamientos laterales máximos que podrían esperarse en la estructura habilitada con disipadores de energía.

Debe decirse que las ecuaciones mostradas en los capítulos correspondientes de este documento corresponden a arreglos convencionales de los disipadores así como a sistemas cuya deformación lateral ante un sismo es principalmente a cortante. En caso de que el arreglo del sistema de disipación sea muy distinto a los aquí estudiados el diseñador deberá evaluar el efecto de los disipadores (tales como las fuerzas que se generan en la estructura) de acuerdo a la geometría del arreglo que se proponga, así mismo deberá tenerse en cuenta el comportamiento dinámico de cada estructura y si esta se deforma preferentemente a flexión o no.

Con el objeto de que la metodología aquí presentada pudiera ser implementada en la práctica profesional del Distrito Federal, se propusieron también reglas de reducción para los espectros de diseño incluidos en el Anexo A de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (2004).

Las reglas de reducción para los espectros de diseño toman en cuenta de manera explícita no solo las características sísmológicas del valle de México sino también el comportamiento de los sistemas estructurales con los diferentes sistemas de disipación.

La metodología aquí propuesta pretende ser una metodología integral para analizar y diseñar estructuras con disipadores de energía cuya mayor ventaja radica en que los factores y coeficientes utilizados toman en cuenta las condiciones sísmicas de la Ciudad de México así como el tipo de construcciones comunes que pueden encontrarse en la realidad.

REFERENCIAS

- Akiyama, H., 1988. *Earthquake resistant design based on the energy concept*. Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, vol.5, paper 8-1-2, Tokyo, Japan, pp. 905-910.
- Avilés López, J. y Pérez Rocha, L. E. (2004), *Bases para nuevas disposiciones reglamentarias sobre interacción dinámica suelo-estructura*, Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS, vol 71, 1-36
- Alamilla, J (1997), *Simulación de registro de temblores en el valle de México mediante proceso estocásticos modulados en amplitud y frecuencia*, Tesis de maestría, DEPI - UNAM, México
- Arroyo Espinoza, D. y Terán Gilmore A. (2002), *Factores de reducción de fuerzas sísmicas para el diseño de estructuras con sistemas pasivos de disipación de energía*, Revista de Ingeniería Sísmica, vol 66, 73-93
- Baber T. T. y Wen Y. K. (1981), *Random vibration of hysteretic, degrading system*, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Proceeding ASCE, vol 107, 1069-1087
- Base Mexicana de Sismos Fuertes* (1999), Disco compacto editado por la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, A C
- Bommer J. J. y Elnashai A. S. (1999), *Displacement spectra for seismic design*, *Journal of Earthquake Engineering*, vol 3, 1-32
- Bommer J. J., Elnashai A. S. y Weir A. G. (2000), *Compatible acceleration y displacement spectra for seismic design codes*, Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland; trabajo No 207
- Bommer J. J. y Mendis R. (2004), *Scaling of spectral displacement ordinates with damping ratios*, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol 34, 145-165, John Wiley & Sons
- Cameron W. I. y Green R. A. (2007), *Damping correction factors for horizontal ground-motion response spectra*, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(3), 934-960
- Castillo T. y Ruiz Gómez S. E. (2010), *Regla para reducir las ordenadas espectrales para el diseño sísmico de estructuras con disipadores de tipo viscoso desplantadas en el valle de México*, Memorias del XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, León, Gto, México
- Castillo T. y Ruiz Gómez S. E. (2014), *Reduction Factors for Seismic Design Spectra for Structures with Viscous Energy Dampers*, *Journal of Earthquake Engineering*, 18: 323-349, Tylor& Francis group

Constantinou M. y Symans M. (1995), *Experimental study of seismic response of buildings with supplemental fluid dampers*, Department of Civil Engineering, State University of New York Buffalo, NY, EUA

Esteva L. (1968), *Bases para la formulación de decisiones de diseño sísmico*, Serie azul del Instituto de Ingeniería, UNAM, vol 182

Esteva L. y Ruiz S. E. (1989), *Seismic failure rates of multistory frames*, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 115(2), 268-284

Federal Emergency Management Agency (2003), NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, FEMA 450, Building Seismic Safety Council, National Institute of Building Science, Washington, D C

Jara J. M. (1994), *Estado del arte sobre dispositivos para reducir daños provocados por temblores*, *Revista de Ingeniería Sísmica*, vol 47, 35-79

Lin Y. Y., Miranda E. y Chang K. Ch. (2005), *Evaluation of damping reduction factors for estimating elastic response of structures with high damping*, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol 34, 1427-1443, John Wiley & Sons

Lin Y.Y. y Chang K. C. (2004), *Study on damping reduction factor for buildings under earthquake ground motions*, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 129(2), 206-214

Meli R. (2001), *Diseño estructural*, Editorial Limusa, primera reimpression de la segunda edición, México, 592 pp.

Naeim F. y Kircher C. A. (2001), *On the damping adjustment factors for earthquake response spectra*, *The Structural Design of Tall Buildings*, vol 10, 361-369, John Wiley & Sons

Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (2004), Gaceta Oficial del Distrito Federal, 6 de octubre, México, D F, México

Ordaz M., Reinoso E. y Pérez-Rocha L. E. (1996), *Criterios de diseño sísmico: consideraciones para suelos blandos*, *Revista de Ingeniería Sísmica*, vol 53, 25-36

Ramírez O., Constantinou M., Kircher C., Whittaker A., Johnson M. y Gómez J., (2001), *Development and evaluation of simplified procedures for analysis and design of buildings with passive energy dissipation systems*, Technical Report MCEER-00-0010. Buffalo, NY. USA.

Reyes Salinas Juventino Carlos (1999), *El estado límite de servicio en el diseño sísmico de edificios*, Tesis Doctoral, UNAM, México.

Rivera J. L. y Ruiz S. E. (2007), *Design approach based on UAFR spectra for structures with displacement- dependent dissipating elements*, *Earthquake Spectra*, 23(2), 417-439

Ruiz Gómez, S E (1999), *Alternativas para el control de la respuesta sísmica*, *Revista de Ingeniería Civil*, vol 357, 12-22

Ruiz Gómez, S. E. (2011), *Recomendaciones para diseño con disipadores de energía (en el marco de las NCDS del RCDF)*, Serie de Investigación y Desarrollo del Instituto de Ingeniería de la UNAM, No. 667, México D.F.

Tena Colunga, A (2003), *Disipación pasiva de energía en México: un estado del arte*, Memorias, VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Barquisimeto, Venezuela, CD-ROM

Terán Gilmore A., Virto-Cambray N. (2009). *Preliminary Design of Low-Rise Buildings Stiffened with Buckling-Restrained Braces by a Displacement-Based Approach*, Earthquake Spectra vol.25, 1, 185–211.

Tolis S. V. y Faccioli E. (1999), *Displacement design spectra*, Journal of Earthquake Engineering, 3(1), 107-125.

Tsai K.C., Chen H.W., Hong C. P., y Su Y. F. (1993), *Design of Steel Triangular Plate Energy absorbers for seismic-resistant construction*, Earthquake Spectra, vol9, No. 3;505-528.

Whittaker A., Bertero V.V. y Alonso J. (1989), *Earthquake simulator testing of Steel Plate Added Damping and Stiffness elements*. Report No. 89/02, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.

APÉNDICE A

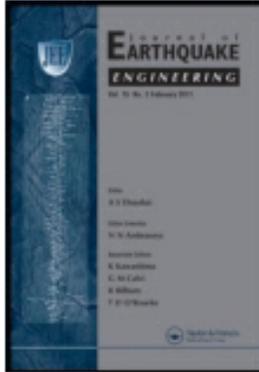
Artículo publicado en la revista *Journal of Earthquake Engineering*

This article was downloaded by: [UNAM Ciudad Universitaria]

On: 20 March 2014, At: 09:25

Publisher: Taylor & Francis

Informa Ltd Registered in England and Wales Registered Number: 1072954 Registered office: Mortimer House, 37-41 Mortimer Street, London W1T 3JH, UK



Journal of Earthquake Engineering

Publication details, including instructions for authors and subscription information:

<http://www.tandfonline.com/loi/ueqe20>

Reduction Factors for Seismic Design Spectra for Structures with Viscous Energy Dampers

Tomás Castillo^a & Sonia E. Ruiz^a

^a Department of Applied Mechanics, Universidad Nacional Autónoma de México, Institute of Engineering, Coyoacan, Mexico

Published online: 19 Mar 2014.

To cite this article: Tomás Castillo & Sonia E. Ruiz (2014) Reduction Factors for Seismic Design Spectra for Structures with Viscous Energy Dampers, *Journal of Earthquake Engineering*, 18:3, 323-349, DOI: [10.1080/13632469.2013.860932](https://doi.org/10.1080/13632469.2013.860932)

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/13632469.2013.860932>

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

Taylor & Francis makes every effort to ensure the accuracy of all the information (the "Content") contained in the publications on our platform. However, Taylor & Francis, our agents, and our licensors make no representations or warranties whatsoever as to the accuracy, completeness, or suitability for any purpose of the Content. Any opinions and views expressed in this publication are the opinions and views of the authors, and are not the views of or endorsed by Taylor & Francis. The accuracy of the Content should not be relied upon and should be independently verified with primary sources of information. Taylor and Francis shall not be liable for any losses, actions, claims, proceedings, demands, costs, expenses, damages, and other liabilities whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with, in relation to or arising out of the use of the Content.

This article may be used for research, teaching, and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, redistribution, reselling, loan, sub-licensing, systematic supply, or distribution in any form to anyone is expressly forbidden. Terms & Conditions of access and use can be found at <http://www.tandfonline.com/page/terms-and-conditions>

Reduction Factors for Seismic Design Spectra for Structures with Viscous Energy Dampers

TOMÁS CASTILLO and SONIA E. RUIZ

Department of Applied Mechanics, Universidad Nacional Autónoma de México,
Institute of Engineering, Coyoacan, Mexico

A simple mathematical expression is proposed to estimate spectra reduction damping factors for seismic design of systems with viscous dampers. The expression is obtained from the ratios between ordinates of uniform hazard spectra associated with two different return intervals (50 and 125 years), corresponding to sites with different types of soil within the Valley of Mexico. The expression proposed depends on the dominant period of the soil, and on both the vibration period and damping ratio of the structural system. Values of the damping factors proposed here are comparable to those recommended by different authors and seismic design building codes.

Keywords Damping Reduction Factors; Uniform Hazard Spectra; Return Interval; Limit States; Seismic Design Codes

1. Introduction

The ordinates of the design spectra specified in most of the seismic design codes throughout the world can be generally reduced by: (a) ductility factors, (b) over-strength factors, and (c) damping factors. Damping factors are used to reduce the spectral ordinates for the design of buildings provided with seismic energy dampers or, alternatively, to take into account the effect of soil-structure interaction [Avilés and Pérez-Rocha, 2004].

There is a necessity to obtain rules (expressed by means of simple mathematical expressions) about the damping factors applicable to design spectra corresponding to high seismic hazard sites where the construction of structures with seismic energy dissipation systems can be a good solution for reducing the structural damage caused by intense earthquakes and/or for controlling the structural response under low-intensity seismic motions.

Damping reduction factors of structures have been obtained by means of different approaches and techniques of analysis. Related literature contains several studies on supplementary damping-based reduction factors for single degree-of-freedom (SDOF) systems.

Newmark and Hall [1982] proposed various approximate methods to estimate the elastic response spectrum corresponding to systems with high damping ratios. Their method is not only the earliest but also the best known. Their results have been adopted by most design codes and guidelines. In this method, the damping reduction factors for median estimates

Received 27 August 2012; accepted 28 October 2013.

Address correspondence to Tomás Castillo, Department of Applied Mechanics, Institute of Engineering, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 3000, Coyoacan 04510 Mexico, D.F., Mexico. E-mail: T.CastilloC@ingen.unam.mx

Color versions of one or more of the figures in the article can be found online at www.tandfonline.com/ueqe.

of response (i.e., 50% probability of exceedance) are expressed by an equation which was derived from the spectrum amplification factors that are used to multiply the peak ground acceleration, velocity, and displacement to create the elastic design response spectrum.

In 1987, Ashour developed a relationship that described the decrease in displacement response spectrum for elastic systems with changes in viscous damping. Natural vibration periods of 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, and 3.0 s, as well as viscous damping ratios of 0, 2, 5, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 125, and 150% were considered. Three actual and 12 artificial earthquake acceleration records were used as excitation inputs. The mathematical expression for the damping factors derived from that study was adopted by NEHRP [1994] for the design of buildings with passive energy dissipation systems.

In 1989, Wu and Hanson presented a set of damping reduction factors from a statistical study of inelastic response spectra with high damping ratios. Ten earthquake records (one artificial and nine real earthquakes) were used as input ground motions for elastoplastic SDOF systems with damping ratios between 10 and 50%. Ductility ratios were considered to range from 1.0 to 6.0 s. Two periods in the constant acceleration region ($T = 0.1$ and 0.5 s), one in the constant velocity region and two in the constant displacement region ($T = 3.0$ and 10.0 s) were selected. The expression to describe the behavior of the damping reduction factors was derived from the displacement response spectra.

Bommer and Elnashai [1999] derived attenuation laws for horizontal displacement response spectral ordinates based on a dataset of European strong motion records. The results were simplified into a parametric form that allows the straightforward construction of displacement design spectra for six damping levels.

Ramirez *et al.* [2000] established values for the reduction damping factors derived from twenty horizontal components of ten earthquake history sets for linear elastic SDOF systems with damping ratios ranging from 2–100%. Each of these sets was associated with earthquakes with a magnitude larger than 6.5, an epicenter distance between 10 and 20 km, and site conditions characterized by site classes C–D in accordance with the 2000 NEHRP Provisions. No near-field or soft-soil histories were included. Periods considered were up to 4.0 s. They proposed a bilinear model when the total damping of the structure, ζ , is lower than 50%; the model becomes trilinear when the viscous damping ratios are larger than 50%. On the basis of this model, a simplified two-parameter model was adopted by the NEHRP 2000 for design of buildings with damping systems.

Naeim and Kircher [2001] studied the dependence of the viscous damping factors on the vibration period of the ground for a large number of seismic response spectra by means of statistical analyses. Lin and Chang [2003] proposed a period-dependent formula derived from the displacement response of linear elastic SDOF systems with damping ratios between 2 and 50% and with periods of vibration from 0.01 to 10 s. In their study, a total of 1053 acceleration time histories from 102 earthquakes recorded in the U.S.A. were selected as input ground motions. All ground motions have a peak ground acceleration (PGA) between 25 and 1600 gals, a surface wave magnitude between 5.5 and 7.5, a distance to closest fault rupture between 0.1 and 180 km, and site conditions characterized by site classes B–D in accordance with the 2000 NEHRP Provisions.

Based on the study of the response of SDOF systems subjected to accelerograms recorded in Mexico City, Arroyo-Espinoza and Terán-Gilmore [2003] proposed expressions to estimate the strength reduction factor that should be used to reduce the elastic design strength spectra in order to establish the design seismic forces for structures having different combinations of plastic and viscous energy-dissipating capacities.

Cameron and Green [2007] found that the reduction factors for linear oscillators depend on the frequency content, earthquake magnitude and tectonic characteristics of the

site. In addition, they also found that in the case of oscillators with damping factors lower than 1%, the reduction factors depend on the distance between the site and the source.

Cardone *et al.* [2009] examined the accuracy of different damping reduction factor equations included in different design codes for the evaluation of approximate high-damping elastic response spectra. The examination of the damping reduction factors was carried out based on approximately 120 actual seismic records corresponding to seismic events with magnitudes between 6 and 8, epicentral distances ranging from 1km to 100km, and peak ground accelerations higher than 0.1 g. Exact and approximate displacement elastic response spectra for three different damping ratios (10, 20, and 30%) were compared.

The studies mentioned above use different data bases of seismic records for analysis purposes. Therefore, the resulting reduction factors are closely related to the characteristics of the set of seismic motions used in each study.

As opposed to the references mentioned above, a reduction damping factor rule (expressed by means of a mathematical expression) is obtained in the present study from ratios of Uniform Hazard Spectral (UHS) ordinates associated with different return intervals, which correspond to systems located in the Valley of Mexico. The analysis is performed separately for the spectral ordinates ratios of UHS corresponding to a high annual exceedance rate (which corresponds to a short return interval, $T_R = 50$ years) and, alternatively, of UHS associated with a low annual exceedance rate (which corresponds to a long return interval, $T_R = 125$ years). (The annual exceedance rate corresponding to a given intensity represents the mean number of times that the intensity is exceeded in one year.) Thus, two sets of the parameter values included in the mathematical expression proposed are obtained, one set of values for $T_R = 50$ years and the other for $T_R = 125$ years. The expression proposed here leads to values comparable to those calculated with other reduction rules obtained by different authors and seismic design recommendations throughout the world.

2. General Methodology

For the purpose of determining the UHS corresponding to each T_R , a seismic hazard analysis in the Valley of Mexico was initially performed. In order to take into account the dynamic characteristics of the different types of soil found in the valley, it was necessary to subdivide the geographic region in seven zones, in accordance with the value of the dominant vibration period of the soil.

In order to define the empirical transfer functions through the soil, correlation was made of the spectral ordinates corresponding to accelerograms recorded simultaneously in two stations (one of them on firm ground and the other on softer soil). Then, using the methodology proposed by Esteva [1968], seismic hazard curves were obtained for each zone. These curves contain values of the annual exceedance rates for different seismic intensities (pseudo-acceleration spectral ordinates) at the site, for several structural periods and damping ratios.

Using the seismic hazard curves obtained previously, the value of the spectral acceleration (corresponding to a return interval selected) was obtained, and the Uniform Hazard Spectra (UHS) curves were plotted for different zones of the Valley of Mexico for different damping ratios. Two annual exceedance rates of intensity were selected: (a) $\nu = 0.02$ (return interval $T_R = 50$ years) for the purpose of verifying the serviceability design condition and (b) $\nu = 0.008$ (return interval $T_R = 125$ years) for the collapse design condition. It was verified that the UHS values that correspond to a return interval of 125 years and

5% of critical damping (which correspond to the design of structures under collapse conditions) were equal or lower than the design spectra ordinates recommended by the Mexico City Building Code (2004). This verification was also performed by Ordaz *et al.* [2003]. In the same way, it was verified that the UHS curves corresponding to a return interval of 50 years were equal to or lower than the design spectra corresponding to the serviceability limit state. In the case of the Mexico City Building Code (2004), the ordinates of the serviceability design spectra are approximately seven times lower than those corresponding to the near-collapse design spectra.

Spectral ratios corresponding to each return interval were obtained from ratios between UHS associated with conventional systems (structures with 5% of damping ratio) and UHS for structures with damping ratios of 10, 15, 20, 25, 30, and 35%. Then, a mathematical expression of the damping factor was fitted to the spectral ratios obtained in the previous step. The expression for the damping factor proposed here is a function of the structural period, the dominant vibration period of the soil and the damping ratio corresponding to the damping of the structural system.

3. Calculation of Seismic Hazard Curves and Uniform Hazard Spectra

For the purpose of integrating a data base that takes into account the dynamic characteristics of the Valley of Mexico, 334 seismic motions recorded by the accelerometer network of the valley were selected (see Fig. 1). Two sets of earthquake motions with similar epicenter distances were chosen. The seismic motions associated with low intensities (called here Group I) were caused by subduction seismic events with magnitudes (M) lower than or equal to 6.9, whereas the motions associated with high intensities (called here Group II) corresponded to subduction events with magnitudes equal to or higher than 6.9. The pseudo-acceleration response spectra of all records were calculated and their peak spectral periods (depending on the type of soil where the motion was recorded) were determined. Tables 1 and 2 present a list of the recorded accelerograms corresponding to Groups I and II, respectively. Tables 1 and 2 show the name of the station in column 1; columns 2 and 3 show the coordinates of the station; column 4 shows the institution in-charge and column 5 shows the date when the earthquake occurred. The name of the record and the magnitude (M) of the seismic event are shown in columns 6 and 7.

The seismic motions were classified into seven zones within the Valley of Mexico, depending on the period where the peak spectral pseudo-acceleration took place and on the location of the station within the accelerometer network. Table 3 contains the list of the seven zones (A–G) proposed here, together with their corresponding intervals of dominant vibration period of the soil (T_s). It is noticed that zone A is associated with $T_s \leq 0.5$ s, which corresponds to firm ground (see Fig. 1), and zone G is associated with $3.0 < T_s \leq 4.0$ s, which corresponds to very soft soil (lake-bed ground).

Figures 2a–g and 3a–g show the response spectra normalized with respect to the peak ground acceleration, for 5% of the critical damping, corresponding to each zone and each group of seismic ground motions. The response spectra shown in Figs. 2a–g correspond to Group I ($M < 6.9$) and those shown in Figs. 3a–g correspond to Group II ($M \geq 6.9$). It can be observed that the spectral shapes in Figs. 2a–d (zones A–D, Group I) are similar to those in Figs. 3a–d (zones A–D, Group II); however, the spectral shapes in Figs. 2e–g (zones E–G, Group I) are very different (especially for long periods) from those in Figs. 3e–g (zones E–G, Group II), which means that the influence of the magnitude (M) of the seismic events is significant for soils with dominant periods $T_s > 2.0$ s (zones E–G); however, the influence of the seismic magnitude is not relevant for soils with $T_s \leq 2.0$ s. It can also be seen that for seismic events with large magnitude the amplitude of the motions in soft soils

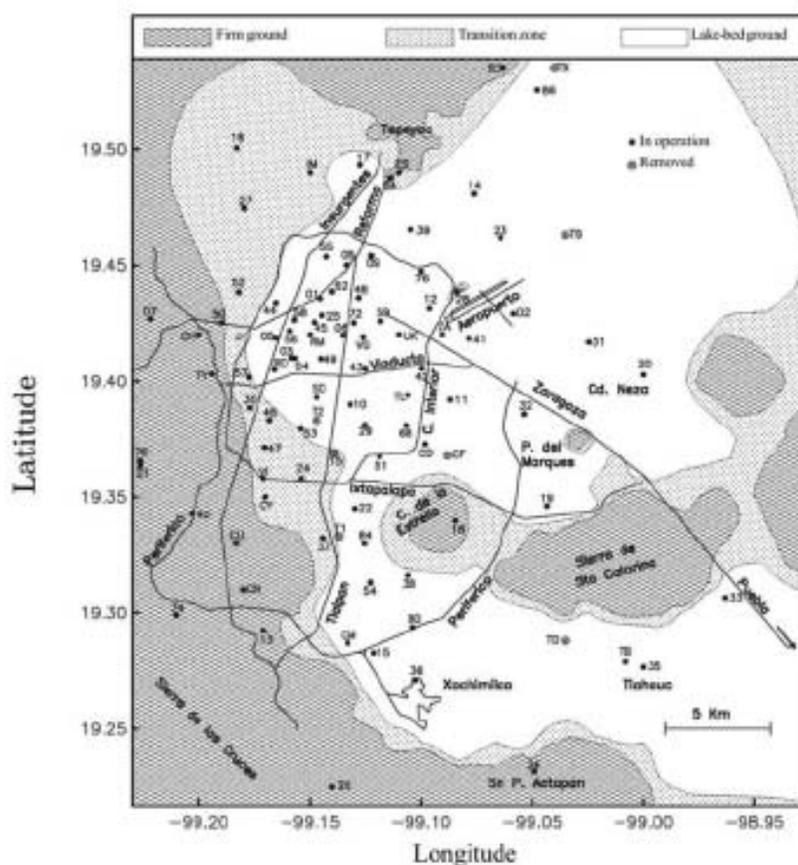


FIGURE 1 Accelerometer network of the Valley of Mexico. [Mexican Strong Earthquakes Data Base, 1999].

are larger for longer structural periods. It is well known that the change in the spectral shape can be attributed to seismic source effects (including magnitude and frequency content) as well as to the fundamental period of the soil. An extensive discussion about this fact can be found in Ordaz *et al.* [1996].

It can also be observed in Figs. 2a–g that the normalized spectra of the not-so-intense motions (Group I) show spectral peaks that are not defined in terms of a single period, whereas Figs. 3a–g show that for the most intense motions (Group II) the spectral peaks are grouped around the dominant period of the soil. Thus, the period intervals indicated in Table 3 were obtained based on the pseudo-acceleration spectra corresponding to seismic motions of Group II.

4. Ratios of Uniform Hazard Spectral Ordinates

The data base mentioned previously was used to evaluate the seismic hazard for each zone listed in Table 3. To calculate the seismic hazard curves, the formulation suggested by Esteva [1968] was used. This formulation indicates that if the seismic hazard curves and the

TABLE 1 Ground motions data base. Group I

Station	Coordinates			Seismic event data		
	Latitude	Longitude	Institution	Date	Record	Magnitude
Chapultepec	19.42	99.20	CENAPRED	13-03-96	CHAS9603131(2)-1	4.40
Chapultepec	19.42	99.20	CENAPRED	27-03-96	CHAS9603271(1)-1	4.90
Superficie	19.42	99.20	CENAPRED	27-03-96	CHAS9603271(2)-009157	4.90
Superficie	19.42	99.20	CENAPRED	23-04-96	CHAS9604231(1)-01	4.90
Superficie	19.42	99.20	CENAPRED	23-04-96	CHAS9604231(2)-01	4.90
IMP SUPERFICIE	19.49	99.15	CENAPRED	08-05-97	IMPS9705081(1)-01	4.30
IMP SUPERFICIE	19.49	99.15	CENAPRED	08-05-97	IMPS9705081(2)-01	4.30
SAN SIMON	19.38	99.15	FICA	11-05-90	SI539005N00E	4.90
SAN SIMON	19.38	99.15	FICA	11-05-90	SI539005N90E	4.90
SAN SIMON	19.38	99.15	CIRES	13-03-96	SI539603N00E	4.90
SAN SIMON	19.38	99.15	CIRES	13-03-96	SI539603N90E	4.90
GRANJAS	19.48	99.18	FICA	11-05-90	GR279005N00E	4.90
GRANJAS	19.48	99.18	FICA	11-05-90	GR279005N90E	4.90
GRANJAS	19.48	99.18	CIRES	27-03-96	GR279603N00E	4.90
GRANJAS	19.48	99.18	CIRES	27-03-96	GR279603N90E	4.90
GRANJAS	19.48	99.18	CIRES	18-07-96	GR279607N00E	4.70
GRANJAS	19.48	99.18	CIRES	18-07-96	GR279607N90E	4.70
XOTEPINGO	19.33	99.14	FICA	11-05-90	DX379005N00E	4.90
XOTEPINGO	19.33	99.14	FICA	11-05-90	DX379005N90E	4.90
MIRAMONTES	19.28	99.13	FICA	11-05-90	M1159005111(1)	4.90
MIRAMONTES	19.28	99.13	FICA	11-05-90	M1159005111(2)	4.90
MIRAMONTES	19.28	99.13	CIRES	27-03-96	M1159603271(1)	4.90
MIRAMONTES	19.28	99.13	CIRES	27-03-96	M1159603271(2)	4.90
MIRAMONTES	19.28	99.13	CIRES	23-04-96	M1159604231(1)	4.90
MIRAMONTES	19.28	99.13	CIRES	23-04-96	M1159604231(2)	4.90
SAN SIMON	19.38	99.15	FICA	11-05-90	SI539005111(1)	4.90

SAN SIMON	19.38	99.15	CIRES	27-03-96	SI539603271(1)	4.90
SAN SIMON	19.38	99.15	CIRES	27-03-96	SI539603271(2)	4.90
SAN SIMON	19.38	99.15	CIRES	23-04-96	SI539604231(1)	4.90
SAN SIMON	19.38	99.15	CIRES	23-04-96	SI539604231(2)	4.90
SAN SIMON	19.38	99.15	CIRES	08-05-97	SI539705081(1)	4.30
SAN SIMON	19.38	99.15	CIRES	08-05-97	SI539705081(2)	4.30
ALAMEDA	19.44	99.15	FICA	11-01-90	AL019005.111N00EdaiA	4.90
ALAMEDA	19.44	99.15	FICA	11-01-90	AL019005.111N90EdaiA	4.90
ALAMEDA	19.44	99.15	CIRES	23-04-96	AL019604.231N00EdaiA	4.90
ALAMEDA	19.44	99.15	CIRES	23-04-96	AL019604.231N90EdaiA	4.90
C.U. JUAREZ	19.41	99.16	FICA	11-05-90	CJ039005.111N00EdaiA	4.90
C.U. JUAREZ	19.41	99.16	FICA	11-05-90	CJ039005.111N90EdaiA	4.90
C.U. JUAREZ	19.41	99.16	CIRES	27-03-96	CJ039603.271N00EdaiA	4.40
C.U. JUAREZ	19.41	99.16	CIRES	27-03-96	CJ039603.271N90EdaiA	4.40
C.U. JUAREZ	19.41	99.16	CIRES	23-04-96	CJ039604.231N00EdaiA	4.90
C.U. JUAREZ	19.41	99.16	CIRES	23-04-96	CJ039604.231N90EdaiA	4.90
SECTOR POPULAR	19.37	99.12	FICA	11-05-90	SP519005.111N00EdaiA	4.90
SECTOR POPULAR	19.37	99.12	FICA	11-05-90	SP519005.111N90EdaiA	4.90
SECTOR POPULAR	19.37	99.12	CIRES	27-06-96	SP519603.271N00EdaiA	4.40
SECTOR POPULAR	19.37	99.12	CIRES	27-06-96	SP519603.271N90EdaiA	4.40
SECTOR POPULAR	19.37	99.12	CIRES	08-05-97	SP519604.231N00EdaiA	4.90
SECTOR POPULAR	19.37	99.12	CIRES	08-05-97	SP519604.231N90EdaiA	4.90
SECTOR POPULAR	19.37	99.12	CIRES	08-05-97	SP519705.081N00EdaiA	4.30
SECTOR POPULAR	19.37	99.12	CIRES	08-05-97	SP519705.081N90EdaiA	4.30
TLATELOLCO	19.44	99.14	FICA	11-05-90	TL559005.111N00EdaiA	4.90
TLATELOLCO	19.44	99.14	FICA	11-05-90	TL559005.111N90EdaiA	4.90
TLATELOLCO	19.44	99.14	CIRES	27-03-96	TL559603.271N00EdaiA	4.40
TLATELOLCO	19.44	99.14	CIRES	27-03-96	TL559603.271N90EdaiA	4.40
TLATELOLCO	19.44	99.14	CIRES	23-04-96	TL559604.231N00EdaiA	4.90

(Continued)

TABLE 1 (Continued)

Station	Coordinates			Seismic event data		
	Latitude	Longitude	Institution	Date	Record	Magnitude
TLATELOLCO	19.44	99.14	CIRES	23-04-96	TL559604.231N90E daiA	4.90
MEYEHUALCO	19.35	99.04	CIRES	27-03-96	MY199603271(1)	4.90
MEYEHUALCO	19.35	99.04	CIRES	27-03-96	MY199603271(2)	4.90
MEYEHUALCO	19.35	99.04	CIRES	23-04-96	MY199604231(1)	4.90
MEYEHUALCO	19.35	99.04	CIRES	23-04-96	MY199604231(2)	4.90
VILLA DEL MAR	19.38	99.13	FICA	11-05-90	VM299005111(1)	4.90
VILLA DEL MAR	19.38	99.13	FICA	11-05-90	VM299005111(2)	4.90
VILLA DEL MAR	19.38	99.13	CIRES	13-12-94	VM299412131(1)	4.90
VILLA DEL MAR	19.38	99.13	CIRES	13-12-94	VM299412131(2)	4.90
BUENOS AIRES	19.41	99.15	FICA	11-05-90	BA499005111(1)	4.90
BUENOS AIRES	19.41	99.15	FICA	11-05-90	BA499005111(2)	4.90
BUENOS AIRES	19.41	99.15	CIRES	23-04-96	BA499604231(2)	4.90
ROMA B SUPERFICIE	19.42	99.16	CENAPRED	27-03-96	RMB89603271(1)	4.90
ROMA B SUPERFICIE	19.42	99.16	CENAPRED	27-03-96	RMB89603271(2)	4.90
ROMA B SUPERFICIE	19.42	99.16	CENAPRED	23-04-96	RMB89604231(1)	4.90
ROMA B SUPERFICIE	19.42	99.16	CENAPRED	23-04-96	RMB89604231(2)	4.90
BALDERAS	19.43	99.20	FICA	11-05-90	BL459005111(1)	4.90
BALDERAS	19.43	99.20	CIRES	27-03-96	BL459603271(1)	4.90
BALDERAS	19.43	99.20	CIRES	27-03-96	BL459603271(2)	4.90
BALDERAS	19.43	99.20	CIRES	23-04-96	BL459604231(1)	4.90
BALDERAS	19.43	99.20	CIRES	23-04-96	BL459604231(2)	4.90
BONDOJITO	19.47	99.11	CIRES	27-03-96	BO399603271(1)	4.90
BONDOJITO	19.47	99.11	CIRES	27-03-96	BO399603271(2)	4.90
CANDELARIA	19.43	99.12	CIRES	27-03-96	CA599603-1	4.90

CANDELARIA	19.43	99.12	CIRES	27-03-96	CA 599603-2	4.90
CANDELARIA	19.43	99.12	CIRES	23-04-96	CA 599604-1	4.90
CANDELARIA	19.43	99.12	CIRES	23-04-96	CA 599604-2	4.90
CANDELARIA	19.43	99.12	CIRES	18-07-96	CA 599607-1	4.70
CANDELARIA	19.43	99.12	CIRES	18-07-96	CA 599607-2	4.70
JAMAICA	19.41	99.13	FICA	11-05-90	JA439005-1	4.90
JAMAICA	19.41	99.13	FICA	11-05-90	JA439005-2	4.90
APATLACO	19.38	99.11	CIRES	11-05-90	AP689005-1	4.90
APATLACO	19.38	99.11	CIRES	11-05-90	AP689005-2	4.90
CENTRAL DE ABASTOS OFICINAS	19.37	99.10	I.L. UNAM	11-05-90	CDAO9005-1	4.90
XOCHIMILCO	19.27	99.10	CIRES	18-07-96	XO369607-1	4.70
UNIDAD KENNEDY SUPERFICIE	19.42	99.11	CENAPRED	13-03-96	UNKS9603131(1)	4.40
UNIDAD KENNEDY SUPERFICIE	19.42	99.11	CENAPRED	13-03-96	UNKS9603131(2)	4.40
UNIDAD KENNEDY SUPERFICIE	19.42	99.11	CENAPRED	13-03-96	UNKS9604231(1)	4.90
UNIDAD KENNEDY SUPERFICIE	19.42	99.11	CENAPRED	13-03-96	UNKS9604231(2)	4.90
UNIDAD KENNEDY SUPERFICIE	19.42	99.11	CENAPRED	16-01-97	UNKS9701161(2)	4.90
TLACOTAL SUPERFICIE	19.40	99.10	CENAPRED	20-03-96	TLAS9603201(1)	4.50
TLACOTAL SUPERFICIE	19.40	99.10	CENAPRED	20-03-96	TLAS9603201(2)	4.50
TLACOTAL SUPERFICIE	19.40	99.10	CENAPRED	23-04-96	TLAS9604231(1)	4.90
TLACOTAL SUPERFICIE	19.40	99.10	CENAPRED	23-04-96	TLAS9604231(2)	4.90

TABLE 2 Ground motions data base. Group II

Station	Coordinates		Institution	Seismic event data		
	Latitude	Longitude		Date	Record	Magnitude
ii inst. sísmica	19.33	99.18	I.I. UNAM	68-08-02	01i	7.1
ii inst. sísmica	19.33	99.18	I.I. UNAM	79-03-14	03i	7
Sismex CU	19.33	99.18	I.I. UNAM	79-03-14	04i	7
Sismex Hospital ABC	19.00	99.21	I.I. UNAM	79-03-14	05i	7
Sismex CU	19.33	99.18	I.I. UNAM	81-10-25	06i	7.3
ii inst. sísmica	19.33	99.18	I.I. UNAM	82-06-07	07i	6.9
ii inst. sísmica	19.33	99.18	I.I. UNAM	85-09-19	08i	8.1
ii patio	19.33	99.18	I.I. UNAM	85-09-19	09i	8.1
Mesa vibradora	19.33	99.18	I.I. UNAM	85-09-19	10i	8.1
Tacubaya	19.40	99.19	I.I. UNAM	85-09-19	11i	8.1
ii patio	19.33	99.18	I.I. UNAM	85-09-21	12i	7.6
Mesa vibradora	19.33	99.18	I.I. UNAM	85-09-21	13i	7.6
Tacubaya	19.40	99.19	I.I. UNAM	85-09-21	14i	7.6
ii inst. sísmica	19.33	99.18	I.I. UNAM	89-04-25	15i	6.9
Lab. de desarrollo	19.33	99.18	I.I. UNAM	85-09-21	16i	6.9
Fund. Javier Barros Sierra	19.30	99.21	CIRES	85-09-21	17i	6.9
Mariscal Tito	19.43	99.19	CIRES	85-09-21	18i	6.9
San Pedro Atocpan	19.20	99.05	CIRES	85-09-21	19i	6.9
Tacubaya	19.40	99.19	I.I. UNAM	85-09-21	20i	6.9
Tlalpan	19.29	99.17	FICA	85-09-21	21i	6.9
Est. # 14 Chapultepec	19.42	99.21	CENAPRED	95-09-14	22i	7.3
Colinas del Sur	19.37	99.23	CIRES	95-09-14	23i	7.3
ii patio 1	19.33	99.18	I.I. UNAM	95-09-14	24i	7.3
ii patio 4	19.33	99.18	I.I. UNAM	95-09-14	25i	7.3
Fund. Javier Barros Sierra	19.30	99.21	CIRES	95-09-14	26i	7.3
San Pedro Atocpan	19.20	99.05	CIRES	95-09-14	27i	7.3
Campo libre	19.35	99.19	CIRES	95-09-14	28i	7.3
Tacubaya	19.40	99.19	I.I. UNAM	95-09-14	29i	7.3
Tlalpan	19.29	99.17	FICA	95-09-14	30i	7.3
Universidad Iberoamericana	19.37	99.23	CIRES	95-09-14	31i	7.3
Sismex Viveros	19.36	99.17	I.I. UNAM	81-10-25	01ii	7.3
Sismex Viveros	19.36	99.17	I.I. UNAM	85-09-19	02ii	8.1
Angel Urraza	19.38	99.17	CIRES	89-04-25	03ii	6.9
Coyoacán	19.37	99.17	FICA	89-04-25	04ii	6.9
Deportivo Reynoso	19.50	99.18	CIRES	89-04-25	05ii	6.9
Xotepingo	19.33	99.14	FICA	89-04-25	06ii	6.9
Esparza Oteo	19.39	99.18	CIRES	89-04-25	07ii	6.9
Escandón	19.40	99.18	FICA	89-04-25	08ii	6.9
Granjas	19.48	99.18	FICA	89-04-25	09ii	6.9

(Continued)

TABLE 2 (Continued)

Station	Coordinates		Institution	Seismic event data		
	Latitude	Longitude		Date	Record	Magnitude
Mariano Escobedo	19.44	99.18	CIRES	89-04-25	10ii	6.9
Alberca olímpica	19.36	99.15	CIRES	95-09-14	11ii	7.3
Angel Urraza	19.38	99.17	CIRES	95-09-14	12ii	7.3
Coyoacán	19.37	99.17	FICA	95-09-14	13ii	7.3
Est. # 6 Coyoacán	19.35	99.17	CENAPRED	95-09-14	14ii	7.3
Xotepingo	19.33	99.14	FICA	95-09-14	15ii	7.3
Escandón	19.40	99.18	FICA	95-09-14	16ii	7.3
Est. # 15 IMP	19.49	99.15	CENAPRED	95-09-14	17ii	7.3
Mariano Escobedo	19.44	99.18	CIRES	95-09-14	18ii	7.3
Alberca olímpica	19.36	99.15	CIRES	97-01-11	20ii	6.9
Angel Urraza	19.38	99.17	CIRES	97-01-11	21ii	6.9
Deportivo Reynoso	19.50	99.18	CIRES	97-01-11	22ii	6.9
Xotepingo	19.33	99.14	FICA	97-01-11	23ii	6.9
Granjas	19.48	99.18	FICA	97-01-11	24ii	6.9
Est. # 15 IMP	19.49	99.15	CENAPRED	97-01-11	25ii	6.9
Mariano Escobedo	19.44	99.18	CIRES	97-01-11	26ii	6.9
Culhuacán	19.33	99.13	CIRES	89-04-25	01a	6.9
Roma	19.41	99.17	LI. UNAM	89-04-25	02a	6.9
Jardines de Coyoacán	19.31	99.13	CIRES	89-04-25	04a	6.9
Lindavista	19.49	99.13	FICA	89-04-25	05a	6.9
Miramontes	19.28	99.13	FICA	89-04-25	06a	6.9
San Simón	19.38	99.15	FICA	89-04-25	07a	6.9
Culhuacán	19.33	99.13	CIRES	95-09-14	09a	7.3
Jardines de Coyoacán	19.31	99.13	CIRES	95-09-14	12a	7.3
Miramontes	19.28	99.13	FICA	95-09-14	13a	7.3
Culhuacán	19.33	99.13	CIRES	97-01-11	14a	6.9
Roma	19.41	99.17	LI. UNAM	97-01-11	15a	6.9
Jardines de Coyoacán	19.31	99.13	CIRES	97-01-11	16a	6.9
Lindavista	19.49	99.13	FICA	97-01-11	17a	6.9
Miramontes	19.28	99.13	FICA	97-01-11	18a	6.9
San Simón	19.38	99.15	FICA	97-01-11	19a	6.9
Nonoalco Atizapán patio	19.45	99.14	LI. UNAM	78-11-29	02i	7.8
Ibero	19.35	99.13	CIRES	89-04-25	03a	6.9
Unidad Colonia IMSS	19.43	99.17	CIRES	89-04-25	08a	6.9
Ibero	19.35	99.13	CIRES	95-09-14	11a	7.3
SCT	19.29	99.15	LI. UNAM	85-09-19	01b	8.1
Tlahuac deportivo	19.29	99.04	LI. UNAM	85-09-21	02b	7.6
Alameda	19.44	99.15	FICA	89-04-25	03b	6.9

(Continued)

TABLE 2 (Continued)

Station	Coordinates		Institution	Seismic event data		
	Latitude	Longitude		Date	Record	Magnitude
Balderas	19.43	99.15	FICA	89-04-25	04b	6.9
Cibeles	19.42	99.17	FICA	89-04-25	05b	6.9
CU Juárez	19.41	99.16	FICA	89-04-25	06b	6.9
Córdoba	19.42	99.16	CIRES	89-04-25	07b	6.9
Garibaldi	19.44	99.14	CIRES	89-04-25	08b	6.9
Liconsa	19.31	98.96	CIRES	89-04-25	09b	6.9
Plutarco Elías Calles	19.39	99.13	CIRES	89-04-25	10b	6.9
SCT	19.39	99.15	LI. UNAM	89-04-25	12b	6.9
Sector Popular	19.37	99.12	CIRES	89-04-25	13b	6.9
Tlatelolco	19.45	99.13	CIRES	89-04-25	14b	6.9
Tlatelolco	19.44	99.14	CIRES	89-04-25	15b	6.9
Valle Gómez	19.45	99.12	CIRES	89-04-25	16b	6.9
Alameda	19.44	99.15	FICA	95-09-14	17b	7.3
Balderas	19.43	99.15	FICA	95-09-14	18b	7.3
CU Juárez	19.41	99.16	FICA	95-09-14	19b	7.3
Centro urbano Presidente Juárez	19.41	99.16	LI. UNAM	95-09-14	20b	7.3
Córdoba	19.42	99.16	CIRES	95-09-14	21b	7.3
Edif. Jalapa	19.42	99.16	LI. UNAM	95-09-14	22b	7.3
Garibaldi	19.44	99.14	CIRES	95-09-14	23b	7.3
García Campillo	19.32	99.11	CIRES	95-09-14	24b	7.3
Liconsa	19.31	98.96	CIRES	95-09-14	25b	7.3
Plutarco Elías Calles	19.39	99.13	CIRES	95-09-14	26b	7.3
Est. # 12 Roma C	19.42	99.16	CENAPRED	95-09-14	29b	7.3
Sector Popular	19.37	99.12	CIRES	95-09-14	30b	7.3
Tlatelolco	19.45	99.13	CIRES	95-09-14	31b	7.3
Tlatelolco	19.44	99.14	CIRES	95-09-14	32b	7.3
Balderas	19.43	99.15	FICA	95-10-09	33b	7.5
Cibeles	19.42	99.17	FICA	95-10-09	34b	7.5
CU Juárez	19.41	99.16	FICA	95-10-09	35b	7.5
Centro urbano Presidente Juárez	19.41	99.16	LI. UNAM	95-10-09	36b	7.5
Córdoba	19.42	99.16	CIRES	95-10-09	37b	7.5
Edif. Jalapa	19.42	99.16	LI. UNAM	95-10-09	38b	7.5
Garibaldi	19.44	99.14	CIRES	95-10-09	39b	7.5
Liconsa	19.31	98.96	CIRES	95-10-09	40b	7.5
Liverpool	19.43	99.16	CIRES	95-10-09	41b	7.5
Plutarco Elías Calles	19.39	99.13	CIRES	95-10-09	42b	7.5
Est. # 12 Roma C	19.42	99.16	CENAPRED	95-10-09	44b	7.5
Sector Popular	19.37	99.12	CIRES	95-10-09	45b	7.5

(Continued)

TABLE 2 (Continued)

Station	Coordinates		Institution	Seismic event data		
	Latitude	Longitude		Date	Record	Magnitude
Valle Gómez	19.45	99.12	CIRES	95-10-09	46b	7.5
Alameda	19.44	99.15	FICA	97-01-11	47b	6.9
Balderas	19.43	99.15	FICA	97-01-11	48b	6.9
Cibeles	19.42	99.17	FICA	97-01-11	49b	6.9
CU Juárez	19.41	99.16	FICA	97-01-11	50b	6.9
Centro urbano Presidente Juárez	19.41	99.16	LI. UNAM	97-01-11	51b	6.9
Córdoba	19.42	99.16	CIRES	97-01-11	52b	6.9
Garibaldi	19.44	99.14	CIRES	97-01-11	54b	6.9
García Campillo	19.32	99.11	CIRES	97-01-11	55b	6.9
Liconsá	19.31	98.96	CIRES	97-01-11	56b	6.9
Liverpool	19.43	99.16	CIRES	97-01-11	57b	6.9
Plutarco Elías Calles	19.39	99.13	CIRES	97-01-11	58b	6.9
Est. # 10 Roma A	19.42	99.16	CENAPRED	97-01-11	59b	6.9
Est. # 11 Roma B	19.42	99.15	CENAPRED	97-01-11	60b	6.9
Est. # 12 Roma C	19.42	99.16	CENAPRED	97-01-11	61b	6.9
Sector Popular	19.37	99.12	CIRES	97-01-11	62b	6.9
Tlatelolco	19.45	99.13	CIRES	97-01-11	63b	6.9
Tlatelolco	19.44	99.14	CIRES	97-01-11	64b	6.9
Valle Gómez	19.45	99.12	CIRES	97-01-11	65b	6.9
Buenos Aires	19.41	99.15	FICA	89-04-25	06c	6.9
Meyehualco	19.35	99.04	FICA	89-04-25	12c	6.9
Villa del Mar	19.38	99.13	FICA	89-04-25	13c	6.9
Meyehualco	19.35	99.04	FICA	95-09-14	21c	7.3
Buenos Aires	19.41	99.15	FICA	95-10-09	23c	7.5
Meyehualco	19.35	99.04	FICA	95-10-09	29c	7.5
Villa del Mar	19.38	99.13	FICA	95-10-09	31c	7.5
Villa del Mar	19.38	99.13	FICA	96-02-25	33c	6.9
Buenos Aires	19.41	99.15	FICA	97-01-11	35c	6.9
Villa del Mar	19.38	99.13	FICA	97-01-11	40c	6.9
Rodolfo Menéndez	19.44	99.13	CIRES	89-04-25	11b	6.9
Rodolfo Menéndez	19.44	99.13	CIRES	95-09-14	28b	7.3
Rodolfo Menéndez	19.44	99.13	CIRES	95-10-09	43b	7.5
Aragón	19.48	99.08	CIRES	95-09-14	12d	7.3
Aragón	19.48	99.08	CIRES	95-10-09	22d	7.5
Central de abastos oficina	19.37	99.10	LI. UNAM	85-09-19	01c	8.1
Central de abastos frigorífico	19.37	99.09	LI. UNAM	85-09-21	02c	7.6
Central de abastos oficina	19.37	99.10	LI. UNAM	85-09-21	03c	7.6
Texcoco centro lago	19.48	98.99	LI. UNAM	85-09-21	04c	7.6

(Continued)

TABLE 2 (Continued)

Station	Coordinates		Institution	Seismic event data		
	Latitude	Longitude		Date	Record	Magnitude
Apatlaco	19.38	99.11	CIRES	89-04-25	05c	6.9
Bondojito	19.47	99.11	FICA	89-04-25	07c	6.9
Candelaria	19.43	99.12	FICA	89-04-25	08c	6.9
Prepa # 7 La Viga	19.42	99.13	LI. UNAM	89-04-25	09c	6.9
Jamaica	19.41	99.13	FICA	89-04-25	11c	6.9
Xochipilli	19.42	99.14	CIRES	89-04-25	14c	6.9
Apatlaco	19.38	99.11	CIRES	95-09-14	15c	7.3
Bondojito	19.47	99.11	FICA	95-09-14	16c	7.3
Candelaria	19.43	99.12	FICA	95-09-14	17c	7.3
Central de abastos oficina	19.37	99.10	LI. UNAM	95-09-14	18c	7.3
Hospital Juárez	19.43	99.13	CIRES	95-09-14	19c	7.3
Jamaica	19.41	99.13	FICA	95-09-14	20c	7.3
Apatlaco	19.38	99.11	CIRES	95-10-09	22c	7.5
Bondojito	19.47	99.11	FICA	95-10-09	24c	7.5
Candelaria	19.43	99.12	FICA	95-10-09	25c	7.5
Jamaica	19.41	99.13	FICA	95-10-09	28c	7.5
Xochipilli	19.42	99.14	CIRES	95-10-09	32c	7.5
Apatlaco	19.38	99.11	CIRES	97-01-11	34c	6.9
Bondojito	19.47	99.11	FICA	97-01-11	36c	6.9
Candelaria	19.43	99.12	FICA	97-01-11	37c	6.9
Jamaica	19.41	99.13	FICA	97-01-11	38c	6.9
Xochimilco	19.27	99.10	CIRES	97-01-11	41c	6.9
Xochipilli	19.42	99.14	CIRES	97-01-11	42c	6.9
Tlahuac Bombas	19.28	99.01	LI. UNAM	85-09-19	01d	8.1
Tlahuac Bombas	19.28	99.01	LI. UNAM	86-04-30	02d	7
Autódromo	19.39	99.09	FICA	89-04-25	03d	6.9
Cetis	19.46	99.06	FICA	89-04-25	04d	6.9
Cetis 57	19.39	99.05	CIRES	89-04-25	05d	6.9
Deportivo Moctezuma	19.43	99.10	CIRES	89-04-25	06d	6.9
Hangares	19.42	99.08	FICA	89-04-25	07d	6.9
Nezahualcoyotl	19.42	99.03	FICA	89-04-25	08d	6.9
Palacio de los deportes	19.41	99.10	CIRES	89-04-25	09d	6.9
Tlahuac	19.28	99.00	FICA	89-04-25	10d	6.9
Aeropuerto	19.43	99.06	CIRES	95-09-14	11d	7.3
Autódromo	19.39	99.09	FICA	95-09-14	13d	7.3
Cetis	19.46	99.06	FICA	95-09-14	14d	7.3
Cetis 57	19.39	99.05	CIRES	95-09-14	15d	7.3
Deportivo Moctezuma	19.43	99.10	CIRES	95-09-14	16d	7.3
Nezahualcoyotl	19.42	99.03	FICA	95-09-14	17d	7.3

(Continued)

TABLE 2 (Continued)

Station	Coordinates		Institution	Seismic event data		
	Latitude	Longitude		Date	Record	Magnitude
Palacio de los deportes	19.41	99.10	CIRES	95-09-14	18d	7.3
Tlahuac	19.28	99.00	FICA	95-09-14	19d	7.3
Est. # 9 U. Kennedy	19.42	99.11	CENAPRED	95-09-14	20d	7.3
Est. # 8 Zaragoza	19.42	99.09	CENAPRED	95-09-14	21d	7.3
Autódromo	19.39	99.09	FICA	95-10-09	23d	7.5
Cetis	19.46	99.06	FICA	95-10-09	24d	7.5
Deportivo Moctezuma	19.43	99.10	CIRES	95-10-09	26d	7.5
Hangares	19.42	99.08	FICA	95-10-09	27d	7.5
Nezahualcoyotl	19.40	99.00	CIRES	95-10-09	28d	7.5
Nezahualcoyotl	19.42	99.03	FICA	95-10-09	29d	7.5
Palacio de los deportes	19.41	99.10	CIRES	95-10-09	30d	7.5
Est. # 7 Tlacotal	19.40	99.11	CENAPRED	95-10-09	31d	7.5
Est. # 9 U. Kennedy	19.42	99.11	CENAPRED	95-10-09	32d	7.5
Est. # 8 Zaragoza	19.42	99.09	CENAPRED	95-10-09	33d	7.5
Aeropuerto	19.43	99.06	CIRES	97-01-11	34d	6.9
Autódromo	19.39	99.09	FICA	97-01-11	35d	6.9
Cetis 57	19.39	99.05	CIRES	97-01-11	36d	6.9
Deportivo Moctezuma	19.43	99.10	CIRES	97-01-11	37d	6.9
Nezahualcoyotl	19.40	99.00	CIRES	97-01-11	38d	6.9
Nezahualcoyotl	19.42	99.03	FICA	97-01-11	39d	6.9
Palacio de los deportes	19.41	99.10	CIRES	97-01-11	40d	6.9
Tlahuac	19.28	99.00	FICA	97-01-11	41d	6.9
Est. # 8 Zaragoza	19.42	99.09	CENAPRED	97-01-11	42d	6.9

TABLE 3 Zones in the valley of México

Zone	T_x [s]
A	≤ 0.5
B	$0.5 < T_x \leq 1.0$
C	$1.0 < T_x \leq 1.5$
D	$1.5 < T_x \leq 2.0$
E	$2.0 < T_x \leq 2.5$
F	$2.5 < T_x \leq 3.0$
G	$3.0 < T_x \leq 4.0$

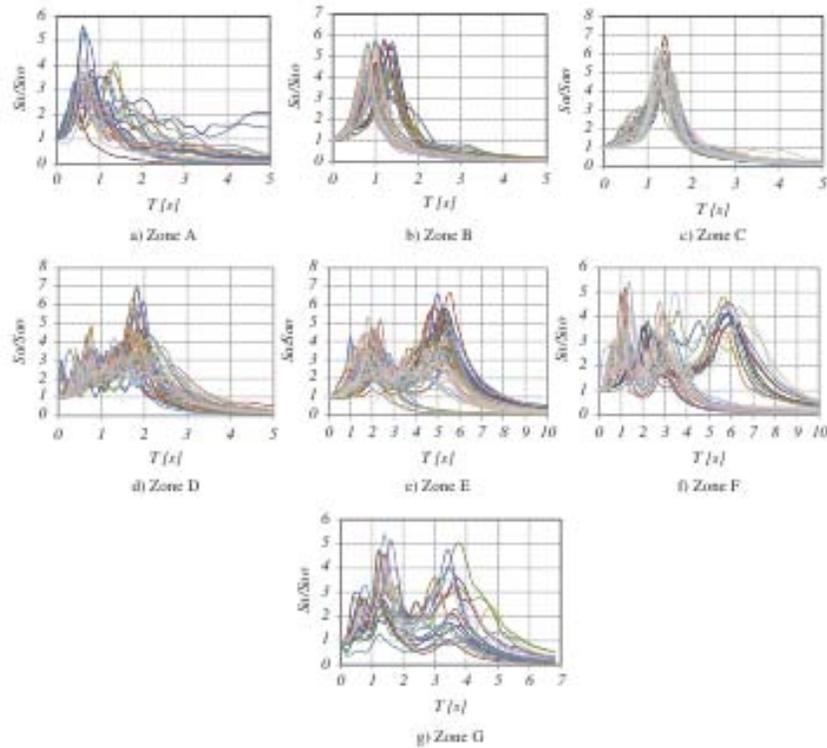


FIGURE 2 Normalized response spectra. Group I.

corresponding seismic records at a certain site are available, then it is possible to calculate the hazard curves of a different site, by means of statistical parameters of the spectral ordinates ratios of both sites, using the following expression:

$$v_Y(y) = \int_0^{\infty} v_X\left(\frac{y}{z}\right) f_Z(z) dz = E_Z\left(v_X\left(\frac{y}{z}\right)\right), \quad (1)$$

where

- Y is the intensity at the site of interest; and y is a specific value that the intensity can take;
- $v_Y(y)$ is the annual exceedance rate of the intensity;
- X is the intensity at the site corresponding to the known seismic hazard curve;
- Z is the random variable Y/X ; and z is a specific value that the ratio can take; and
- $E_Z(\cdot)$ is the expected value with respect to the random variable Z .

The seismic hazard curves were calculated in terms of the ratio between the pseudo-acceleration response spectra of each zone and the response spectra of the *Ciudad Universitaria* station, which is founded upon firm ground of the Valley of Mexico.

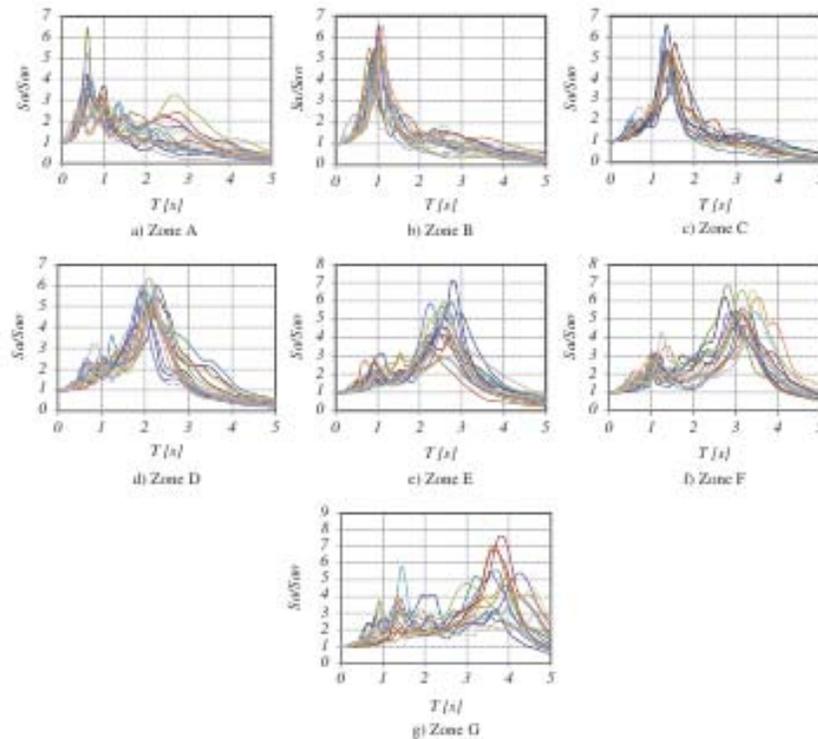


FIGURE 3 Normalized response spectra. Group II.

Then, Eq. (1) was also applied to take into account the contribution of the energy dissipation device to the damping of the structure. Seismic hazard curves were calculated for systems located in the zones listed in Table 3 with damping ratios $\zeta = 10, 15, 20, 25, 30,$ and 35% . From the hazard curves calculated, the values of the UHS (corresponding to a constant return interval) were obtained for each zone and each damping ratio.

As a next step, spectral ratios (SR) were determined as the ratio of the UHS corresponding to a damping ratio $\zeta > 5\%$, to the UHS corresponding to a value of 5% , as follows:

$$SR = \frac{S_d(T, \zeta)}{S_d(T, \zeta = 5\%)} \quad (2)$$

where SR is the spectral ratio, $S_d(T, \zeta)$ represents the UHS corresponding to systems with damping ratios $\zeta = 10, 15, 20, 25, 30,$ and 35% , and $S_d(T, \zeta = 5\%)$ is the UHS for conventional systems with $\zeta = 5\%$.

Figures 4–6 show the spectral ratios (SR) obtained by means of Eq. (2) for zones A, D, and G, corresponding to UHS associated with the two exceedance rates selected for this study: $v = 0.02$ (return interval $T_R = 50$ years), and $v = 0.008$ (return interval $T_R = 125$ years).

Comparing the spectral ratios depicted in Figs. 4a, 5a, and 6a with those in Figs. 4b, 5b, and 6b, respectively, it is observed that there is no important difference between the

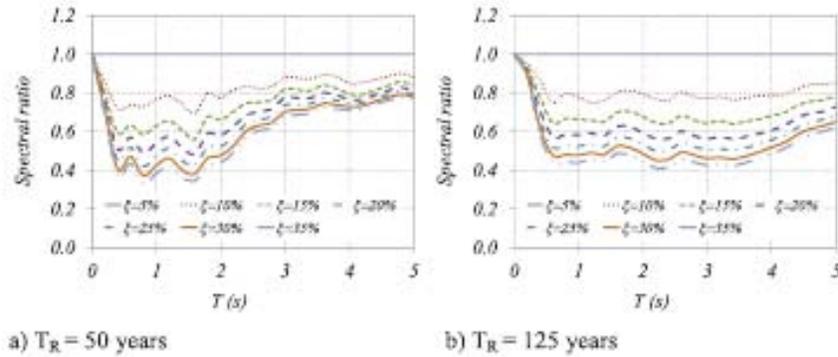


FIGURE 4 Spectral ratio associated to different T_R . Zone A.

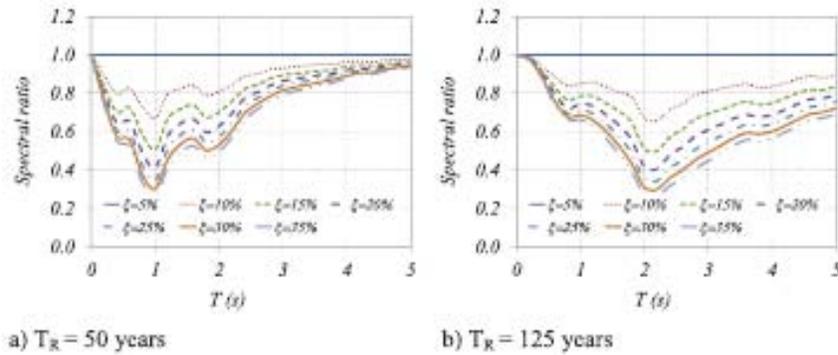


FIGURE 5 Spectral ratio associated to different T_R . Zone D.

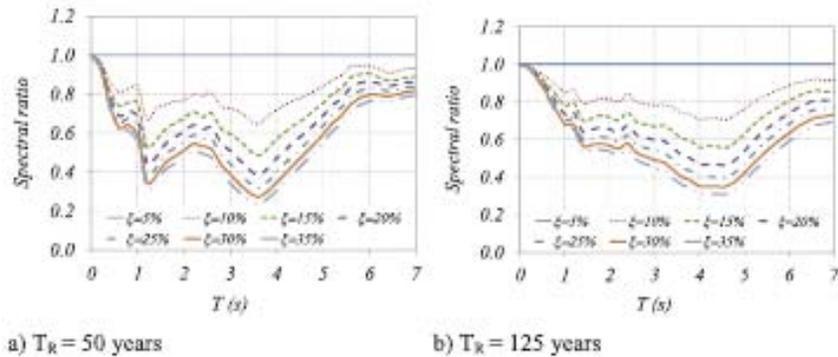


FIGURE 6 Spectral ratio associated to different T_R . Zone G.

minimum values of the spectral ratios associated with both return intervals ($T_R = 50$ and $T_R = 125$ years); however, the structural period where the minimum value appears in the graphs at the left of the figures is not the same as the period corresponding to the spectral ratios at the right of Figs. 4–6. For example, for the spectral ratios corresponding to

$T_R = 50$ years at zone G (Fig. 6a), two minimum values can be observed, one at 1.2 s and the other at 3.6 s, whereas for the spectral ratios corresponding to $T_R = 125$ years (Fig. 6b) only one minimum value exists at 4.5 s. A similar behavior (but less pronounced) can also be observed in Figs. 5a and 5b which correspond to the spectral ratios found for zone D ($1.5 \text{ s} < T_s \leq 2.0 \text{ s}$). In this case, the spectral ratios corresponding to $T_R = 50$ years present two minimum values: one at 1 s and the other (less pronounced) at about 2 s, whereas for the spectral ratios corresponding to $T_R = 125$ years only one minimum value is evident at about 2 s. This behavior is not observed in Fig. 4, because it corresponds to firm ground (zone A, $T_s \leq 0.5 \text{ s}$). The differences just mentioned between the behavior of the spectral ratios of the three zones presented in Figs. 4, 5, and 6 (which correspond to zones A, D, and G, respectively) are due to the influence of both the seismic source effects (i.e., magnitude, frequency content, etc.) and the dominant period of vibration of the soil on the spectral shapes, as discussed in Sec. 3.

5. Mathematical Expression Proposed for the Damping Factor β_V

A simple mathematical expression was fitted using the least square method to the spectral ratios (like those shown in Figs. 4–6) corresponding to the seven zones (A–G) defined in Table 3. The resulting mathematical function (β_V) depends on three main parameters: the fundamental period of the soil, the structural period, and the damping ratio of the structure. The expression proposed is:

$$\beta_V = \begin{cases} 1 - \left(1 - \left(\sqrt{\frac{0.05}{\zeta}} \right)^\lambda \frac{1}{F_a T_s} \right) T_s & ; \text{ if } T_s \leq F_a T_a \\ \left(\sqrt{\frac{0.05}{\zeta}} \right)^\lambda & ; \text{ if } F_a T_a < T_s \leq F_b T_b \\ 1 + \left[\left(\sqrt{\frac{0.05}{\zeta}} \right)^\lambda - 1 \right] \times \left(\frac{T_b}{T_s} \right)^{\sqrt{\zeta}} & ; \text{ if } T_s > F_b T_b \end{cases} \quad (3)$$

where T_s is the structural period, ζ is the damping ratio of the structural system, and T_a and T_b are the limit periods that define the plateau of the design spectrum according to the Mexico City Building Code (2004). Both T_a and T_b depend on the type of soil. The parameters λ , ε , F_a , and F_b were obtained by means of the least square method, for each zone and each T_R value. Values of parameters λ , ε , F_a , and F_b are presented in Tables 4 and 5. These values correspond to return intervals $T_R = 50$ and 125 years, which can be associated with limit states of serviceability and near collapse, respectively (see Sec. 2). All of these parameters (λ , ε , F_a and F_b) are independent to each other, and do not have any physical meaning.

Figures 7–9 show the reduction factors SR and the mathematical expression proposed in this study (β_V) for zones A, D, and G. Figures 7a–9a correspond to a return interval $T_R = 50$ years, whereas Figs. 7b–9b correspond to $T_R = 125$ years.

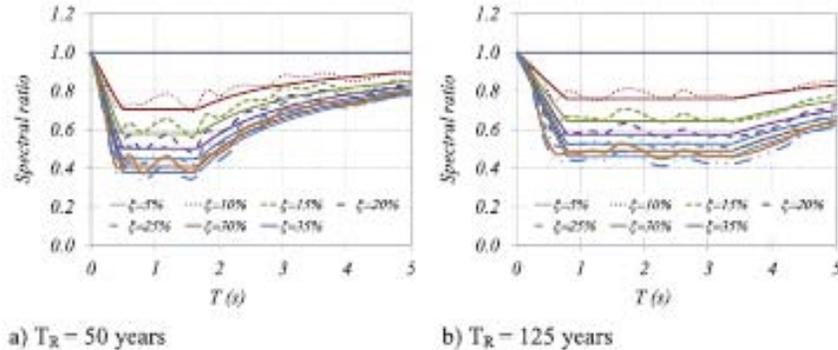
It can be seen in Figs. 7–9 that Eq. (3) depicts three branches with different period limits that depend on both the zone and the return interval (T_R) of interest. The behavior of the expression (β_V) fitted to the spectral ratios (SR), corresponding to the return intervals (1) $T_R = 50$ years and (2) 125 years is analyzed next.

TABLE 4 Values of λ , ϵ , F_a , and F_b corresponding to $T_R = 50$ years

Zone	λ	ϵ	F_a	F_b
A	1.0	0.9	2.0	1.3
B	1.0	1.5	1.4	1.0
C	1.0	1.3	1.4	1.0
D	1.1	2.0	0.6	0.5
E	0.9	0.9	1.0	1.0
F	1.0	2.0	1.5	1.0
G	1.0	5.0	1.5	1.0

TABLE 5 Values of λ , ϵ , F_a and F_b corresponding to $T_R = 125$ years

Zone	λ	ϵ	F_a	F_b										
A	0.8	0.8	2.5	2.5										
B	0.9	0.2	1.9	1.0										
C	0.9	0.3	1.2	1.0										
D	1.0	1.2	1.7	1.0										
E	1.0	1.8	1.7	1.0 </tr <tr> <td>F</td> <td>1.1</td> <td>3.0</td> <td>2.0</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td>G</td> <td>0.9</td> <td>4.0</td> <td>3.5</td> <td>1.2</td> </tr>	F	1.1	3.0	2.0	1.0	G	0.9	4.0	3.5	1.2
F	1.1	3.0	2.0	1.0										
G	0.9	4.0	3.5	1.2										

**FIGURE 7** Reduction damping factors for different T_R . Zone A.

5.1. Analysis of the Damping Factor Expression Corresponding to $T_R = 50$ years

The first branch of Eq. (3) corresponding to $T_R = 50$ years (Figs. 7a–9a) presents a different upper period limit that depends on the zone of interest (i.e., the value of $F_a T_a$ that appears in Eq. (3) is smaller than 0.5s for zone A, equal to 0.9 s for zone D and 1.3 s for zone G). It can be observed in Fig. 7a that, for firm ground (zone A), the values of the spectral ratios (SR) and the reduction factors (β_V) are similar; however, for the softer soils (Figs. 8a and 9a, zones D and G) the difference between the spectral ratios and the fitted reduction factors is larger. Figures 8a and 9a (corresponding to zones D and G) show that Eq. (3) overestimates,

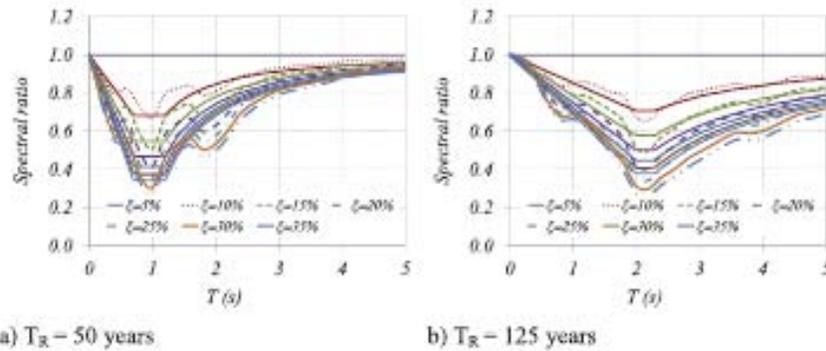


FIGURE 8 Reduction damping factors for different T_R . Zone D.

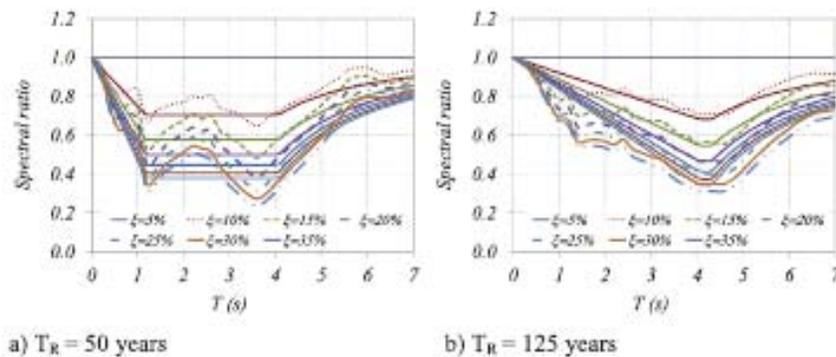


FIGURE 9 Reduction damping factors for different T_R . Zone G.

in general, the spectral ratios, which means that the expression proposed here gives place to reduced design spectral ordinates on the safe side.

The second branch of Eq. (3) represents a plateau between the interval of structural periods: $F_a T_a < T_e \leq F_b T$. In this interval the following is noticed: (a) the largest influence of the damping ratio on the structural response takes place; (b) the minimum values of the spectral ratios (SR) are overestimated by Eq. 3; and (c) the proposed expression gives place to conservative values of the reduced design spectra.

Finally, the third branch of Eq. (3) depicts an exponential behavior that, for zones A and G, follows approximately the values of the spectral ratios; for zone D, it gives place to conservative reduction factors of the design spectra. It is noticed that the third branch of Eq. (3) tends to unity for long structural periods.

5.2. Analysis of the Damping Factor Expression Corresponding to $T_R = 125$ Years

The upper limit of the structural period of the first branch ($F_a T_a$) of Eq. (3) for $T_R = 125$ years is very close to the period of the soil (0.5 s for zone A, 2 s for zone D, and 4 s for zone G). As in the case for $T_R = 50$ years, it can be observed in Fig. 7b that for firm ground (zone A) the ordinates of the spectral ratio (SR) and the reduction factor (β_V) are very similar.

The second branch for this case is also a plateau. As in the case of $T_R = 50$ years, the minimum values of the spectral ratios (SR) are also overestimated by Eq. (3) (especially for structural systems with damping ratios higher than 15%), which means that the reduced design spectra will be on the safe side.

Finally, the third branch also depicts an exponential behavior. For this branch most of the spectral ratios ordinates (SR) are either equal to their correct values or overestimated by the equation proposed here.

The analyses presented above indicate that the expression proposed herein leads to conservative values of the reduced design spectral ordinates.

6. Comparison Between the Expression Obtained in this Study and Other Rules

A comparison is now made between results of damping factors calculated with Eq. (3) and those recommended by the following authors and guidelines for seismic design.

- (a) Bommer *et al.* [2000] proposed the following equation to calculate the reduction factor of the plateau of the design spectrum ($S_{e,d}$) recommended by the EUROCODE (EC8):

$$\frac{S_{e,d}(\zeta)}{S_{e,d}(5\%)} = \sqrt{\frac{10}{5 + \zeta}} \quad (4)$$

- (b) Toils and Faccioli [1999] proposed the design spectrum plateau to be reduced using the following expression:

$$\frac{S_{e,d}(\zeta)}{S_{e,d}(5\%)} = \sqrt{\frac{7}{2 + \zeta}} \quad (5)$$

- (c) The Spanish (1994) and French (1996) design codes recommend the following expression:

$$\frac{S_{e,d}(\zeta)}{S_{e,d}(5\%)} = \left(\frac{5}{\zeta}\right)^{0.4} \quad (6)$$

- (d) FEMA [2003] specified reduction damping factors constituted by two branches: a descending linear function that reaches a certain reference period (where the plateau of the seismic design spectra starts) and another function that remains constant for periods longer than a given value. Table 6 shows the values of the reduction factors ($B = 1/\beta_V$) corresponding to the plateau of the design spectrum.

- (e) Lin and Chang [2003] proposed the following expression to calculate the reduction factors:

$$\frac{S_{e,d}(\zeta)}{S_{e,d}(5\%)} = d + e \cdot T_e \quad (7)$$

The values of parameters d and e , for different types of soils, are indicated in Table 7. The AB type of soil corresponds to firm ground.

TABLE 6 Reduction factors specified in FEMA 450

Effective Damping, β (percentage of critical)	B (where period of the structure $\leq T_0$)
≤ 2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.8
40	2.1
50	2.4
60	2.7
70	3.0
80	3.3
90	3.6
≥ 100	4.0

TABLE 7 Parameter values for the Lin and Chang equations [2004]

Site Class	D	E
AB	$0.391 \zeta^{-0.304}$	$0.0057 + 0.383 \zeta - 1/15929 \zeta^2$
C	$0.390 \zeta^{-0.392}$	$0.0151 + 0.474 \zeta - 1/10241 \zeta^2$
D	$0.326 \zeta^{-0.371}$	$0.00348 + 0.248 \zeta - 1/8250 \zeta^2$
All	$0.342 \zeta^{-0.354}$	$0.0186 + 0.368 \zeta - 1/10644 \zeta^2$

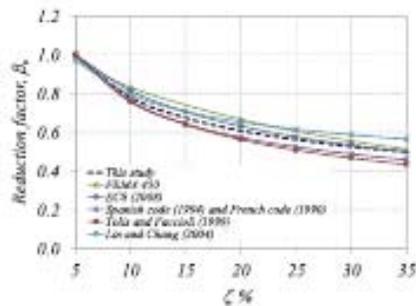
**FIGURE 10** Reduction factors recommended by different authors and seismic guidelines for firm ground.

Figure 10 shows a comparison of values of the reduction factors calculated with expressions (4)–(7), corresponding to the plateau of the design spectrum for systems founded upon firm ground for the return interval associated with the near-collapse limit state. From Fig. 10 it can be observed that the results obtained with the Eq. (3) proposed here and those calculated using other design guidelines are very similar.

Figure 10 indicates that as the damping ratio of the structural system increases, the reduction damping factor becomes lower, which means that the ordinates of the reduced design spectrum also decrease. It can also be seen that as the damping ratio (ζ) increases,

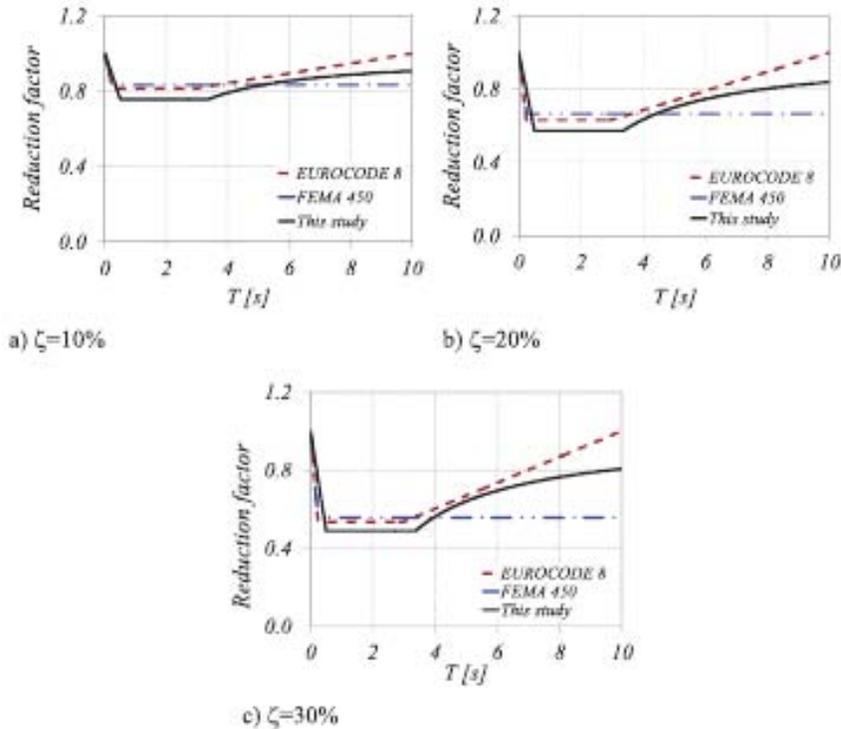


FIGURE 11 Comparison of reduction damping factors between Eurocode, FEMA 450, and this article for different damping ratio.

the differences between the curve obtained with equation 3 and those calculated in accordance with the other references also increase (the differences for $\zeta = 35\%$ are smaller than 9%, and for smaller values of ζ such differences are negligible).

Figures 11a, 11b, and 11c show a comparison of the reduction factors for $\zeta = 10\%$, 20%, and 30%, respectively, calculated with the recommendations by EUROCODE 8 [1994] and by FEMA 450 [2003] with respect to those determined with Eq. (3) proposed in this article. Curves in Figs. 11a–c show results of systems located on firm ground, corresponding to return intervals associated with the near-collapse limit state. It was not possible to compare results for systems located on soft soil because no reduction factor rules for this type of soil were found in the literature.

It can be observed in Figs. 11a–c that the shapes of the curves corresponding to the European code (EUROCODE 8), to FEMA 450, and to that given by Eq. (3) are similar for the interval of structural periods $0 < T_s < 0.5$ s approximately. It can also be seen that for the interval of structural periods $0.5 < T_s < 3.5$ s approximately, the values of the reduction factors obtained with the equation proposed here are lower than those obtained with the EUROCODE 8 or with FEMA 450. Finally, for the interval of structural periods $T_s > 3.5$ s it can be observed that EUROCODE 8 recommends reduction damping factors which values are more conservative than the values given by FEMA 450 and by the expression proposed here.

The mean difference percentages between the reduction factors specified in FEMA 450 and those recommended here are of 6.2%, 13.3%, and 18.1% for structural damping ratios $\zeta = 10\%$, 20%, 30%, respectively; while the mean differences between the EUROCODE 8 and the reduction factors recommended here are of 6.7%, 10.0%, and 10.9% for structural damping ratios $\zeta = 10\%$, 20%, 30%, respectively.

Figures 11a–c also show that, in all cases, from a structural period of 3.5 s approximately, the reduction factor proposed by EUROCODE 8 and that given by Eq. (3) increases with the structural period; however, the reduction factor recommended by FEMA 450 remains constant as the structural period increases. As a consequence, the reduction factor rule specified by FEMA 450 for structural periods longer than 3.5 s, approximately, is less conservative than that provided by Eq. (3) and by EUROCODE 8.

7. Conclusions

Based on the analysis presented here, the following is concluded.

1. From the analysis of the shape of the pseudo-acceleration response spectra corresponding to seismic motions recorded in the Valley of Mexico, with similar epicentral distances, caused by subduction events with small magnitude ($M < 6.9$, Group I) and by events with large magnitude ($M \geq 6.9$, Group II), it was concluded that the influence of the characteristics of the seismic source mechanism (including magnitude and frequency content) is significant for the spectral shape of the seismic motions recorded on soft soil; however, that influence is not relevant for the motions recorded on hard ground. This means that the shape of the response spectra corresponding to motions obtained on hard ground does not change as the magnitude of the seismic event increases; however, that shape changes for those corresponding to motions recorded on soft soil ($T_s > 2$ s), especially for long structural periods.
2. The results obtained here show that there is no important difference between the minimum values of the uniform hazard spectral ratios associated with return intervals of $T_R = 50$ and of $T_R = 125$ years; however, the structural period where the minimum value occurs for each return interval is not the same. For example, for zone G (very soft soil) and $T_R = 50$ years, the spectral ratios depict two minimum values, whereas for $T_R = 125$ years there is only one minimum value associated with the fundamental period of the soil. The reason of this behavior obeys to the explanation mentioned in Conclusion (1).
3. A simple mathematical expression is recommended here to reduce the spectral ordinates for purposes of design of structures provided with supplementary energy dissipation. The equation proposed is a function of the structural period, the damping ratio of the structure-damping system, and the dominant period of the soil. The values of the parameters involved in the expression proposed depend on the zone of the Valley of Mexico (A–G) where the structural system is located, and on the return intervals selected ($T_R = 50$ or $T_R = 125$ years) to construct the Uniform Hazard Spectra.
4. The reduction factor proposed in this study leads to results similar to those recommended by other authors and design codes for the case of systems located on firm ground and corresponding to return intervals associated with the near-collapse limit state. It was not possible to compare the results for other type of systems located on very soft ground and associated with the serviceability limit state, because no studies corresponding to these cases were found in the literature.

Acknowledgment

The authors wish to thank the two reviewers of this article for their valuable comments.

Funding

The support received from the Secretaría de Obras y Servicios of the Gobierno del Distrito Federal and from the Universidad Nacional Autónoma de México through the program DGAPA-PAPIIT under projects IN107011 and IN102114 is gratefully acknowledged.

References

- Arroyo-Espinoza, D. and Terán-Gilmore, A. [2003] "Strength reduction factors for ductile structures with passive energy dissipating devices," *Journal of Earthquake Engineering* **7**(2), 297–325.
- Ashour, S. A. [1987] "Elastic seismic response of buildings with supplemental damping." Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.
- Avilés López, J. and Pérez Rocha, E. [2004] "Basis for new guidelines about soil-structure interaction," *Revista de Ingeniería Sísmica*, SMIS, **71**, 1–36.
- Bommer, J. J. and Elnashai, A. S. [1999] "Displacement spectra for seismic design," *Journal of Earthquake Engineering* **3**, 1–32.
- Bommer, J. J., Elnashai, A. S., and Weir, A. G. [2000] "Compatible acceleration and displacement spectra for seismic design codes," *Proc. 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, N. Z. Paper no. 207.
- Cardone, D., Dolce, M., and Rivelli, M. [2009] "Evaluation of reduction factors for high-damping design response spectra," *Bulletin of Earthquake Engineering* **7**, 273–291.
- Cameron, W. and Green, R. [2007] "Damping correction factors for horizontal ground-motion response spectra," *Bulletin of Seismic Society of America* **97**, 934–960.
- Eurocode 8 [1994] *Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, ENV 2004-1-1, Brussels.
- Esteva, L. [1968] Bases para la formulación de decisiones de diseño sísmico, *Technical Report 82*, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Federal Emergency Management Agency [2003] "NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures," *FEMA 450*, Ch. 15, Building Seismic Safety Council, National Institute of Building Science, Washington, D.C.
- Federal Emergency Management Agency [2000] "NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings," Building Seismic Safety Council, National Institute of Building Science, Washington, D.C.
- Lin, Y. and Chang, K. C. [2003] "Study on damping reduction factor for building under earthquake ground motions," *Structural Engineering* **129**, 206–214.
- Mexican Strong Earthquake Data Base [1999] Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica A. C., Mexico.
- Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente [1994] "Norma de construcción sismorresistente (parte general y edificación)," Instituto Geográfico Nacional, Spain.
- Naeim, F. and Kircher, C. A. [2001] "On the damping adjustment factors for earthquake response spectra," *Structural Design of Tall Buildings* **10**, 361–369.
- Newmark, N. M. and Hall, W. J. [1982] "Earthquake Spectra and Design," EERI Monograph Series, *Earthquake Engineering*, Oakland, California.
- Mexico City Building Code [2004] Gaceta Oficial del Distrito Federal, Mexico.
- Ordaz, M., Reinoso, E., and Pérez-Rocha, E. [1996] "Criterios de diseño sísmico: consideraciones para suelos blandos," *Revista de Ingeniería Sísmica*, SMIS **53**, 25–36 (in Spanish).
- Ordaz, M., Miranda, E., and Avilés, J. [2003] "Propuesta de espectros de diseño por sismo para el DF," *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, Escuela Superior Politécnica del Ejército, **8**, 189–208 (in Spanish).

- Ramirez, O. M., Constantinou, M. C., Kircher, C. A., Whittaker, A. S., Johnson, M. W., Gomez, J. D., and Chrysostomou, C. Z. [2000] "Development and evaluation of simplified procedures for analysis and design of buildings with passive energy dissipation systems," Report No: MCEER-00-0010, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER), University of New York at Buffalo, New York.
- International Association of Earthquake Engineering [1996] *Regulations for Seismic Design: A World List*, International Association of Earthquake Engineering, Tokyo, Japan.
- Tolis, S. V. and Faccioli, E. [1999] "Displacement design spectra," *Earthquake Engineering* **3**, 107–125.
- Wu, J. P. and Hanson, R. D. [1989] "Inelastic response spectra with high damping," *Journal of the Structural Division (ASCE)* **115**(6), 1412–1431.