



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE EN SISTEMAS
ESTRUCTURALES CON DISIPADORES DE TIPO
HISTERÉTICO DESPLANTADOS SOBRE TERRENO
DURO E INTERMEDIO**

T E S I S

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

PRESENTA:

Tomás Castillo Cruz

TUTORA:

Dra. Sonia Elda Ruiz Gómez

Octubre 2009

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, la única y verdadera escuela

“árbol viejo es, quebrado por no ceder ante un viento cruel que le impide morir de pie, tanto lastre que soltar y que lejos la orilla, te olvidaste de respirar por dar aire a mi vida...”

Av.

INTRODUCCIÓN

OBJETIVOS Y ALCANCES

I.- CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS ESTUDIADOS

- I.1 Sistemas con disipadores histeréticos
- I.2 Sistemas con disipadores de tipo viscoso y viscoelástico
- I.3 Definición de los parámetros α y γ para sistemas con disipadores de tipo histerético
- I.4 Propiedades geo-sísmicas de los sitios de estudio
 - I.4.1 Terreno duro
 - I.4.2 Terreno intermedio
- I.5 Espectros de Peligro Uniforme para sistemas con disipadores viscosos en terreno duro e intermedio
- I.6 Propiedades de las estructuras analizadas

II.- CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECTROS DE TASA DE FALLA UNIFORME (ETFU) PARA SISTEMAS CON DISIPADORES DE TIPO HISTERÉTICO

- II.1 Ecuaciones de movimiento para sistemas con disipadores histeréticos
- II.2 Metodología para obtener Espectros de Tasa de Falla Uniforme, ETFU
- II.3 Espectros de tasa de falla uniforme para sistemas con disipadores histeréticos
 - II.3.1 ETFU para Terreno duro
 - II.3.2 ETFU para Terreno intermedio

III.- METODOLOGÍA PARA OBTENER EL AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE

- III.1 Parámetros correspondientes a terreno duro
- III.2 Parámetros correspondientes a terreno intermedio

IV.- CALIBRACION DE LAS EXPRESIONES PROPUESTAS

- IV.1 Calibración de sistemas localizados en terreno duro
- IV.2 Calibración de sistemas localizados en terreno intermedio

V.- CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

Se presenta una expresión para encontrar el porcentaje de amortiguamiento crítico viscoso equivalente al que proporciona un sistema con disipadores histeréticos. El criterio se basa en la relación entre las ordenadas espectrales con tasa anual de falla uniforme para sistemas con disipadores histeréticos y las correspondientes a sistemas con disipadores viscosos. Se analizan estructuras desplantadas en dos tipos de terreno: duro e intermedio, el primero corresponde a Filo de Caballo en el estado de Guerrero. El terreno intermedio corresponde a Viveros en la Ciudad de México. Para cada tipo de terreno se encuentran y comprueban los parámetros correspondientes a la expresión.

A simple expression is presented to find the fraction of effective critical viscous damping equivalent to that of a system with hysteretic dampers. The criterium is based on the correlation between uniform failure rate spectral ordinates for systems with hysteretic dampers and those with viscous dampers. The structures are supposly placed on two kinds of soils: hard soil and transitive soil. The first one corresponds to Filo de Caballo in Guerrero state ande the second one corresponds to Viveros in Mexico City. The parameters of the expression for each type of soil is located and check.

Introducción

Hoy en día las reglas de reducción por amortiguamiento de espectros de diseño están en función del porcentaje efectivo del amortiguamiento crítico viscoso y no de parámetros correspondientes a disipadores de tipo histerético. Por ejemplo, el factor de amortiguamiento β que se menciona en el Apéndice A del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal depende del porcentaje efectivo del amortiguamiento del sistema ζ_e (y además de otros parámetros relacionados con el periodo). Asimismo, el factor de amortiguamiento β que se menciona en el capítulo Espectros de Diseño Sísmico para el Territorio Mexicano del Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad también es función de ζ_e . Partiendo de estos antecedentes, es evidente que se requiere conocer el valor del amortiguamiento equivalente ζ_e que se presenta en un sistema con disipadores histeréticos (con ciertas características dinámicas). Esto permitiría hacer de manera simplificada el análisis y diseño de sistemas con disipadores histeréticos.

En esta tesis se llaman disipadores histeréticos a aquellos constituidos por algún material que presenta deformación plástica (como por ejemplo, acero, plomo, cobre, etc) cuya capacidad de disipar energía depende del desplazamiento relativo entre los extremos del disipador (y no de su velocidad relativa). Este tipo de disipadores son, por ejemplo, los ADAS, TADAS, tipo óvalo, etc. Para el análisis de sistemas con disipadores histeréticos se definen dos parámetros: α y γ que corresponden respectivamente a la relación de rigidez y de fluencia entre el sistema base (estructura principal) y el disipador.

En el presente trabajo se propone una metodología para correlacionar la respuesta de un sistema con disipadores de energía histeréticos con la del mismo sistema pero con disipadores de tipo viscoso, lineal.

La respuesta sísmica de una estructura depende de sus parámetros de diseño, del tipo de terreno en el cual esté desplantada, así como de las características del sismo actuante (intensidad, contenido de frecuencias, distancia al epicentro, etc). Por tal motivo, en esta tesis se analizan sistemas con diferentes periodos de vibrar, ubicados en dos tipos de terreno diferentes: duro e intermedio. El primero de ellos corresponde al sitio Filo de Caballo ubicado en el Estado de Guerrero. Para el terreno intermedio se seleccionó el sitio Viveros ubicado al sur de la Ciudad de México. La forma de modelar el movimiento sísmico en este trabajo se hace a través de simular sismos con ciertas características inherentes a cada sitio de estudio, en ambos casos se utiliza como semilla de la simulación los acelerogramas del sismo del 19 de septiembre de 1985, registrados en cada uno de los sitios.

La correlación entre las respuestas de los diferentes sistemas estudiados se realiza a través de la relación entre ordenadas espectrales correspondientes a Espectros de Tasa de Falla Uniforme, ETFU, para sistemas con disipadores histeréticos y Espectros de Peligro Uniforme, EPU, para sistemas con amortiguamiento viscoso. En ambos casos, dichos espectros contienen a las ordenadas máximas que pueden presentarse en el sitio bajo un mismo nivel de intensidad (en este trabajo se trabajan con sismos cuyo periodo de retorno es de 125 años que corresponde a una tasa anual de excedencia de 0.008).

En el capítulo I se muestra un panorama general del estudio. Se mencionan tanto las características geosísmicas de cada tipo de terreno como las propiedades de los sistemas estudiados (caracterizadas por los valores de α , γ y el periodo del sistema estructural base).

En el capítulo II se muestra la metodología para obtener los ETFU, incluyendo para ello las ecuaciones correspondientes para sistemas con disipadores.

En el capítulo III se menciona la manera de cómo se estableció la correlación entre las respuestas para cada uno de los sistemas estudiados (sistemas con disipadores de tipo histerético y sistemas con disipadores de tipo viscoso). Se propone una ecuación que proporciona de manera sencilla el amortiguamiento equivalente para sistemas con disipadores histeréticos en función de las características del disipador y del periodo del sistema base. Se ajustan los parámetros de la ecuación para cada tipo de terreno en estudio (duro e intermedio).

Por último, en el capítulo IV se hace una calibración de las ecuaciones propuestas para obtener el amortiguamiento equivalente en sistemas de un grado de libertad para cada tipo de terreno. Para ello se analizan las estructuras paso a paso en el tiempo ante movimientos sísmicos con un nivel de intensidad similar para el cual se obtuvieron los resultados.

Se comparan las respuestas sísmicas de estructuras con disipadores de tipo histerético con las de estructuras con amortiguamiento equivalente. El procedimiento se ilustra mediante un ejemplo para cada tipo de terreno.

El objetivo de este trabajo es proponer una expresión sencilla mediante la cual se calcule el amortiguamiento efectivo viscoso que presentan sistemas de un grado de libertad (SDGL) con disipadores histeréticos. Esto se logra al relacionar ordenadas espectrales con una cierta tasa anual de falla uniforme en sistemas tanto con amortiguamiento viscoso como con disipadores histeréticos. Los sistemas estudiados se suponen ubicados en terrenos duros e intermedios.

La metodología presentada en este estudio se enfoca a sistemas cuyo comportamiento corresponde a la suma de un sistema base con comportamiento elástico al que se le añade un disipador que presenta comportamiento inelástico. Las recomendaciones y reglas que se obtienen sirven exclusivamente para los sitios de estudio y para los niveles de intensidad de los sismos seleccionados.

I.- Características de los sistemas estudiados

Los daños estructurales producidos por los sismos suelen corregirse mediante el reforzamiento y/o rigidización de la estructura dañada. En ocasiones se improvisan soluciones las cuales no garantizan la seguridad de la estructura, ya sea porque se desconoce la magnitud del daño o bien porque se ignoran las condiciones de la estructura en su estado original.

Por otro lado, los sistemas de reforzamiento pueden imponer a las cimentaciones solicitaciones más severas para las cuales fueron diseñadas, reflejándose en un incremento de la rigidez y de la masa total del sistema, así como de los momentos de volteo sísmico.

Por lo general, las estructuras liberan la energía que reciben de los movimientos sísmicos de diferentes maneras:

- A) Energía cinética
- B) Energía por amortiguamiento
- C) Energía por comportamiento inelástico

La primera representa solo un pequeño porcentaje de la energía total disipada. La siguiente ocurre mediante el movimiento relativo de las partes que componen a la estructura tales como muros divisorios, fachadas, recubrimientos, etc. y al igual que la primera, representa un pequeño porcentaje de la energía total que recibe la estructura.

La última forma de disipación es la más importante, debido a que se produce cuando los elementos que componen la estructura presentan un comportamiento inelástico. Este tipo de disipación ha sido reconocido y valorado por los códigos de reglamentación de diseño sísmico como una forma realista y efectiva de absorber, de manera económica, las solicitaciones a las que podrían estar sujetas las estructuras durante un sismo de magnitud considerable. Por otro lado, la secuencia en la que se desarrollarán las articulaciones plásticas a lo largo de la estructura no puede saberse a ciencia cierta y dependerán en gran medida de la distribución de la carga sobre la estructura en el momento en que ocurra el sismo, de la forma en que los elementos no estructurales están ligados a la estructura, de la homogeneidad en los materiales de construcción, así como de los procesos constructivos y del deterioro que puedan sufrir los elementos estructurales ya sea por factores ambientales, o bien por el paso del tiempo hasta el momento en que se presente algún sismo intenso.

Debido a lo anterior, se puede concluir que no siempre conviene solamente depender de la ductilidad del sistema estructural para disipar energía, debido a las múltiples variables a tomar en cuenta, en su defecto, se puede contar con este comportamiento como una reserva o segunda línea de resistencia.

En los últimos años se han desarrollado dispositivos que permiten disipar energía sísmica y reducir los efectos de los sismos sobre las estructuras ya sea para evitar el daño en sus elementos principales o bien concentrarlo en puntos específicos. Dichos dispositivos tienen la función de disipar la energía de forma estable, y además, pueden ser reparados o sustituidos con relativa facilidad y bajo costo.

Existen dos grupos de dispositivos para disipar energía en las estructuras: los que dependen del desplazamiento y los que dependen de la velocidad. Los primeros incluyen a los disipadores de tipo histerético y se caracterizan por funcionar a partir de la fluencia de un material, o bien de la fricción entre dos o más materiales. Dentro de este grupo de disipadores se encuentran los tipo ADAS, TADAS, Óvalo, etc. Los dispositivos que dependen de la velocidad son los disipadores viscoelásticos y viscosos. A continuación se da una breve descripción de cada uno de estos dispositivos.

I.1 Sistemas con disipadores de tipo histerético

La disipación pasiva de energía es reconocida como un medio efectivo para defender a las estructuras de los efectos de los sismos. El principio es simple: si los sismos se originan mediante una liberación de energía del suelo, los elementos que estén íntimamente ligados al suelo tales como las estructuras, absorben esta energía durante un sismo y deberán liberarla de alguna manera.

Los disipadores histeréticos son dispositivos mecánicos formados por una serie de placas de acero paralelas que al conectarse entre dos puntos de la estructura que se desplazan entre sí, se deforman en su sentido débil, tomando parte del cortante provocado por el movimiento entre los dos puntos de la estructura en donde se conectaron los disipadores.

Bajo este principio surge el concepto de los disipadores conocidos como ADAS (Added Damping And Stiffness) y los TADAS (Triangular Added Damping And Stiffness), los cuales, en esencia, suponen un incremento interno del amortiguamiento estructural mediante la disipación de energía, pero al mismo tiempo proporcionan un incremento tanto en la rigidez como en la resistencia del sistema estructural (Figura 1.1).

Por lo general los disipadores histeréticos se comportan elásticamente para resistir las cargas laterales producidas por viento y sismos menores, y trabajan en el rango inelástico en el caso de sismos intensos disipando energía mediante este comportamiento. Al estar ligados a la estructura principal, las deformaciones inelásticas de los disipadores describen durante los sismos ciclos histeréticos, lo cual representa una forma efectiva de disipar energía. Esto conlleva a la condición de que para que los disipadores funcionen de manera adecuada, se deba garantizar la fluencia del material con el que están hechos.

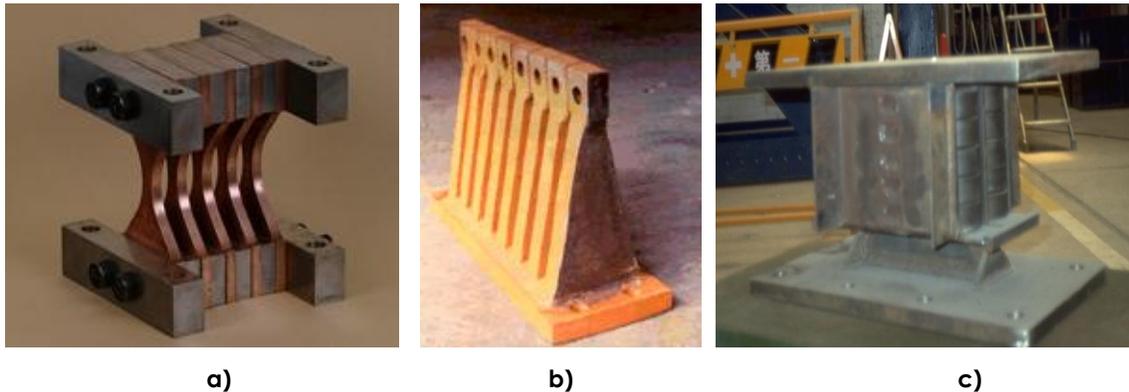


Figura 1.1 Disipadores de tipo histerético: a) ADAS, b) TADAS, c) Tipo óvalo

Los disipadores histeréticos se pueden colocar en la punta o vértice de un contraventeo en V invertida (Figura 1.2). En el caso de edificios cuyos sistemas resistentes a cargas laterales se base en muros de cortante y en los cuales las deformaciones relativas entre los pisos sean de menor cuantía que las que se requieren para activar eficazmente a los disipadores, se debe buscar entonces otro arreglo, por ejemplo, se puede aprovechar la configuración de deformación del edificio (similar a la de una viga por cortante) y colocar los disipadores horizontalmente entre dos muros (Figura 1.3).

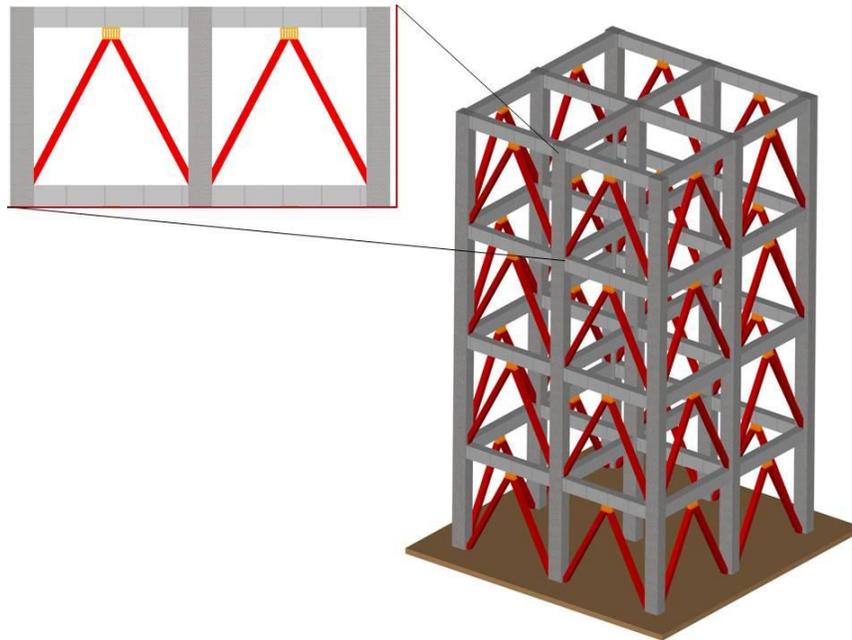


Figura 1.2 Configuraciones de disipadores de tipo histérico en edificios a base de marcos

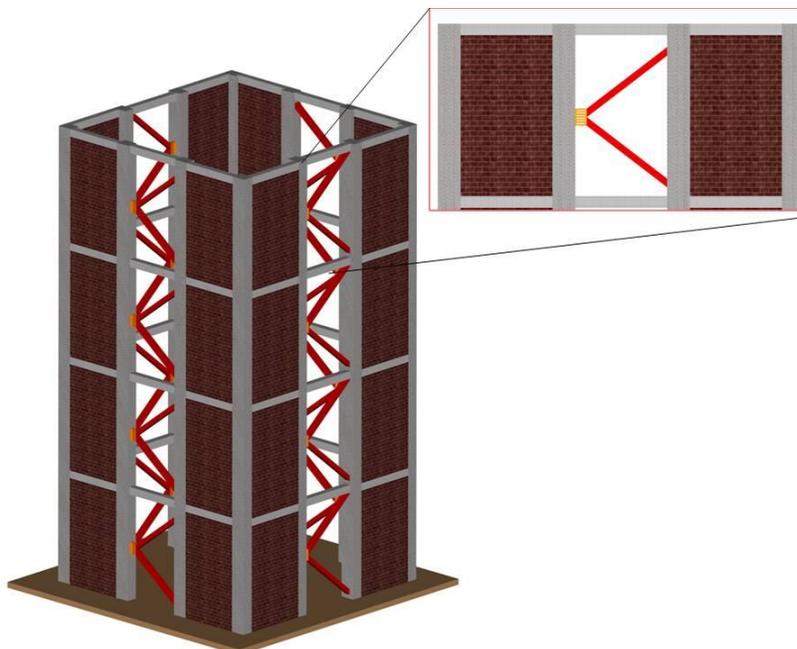


Figura 1.3 Configuraciones de disipadores de tipo histérico en edificios a base de muros de cortante

I.2 Sistemas con disipadores de tipo viscoso y viscoelástico

El principio de funcionamiento de los disipadores viscosos consiste en el desplazamiento de un elemento a través de un fluido viscoso. La fricción con el líquido genera fuerzas que se oponen al movimiento del elemento, cuya magnitud es proporcional a la velocidad. Estos disipadores contienen en su interior fluidos viscosos tales como siliconas, aceites, etc. y han sido utilizados hace ya varias décadas con eficiencia en la generación de dispositivos disipadores de energía (Figura 1.4).



Figura 1.4 Disipadores viscosos

Los disipadores viscoelásticos consisten de capas de polímeros viscoelásticos adheridas a placas de acero que a su vez se conectan a la estructura (Figura 1.5). Generalmente este tipo de dispositivos se modelan a través del cuerpo de Kelvin que consiste en un resorte y un amortiguador conectados en paralelo.

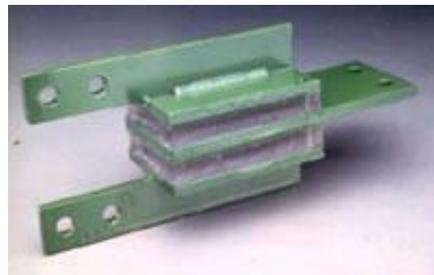


Figura 1.5 Disipadores viscoelásticos

I.3 Definición de los parámetros α y γ para sistemas con disipadores de tipo histerético

Para el análisis de estructuras con disipadores de tipo histerético se debe caracterizar el comportamiento tanto lineal como no lineal a través de dos propiedades: rigidez y resistencia. Dichas propiedades se definen en este trabajo a través de los parámetros α y γ .

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

$$\alpha = \frac{K_d}{K_c} \quad (1.1)$$

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

Por otro lado, el parámetro γ se define como la relación entre la fuerza de fluencia del disipador y la fuerza de fluencia del sistema básico

$$\gamma = \frac{F_{yd}}{F_{yc}} \quad (1.2)$$

donde F_{yd} es la fuerza de fluencia del disipador y F_{yc} es la fuerza de fluencia del sistema básico.

El sistema estructura-disipador se modela a través de un sistema de un grado de libertad con fracción del amortiguamiento crítico del 5% más un elemento disipador, tal y como se muestra en la figura 1.6.

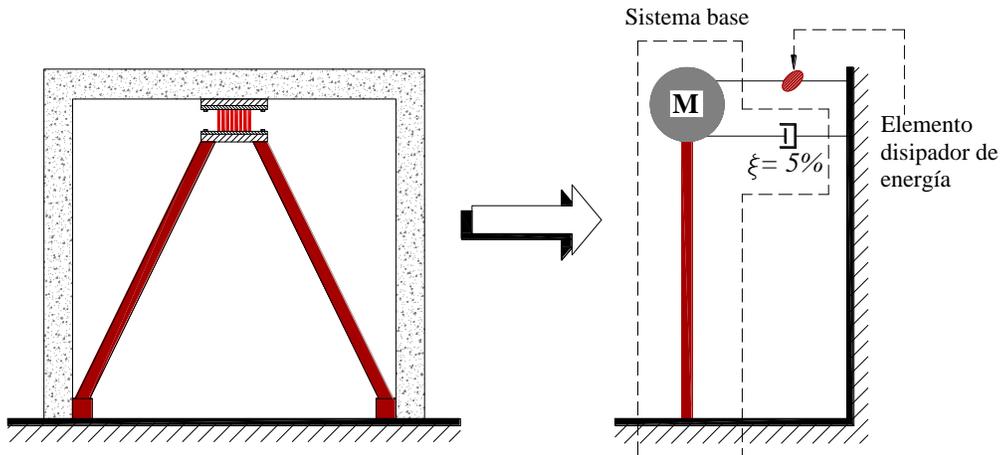


Figura 1.6 Modelo de un sistema estructura-disipador

En este estudio se hace la consideración de que el sistema base trabaja dentro del intervalo elástico mientras que el disipador presenta comportamiento elastoplástico. Cuando se presenta un sismo, la suma de ambas respuestas es la respuesta del sistema completo.

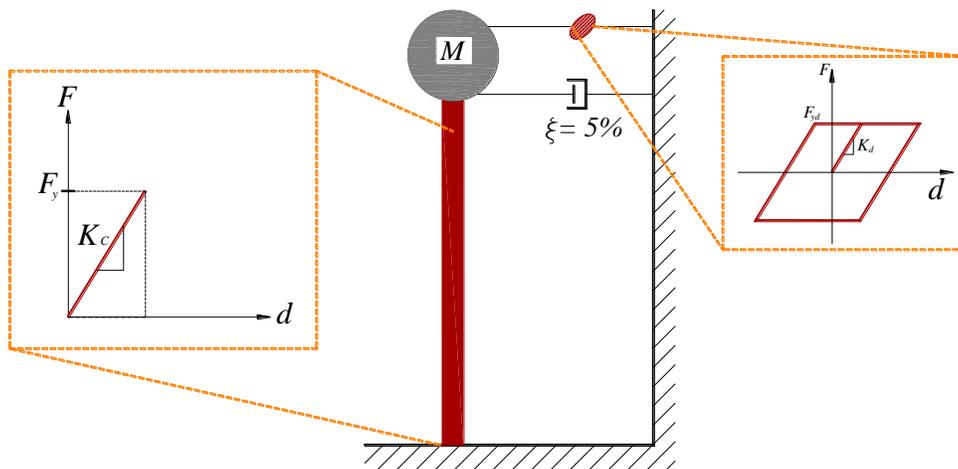


Figura 1.7 Comportamiento físico de las partes que constituyen al sistema estructura-disipador

En la figura 1.8 se muestra las curvas correspondientes a un sistema estructura-disipador ante carga monótonicamente creciente. Dichas curvas corresponden al sistema base y a los elementos disipadores de energía que se estudian en esta tesis. 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 base y al disipador da lugar al comportamiento bi-lineal del sistema estructura-disipador (ED).

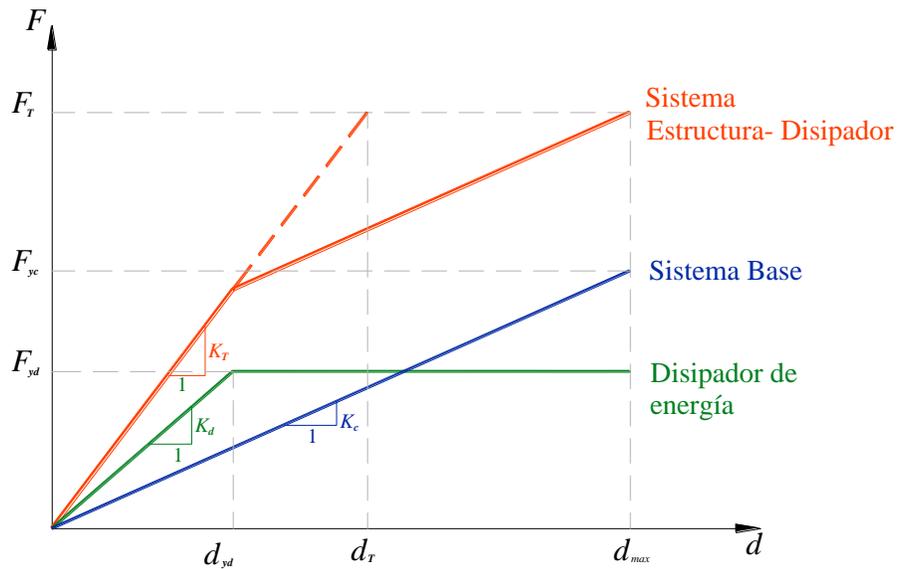


Figura 1.8 Relaciones fuerza-desplazamiento de las partes que constituyen al sistema estructura-disipador

Dado que en este estudio el sistema base siempre mantiene un comportamiento elástico, es evidente que el desplazamiento de fluencia del disipador, d_{yd} , debe ser siempre menor que el desplazamiento máximo de la estructura, d_{max} , es decir:

$$d_{max} > d_{yd} \quad (1.3)$$

estos se definen mediante:

$$d_{max} = \frac{F_{yc}}{K_c} \quad (1.4)$$

$$d_{yd} = \frac{F_{yd}}{K_d} \quad (1.5)$$

sustituyendo estas dos últimas ecuaciones en la desigualdad 1.3:

$$\frac{F_{yc}}{K_c} > \frac{F_{yd}}{K_d} \quad (1.6)$$

lo anterior es equivalente a escribir:

$$\frac{K_d}{K_C} > \frac{F_{yd}}{F_{yC}} \quad (1.7)$$

De acuerdo a las ecuaciones 1.1 y 1.2 cada uno de los lados de la desigualdad 1.7 corresponden a las definiciones de los parámetros α y γ . Así, se llega a la conclusión de que para que se cumpla la desigualdad 1.3 y se garantice que el disipador siempre fluya antes de que el sistema base alcance su desplazamiento máximo, el disipador debe ser tal que:

$$\alpha > \gamma \quad (1.8)$$

Lo anterior se puede demostrar gráficamente haciendo referencia a las figuras 1.9, 1.10 y 1.11. La figura 1.9 muestra un sistema con parámetros iniciales del disipador $\alpha = 10$ y $\gamma = 0.5$. Se observa que la rigidez total del sistema estructura-disipador es alta debido al valor del parámetro α . Así mismo, se ve que la distancia entre el desplazamiento máximo del sistema y el desplazamiento de fluencia del disipador, es grande.

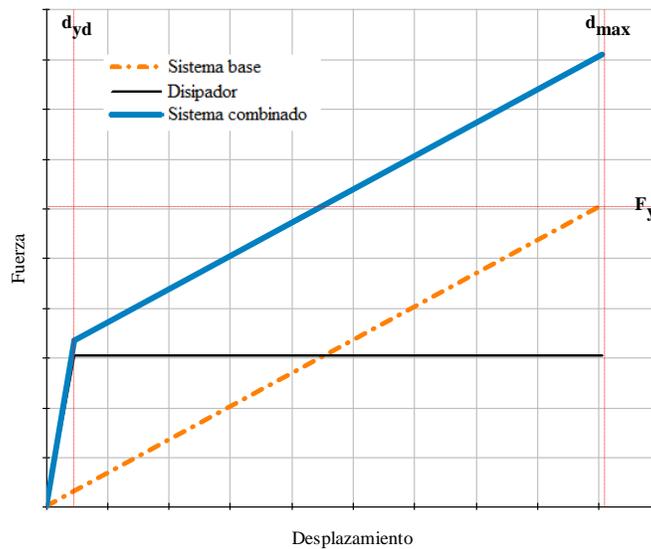


Figura 1.9 Comportamiento del sistema estructura-disipador con $\alpha = 10$ y $\gamma = 0.5$

En la figura 1.10 se muestra el mismo sistema pero con ahora con un valor de $\alpha = 1$ y $\gamma = 0.5$. Se observa que el desplazamiento de fluencia del disipador se ha recorrido hacia la derecha. Así mismo, la rigidez total del sistema es mucho menor respecto a la de la figura 1.9. Se ve que a medida que el valor de α tiende a γ la gráfica que representa al sistema estructura-disipador cada vez se aproxima más a una línea recta (ver línea punteada en la figura 1.8).

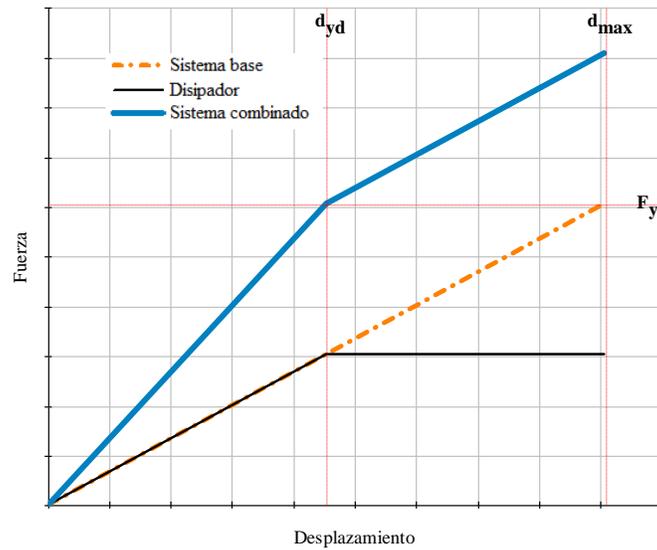


Figura 1.10 Comportamiento del sistema estructura-disipador con $\alpha = 1$ y $\gamma = 0.5$

Si ahora se toma un valor de α igual a γ , (es decir $\alpha = \gamma = 0.5$, ver figura 1.11), se encuentra que tanto el disipador como el sistema base tienen el mismo desplazamiento de fluencia. En este caso ambos sistemas se comportarán de manera elástica.

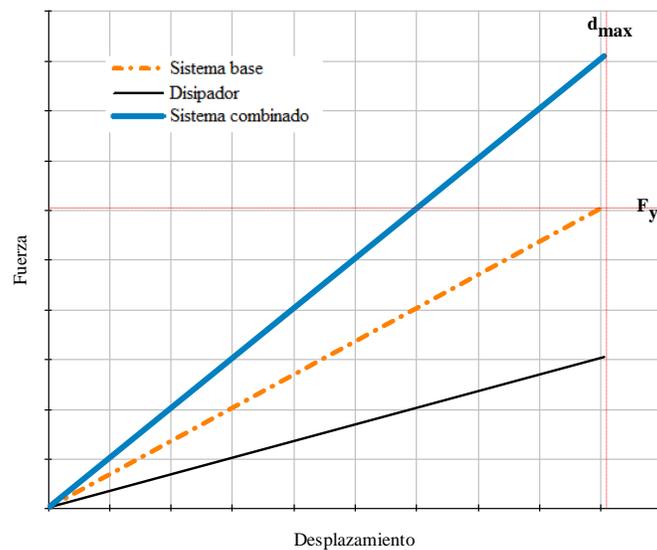


Figura 1.11 Comportamiento del sistema estructura-disipador con $\alpha = 0.5$ y $\gamma = 0.5$

I.4 Propiedades geo-sísmicas de los sitios de estudio

I.4.1 Terreno duro

El terreno duro de estudio corresponde a la estación Filo de Caballo que se ubica en la zona central del Estado de Guerrero. La estación se localiza sobre terreno rocoso perteneciente a la zona D de acuerdo con la zonificación sísmica del Manual de Obras Civiles de Comisión Federal de Electricidad (Capítulo 3, Diseño por Sismo). En la figura 1.11 se muestra una vista aérea del sitio seleccionado.



Figura 1.12 Vista aérea del sitio de estudio para terreno duro

En la figura 1.13 se muestran las curvas de peligro sísmico para diferentes periodos estructurales correspondientes al sitio Filo de Caballo (Alamilla, 2001). Dichas curvas corresponden a sistemas con 5% de amortiguamiento crítico. Las curvas de peligro sísmico contienen información acerca de la tasa de excedencia anual que se puede presentar en un sitio para una intensidad sísmica dada y corresponden a un sitio en particular con un periodo, porcentaje de amortiguamiento crítico y ductilidad particulares. A partir de ellas se pueden construir Espectros de Peligro Uniforme (EPU) para un periodo de retorno en particular, el cual es el inverso de la tasa de excedencia anual.

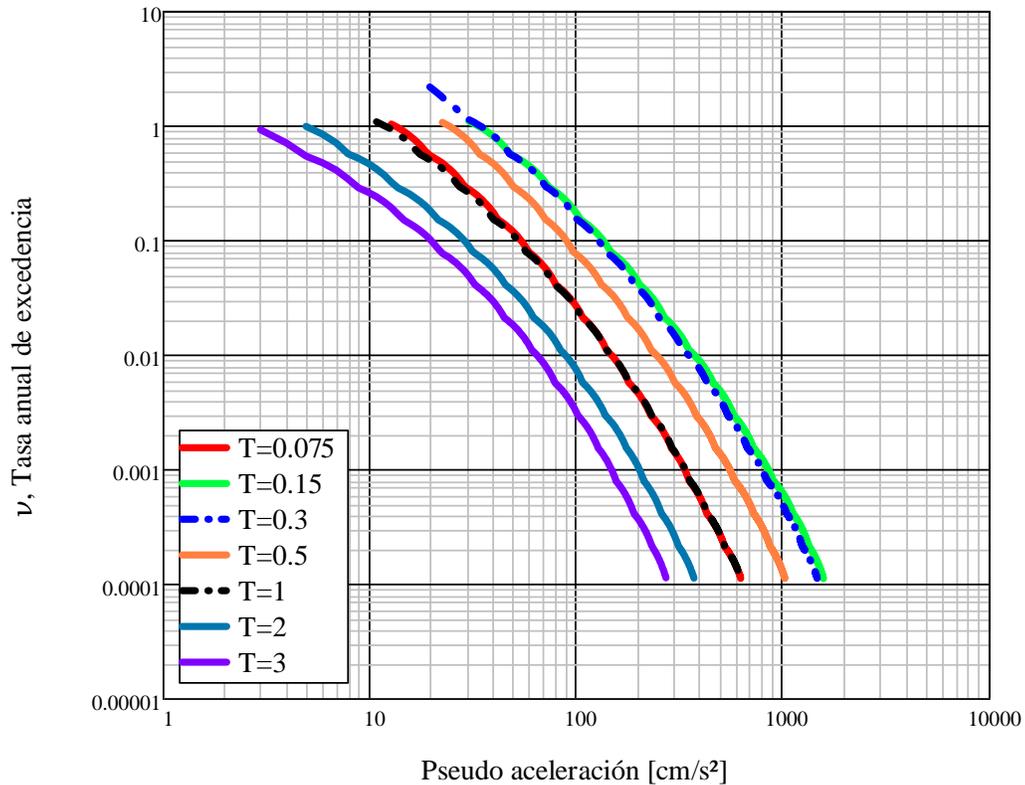


Figura 1.13 Curvas de peligro sísmico para Chilpancingo, Gro., correspondientes a sistemas con 5% de amortiguamiento crítico

En la figura 1.14 se compara el EPU correspondiente a un sitio en Chilpancingo y un periodo de retorno $T_R=125$ años con el espectro de respuesta del sismo del 19 de septiembre de 1985 registrado en Filo de Caballo, para ambas componentes. Se observa que el EPU correspondiente a un periodo de retorno de 125 años presenta mayores ordenadas espectrales que los espectros de respuesta del registro sísmico.

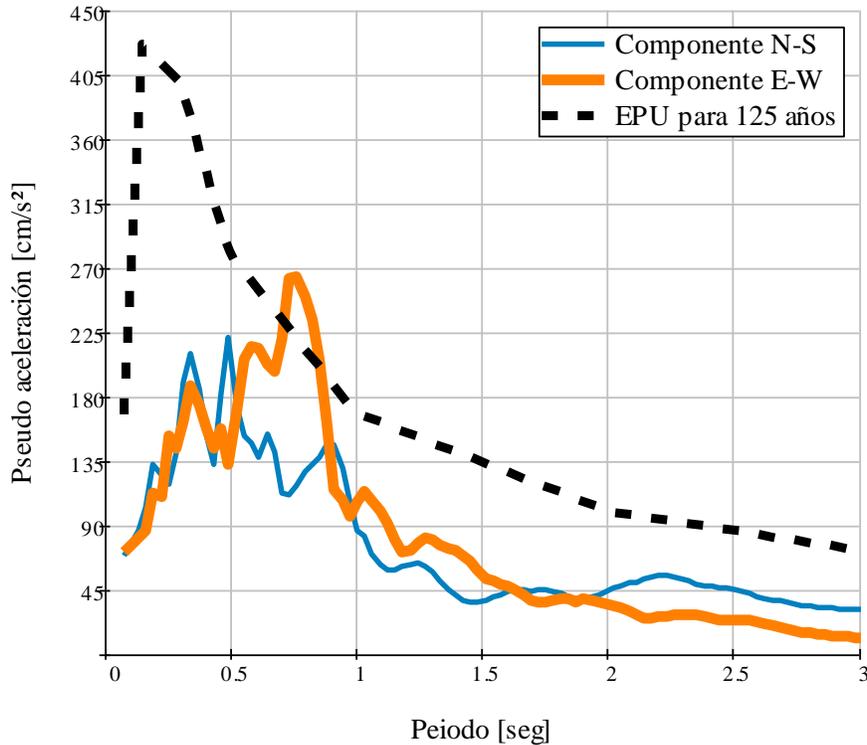


Figura 1.14 Comparación entre el EPU correspondiente a un periodo de retorno de 125 años en Chilpancingo, Gro., y el espectro de respuesta de las componentes registradas el 19 de septiembre de 1985 en la estación Filo de Caballo

I.4.2 Terreno intermedio

Para el terreno intermedio se seleccionó la estación Viveros que se ubica al sur de la Ciudad de México. De acuerdo con la zonificación geotécnica del Valle de México, el terreno pertenece a la zona de transición y tiene su origen en los suelos que se originaron en las barrancas, donde se acumularon los acarrees fluviales que descendieron de Las Lomas a la planicie. La zona de transición interestratificada al pie de Las Lomas contiene en sus partes más profundas la llamada Capa Dura, así como depósitos aluviales recientes. En la figura 1.13 se muestra una vista aérea del sitio de estudio.

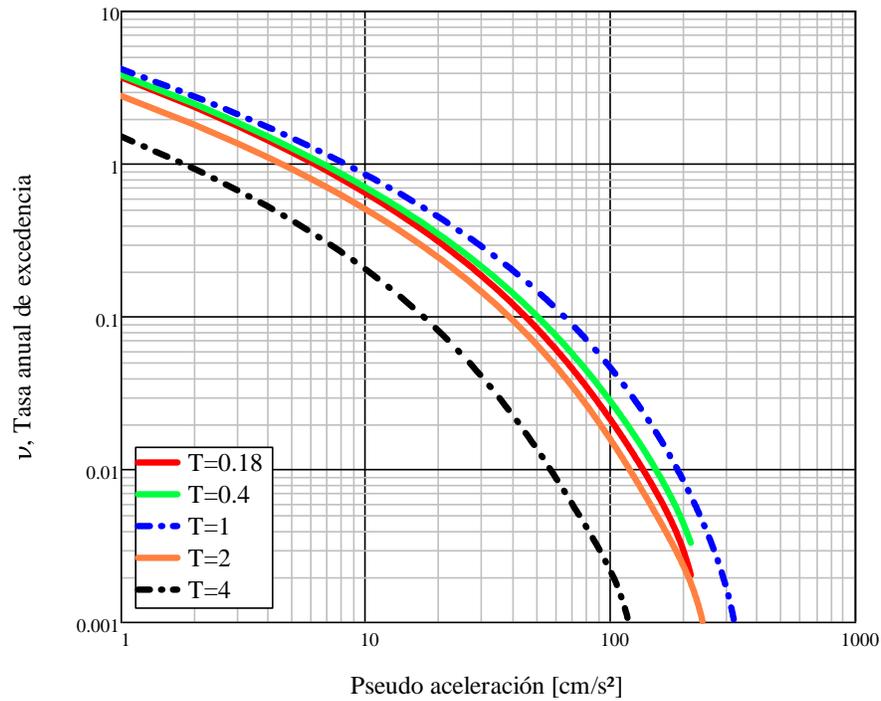


Figura 1.16 Curvas de peligro sísmico para Viveros, Ciudad de México correspondientes a sistemas con 5% de amortiguamiento crítico

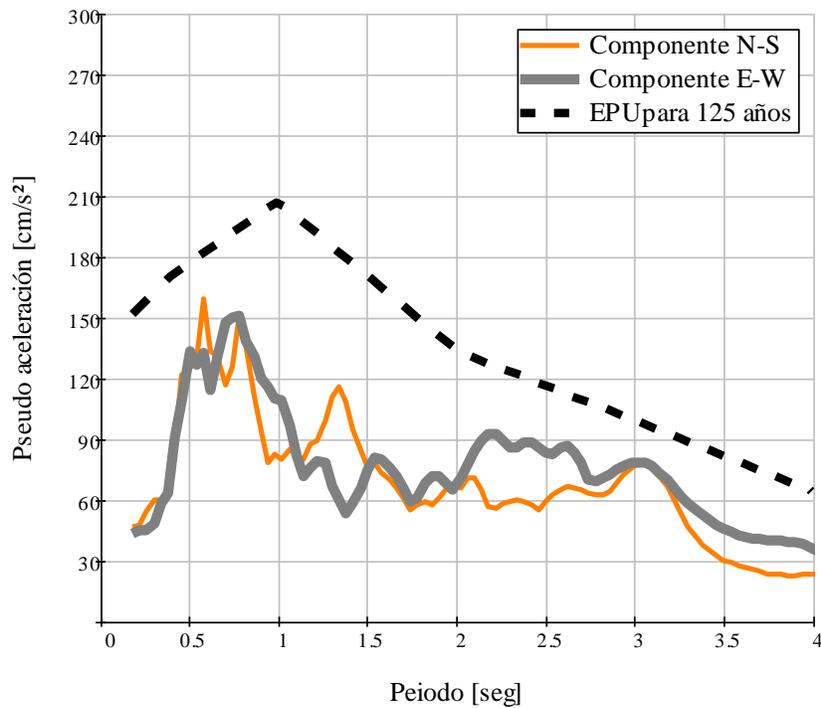


Figura 1.17 Comparación entre el EPU correspondiente a un periodo de retorno de 125 años y el espectro de respuesta de las componentes registrados el 19 de septiembre de 1985 en la estación Viveros

I.5 Espectros de Peligro Uniforme para sistemas con disipadores viscosos en terrenos duro e intermedio

Es posible construir Espectros de Peligro Uniforme, EPU a partir de curvas de peligro sísmico de un sitio en particular. Estos espectros estarán definidos por los periodos para los cuales se tengan las curvas así como de los niveles de amortiguamiento y ductilidad disponibles.

Para el presente estudio se contó con las curvas de peligro sísmico para diferentes periodos (Hidalgo, 2009), con ductilidad $Q=1$ y distintas relaciones de amortiguamiento crítico ($\xi= 5, 10, 15, 20, 25$ y 30%). En las figuras 1.18 y 1.19 se muestran los EPU para sistemas con amortiguamiento viscoso para ambos tipos de terreno.

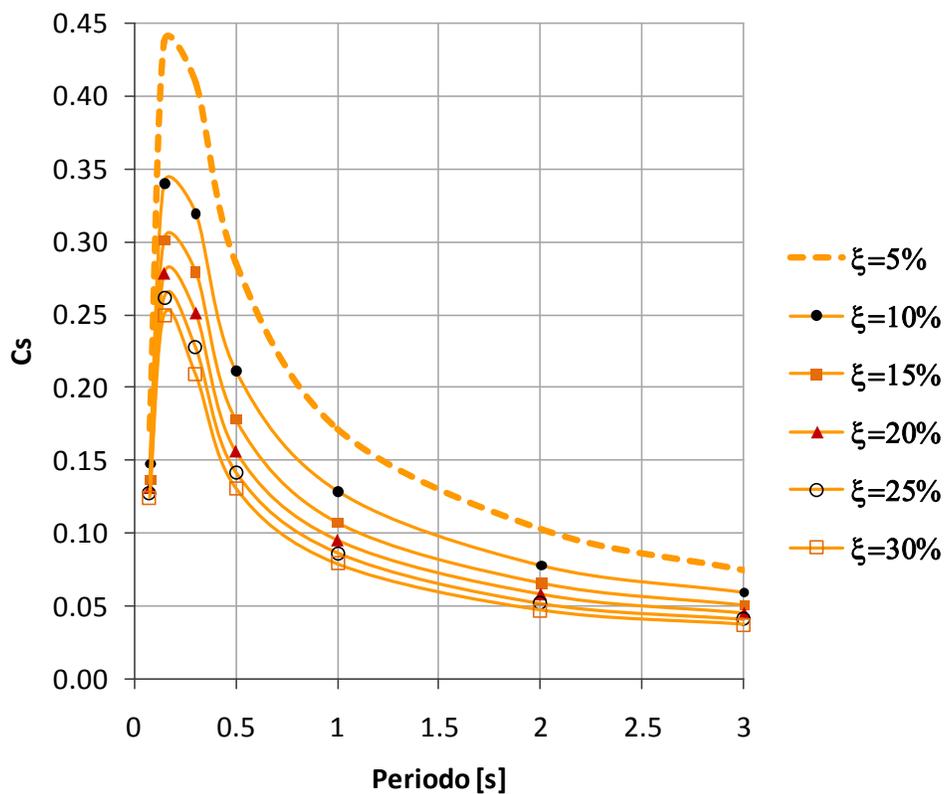


Figura 1.18 ETFU para sistemas con amortiguamiento viscoso desplantados sobre terreno duro en Filo de Caballo (Hidalgo, 2009)

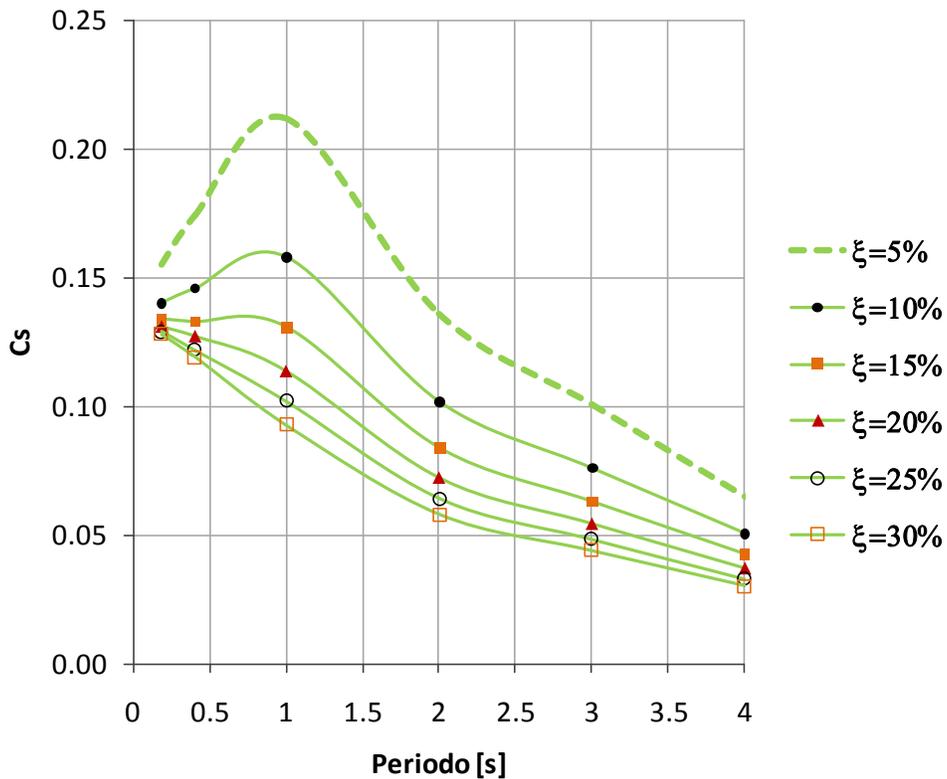


Figura 1.9 ETFU para sistemas con amortiguamiento viscoso desplantados sobre terreno intermedio en Viveros (Hidalgo, 2009)

I.6 Propiedades de las estructuras analizadas

La respuesta sísmica de una estructura depende en gran medida de sus parámetros de diseño. En el caso de SIGDL convencionales estos parámetros son el periodo de vibrar, T_e , y el porcentaje de amortiguamiento crítico, ξ .

Cuando se analizan sistemas con disipadores de tipo histerético, se deben incluir, además, los valores de los parámetros α y γ que definen al disipador que trabajará en conjunto con la estructura base.

En las tablas 1.1 y 1.2 se muestran las diferentes combinaciones del periodo, T , α y γ correspondientes a estructuras que se analizan en este trabajo, desplantadas en terreno duro e intermedio. El intervalo de periodos estudiados dependió de la disponibilidad de las curvas de peligro sísmico con las que se contó en el momento del análisis.

Tabla 1.1. Estructuras en terreno duro

T	α	γ
0.075		
0.15		
0.3		
0.5	0, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 10	0.2, 0.3, 0.5, 0.75
1.0		
2.0		
3.0		

Tabla 1.2 Estructuras en terreno intermedio

T	α	γ
0.18		
0.4		
1.0	0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 4	0.2, 0.3, 0.75
2.0		
3.0		
4.0		

II.- Espectros de Tasa de Falla Uniforme (ETFU) para sistemas con disipadores de tipo histerético

II.1 Ecuaciones de movimiento para sistemas de un grado de libertad con disipadores histeréticos

La ecuación general de movimiento para un sistema de un grado de libertad (1GDL), es (Baber y Wen, 1981).

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + K\Gamma_2 x + (1 - \Gamma_2)Kz = -Ma(t) \quad (2.1)$$

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 es 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.

Para el caso de sistemas con comportamiento elástico, la ecuación 2.1 resulta como sigue:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -Ma(t) \quad (2.2)$$

dividiendo entre la masa del sistema:

$$\ddot{x} + 2\xi \Omega \dot{x} + \Omega^2 x = -a(t) \quad (2.3)$$

donde ξ es la fracción del amortiguamiento crítico y Ω es la frecuencia natural del sistema.

En el caso de sistemas con disipadores histeréticos, la ecuación de movimiento está dada por (Rivera y Ruiz, 2006).

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + K_c \Gamma_{2c} x + (1 - \Gamma_{2c}) K_c z_c + K_d \Gamma_{2d} \dot{x} + (1 - \Gamma_{2d}) K_d \dot{z}_d = -Ma(t) \quad (2.4)$$

Los términos con la forma $K\Gamma_2 x$ 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 esta tesis se supone que el sistema base presenta comportamiento elástico, 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, así, se tiene:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + K_c x + K_d \Gamma_{2d} \dot{x} + (1 - \Gamma_{2d}) K_d \dot{z}_d = -Ma(t) \quad (2.5)$$

La ecuación 2.5 se puede expresar mediante el sistema de ecuaciones diferenciales siguiente (Rivera, 2006):

$$\dot{x} = -2\omega_0 \dot{x} - \left(\frac{K_c}{M}\right)x - \Gamma_{2d} \left(\frac{K_d}{M}\right)\dot{x} - (1 - \Gamma_{2d}) \left(\frac{K_d}{M}\right)\dot{z}_d - a(t) \quad (2.6a)$$

$$\dot{z}_d = \frac{\Gamma_{3d} \dot{x} - \nu_d \left(\Gamma_{4d} z_d |\dot{x}| |z_d|^{\Gamma_{6d}-1} + \Gamma_{5d} \dot{x} |z_d|^{\Gamma_{6d}} \right)}{\eta_d} \quad (2.6b)$$

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 degradación de la rigidez ni de la resistencia). Al resolver el sistema de ecuaciones diferenciales 2.6 para un acelerograma en particular, se obtiene la historia en el tiempo de los desplazamientos, velocidades y aceleraciones del sistema.

II.2 Metodología para obtener Espectros de Tasa de Falla Uniforme (ETFU) en sistemas con disipadores de tipo histerético

Los espectros de Tasa de falla Uniforme, ETFU, contienen las ordenadas máximas que pueden presentarse en un sitio particular, que presentan igual probabilidad de que falle el sistema por unidad de tiempo.

En el caso de sistemas con disipadores de tipo histerético, los ETFU están en función de los parámetros α y γ del sistema combinado.

Para la obtención de los ETFU se utilizó el programa *ETFU 4* cuyo algoritmo se describe en la tesis doctoral de Rivera Salas, 2006. A continuación se hace una breve descripción de la metodología que utiliza el programa:

Como primer paso se propone el valor nominal de la ductilidad disponible del sistema combinado, μ_a , a partir del cual se generan valores aleatorios de la ductilidad disponible del sistema combinado suponiendo que presenta una función de distribución de probabilidad lognormal. El valor medio de la ductilidad disponible del sistema combinado se obtiene a partir de la expresión (Esteva y Ruiz, 1989):

$$\overline{\mu_a} = \mu_a^* \cdot e^{\beta^2 V_\mu} \quad (2.7)$$

donde $\overline{\mu_a}$ es el valor medio de la ductilidad disponible, μ_a^* es el valor nominal de dicha ductilidad, β es el índice de Cornell (1969), ρ es un parámetro cuyo valor se adopta igual a 0.55 y V_μ es el coeficiente de variación de la ductilidad disponible. Se hace la aclaración de que en este trabajo se manejan procesos determinísticos por lo que el valor del coeficiente de variación para la ductilidad vale cero.

Este valor de la ductilidad disponible se puede obtener tanto en función de la ductilidad del sistema base, que en este estudio es igual a la unidad, como de la ductilidad del disipador (ver figura 1.8).

La ductilidad total del sistema, μ_a , se puede definir como

$$\mu_a = \frac{d_T}{d_{\max}} \quad (2.8)$$

donde d_T es el desplazamiento de fluencia del sistema combinado y se define mediante

$$d_T = \frac{F_T}{K_T} = \frac{F_{yc}(1+\gamma)}{K_c(1+\alpha)} = d_{\max} \frac{(1+\gamma)}{(1+\alpha)} \quad (2.9)$$

Sustituyendo la ecuación 2.8 en la ecuación 2.9 se tiene

$$\mu_a = \frac{(1+\gamma)}{(1+\alpha)} \quad (2.10)$$

También es posible expresar la ductilidad del sistema combinado en función de la ductilidad disponible del disipador, μ_d , la cual se define como (ver figura 1.8)

$$\mu_d = \frac{d_{yd}}{d_{\max}} \quad (2.11)$$

Si se multiplica la ecuación 2.8 por el término $\frac{d_{yd}}{d_{yd}}$ no se altera y es posible hacer el siguiente cambio de variable

$$\mu_a = \frac{d_T}{d_{\max}} \left(\frac{d_{yd}}{d_{yd}} \right) = \mu_d \left(\frac{d_T}{d_{yd}} \right) \quad (2.12)$$

La fuerza de fluencia del disipador, d_{yd} , se define como

$$d_{yd} = \frac{F_{yd}}{K_d} = \frac{\gamma F_{yc}}{\alpha K_c} = d_{\max} \frac{\gamma}{\alpha} \quad (2.13)$$

Sustituyendo la ecuación 2.13 y 2.9 en la ecuación 2.12 se obtiene la ductilidad del sistema combinado en función de la ductilidad disponible del disipador

$$\mu_a = \mu_d \left[\frac{\alpha(1+\gamma)}{\gamma(1+\alpha)} \right] \quad (2.14)$$

Estrictamente, se deben analizar las expresiones 2.10 y 2.14 y ver cuál de los sistemas alcanza primero la falla: el sistema base o el disipador.

Posteriormente, se proponen los valores del periodo de vibración nominal del sistema base, T , así como la masa, M , de dicho sistema, y se determina la rigidez nominal del sistema combinado K_T , mediante la expresión:

$$K_T = \frac{4\pi^2 M}{T^2} \quad (2.15)$$

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

$$K_c = \frac{K_T}{(1+\alpha)} \quad (2.16)$$

$$K_d = \alpha K_c \quad (2.17)$$

donde K_c y K_d son la rigidez del sistema base y del disipador respectivamente

El valor del desplazamiento de fluencia de la estructura convencional se obtiene mediante:

$$d_{yc} = \frac{C_y W}{K_c} \quad (2.18)$$

donde C_y es el coeficiente sísmico de la estructura.

La fuerza de fluencia del sistema convencional más el disipador se calcula mediante:

$$F_T = F_{yc}(1+\gamma) \quad (2.19)$$

Una vez que se tienen los parámetros anteriores, los sistemas estructurales se someten a movimientos sísmicos simulados (en este estudio se utilizaron 100 sismos simulados). Estos sismos

simulados se escalan de tal manera que para el periodo nominal, T , se cubra las intensidades de interés que se pueden presentar en el sitio.

Para cada respuesta se obtiene el desplazamiento máximo del sistema y se divide entre el desplazamiento de fluencia. De esta manera se calculan las ductilidades demandadas en el sistema combinado así como en la estructura convencional y en el disipador.

Una vez que se conoce la ductilidad demandada y la ductilidad disponible, se determina la relación de ductilidades, Q , mediante:

$$Q = \frac{\mu_{demandada}}{\mu_{disponible}} \quad (2.20)$$

En este estudio, se considera que la estructura falla cuando la demanda de ductilidad es mayor que su ductilidad disponible, es decir cuando $Q \geq 1$.

La probabilidad de falla de la estructura, $P(Q \geq 1|y)$, se encuentra contando el número de casos en que se presenta la falla asociados al periodo, al C_y , así como a la intensidad, y dividiendo entre el número total de sistemas simulados (100 en este estudio). Los detalles sobre el cálculo de la probabilidad $P(Q \geq 1|S_a)$ se pueden encontrar en la tesis doctoral de Rivera Salas del 2006.

La tasa anual de falla de la estructura se calcula mediante la siguiente ecuación (Esteva y Ruiz 1989):

$$\nu_F = \int \left| \frac{d\nu}{dS_a} \right| P(Q \geq 1|S_a) dS_a \quad (2.21)$$

Donde $|d\nu/ds_a|$ es el valor absoluto de la derivada de la curva de peligro sísmico, y $P(Q \geq 1|S_a)$ es la probabilidad de que ocurra la falla en la estructura dada una intensidad sísmica S_a , la cual corresponde a las intensidades sísmicas de las curvas de peligro correspondientes.

Después de determinar la tasa anual de falla de la estructura, ν_F , este algoritmo se repite para un valor diferente de C_y , con lo cual se va trazando la curva de peligro de demanda correspondiente al periodo T y a los parámetros α y γ seleccionados.

Una vez que se cuenta con las curvas de peligro de demanda correspondientes a distintos periodos, se selecciona una tasa de falla (en este trabajo se eligió una tasa anual de falla de 0.008) y para cada periodo se lee el valor de C_y correspondiente, encontrándose así el ETFU asociado a una pareja de valores de α y γ .

II.3 Espectros de tasa de falla uniforme (ETFU) para sistemas con disipadores histeréticos

En las siguientes figuras se muestran los ETFU calculados para sistemas con disipadores histeréticos. Se muestran primero los sistemas desplantados sobre terreno duro (Figuras 2.1 a 2.4) y posteriormente los ETFU para sistemas desplantados sobre terreno intermedio (Figuras 2.5 a 2.7). Se muestra también el EPU correspondiente a un sistema sin disipadores.

Los parámetros de los disipadores para cada sistema corresponden a los que se mencionan en las tablas 1.1 y 1.2. Las combinaciones de los parámetros del disipador corresponden a aquellas en donde $\alpha > \gamma$.

Se hace notar que los ETFU y los EPU para sistemas con amortiguamiento viscoso son iguales en el intervalo elástico debido a que, al tratarse de un comportamiento lineal, la ductilidad disponible es $\mu_a = 1$, y debido a que los sismos se escalan para que la ordenada del periodo en análisis coincida con las pseudoaceleraciones de la curva de peligro sísmico, la probabilidad $P(Q \geq 1|S_a)$ también vale 1, es decir:

$$P(Q \geq 1|S_a) = 1 \quad (2.22)$$

$$v_F = \int \left| \frac{dv}{dS_a} \right| (1) dS_a \quad (2.23)$$

Así, se llega a la conclusión de que la tasa anual de falla de la estructura corresponde a la tasa de excedencia correspondiente a las curvas de peligro sísmico de interés.

II.3.1 ETFU para Terreno duro

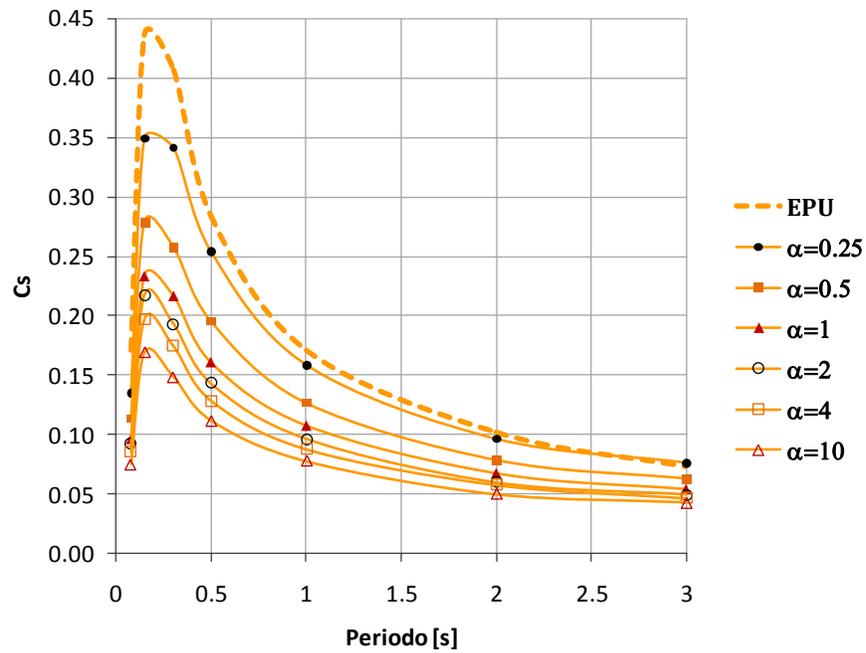


Figura 2.1 ETFU para sistemas con disipadores de tipo histerético con $\gamma = 0.2$ y diferentes valores de α

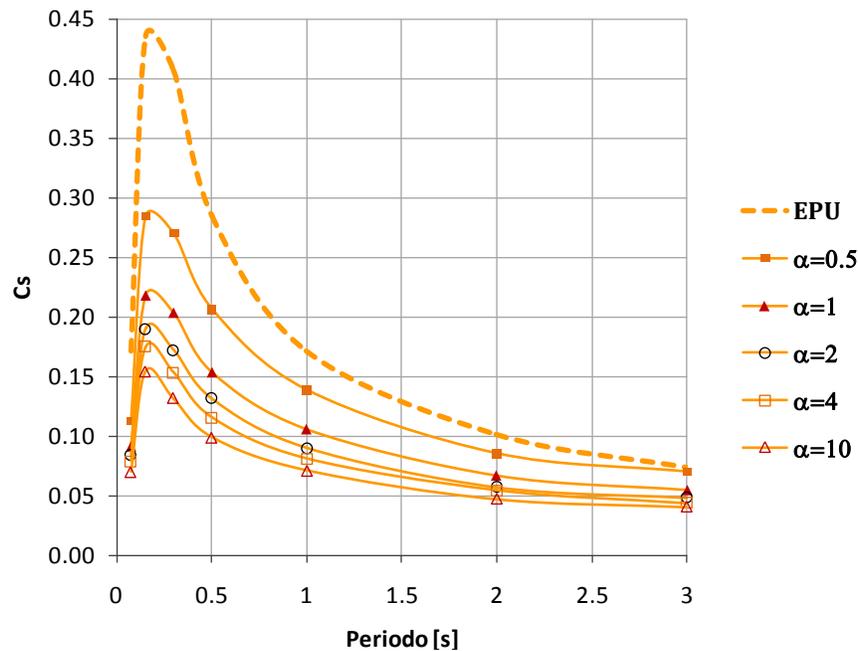


Figura 2.2 ETFU para sistemas con disipadores de tipo histerético con $\gamma = 0.3$ y diferentes valores de α

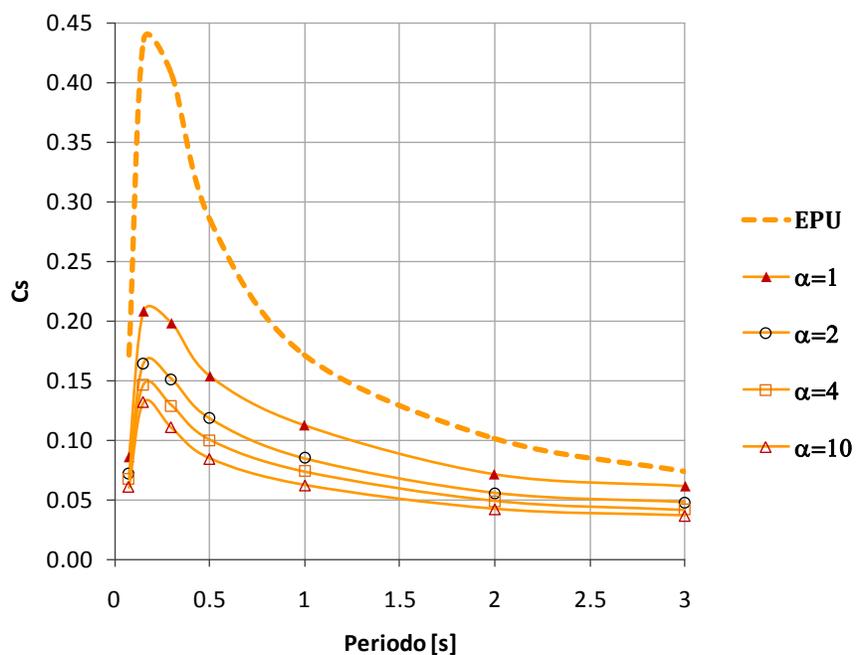


Figura 2.3 ETFU para sistemas con disipadores de tipo histerético con $\gamma = 0.5$ y diferentes valores de α

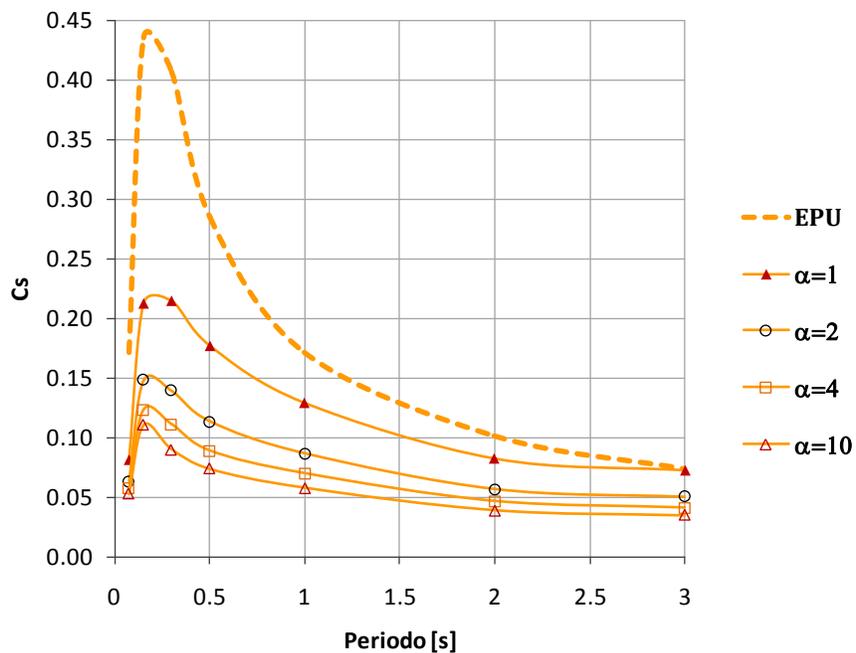


Figura 2.4 ETFU para sistemas con disipadores de tipo histerético con $\gamma = 0.75$ y diferentes valores de α

II.3.2 ETFU para Terreno intermedio

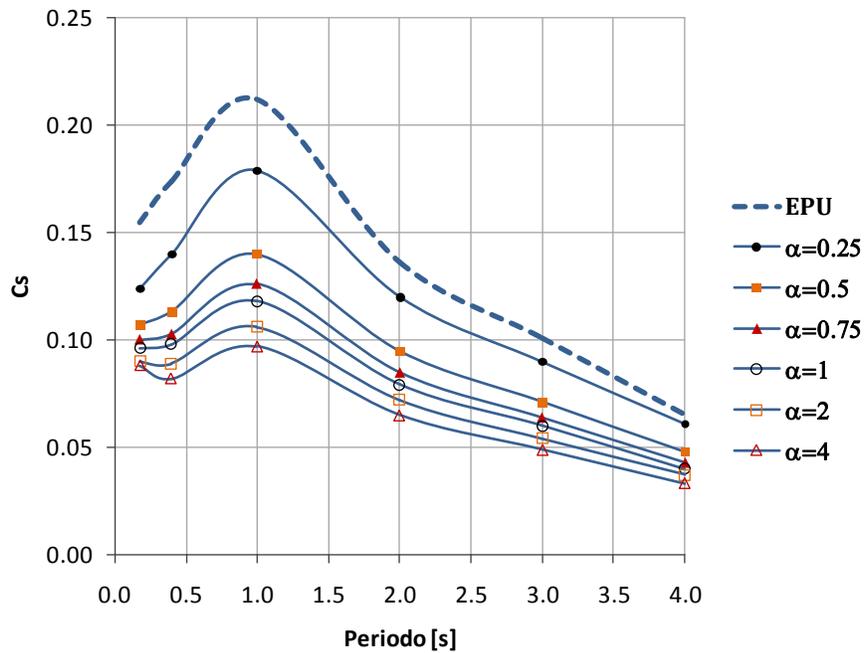


Figura 2.5 ETFU para sistemas con disipadores de tipo histerético con $\gamma = 0.2$ y diferentes valores de α

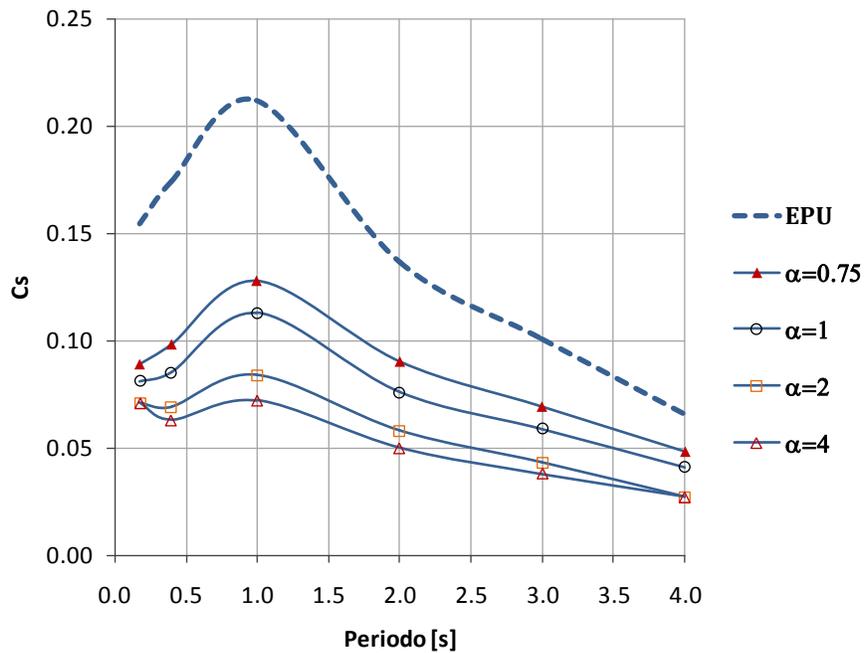


Figura 2.6 ETFU para sistemas con disipadores de tipo histerético con $\gamma = 0.5$ y diferentes valores de α

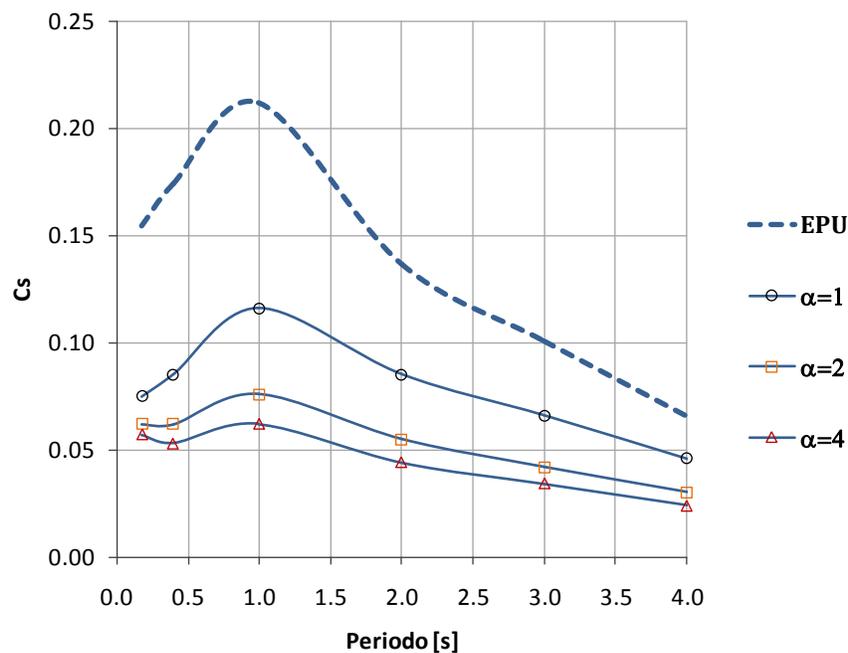


Figura 2.7 ETFU para sistemas con disipadores de tipo histerético con $\gamma = 0.75$ y diferentes valores de α

Cabe señalar que en este estudio se aceptaron como válidas las curvas de peligro sísmico para cada sitio como fueron obtenidas por sus autores, por lo que no se prestó atención al nivel de los desplazamientos espectrales. En algunos casos se puede observar que las demandas de desplazamiento calculadas para periodos altos pueden ser exageradas; sin embargo, dicho incremento en los desplazamiento no afecta el desarrollo de este estudio, debido a que las correlaciones encontradas se hacen entre los diferentes sistemas estructurales y no sobre los valores de las ordenadas espectrales.

III.- Metodología para obtener el amortiguamiento equivalente

En este capítulo se establece la equivalencia entre un sistema con disipadores de tipo histerético y un sistema con amortiguamiento viscoso. Esto se logró superponiendo los ETFU (sistemas con amortiguamiento histerético) con los EPU (sistemas con amortiguamiento viscoso) e interpolando entre los diferentes niveles de amortiguamiento. Así, se obtiene un amortiguamiento equivalente para cada punto de los ETFU. Dicho amortiguamiento está en función del periodo de la estructura base y de los parámetros α y γ de cada sistema.

Para ilustrar lo anterior, en la figura 3.1 se muestra el ETFU para una estructura analizada en terreno duro, con $\alpha = 1$, y $\gamma = 0.5$ superpuesto sobre los EPU para sistemas con amortiguamiento viscoso. El amortiguamiento equivalente asociado a cada punto del espectro se muestra en la figura 3.2.

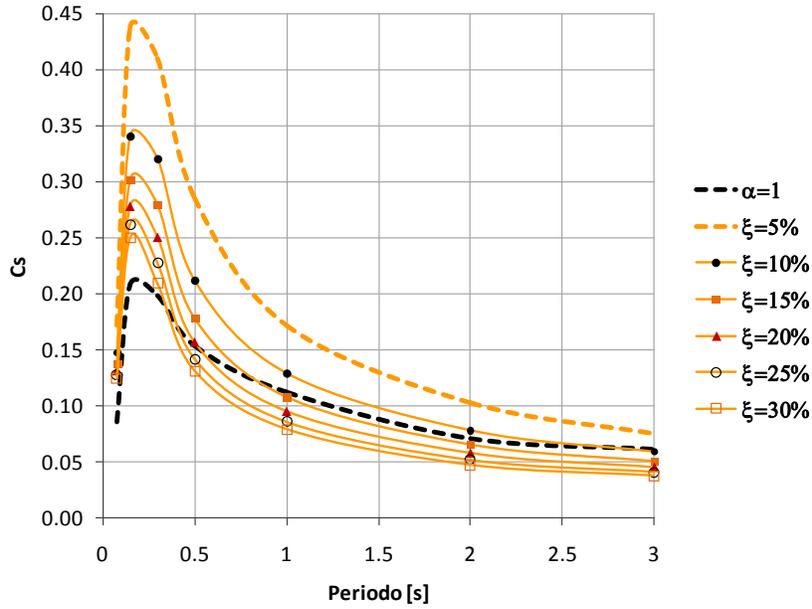


Figura 3.1 Intersección entre el ETFU correspondiente a sistemas con disipador $\alpha = 1$, y $\gamma = 0.5$ y los ETFU para sistemas con amortiguamiento viscoso

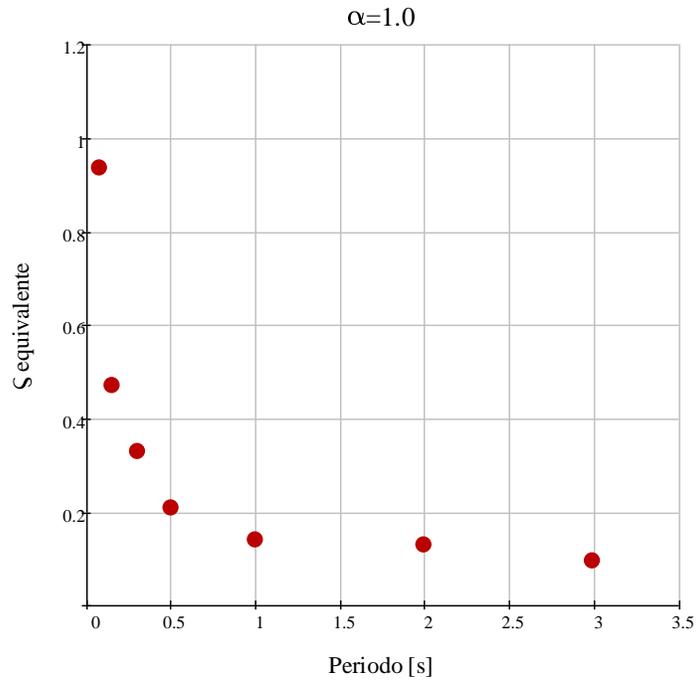


Figura 3.2 Amortiguamiento equivalente asociado al ETFU correspondiente a sistemas con disipador $\alpha = 1$, y $\gamma = 0.5$

Una vez que se cuenta con los puntos del amortiguamiento equivalente, es posible ajustar una ecuación que represente el comportamiento de los puntos para cada uno de los sistemas analizados. En este estudio, se propone que el amortiguamiento equivalente se represente mediante una curva decreciente de manera exponencial de la forma

$$\zeta_e = (T_e + A)^{-C} + B \quad (3.1)$$

en donde T_e es el periodo del sistema base (estructura sin disipador), A y B son constantes que dependen de los parámetros α y γ así como del tipo de terreno, y C es una constante que depende del tipo de terreno analizado.

En las siguientes secciones se muestran los valores de las constantes A y B correspondientes a cada tipo de terreno. La constante C vale 10 para terreno duro y 6 para terreno intermedio. Las diferentes constantes para cada tipo de terreno se ajustaron mediante el método de mínimos cuadrados.

III.1 Parámetros correspondientes a terreno duro

El amortiguamiento equivalente para sistemas desplantados sobre terreno duro está dado por la ecuación

$$\zeta_e = (T_e + A)^{-10} + B \quad (3.2)$$

En donde T_e es el periodo del sistema base (estructura sin disipador), A y B son constantes cuyo valor se determina a partir de las tablas 3.1 y 3.2, respectivamente.

El ajuste del amortiguamiento equivalente para cada uno de los sistemas se presenta en el Anexo A de esta tesis. Como ejemplo, en la figura 3.3 se ilustra el ajuste correspondiente a sistemas con disipadores con $\gamma=0.5$ y distintos valores de α .

Tabla 3.1 Valores de la constante A para terreno duro

\square	$\alpha=0.25$	$\alpha=0.5$	$\alpha=1$	$\alpha=2$	$\alpha=4$	$\alpha=10$
$\gamma=0$	4	4	4	4	4	4
$\gamma=0.20$	1.194	1.04	0.985	0.983	0.971	0.955
$\gamma=0.30$	----	1.028	0.971	0.965	0.961	0.95
$\gamma=0.50$	----	----	0.955	0.944	0.944	0.939
$\gamma=0.75$	----	----	0.94	0.927	0.929	0.93

Tabla 3.2 Valores de la constante B para terreno duro

\square	$\alpha=0.25$	$\alpha=0.5$	$\alpha=1$	$\alpha=2$	$\alpha=4$	$\alpha=10$
$\gamma=0$	0.051	0.051	0.051	0.051	0.051	0.051
$\gamma=0.20$	0.064	0.101	0.157	0.212	0.263	0.332
$\gamma=0.30$	----	0.079	0.174	0.259	0.317	0.381
$\gamma=0.50$	----	----	0.169	0.3	0.376	0.441
$\gamma=0.75$	----	----	0.113	0.305	0.414	0.484

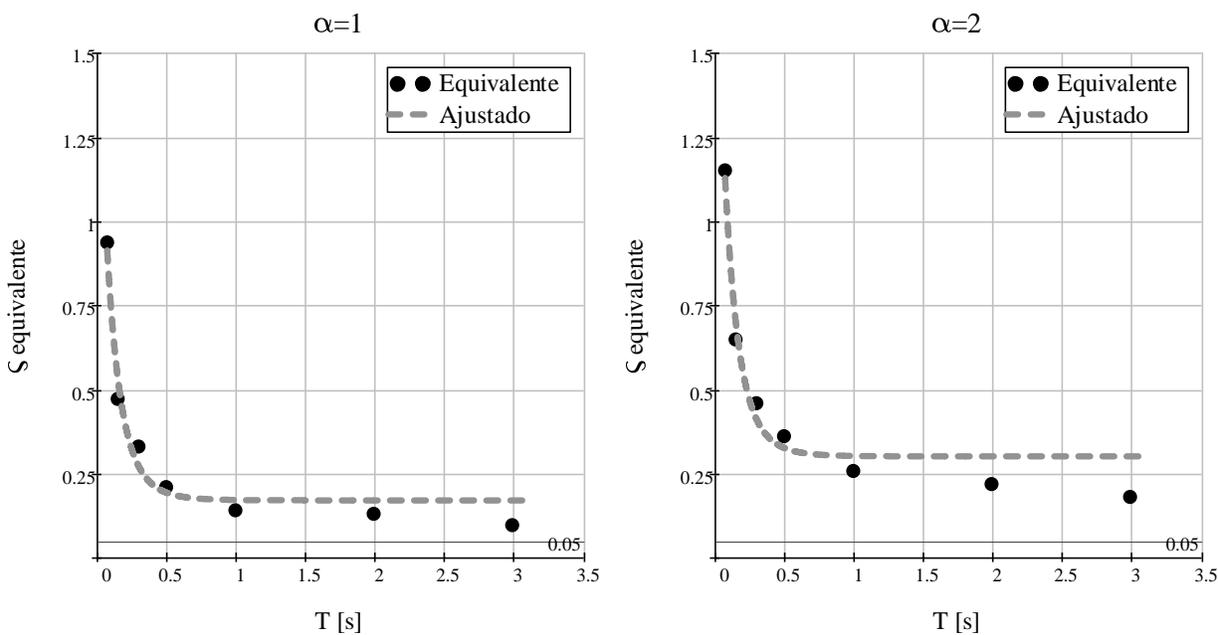


Figura 3.3 Amortiguamiento equivalente ajustado para el ETFU correspondiente a sistemas con $\gamma = 0.5$ y diferentes valores de α

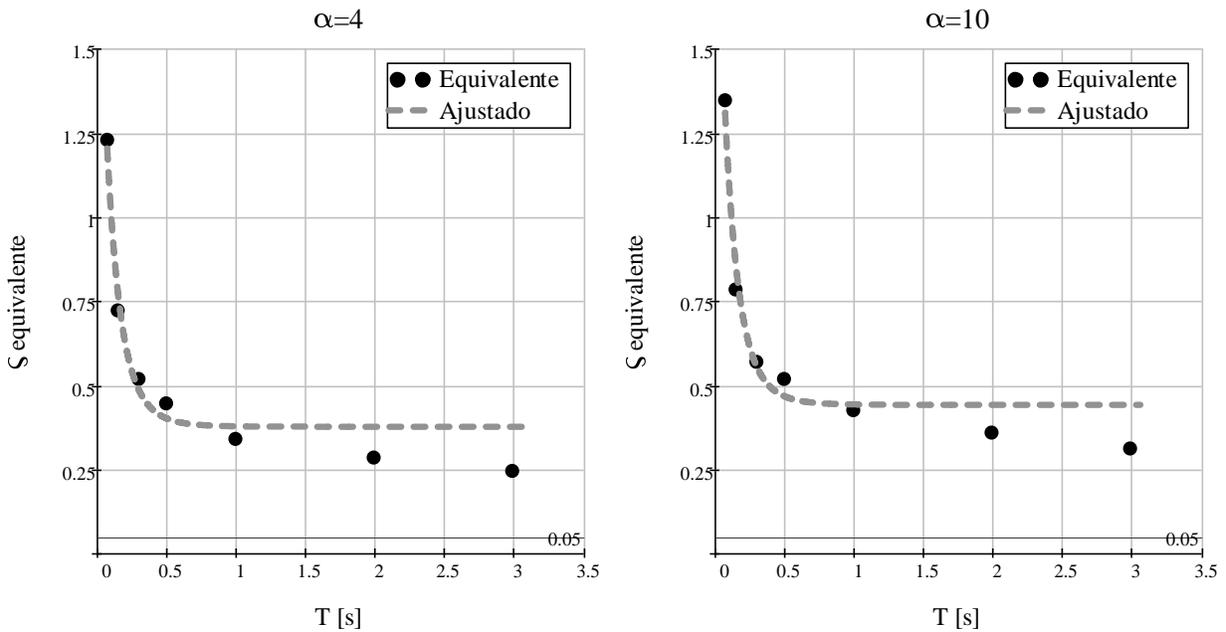


Figura 3.3 (continuación) Amortiguamiento equivalente ajustado para el ETFU correspondiente a sistemas con $\gamma = 0.5$ y diferentes valores de α

III.2 Parámetros correspondientes a terreno intermedio

El amortiguamiento equivalente para sistemas desplantados sobre terreno intermedio está dado por la ecuación:

$$\zeta_e = (T_e + A)^{-6} + B \tag{3.3}$$

Los valores de las constantes A y B se presentan en las tablas 3.3 y 3.4, respectivamente.

El ajuste del amortiguamiento equivalente para cada uno de los sistemas se presenta en el Anexo B de esta tesis. Como ejemplo, en la figura 3.3 se ilustra el ajuste correspondiente a sistemas con disipadores con $\gamma = 0.5$ y distintos valores de α .

Tabla 3.3 Valores de la constante A para terreno intermedio

\square	$\alpha=0.25$	$\alpha=0.5$	$\alpha=1$	$\alpha=2$	$\alpha=4$	$\alpha=10$
$\gamma=0$	2.685	2.685	2.685	2.685	2.685	2.685
$\gamma=0.20$	0.975	0.785	0.75	0.73	0.66	0.705
$\gamma=0.50$	---	---	0.7	0.68	0.66	0.665
$\gamma=0.75$	---	---	0.685	0.66	0.64	0.635

Tabla 3.4 Valores de la constante A para terreno intermedio

\square	$\alpha=0.25$	$\alpha=0.5$	$\alpha=1$	$\alpha=2$	$\alpha=4$	$\alpha=10$
$\gamma=0$	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049
$\gamma=0.20$	0.054	0.101	0.143	0.162	0.208	0.26
$\gamma=0.50$	---	---	0.112	0.182	0.332	0.4
$\gamma=0.75$	---	---	0.08	0.137	0.343	0.445

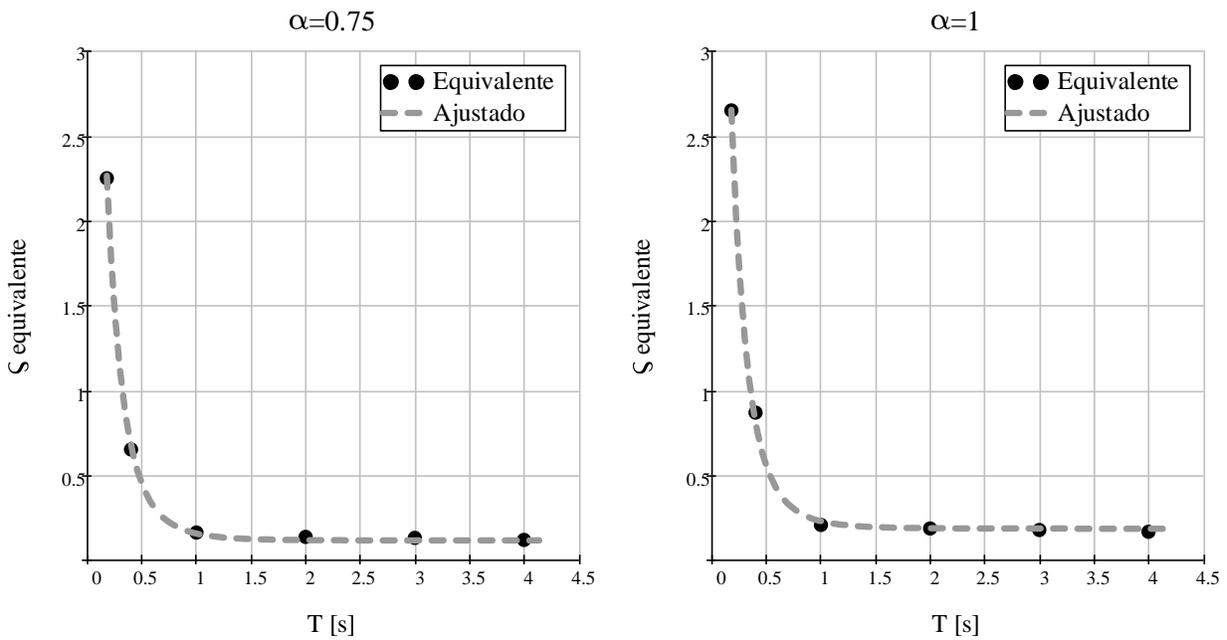


Figura 3.4 Amortiguamiento equivalente ajustado para el ETFU correspondiente a sistemas con $\gamma = 0.5$ y diferentes valores de α

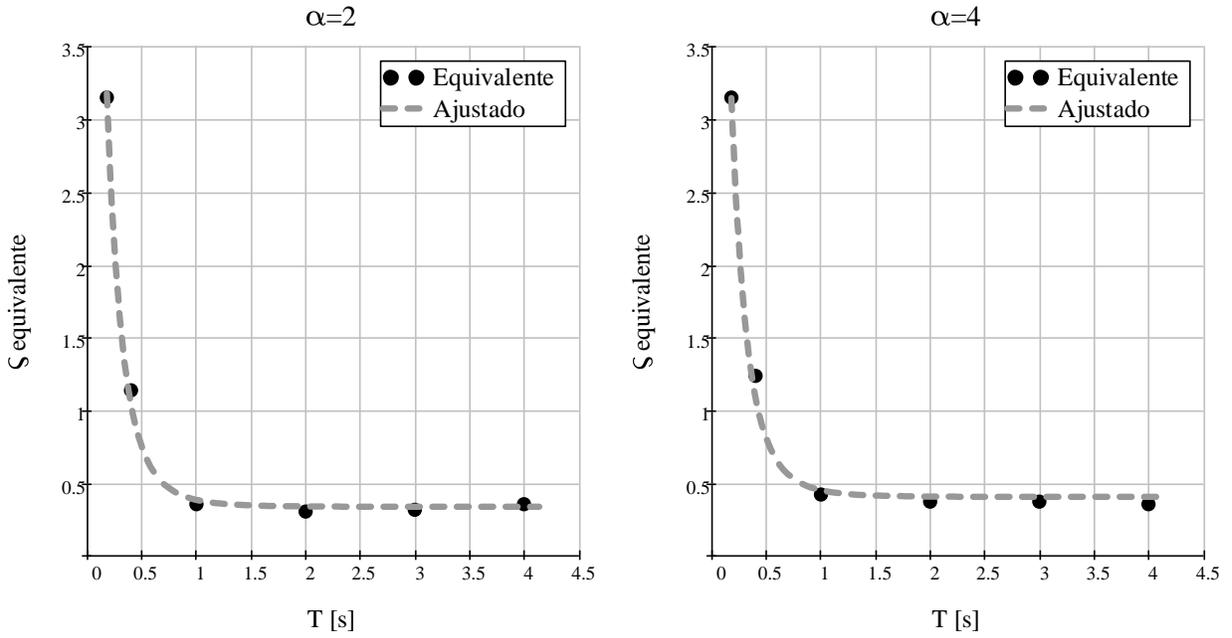


Figura 3.4 (continuación) Amortiguamiento equivalente ajustado para el ETFU correspondiente a sistemas con $\gamma = 0.5$ y diferentes valores de α

IV.- Calibración de las expresiones propuestas

Con el fin de validar las expresiones antes presentadas, se calcularon los espectros de respuesta para 30 sismos (tanto para terreno duro como para terreno intermedio) calculando la respuesta paso a paso del sistema con disipadores y, después, la del sistema con amortiguamiento equivalente tomando en cuenta el periodo de la estructura y los parámetros (A y B) correspondientes al disipador. En ambos casos, se utilizaron movimientos sísmicos simulados con un nivel de intensidad del orden para el cual se obtuvieron los ETFU (con $\nu = 0.008$) mencionados en capítulos anteriores. Los espectros de respuesta correspondientes se compararon entre sí a través de cocientes espectrales y de sus correspondientes desviaciones estándar.

Con el objeto de ilustrar el proceso de calibración que se realizó para cada tipo de terreno a continuación se muestra un ejemplo para la misma estructura que se analizó en el capítulo III. Se trata de una estructura con disipadores cuyos parámetros son $\alpha = 1$ y $\gamma = 0.5$. Se presenta primero el proceso de calibración para terreno duro, y posteriormente para terreno intermedio.

IV.1 Calibración de sistemas localizados en terreno duro

En la figura 4.2 se muestran algunos de los acelerogramas simulados utilizados en la calibración y en la figura 4.3 se muestran los espectros de respuesta convencionales (sistemas con porcentaje de amortiguamiento crítico igual al 5%) obtenidos con movimientos sísmicos simulados, comparados con el EPU correspondiente a un sistema sin disipadores y $\nu = 0.008$. Lo anterior se realiza con el fin de verificar que la intensidad de los sismos simulados corresponda a una tasa de recurrencia promedio de aproximadamente 125 años ($\nu = 0.008$).

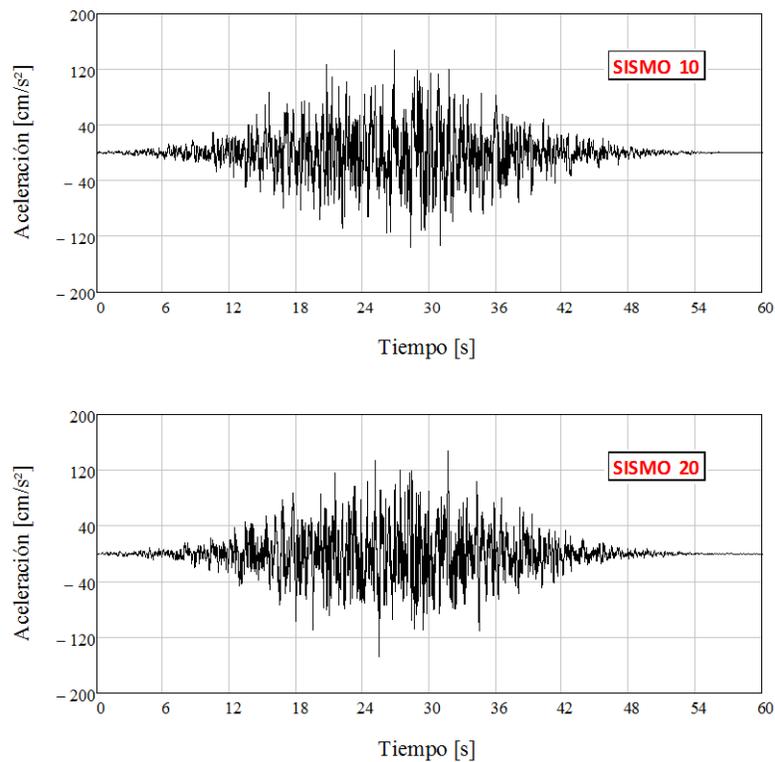


Figura 4.2 Algunos acelerogramas simulados utilizados en la calibración. Terreno duro

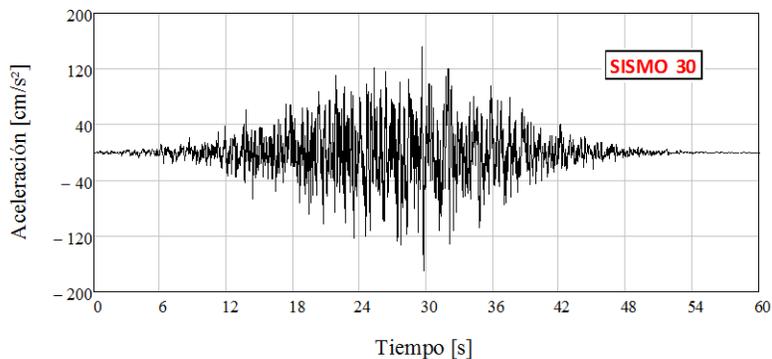


Figura 4.2 (continuación) Algunos acelerogramas simulados utilizados en la calibración. Terreno duro

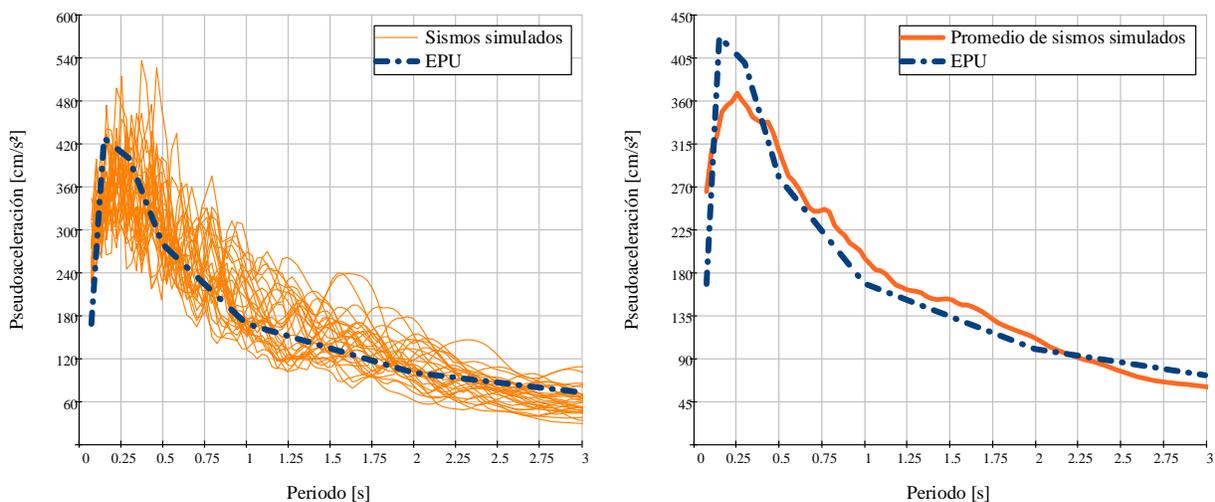


Figura 4.3 Espectros de respuesta y promedios de los 30 sismos simulados y el EPU ($\nu = 0.008$) para un sistema con 5% de amortiguamiento viscoso

En las figuras 4.4 a 4.6 se muestran los espectros de respuesta (pseudoaceleración, velocidad y desplazamiento) correspondientes a los acelerogramas de la figura 4.2. En las figuras 4.7 a 4.9 se presenta una comparación entre los espectros de respuesta de los 30 sismos analizados. A la izquierda de cada figura se muestran los espectros de sistemas con disipadores ($\alpha = 1$ y $\gamma = 0.5$) y a la derecha los espectros con amortiguamiento equivalente.

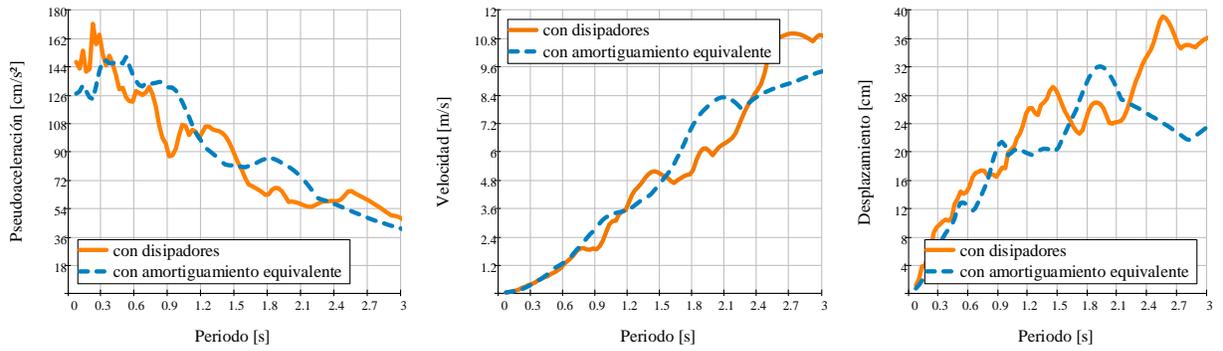


Figura 4.4 Espectros de respuesta del sismo 10 para el sistema en estudio, $\alpha = 1$ y $\gamma = 0.5$

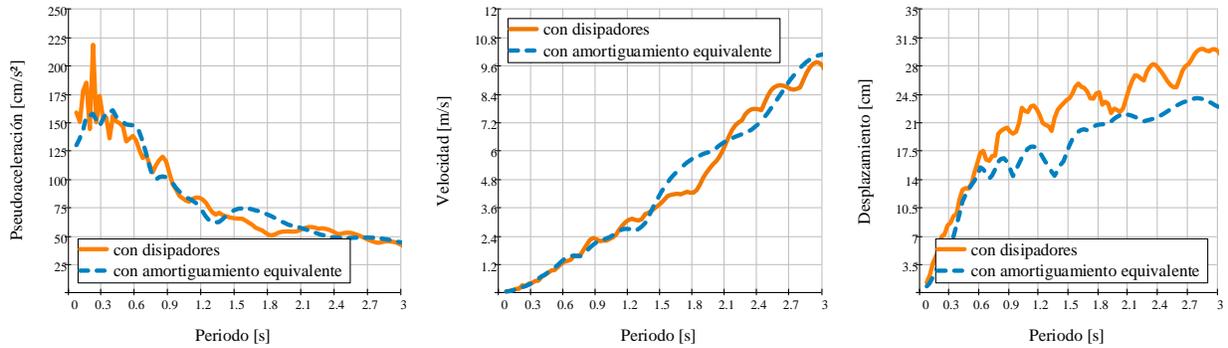


Figura 4.5 Espectros de respuesta del sismo 20 para el sistema en estudio, $\alpha = 1$ y $\gamma = 0.5$

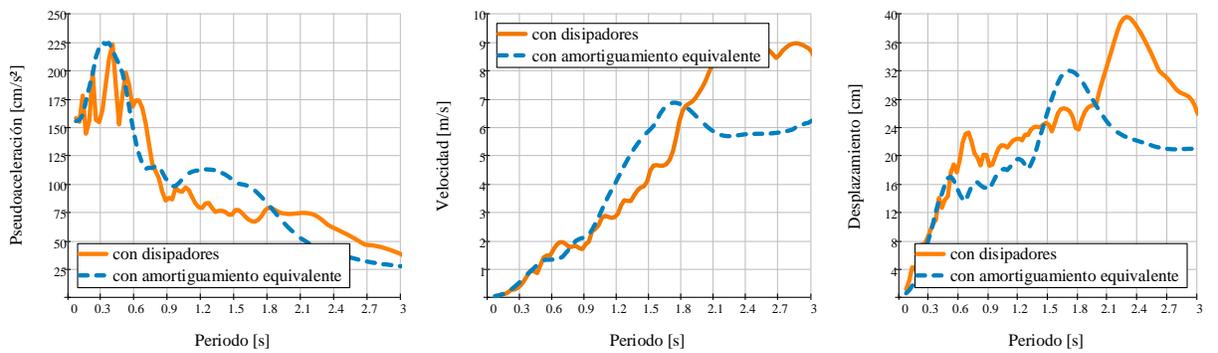


Figura 4.6 Espectros de respuesta del sismo 30 para el sistema en estudio, $\alpha = 1$ y $\gamma = 0.5$

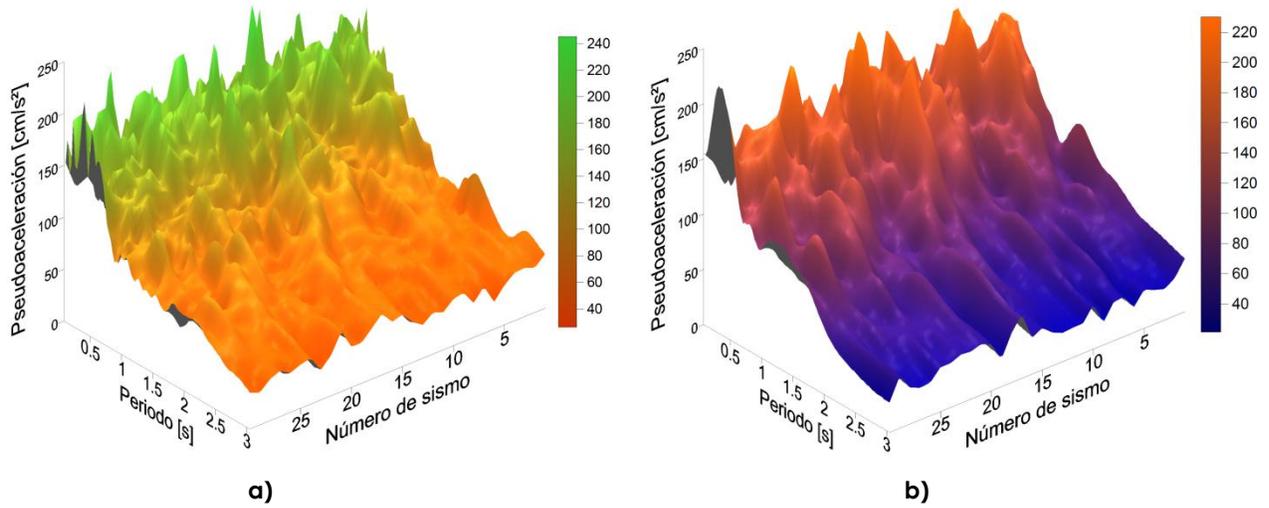


Figura 4.7 Espectros de pseudoaceleración de los 30 sismos analizados para un sistema con $\alpha = 1$ y $\gamma = 0.5$. a) con disipadores, b) con amortiguamiento equivalente

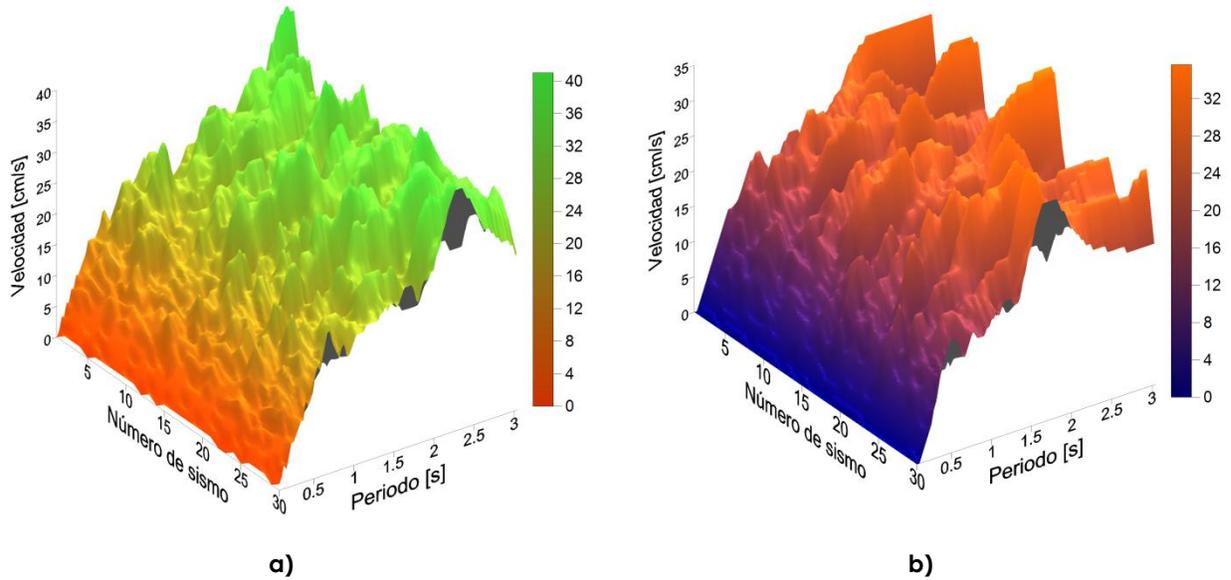


Figura 4.8 Espectros de velocidad de los 30 sismos analizados para un sistema con $\alpha = 1$ y $\gamma = 0.5$. a) con disipadores, b) con amortiguamiento equivalente

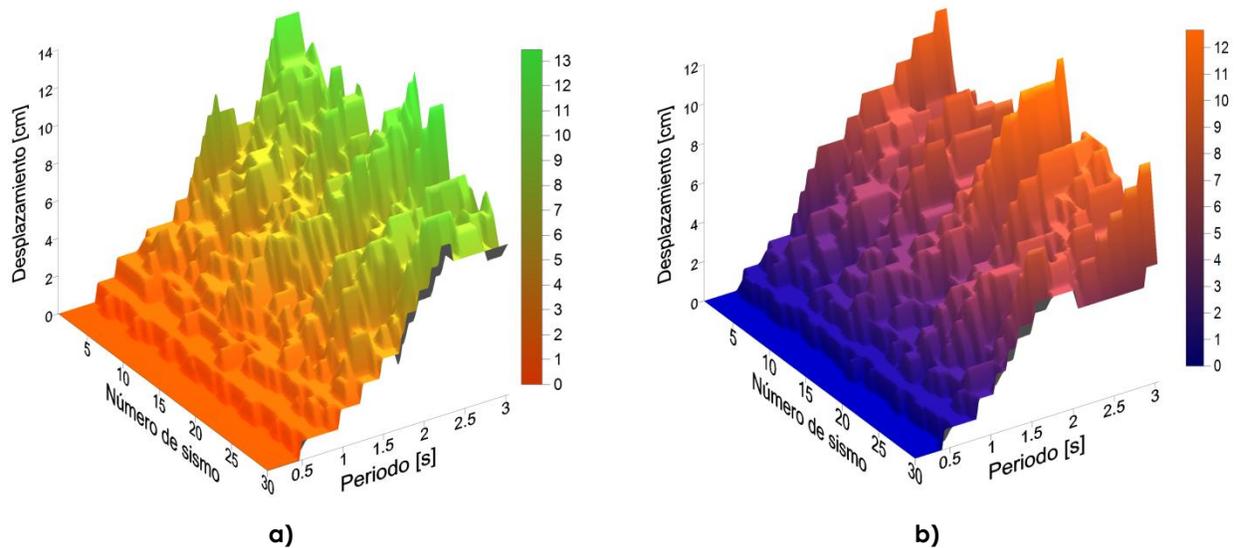


Figura 4.9 Espectros de desplazamiento de los 30 sismos analizados para un sistema con $\alpha = 1$ y $\gamma = 0.5$. a) con disipadores, b) con amortiguamiento equivalente

Una vez que se cuenta con los espectros de respuesta para los dos tipos de sistemas, es posible establecer la relación que existe entre ellos a través de cocientes espectrales: para un sismo particular, se divide su espectro de respuesta considerando el amortiguamiento equivalente, entre el espectro de respuesta considerando al sistema con disipadores hysteréticos. Una buena correlación entre los espectros de respuesta daría lugar a un cociente espectral cercano a la unidad. Los cocientes espectrales que se ubiquen por encima de este valor se encontrarán del lado de la seguridad mientras que los cocientes con valores menores que uno estarán menos seguros. A partir de los resultados se puede obtener la media y coeficiente de variación de los cocientes espectrales en función del periodo.

La media indica el promedio de las respuestas esperadas y gráficamente se puede observar qué tan alejadas están de la unidad. Por su parte, el coeficiente de variación servirá para comparar la dispersión entre la respuesta de los sistemas.

En las figuras 4.10 a 4.12 se muestran los cocientes espectrales correspondientes a los movimientos sísmicos utilizados en el análisis. La media de dichos cocientes se muestra con línea continua.

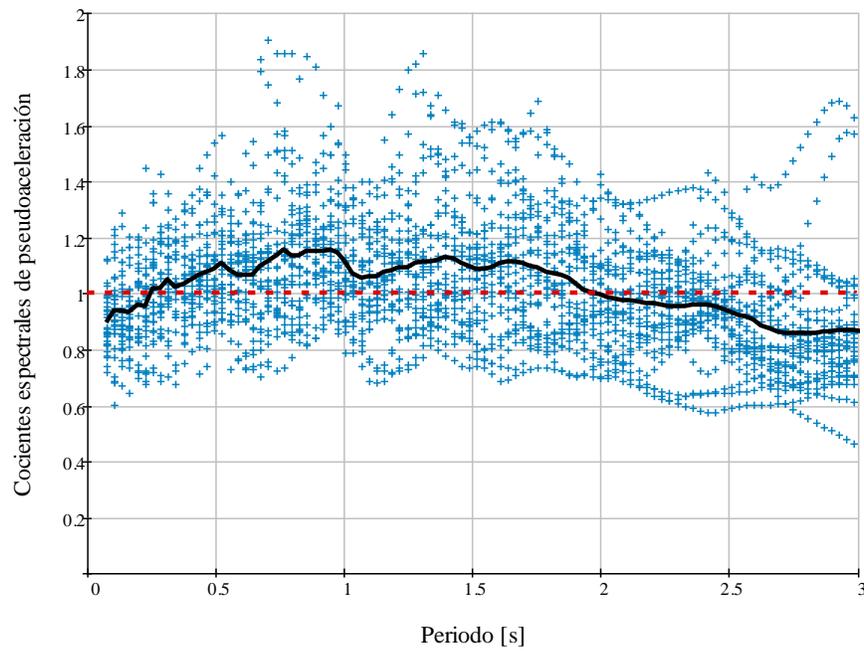


Figura 4.10 Cocientes espectrales de pseudoaceleración correspondientes a los 30 movimientos sísmicos simulados, para un sistema con $\alpha = 1$ y $\gamma = 0.5$

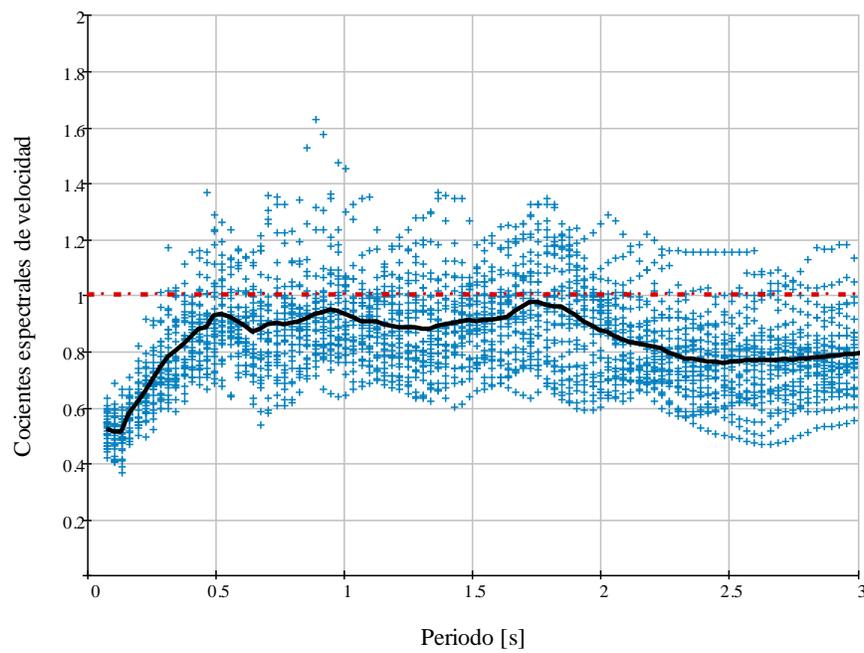


Figura 4.11 Cocientes espectrales de velocidad correspondientes a los 30 movimientos sísmicos simulados, para un sistema $\alpha = 1$ y $\gamma = 0.5$

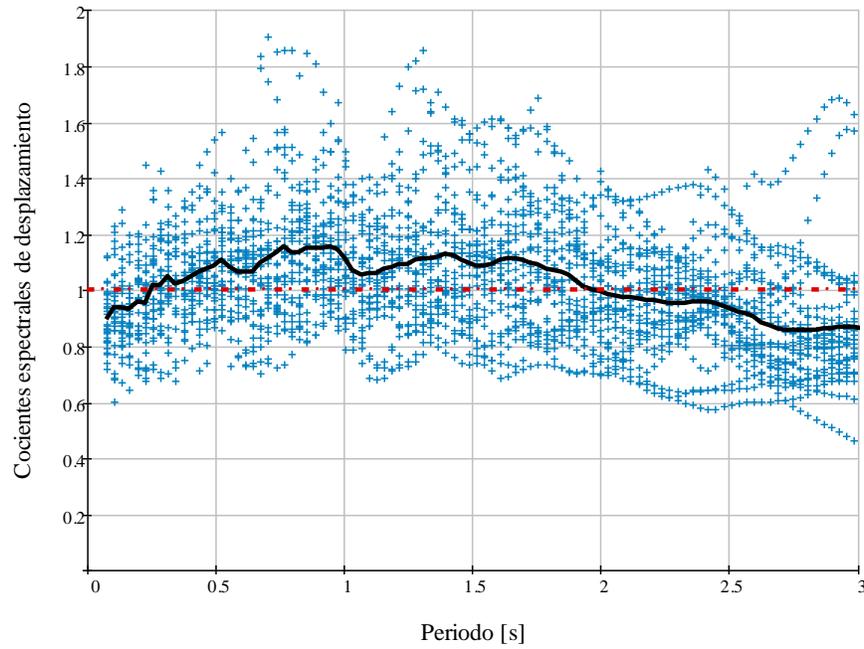


Figura 4.12 Cocientes espectrales de desplazamiento correspondientes a los 30 movimientos sísmicos simulados, para un sistema con $\alpha = 1$ y $\gamma = 0.5$

Se observa que a partir de un periodo de 2 s, la media de los cocientes espectrales tanto de la pseudoaceleración como del desplazamiento se encuentra por debajo de la unidad por lo que, para futuros estudios se sugiere aplicar un factor de seguridad que corrija este comportamiento. Debe recordarse que, de acuerdo a los ETFU antes presentados, las máximas pseudoaceleraciones se presentan en una zona de periodos comprendida entre 0.1 s y 1 s (ver figura 4.10), por lo que el hecho de que la media resulte con un valor menor que uno para periodos mayores a 2 s no representa un error considerable.

El procedimiento anterior se repitió para sistemas con diferentes parejas de valores de α y γ ubicados en cada tipo de terreno. A continuación se muestra la variación (en función del periodo) de la media de los cocientes espectrales de la pseudoaceleración, así como sus coeficientes de variación para las distintas parejas de valores de α y γ .

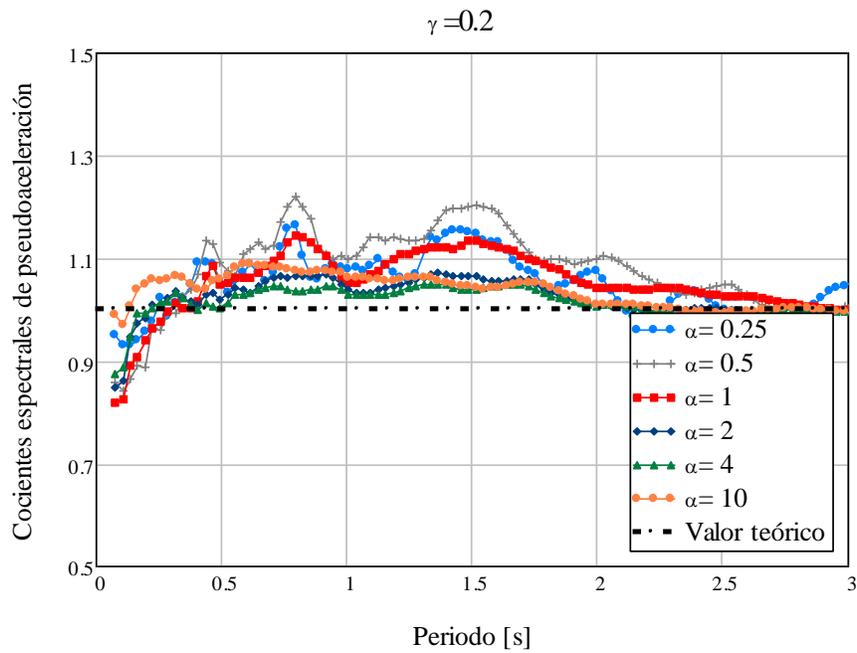


Figura 4.13 a) Media de los cocientes espectrales de la pseudoaceleración para los sistemas estudiados en terreno duro correspondientes a $\gamma = 0.2$ y diferentes valores de α

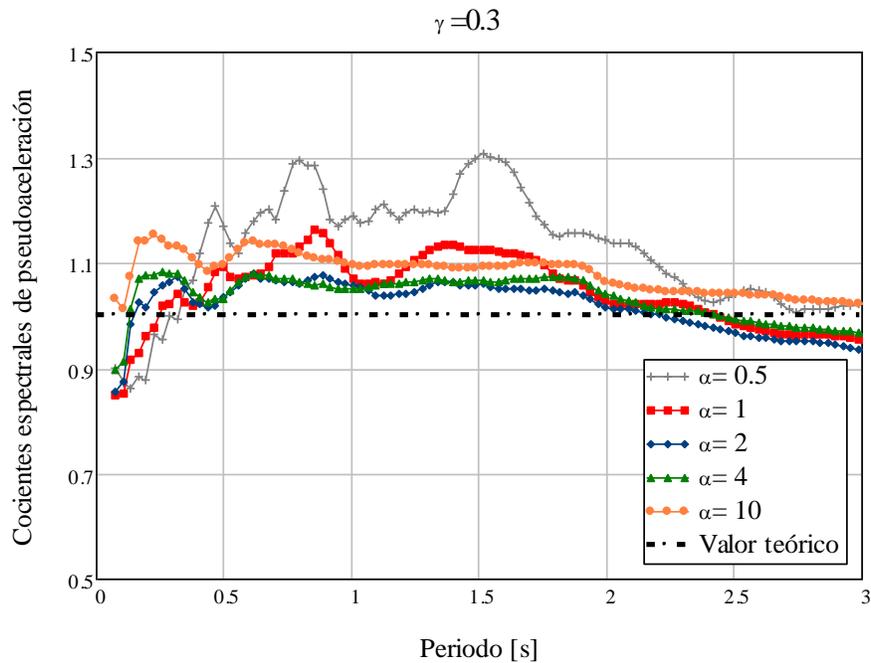


Figura 4.13 b) Media de los cocientes espectrales de la pseudoaceleración para los sistemas estudiados en terreno duro correspondientes a $\gamma = 0.3$ y diferentes valores de α

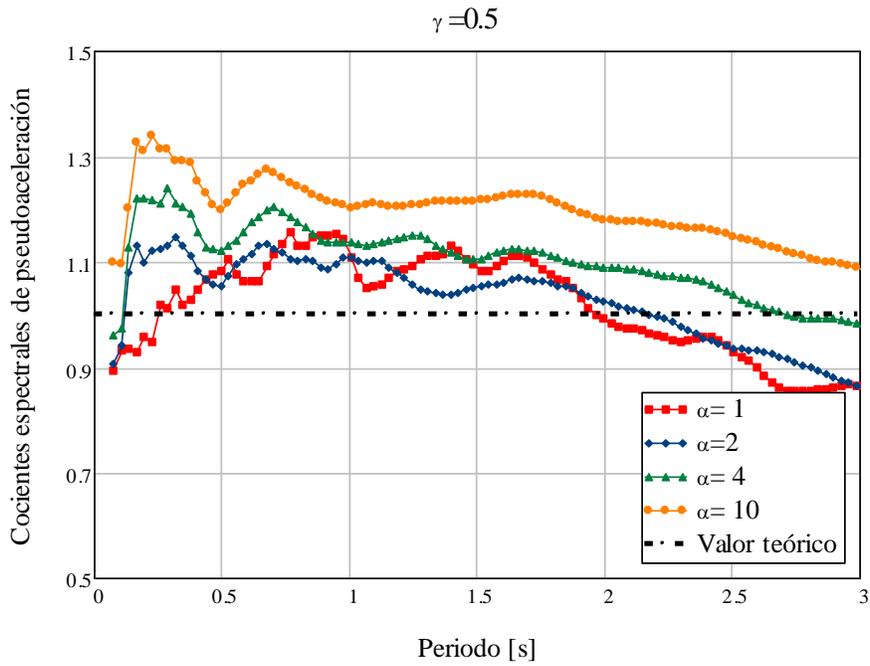


Figura 4.13 c) Media de los cocientes espectrales de la pseudoaceleración para los sistemas estudiados en terreno duro correspondientes a $\gamma=0.5$ y diferentes valores de α

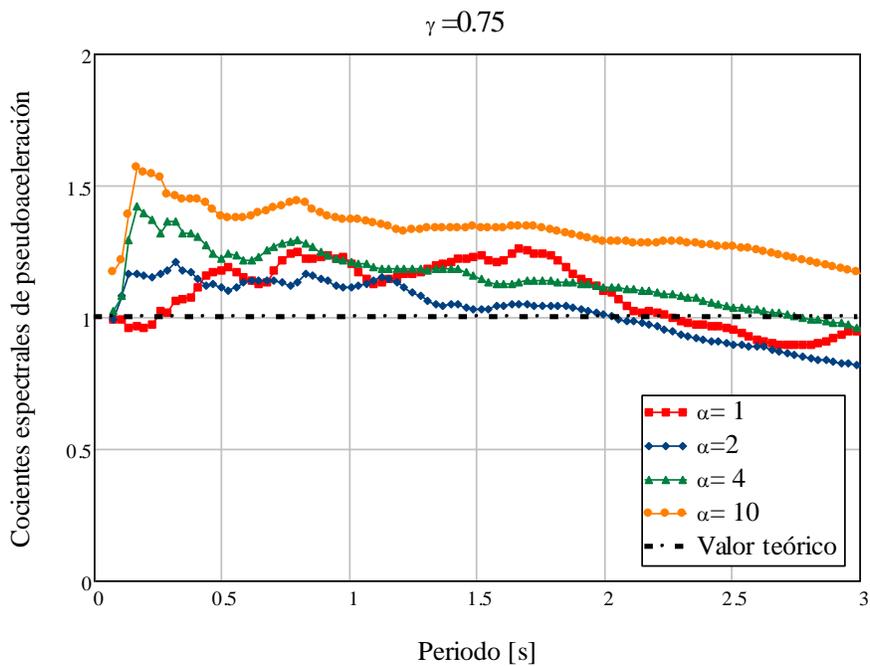


Figura 4.13 d) Media de los cocientes espectrales de la pseudoaceleración para los sistemas estudiados en terreno duro correspondientes a $\gamma=0.75$ y diferentes valores de α

En la figura 4.13 se observa que cuando el valor de γ es pequeño ($\gamma = 0.2$, $\gamma = 0.3$) el promedio de los cocientes espectrales se mantiene alrededor de 1.1 ó 1.2 independientemente del valor de α . Por otro lado, a medida que el parámetro γ crece, las medias de los cocientes tienden a separarse llegando a valores poco más de 1.5; sin embargo, existe una tendencia en la media de los cocientes espectrales a disminuir a partir de un periodo de 2 s y en algunos casos se tienen cocientes menores que uno para valores de α pequeños.

La razón de esto se debe a que, debido a la presencia de los disipadores, no solo existe amortiguamiento adicional en la estructura, sino que además se obtiene un incremento en la rigidez lo cual modifica el periodo estructural del sistema combinado respecto al periodo original del sistema base. Sin embargo, parte de esta nueva rigidez se perderá a medida que el disipador trabaje en el intervalo inelástico; en contraste, cuando se hace el análisis sobre sistemas de un grado de libertad con comportamiento elástico, se considera a la estructura sin modificar su periodo y, aplicando la ecuación 3.1 para terreno duro, se obtiene su amortiguamiento equivalente correspondiente. A partir de estos dos parámetros, periodo del sistema base y amortiguamiento equivalente es que se realizan los análisis para la calibración de las expresiones propuestas.

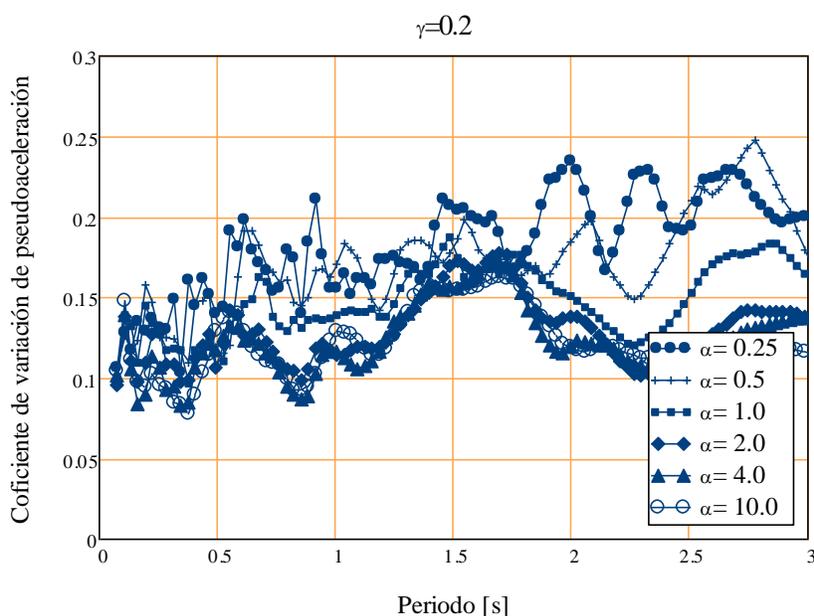


Figura 4.16 a) Coeficiente de variación de los cocientes espectrales de la pseudoaceleración para los sistemas estudiados en terreno duro, correspondientes a $\gamma = 0.2$ y diferentes valores de α

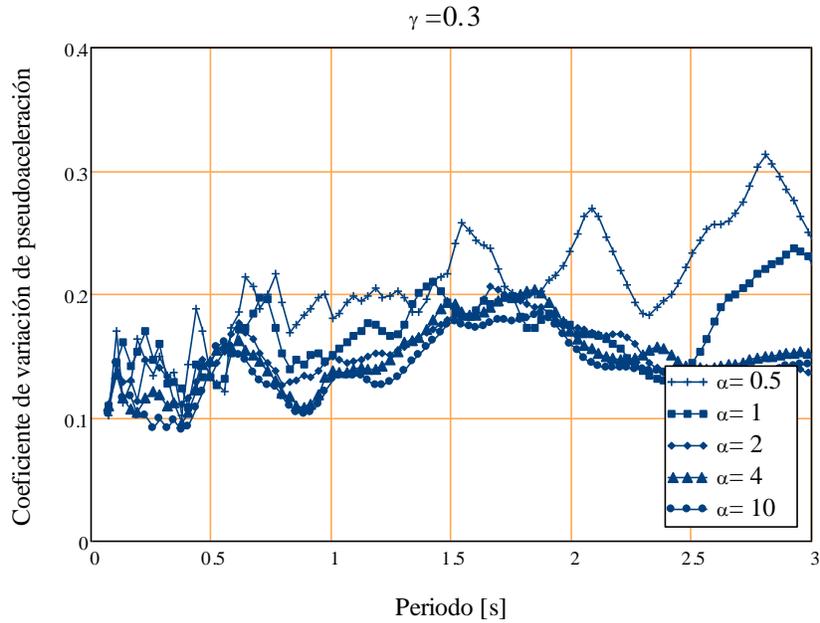


Figura 4.16 b) Coeficiente de variación de los cocientes espectrales de la pseudoaceleración para los sistemas estudiados en terreno duro, correspondientes a $\gamma = 0.3$ y diferentes valores de α

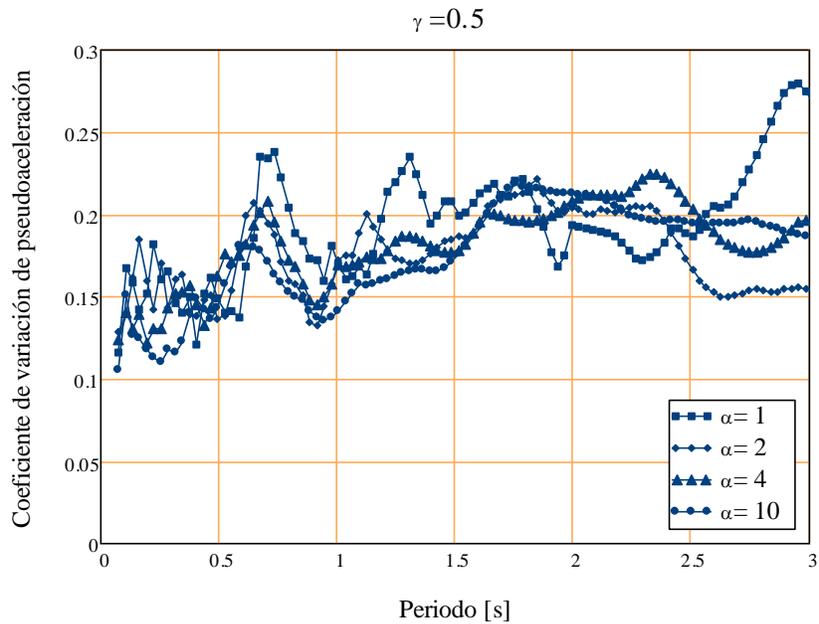


Figura 4.16 c) Coeficiente de variación de los cocientes espectrales de la pseudoaceleración para los sistemas estudiados en terreno duro, correspondientes a $\gamma = 0.5$ y diferentes valores de α

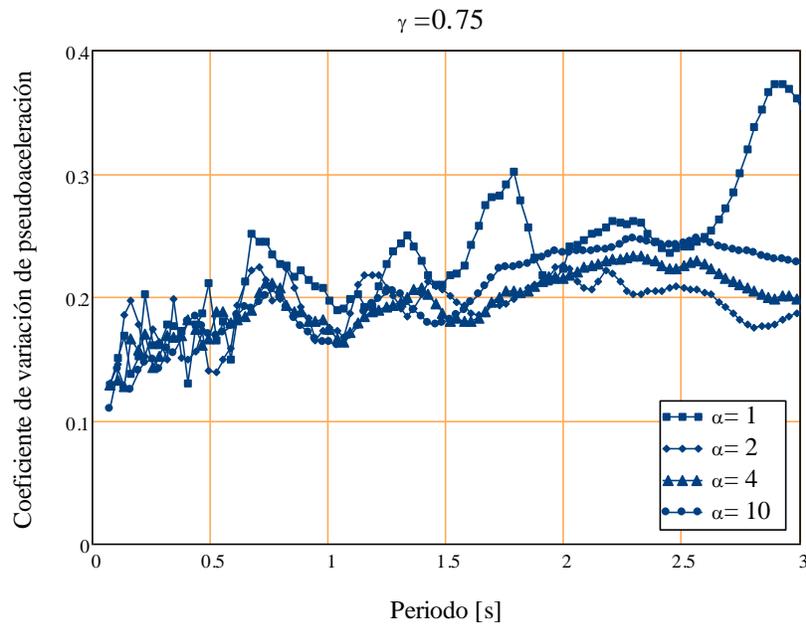


Figura 4.16 d) Coeficiente de variación de los cocientes espectrales de la pseudoaceleración para los sistemas estudiados en terreno duro, correspondientes a $\gamma = 0.75$ y diferentes valores de α

El coeficiente de variación es una medida de la dispersión de los datos respecto a la media y se expresa en porcentaje. En general, si el coeficiente de variación de una población es menor al 50% indica que la media es un parámetro confiable para representar a dicha población, en contraparte, si el coeficiente de variación es mayor o igual a 50%, la media no puede tomarse como un parámetro confiable representativo de la población.

En el caso de $\gamma = 0.2$ y $\gamma = 0.3$ los coeficientes de variación se encuentran en un intervalo entre el 5 y 25%, mientras que para $\gamma = 0.5$ y $\gamma = 0.75$ se tienen valores entre 10 y 30 % aproximadamente. Lo anterior indica que la media de los cocientes espectrales presentadas en la gráfica 4.13 es aceptable para deducir el comportamiento general de los sistemas analizados.

IV.2 Calibración de sistemas en terreno intermedio

Al igual que se hizo en terreno duro, para terreno intermedio se calibraron los sistemas usando 30 sismos cuya semilla de simulación fue el registro de Viveros del sismo ocurrido el 19 de septiembre de 1985. En las figura 4.17 se muestran algunos de los acelerogramas simulados utilizados en la calibración, y en la figura 4.18 se presentan espectros de respuesta convencionales. Estos se comparan con el EPU correspondiente a un sistema sin disipadores y $\nu = 0.008$.

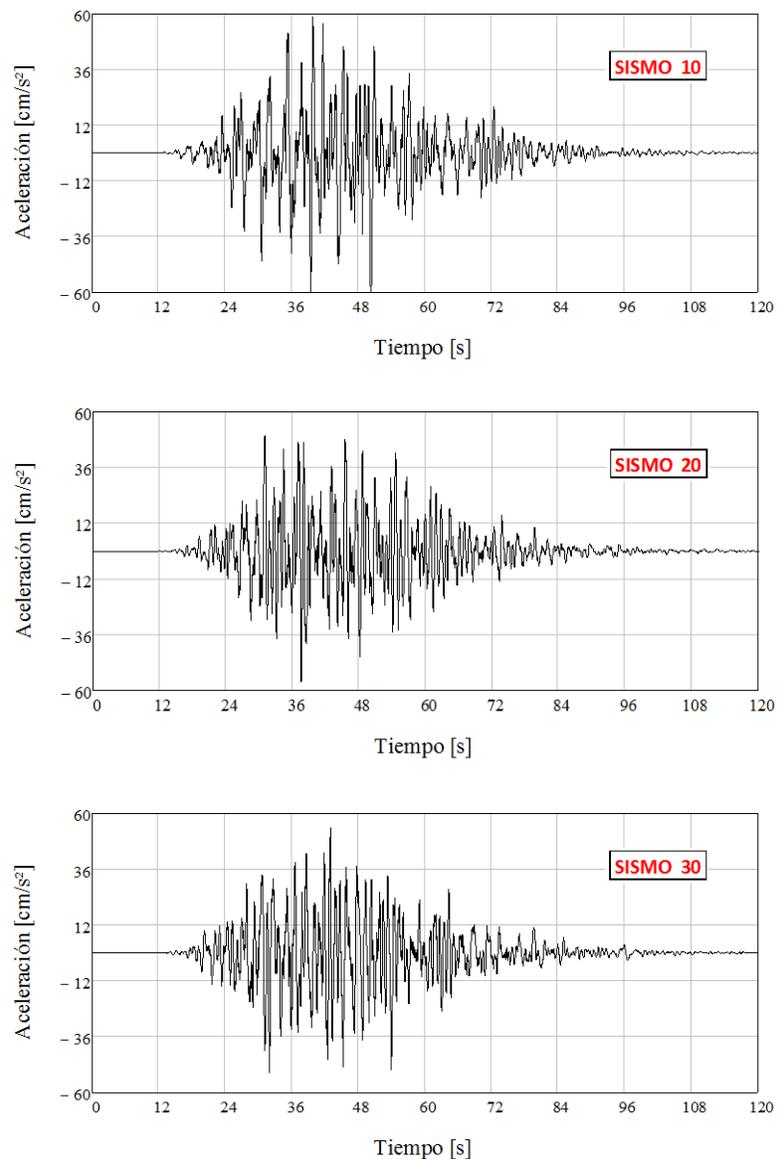


Figura 4.17 Algunos acelerogramas simulados utilizados en la calibración del terreno intermedio

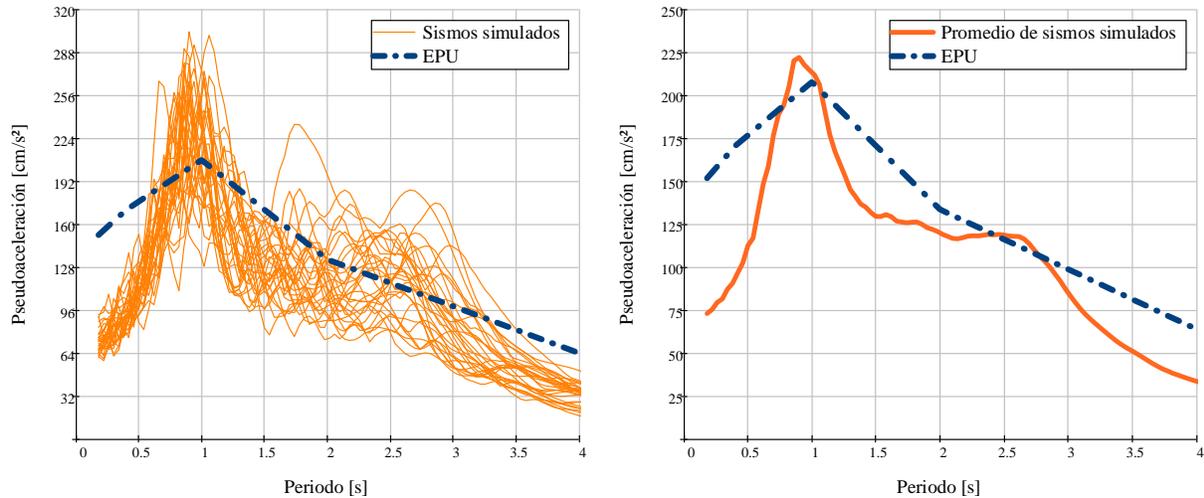


Figura 4.18 Comparación entre los espectros de respuesta y promedio de los 30 sismos simulados para la calibración y el EPU ($\nu = 0.008$) para un sistema con 5% de amortiguamiento viscoso

Debe notarse que en la zona de periodos bajos se presentan ordenadas espectrales muy bajas correspondientes a los movimientos simulados con respecto a las ordenadas del EPU ($\xi = 5\%$) hasta un periodo de 0.75 s aproximadamente, por lo que es de esperarse que en esta zona los cocientes espectrales tengan valores altos.

En las figuras 4.19 a 4.21 se muestran los espectros de respuesta correspondientes a los acelerogramas de la figura 4.17. En la figura 4.22 a 4.24 se presenta una comparación entre los espectros de respuesta de los 30 sismos analizados considerando el sistema con disipadores y el sistema con amortiguamiento equivalente utilizando la ecuación 3.3.

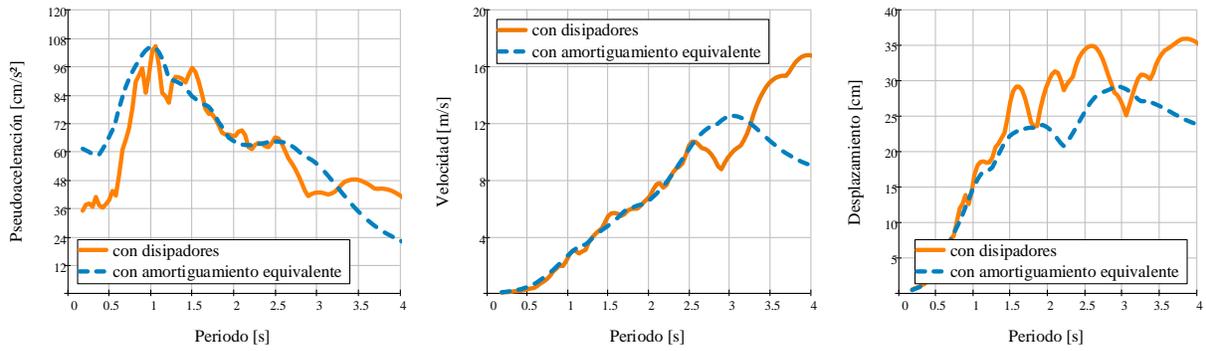


Figura 4.19 Espectros de respuesta del sismo 10 para el sistema en estudio, $\alpha = 1$ y $\gamma = 0.5$

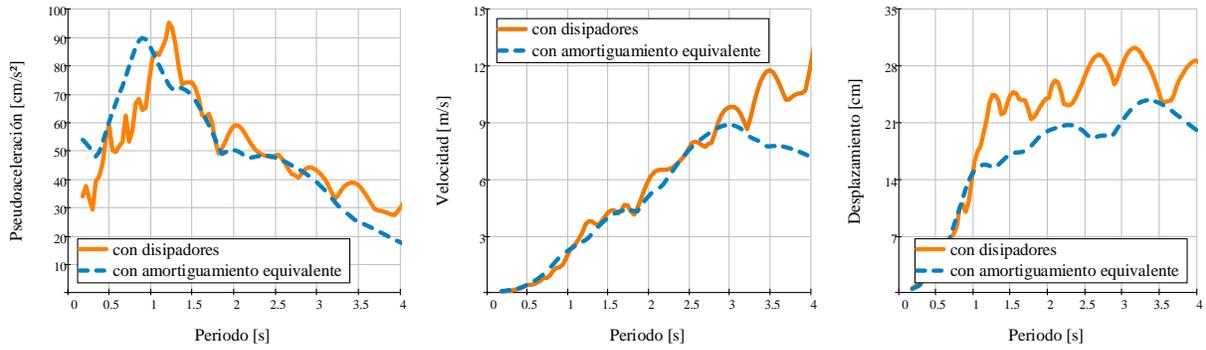


Figura 4.20 Espectros de respuesta del sismo 20 para el sistema en estudio, $\alpha = 1$ y $\gamma = 0.5$

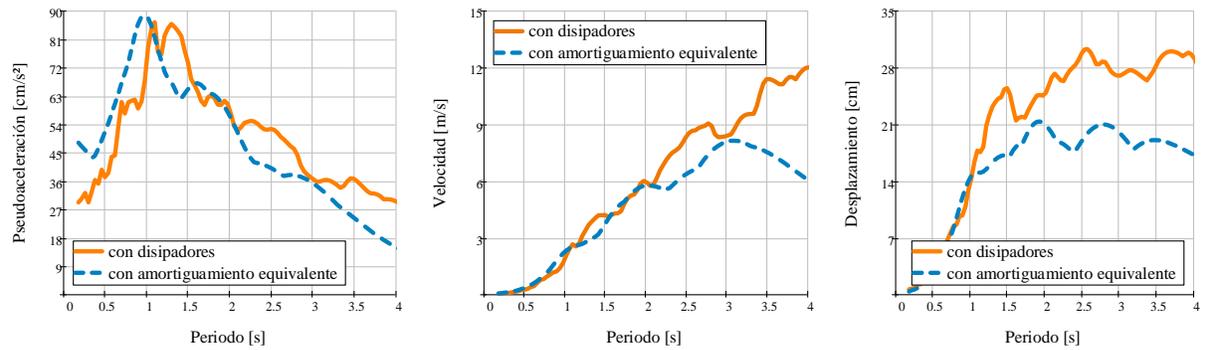


Figura 4.21 Espectros de respuesta del sismo 30 para el sistema en estudio, $\alpha = 1$ y $\gamma = 0.5$

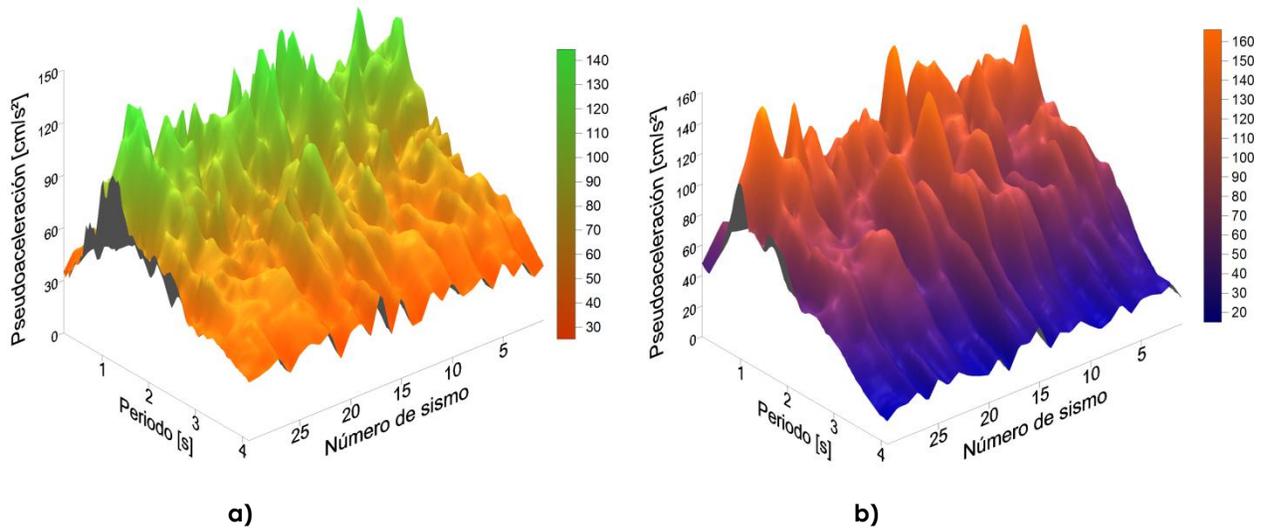


Figura 4.22 Espectros de pseudoaceleración de los 30 sismos simulados para un sistema con $\alpha = 1$ y $\gamma = 0.5$. a) con disipadores, b) con amortiguamiento equivalente

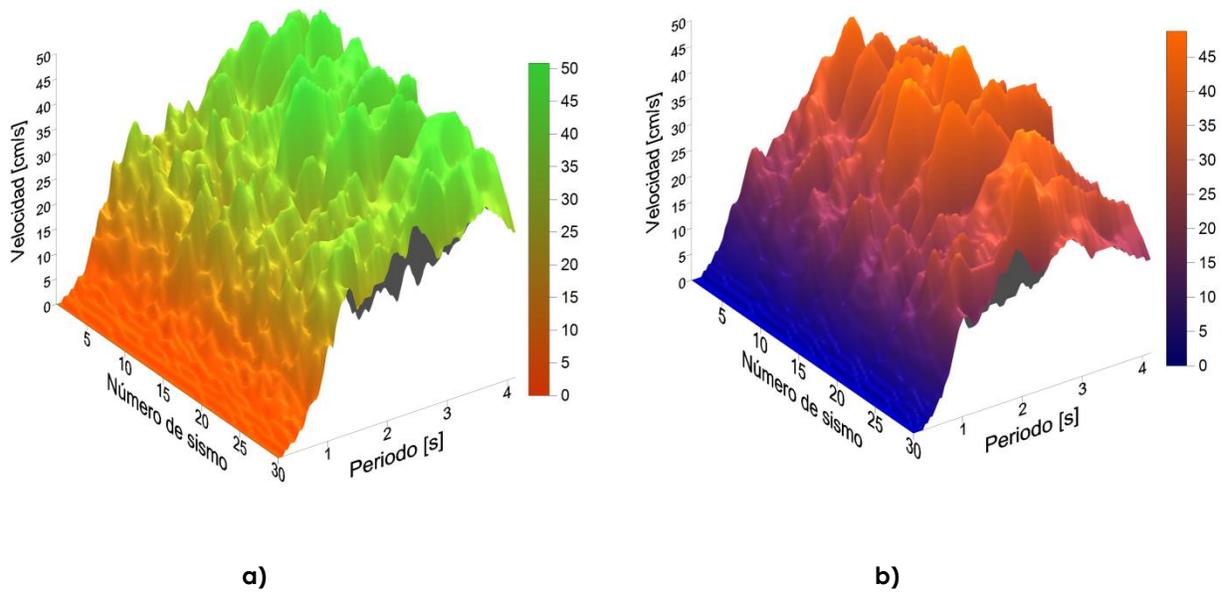


Figura 4.23 Espectros de velocidad de los 30 sismos simulados para un sistema con $\alpha = 1$ y $\gamma = 0.5$. a) con disipadores, b) con amortiguamiento equivalente

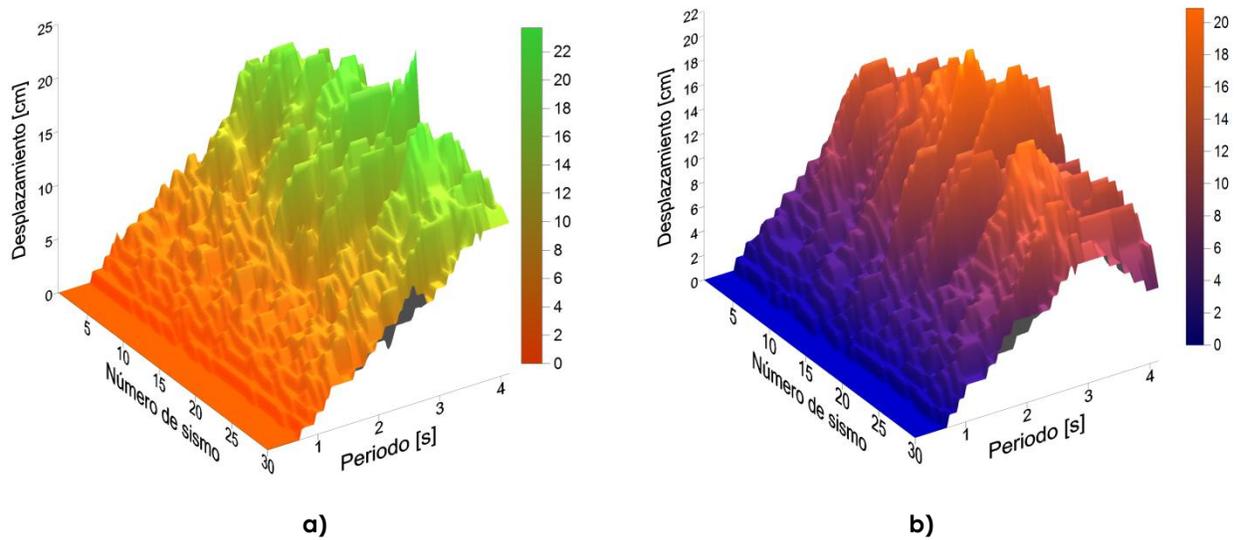


Figura 4.24 Espectros de desplazamiento de los 30 sismos simulados para un sistema con $\alpha = 1$ y $\gamma = 0.5$. a) con disipadores, b) con amortiguamiento equivalente

En las siguientes figuras se muestran los cocientes espectrales correspondientes a los 30 movimientos sísmicos simulados. La media de dichos cocientes se muestra con línea continua.

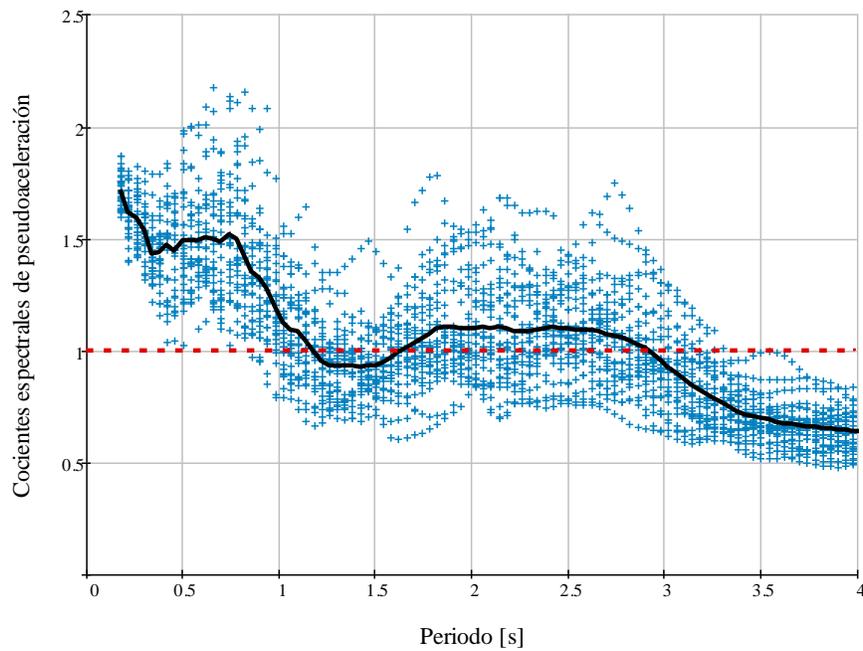


Figura 4.25 Cocientes espectrales de seudo aceleración de los 30 sismos simulados para un sistema con $\alpha = 1$ y $\gamma = 0.5$

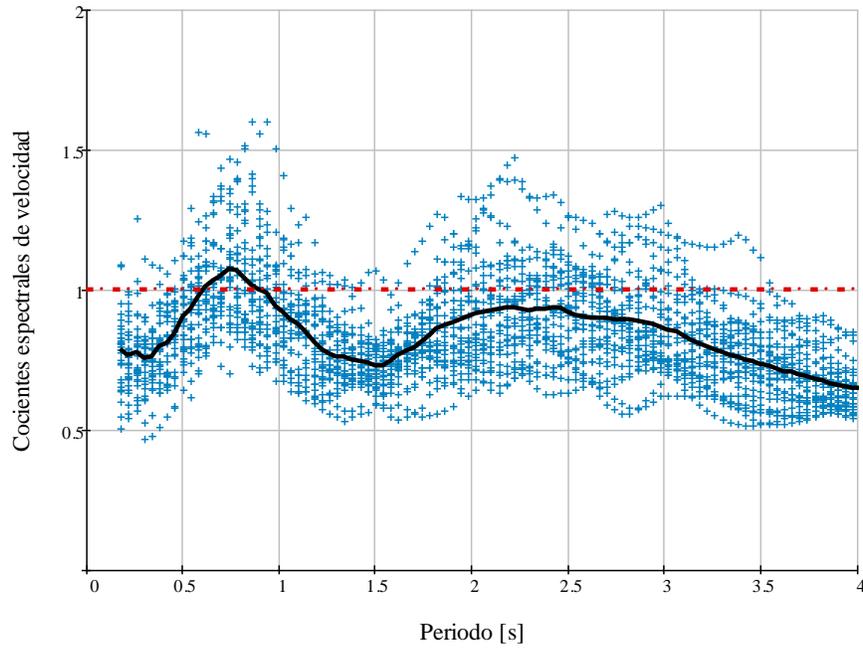


Figura 4.26 Cocientes espectrales de velocidad de los 30 sismos simulados para un sistema con $\alpha = 1$ y $\gamma = 0.5$

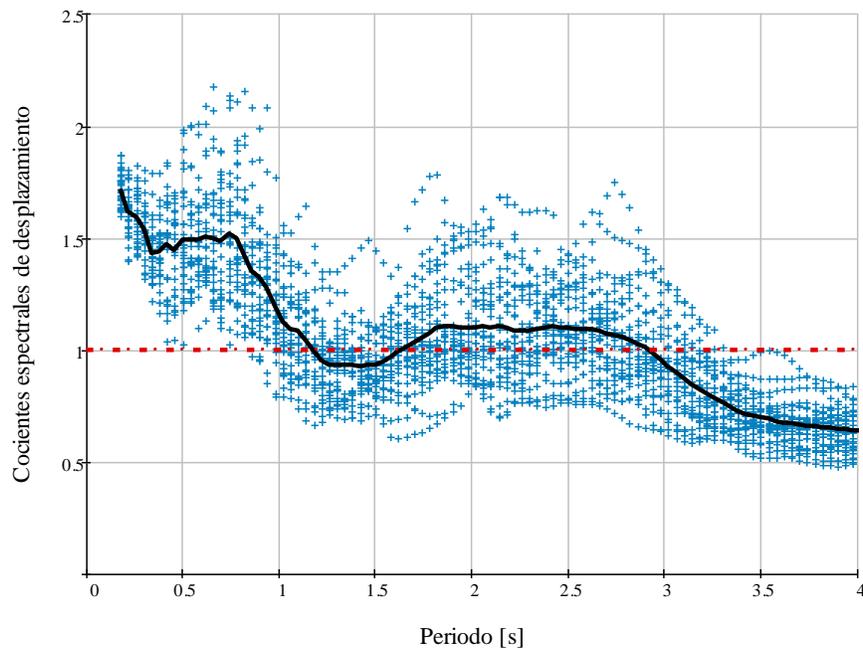


Figura 4.27 Cocientes espectrales de desplazamiento de los 30 sismos simulados para un sistema con $\alpha = 1$ y $\gamma = 0.5$

En las figuras 4.25 a 4.27 se observan cocientes espectrales de pseudoaceleración demasiado altos (para periodos menores que 0.75 s aproximadamente). Esto se debe a la diferencia de intensidades entre los sismos simulados y los sismos para los cuales se obtuvieron las reglas para encontrar el amortiguamiento equivalente (ver figura 4.18). Nuevamente, el procedimiento se repitió para cada pareja de valores de α y γ .

A continuación se muestra la variación (en función del periodo) de la media de los cocientes espectrales de la pseudoaceleración así como sus coeficientes de variación para cada pareja de valores de α y γ . En la figura 4.29 se compara el promedio de los sismos simulados, el EPU del 5% y la media de los cocientes espectrales correspondientes a terreno intermedio.

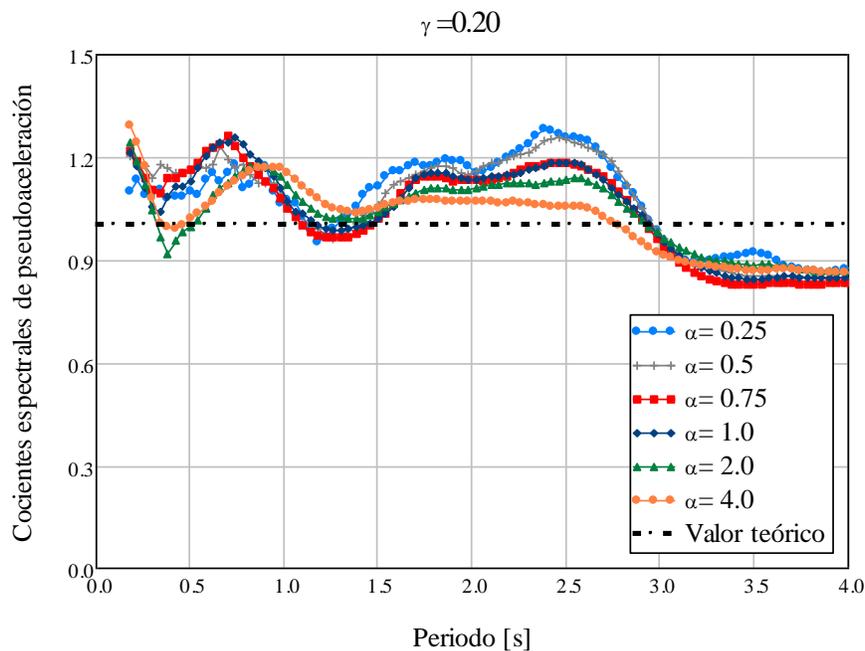


Figura 4.28 a) Media de los cocientes espectrales de la pseudoaceleración para los sistemas estudiados en terreno intermedio correspondientes a $\gamma=0.2$ y diferentes valores de α

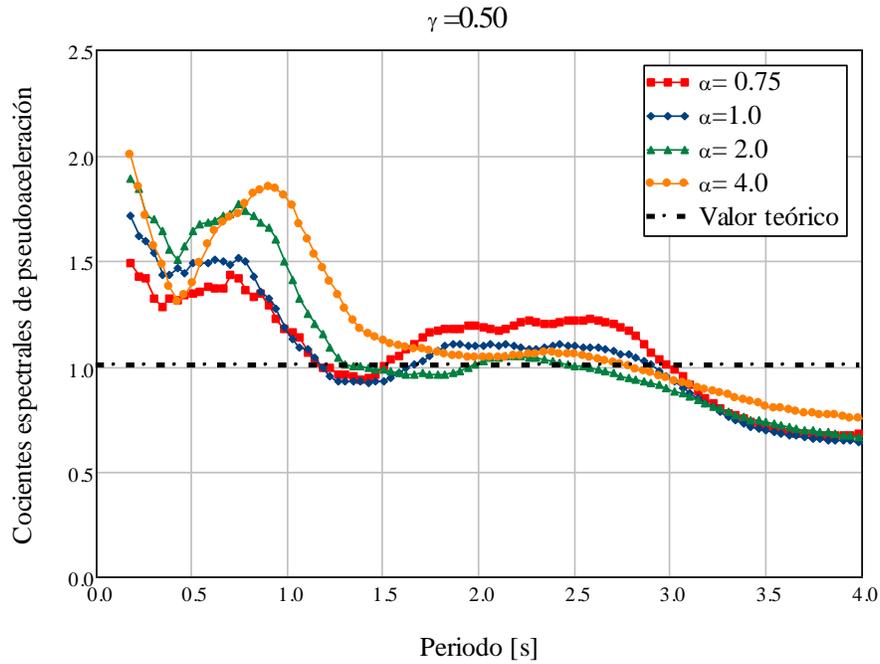


Figura 4.28 b) Media de los cocientes espectrales de la pseudoaceleración para los sistemas estudiados en terreno intermedio correspondientes a $\gamma = 0.5$ y diferentes valores de α

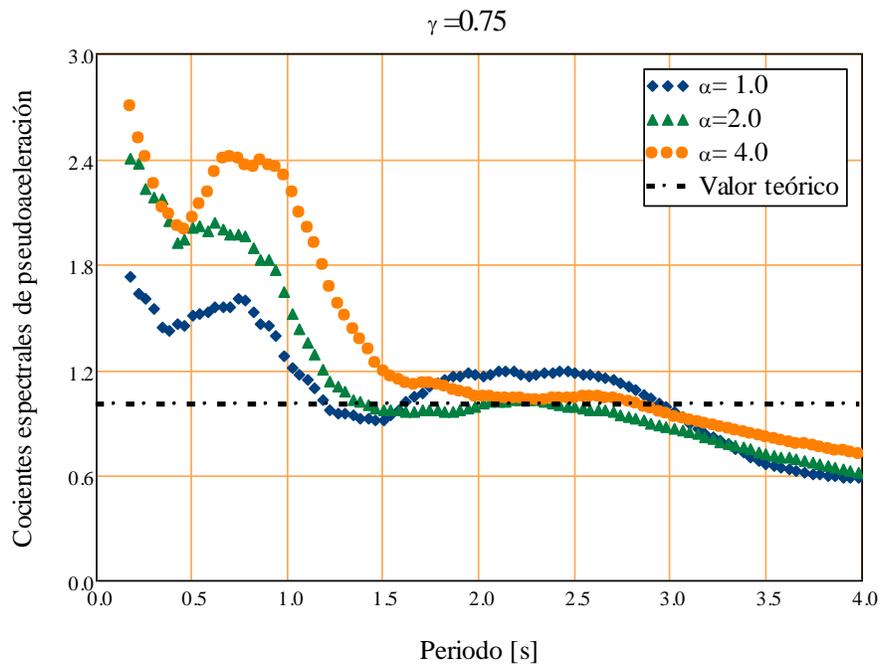


Figura 4.28 c) Media de los cocientes espectrales de la pseudoaceleración para los sistemas estudiados en terreno intermedio correspondientes a $\gamma = 0.75$ y diferentes valores de α

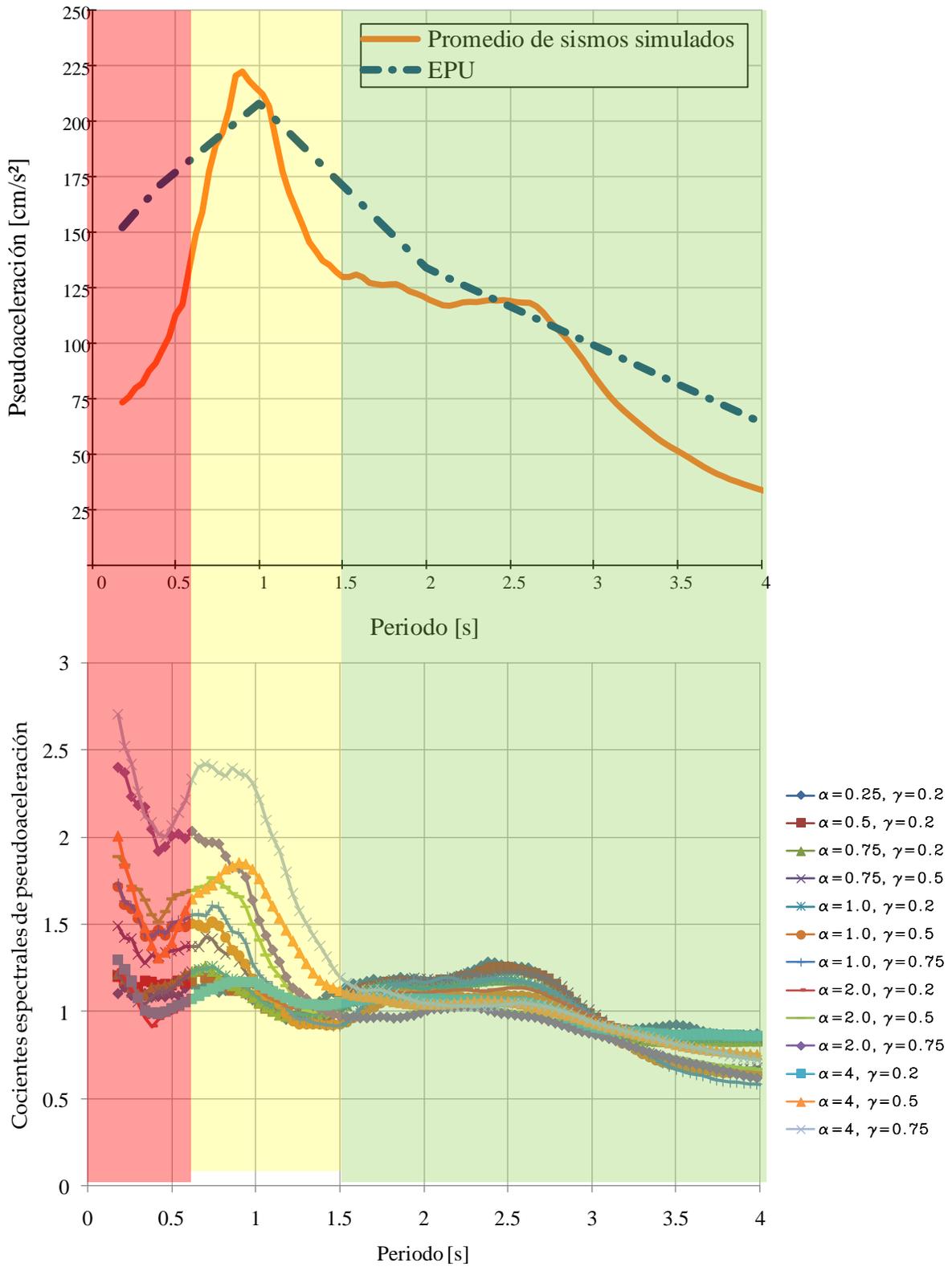


Figura 4.29 Comparación entre el promedio de los 30 sismos, el EPU ($\nu = 0.008$) para un sistema con 5% de amortiguamiento viscoso y los cocientes espectrales de pseudoaceleración

En la figura 4.29 se distinguen tres zonas: una de 0 a 0.6 s en la cual las ordenadas espectrales de los sismos simulados son mucho menores que las ordenadas espectrales del EPU ($\nu = 0.008$, $\xi = 5\%$). Se observa que en esta zona los cocientes espectrales (gráfica inferior) tienen valores mucho mayores que 1 sobre todo cuando crece el valor de γ .

Cabe aclarar que debido a la presencia de los disipadores, no solo se adiciona amortiguamiento a la estructura, además se obtiene un incremento en la rigidez, lo cual modifica el periodo estructural; sin embargo, las ecuaciones propuestas en este estudio, para la obtención del amortiguamiento equivalente parten del hecho de que el disipador trabaja en el intervalo. Lo anterior implica que para que las ecuaciones propuestas sean aplicables el sismo actuante debe tener una intensidad tal que se desarrolle la fluencia del disipador. En este estudio se analizan sismos con intensidades correspondientes a un periodo de retorno de 125 años.

La segunda zona en la figura 4.29 comprende de 0.6 a 1.5 s. En esta zona se puede ver que para valores de γ menores que 0.5 la mayoría de los cocientes espectrales se agrupan en un valor alrededor de 1.2.

Por último, en la zona comprendida de 1.5 a 4 s (ver figura 4.29) se puede ver que el promedio de los cocientes espectrales se agrupan de manera uniforme y quedan comprendidos en un intervalo entre 1 y 1.3, así mismo se puede ver que el promedio de los sismos simulados y el EPU presentan ordenadas espectrales dentro del mismo orden de magnitud y por lo tanto las reglas para obtener el amortiguamiento equivalente se comportan de manera adecuada. Se observa también que los cocientes espectrales tienden a bajar a partir de los 3 s tomando valores por debajo de la unidad lo cual sugiere una revisión de la ecuación 3.2 para estos periodos.

En la figura 4.30 se muestran los coeficientes de variación de los cocientes espectrales para todos los casos correspondientes a terreno intermedio. Se observa que, al igual que en terreno duro, los coeficientes de variación de los diferentes sistemas estudiados se encuentran por debajo de 30%. En el caso de $\gamma = 0.2$ y $\gamma = 0.5$ los coeficientes de variación se encuentran en un intervalo de 5 a 16%, mientras que para $\gamma = 0.75$ se tienen valores entre 12 y 28%, aproximadamente.

En general se pueden aceptar a las medias de los cocientes espectrales que se muestra en la figura 4.28 como un buen parámetro para inferir el comportamiento de los sistemas analizados en terreno intermedio.

Al igual que con la media de los cocientes espectrales, los mayores coeficientes de variación se presentan en sistemas con los valores de $\alpha = 4$ y $\gamma = 0.75$. En este caso en particular, se puede ver que el coeficiente de variación se dispara de manera considerable en relación a otras parejas de α y γ , sobre todo para periodos de hasta 0.6 s aproximadamente (ver figura 4.30 c).

Esto indica una gran variación en los cocientes espectrales respecto a la media debido primeramente a que la simplificación de estos sistemas mediante una estructura equivalente difiere más de la estructura real, y en segundo lugar, a que para estos periodos las ordenadas espectrales de los espectros simulados son de una intensidad mucho menor para la cual fue realizado este estudio.

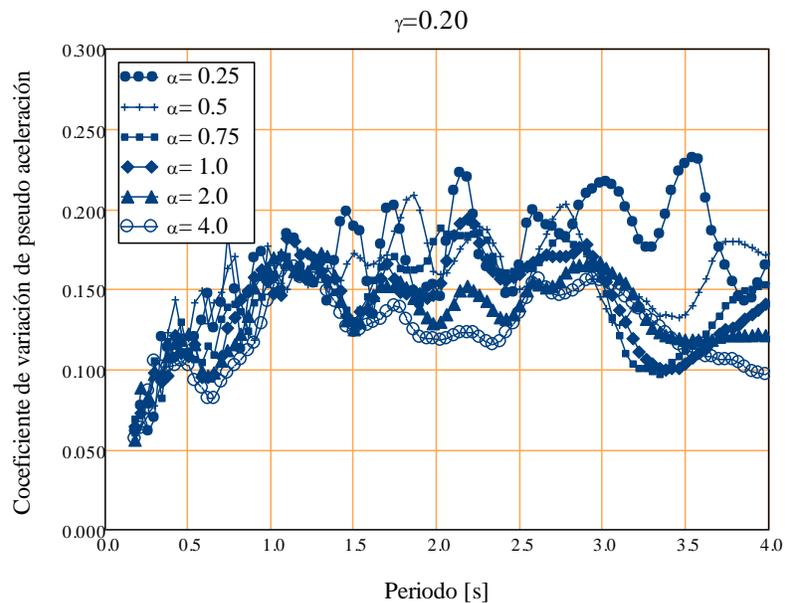


Figura 4.30 a) Coeficiente de variación de los cocientes espectrales de la pseudoaceleración para los sistemas estudiados en terreno duro, correspondientes a $\gamma = 0.2$ y diferentes valores de α

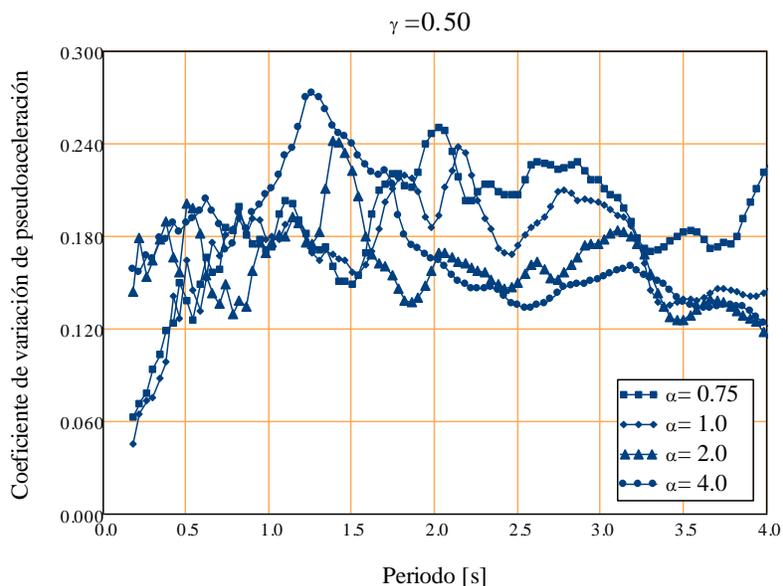


Figura 4.30 b) Coeficiente de variación de los cocientes espectrales de la pseudoaceleración para los sistemas estudiados en terreno duro, correspondientes a $\gamma = 0.5$ y diferentes valores de α

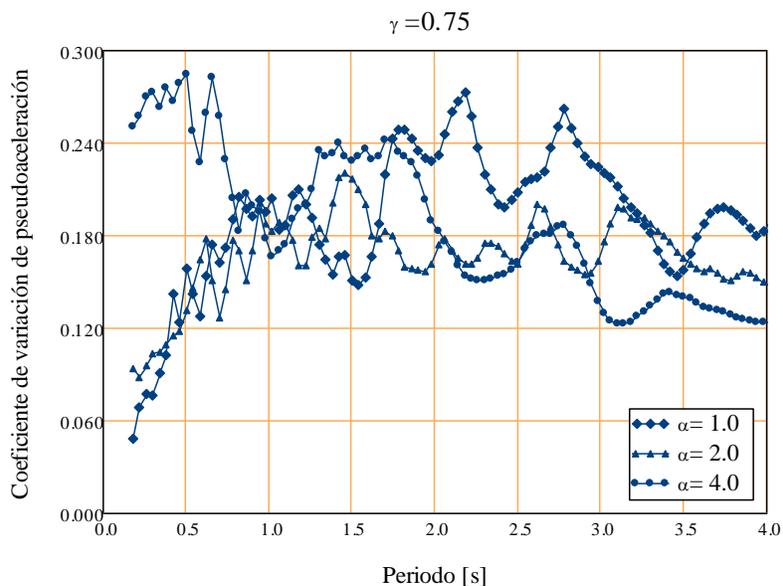


Figura 4.30 c) Coeficiente de variación de los cocientes espectrales de la pseudoaceleración para los sistemas estudiados en terreno duro, correspondientes a $\gamma = 0.75$ y diferentes valores de α

Se puede concluir que la metodología aplicada en este estudio es válida cuando las ordenadas espectrales utilizadas en el análisis son del orden de las ordenadas con las cuales se ajustó el amortiguamiento equivalente.

V.- Conclusiones

Se propuso una metodología para determinar el amortiguamiento equivalente para estructuras con disipadores de energía de tipo histerético a partir de espectros de Tasa de Falla Uniforme correspondientes a una cierta tasa anual de excedencia.

Se formuló una ecuación sencilla que permite obtener el amortiguamiento equivalente en función del periodo de la estructura, de las propiedades del disipador y del tipo de terreno en el cual está desplantada. En este estudio se eligieron dos sitios particulares: Filo de Caballo en el Estado de Guerrero y Viveros en la Ciudad de México.

Se calibró la ecuación propuesta comparando espectros de respuesta para sismos con un cierto periodo de recurrencia considerando sistemas estructura-disipador y sistemas con amortiguamiento equivalente al aplicar la ecuación 3.1 para terreno duro y 3.2 para terreno intermedio. Dicha comparación se realizó a través de cocientes espectrales y de desviaciones estándar en función del periodo de la estructura base.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede concluir que la ecuación propuesta para obtener el amortiguamiento equivalente, tanto en terreno duro como en terreno intermedio, presenta una buena aproximación entre los espectros de sistemas con amortiguamiento equivalente y los sistemas estructura-disipador. En general, las ordenas espectrales calculadas con amortiguamiento equivalente se encuentran por encima del valor esperado, lo que representa un factor de seguridad adecuado cuando se aplica la ecuación 3.1 ó 3.2. y sólo en algunos caso y para periodos mayores a 2 s se tienen cocientes por debajo de la unidad, lo cual implica hacer una ajuste a las expresiones propuestas mediante factores de corrección.

Se encontró también que el error entre el valor real de los cocientes espectrales y el valor teórico esperado se hace cada vez mayor a medida que los valores de α y γ crecen; sin embargo, tienden a estabilizarse a partir de un cierto valor del periodo estructural dependiendo del tipo de terreno.

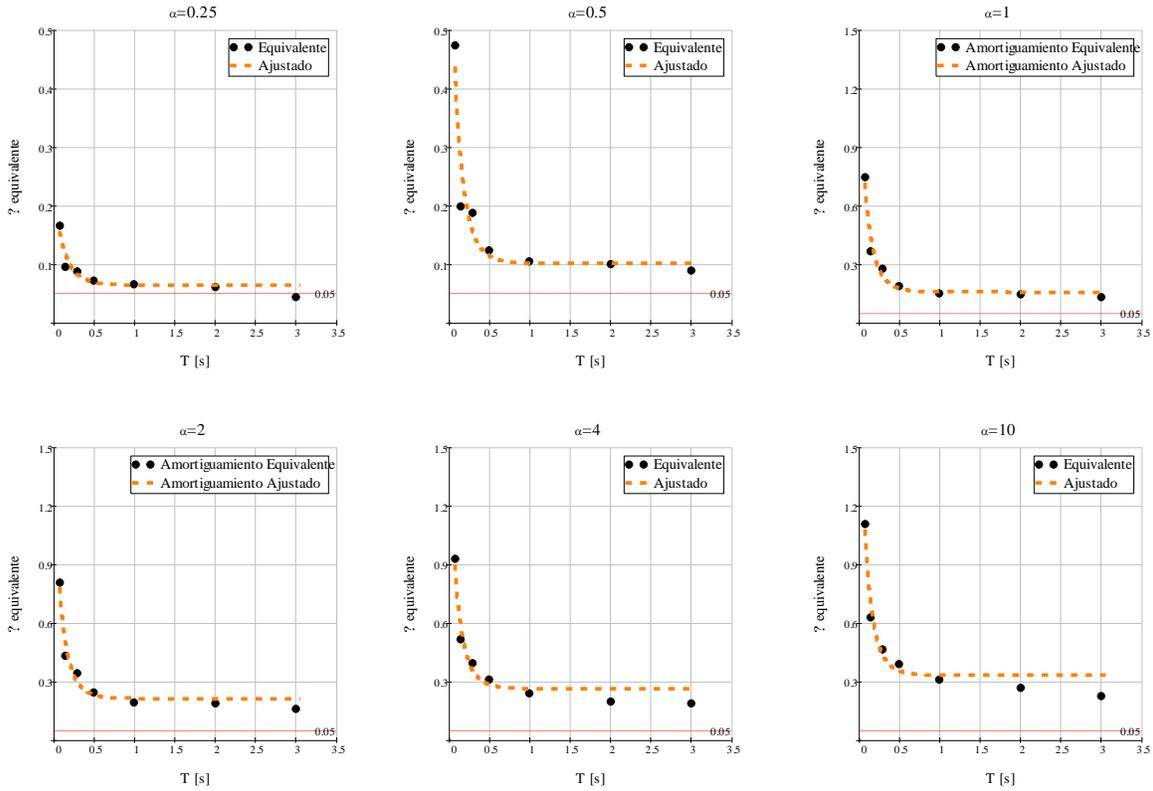
La metodología aplicada en este estudio es válida cuando las ordenadas espectrales utilizadas en el análisis son del orden de las ordenadas con las cuales se ajustó el amortiguamiento equivalente. Es decir, para que las ecuaciones aquí propuestas sean aplicables, el sismo actuante debe tener una intensidad correspondiente a un periodo de retorno de alrededor de 125 años.

Los estudios aquí realizados corresponden a sistemas básicos de un grado de libertad que presentan comportamiento elástico, sometidos a sismos con un periodo de retorno de 125 años, sin embargo es posible extrapolar esta metodología para estudiar sistemas base que incursionen en el intervalo inelástico de tal forma que se tengan ductilidades mayores que 1.

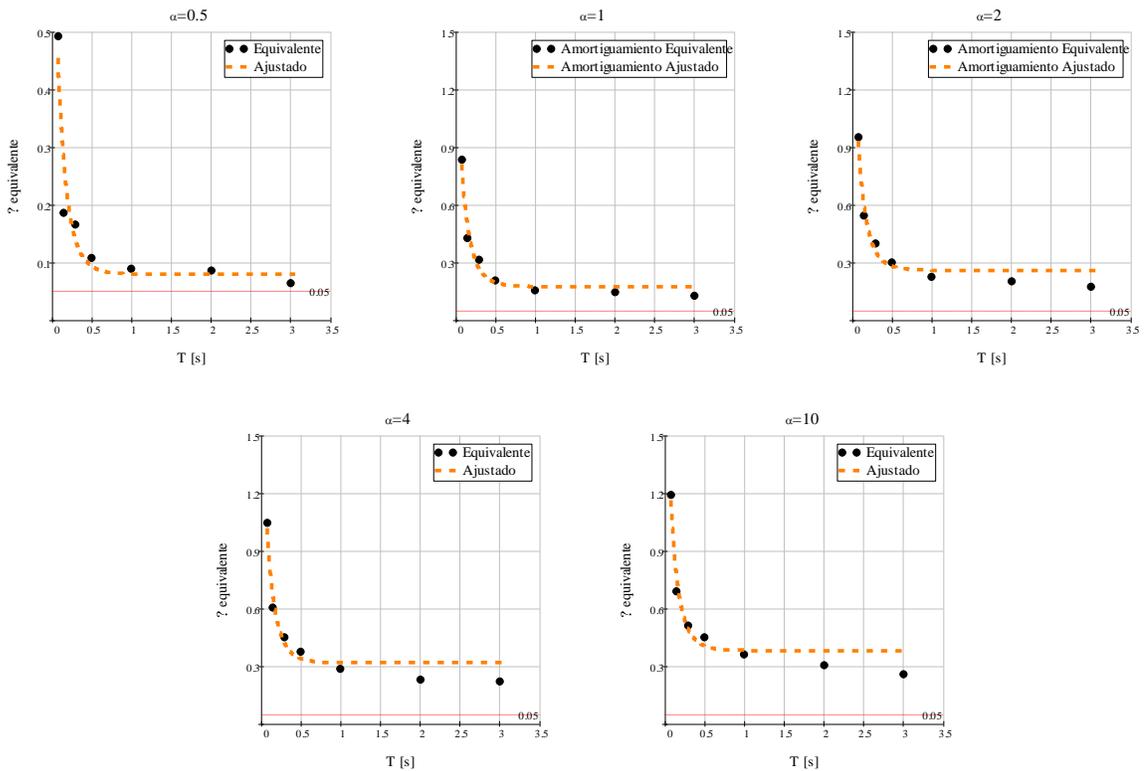
ANEXO A

A MORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE PARA TERRENO DURO

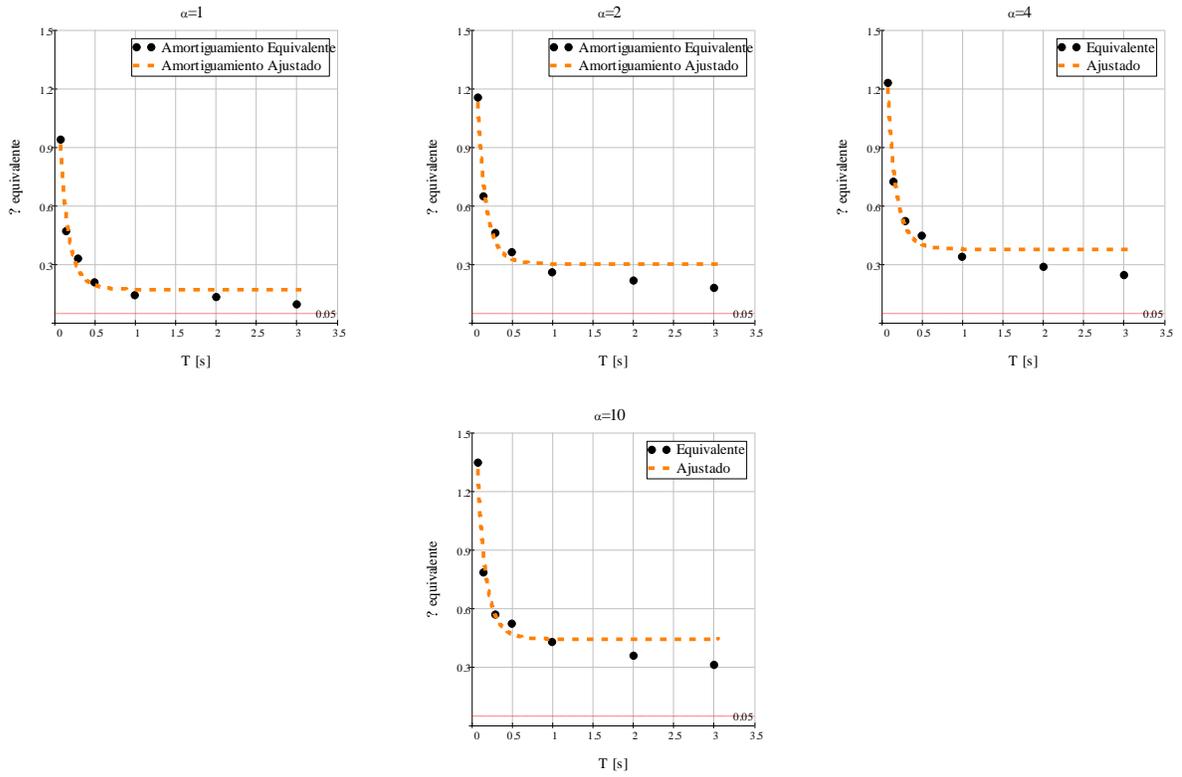
Amortiguamiento equivalente para $\gamma=0.2$ y distintos valores de α



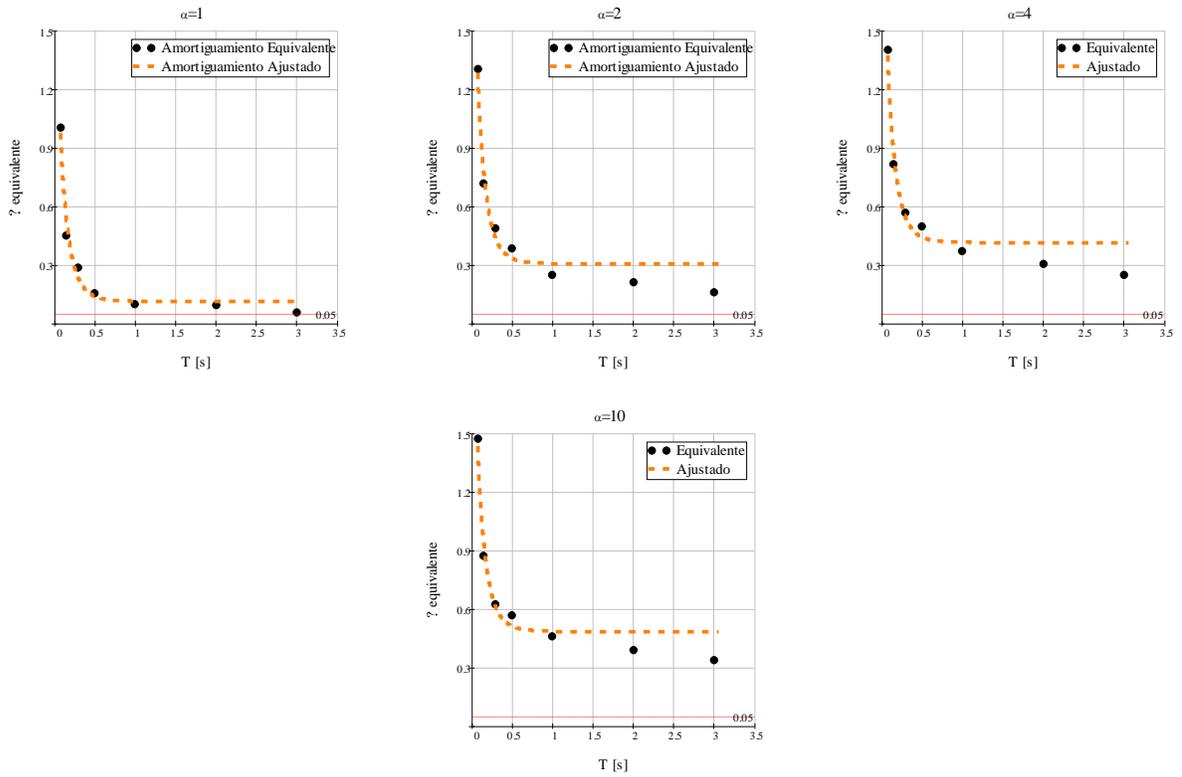
Amortiguamiento equivalente para $\gamma=0.3$ y distintos valores de α



Amortiguamiento equivalente para $\gamma=0.5$ y distintos valores de α



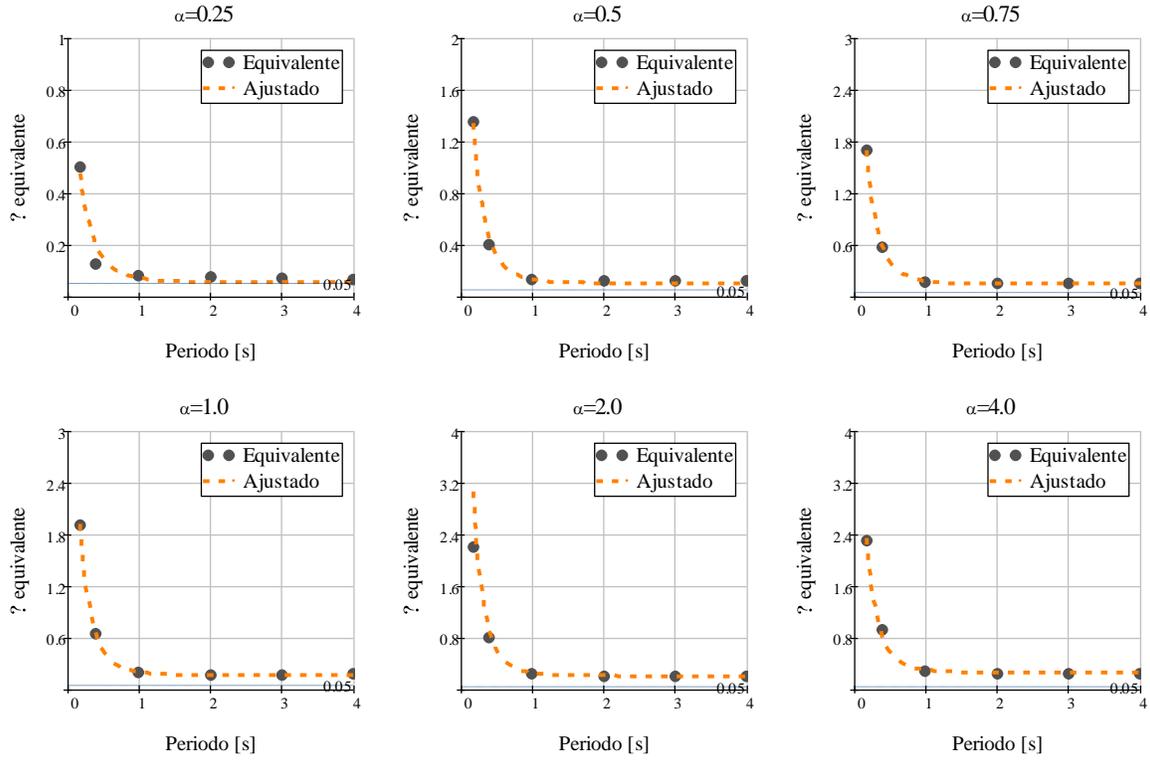
Amortiguamiento equivalente para $\gamma=0.75$ y distintos valores de α



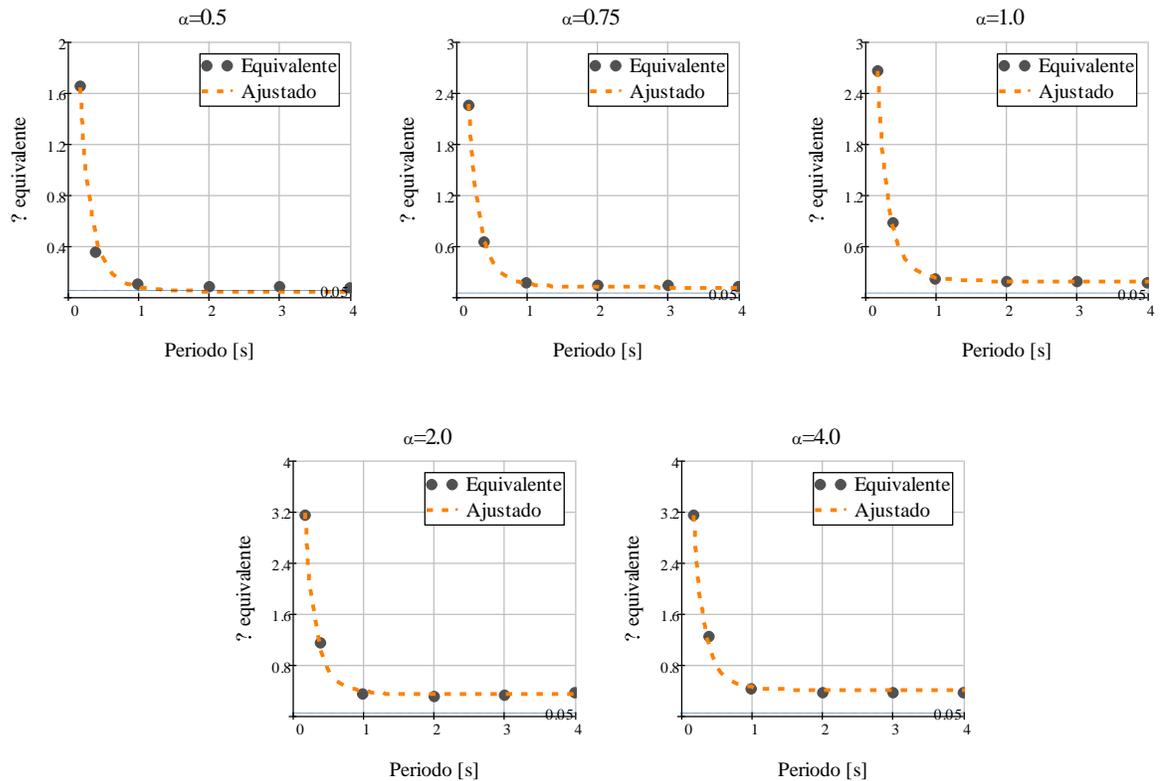
ANEXO B

A MORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE PARA TERRENO INTERMEDIO

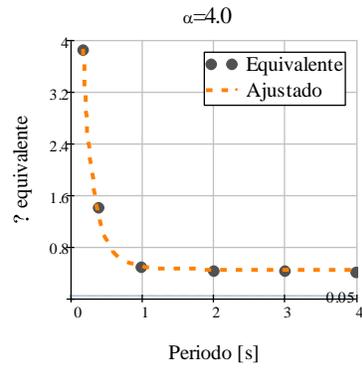
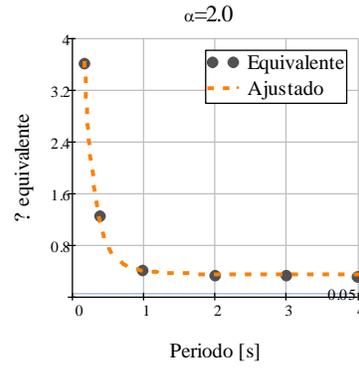
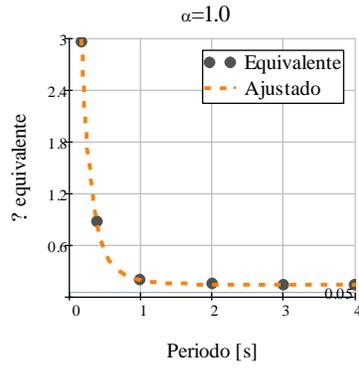
Amortiguamiento equivalente para $\gamma=0.2$ y distintos valores de α



Amortiguamiento equivalente para $\gamma=0.5$ y distintos valores de α



Amortiguamiento equivalente para $\gamma=0.75$ y distintos valores de α



REFERENCIAS

Alamilla J. (2001). **"Criterios de diseño sísmico basados en confiabilidad para estructuras aporticadas"**, Tesis Doctoral, DEPI-UNAM, México

Baber T.T. y Wen Y.K. (1981). **"Random vibration of hysteretic degrading systems"**, Journal of the Engineering Mechanics Division 107: EM6, 1069-1087.

Chopra A. (2007), **"Dynamics of Structures, Theory and applications to earthquake engineering"**, third edition, ed. Pearson Prentice Hall, New Jersey. USA.

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

Francisco Leonel Silva Gonzalez (1998), **"Calibración del método de linealización equivalente estocástica para sistemas histeréticos simples"**, DEPI, UNAM. Tesis de maestría.

Hidalgo Toxqui J. P. (2009). **"Reducción de las ordenadas espectrales de diseño sísmico debida al incremento de amortiguamiento viscoso"**, DEPI, UNAM. Tesis de maestría.

Martínez Romero E. (1990), **“Mejoramiento de la respuesta sísmica de edificios dañados por los sismos mediante la adición de elementos disipadores de energía”**, Memorias del Seminario Internacional: Instrumentación Sísmica y uso de elementos disipadores de energía en el comportamiento estructural, México D.F., SMIS, 211-248.

Pérez Rocha L.E., Ordaz M. G. y Avilés J. (2007), **“Capítulo para diseño por sismo del Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE”**, Memorias del V Simposio Nacional de Ingeniería Estructural en la Vivienda, Querétaro, Qro., México.

Ramírez Oscar M., et al., (2002), **“Evaluation of simplified methods of analysis of yielding structures with damping systems”**, Earthquake Spectra 18:3, 501-530.

Rivera J. L. (2006). **“Espectros de confiabilidad uniforme para sistemas estructurales con disipadores de energía”**, DEPMI, UNAM. Tesis de doctorado.

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 S.E., Castillo T., Hidalgo J.P. y Rivera J.L. (2008), **“Relación entre la respuesta de S1GDL con amortiguamiento viscoso y la de S1GDL con disipadores de tipo histerético”**, Memorias del XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Veracruz, Ver., México.

Ruiz S.E., Hidalgo J.P. y Rivera J.L. (2008), **“Design spectra reduction coefficients for systems with seismic energy dissipating devices located on firm”**, Memorias de la XIV Conferencia mundial sobre Ingeniería Sísmica, Beijing, China.