



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

**RESPUESTA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS CON AMORTIGUADORES VISCOSOS
NO LINEALES, EN LA ZONA DEL LAGO DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

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

PRESENTA:
ANGEL MORENO VEGA

TUTOR PRINCIPAL
DR. HÉCTOR GUERRERO BOBADILLA, INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX, JULIO 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

| | |
|-----------------------------|----------------------------------|
| Presidente: | DRA. SONIA ELDA RUIZ GÓMEZ |
| Secretario: | DR. JOSÉ ALBERTO ESCOBAR SÁNCHEZ |
| Vocal: | DR. HÉCTOR GUERRERO BOBADILLA |
| 1 ^{er} . Suplente: | DR. ROBERTO GÓMEZ MARTÍNEZ |
| 2 ^{do} . Suplente: | DR. ADRIÁN POZOS ESTRADA |

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

DR. HÉCTOR GUERRERO BOBADILLA

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermanos por el apoyo incondicional durante todos mis estudios.

Al Dr. Héctor Guerrero Bobadilla por su tiempo y sus valiosos consejos en la realización de este documento.

A mis sinodales, Dra. Sonia Ruiz Gómez, Dr. José Alberto Escobar Sánchez, Dr. Roberto Gómez Martínez y Dr. Adrián Pozos Estrada, por el valioso tiempo que se tomaron en revisar esta tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para la realización de la maestría.

Al Instituto de Ingeniería por todas las facilidades que me brindó en la realización de esta tesis.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme estudiar en esta gran institución.

A mis compañeros y amigos por sus ayuda y consejos durante los dos años que compartimos aulas.

RESUMEN

Se presenta un estudio sobre la respuesta sísmica de estructuras equipadas con amortiguadores viscosos no lineales, ubicadas en la Zona del Lago de la Ciudad de México. Se evalúan los efectos de la no linealidad de los amortiguadores en términos de sus desplazamientos y fuerzas de amortiguamiento.

Primero se estudian osciladores de un grado de libertad (1GL) y después de varios grados de libertad (MGL). Se incluye la respuesta de estructuras de 1GL y de seis estructuras de MGL.

Los resultados muestran que la reducción de fuerzas de amortiguamiento en los amortiguadores no lineales se cumple para periodos mayores a 1.7 s, aproximadamente, y que el efecto de la no linealidad de los dispositivos, en los desplazamientos máximos de las estructuras, es considerable. Finalmente, se dan conclusiones y recomendaciones para el diseño de este tipo de dispositivos.

ABSTRACT

This document presents a study of the seismic response of structures with non-linear fluid viscous dampers, located on the Lakebed Zone of Mexico City. The effects of damper non-linearity in the displacement response and damping forces were evaluated.

First, simple degree of freedom oscillators (SDOF) were studied, the multiple degree of freedom oscillators (MDOF) were analyzed. The seismic response of SDOF structures and six MDOF structures is included.

The results show that the damping forces reduce in non-linear dampers for periods greater than 1.7 seconds, approximately, and the effect of nonlinearity of the devices in the maximum displacements of the structures is significant. Finally, some conclusions and recommendations for the design of structures with non-linear fluid viscous dampers are given.

CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| RESUMEN..... | IV |
| ABSTRACT | IV |
| CONTENIDO | V |
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 1 |
| 1.2. JUSTIFICACIÓN Y ALCANCES | 2 |
| 1.3. ANTECEDENTES | 2 |
| 1.4. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS..... | 4 |
| CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO | 5 |
| 2.1. AMORTIGUADORES VISCOSOS LINEALES..... | 5 |
| 2.2. AMORTIGUADORES VISCOSOS NO LINEALES | 5 |
| 2.2.1. Energía Disipada por Amortiguadores Viscosos No Lineales | 7 |
| 2.2.2. Constante de Amortiguamiento No Lineal..... | 8 |
| 2.2.3. Fuerza de Amortiguamiento..... | 9 |
| 2.2.4. Amortiguamiento Adicional Proporcionado por los Amortiguadores Viscosos No Lineales | 9 |
| 2.2.5. Ecuación de Movimiento | 11 |
| 2.2.6. Diseño de Amortiguadores Viscosos No Lineales | 11 |
| CAPÍTULO 3. RESPUESTA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS DE UN GRADO DE LIBERTAD CON AMORTIGUADORES VISCOSOS NO LINEALES | 13 |
| 3.1. CARACTERÍSTICAS DEL MOVIMIENTO SÍSMICO | 13 |
| 3.2. RESPUESTA SÍSMICA | 15 |
| 3.3. ESPECTROS DE RESPUESTA..... | 18 |
| 3.4. DISCUSIÓN | 22 |
| CAPÍTULO 4. RESPUESTA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD CON AMORTIGUADORES VISCOSOS NO LINEALES | 24 |
| 4.1. DESCRIPCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS | 24 |
| 4.1.1. Materiales..... | 24 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 4.1.2. | Análisis de cargas..... | 24 |
| 4.1.3. | Geometría y secciones..... | 25 |
| 4.1.4. | Propiedades dinámicas | 27 |
| 4.1.4.1. | <i>Estructura 1</i> | 27 |
| 4.1.4.2. | <i>Estructura 2</i> | 28 |
| 4.1.4.3. | <i>Estructura 3</i> | 29 |
| 4.1.4.4. | <i>Estructura 4</i> | 30 |
| 4.1.4.5. | <i>Estructura 5</i> | 31 |
| 4.1.4.6. | <i>Estructura 6</i> | 32 |
| 4.1.5. | Respuesta sísmica de las estructuras sin amortiguadores..... | 33 |
| 4.1.5.1. | <i>Estructura 1</i> | 33 |
| 4.1.5.2. | <i>Estructura 2</i> | 34 |
| 4.1.5.3. | <i>Estructura 3</i> | 34 |
| 4.1.5.4. | <i>Estructura 4</i> | 35 |
| 4.1.5.5. | <i>Estructura 5</i> | 36 |
| 4.1.5.6. | <i>Estructura 6</i> | 36 |
| 4.2. | DISEÑO DE LOS AMORTIGUADORES VISCOSOS | 37 |
| 4.2.1. | Diseño de amortiguadores viscosos lineales | 37 |
| 4.2.1.1. | <i>Estructura 1</i> | 38 |
| 4.2.1.2. | <i>Estructura 2</i> | 39 |
| 4.2.1.3. | <i>Estructura 3</i> | 40 |
| 4.2.1.4. | <i>Estructura 4</i> | 41 |
| 4.2.1.5. | <i>Estructura 5</i> | 42 |
| 4.2.1.6. | <i>Estructura 6</i> | 43 |
| 4.2.2. | Diseño de los amortiguadores viscosos no lineales | 44 |
| 4.3. | RESULTADOS Y COMPARACIONES..... | 47 |
| 4.3.1. | Resultados de la estructura 1 | 48 |
| 4.3.2. | Resultados de la estructura 2..... | 49 |
| 4.3.3. | Resultados de la estructura 3..... | 51 |
| 4.3.4. | Resultados de la estructura 4..... | 52 |
| 4.3.5. | Resultados de la estructura 5..... | 54 |
| 4.3.6. | Resultados de la estructura 6..... | 56 |
| 4.4. | RELACIONES DE DESPLAZAMIENTOS Y FUERZAS DE AMORTIGUAMIENTO 58 | |
| 4.5. | PROCEDIMIENTO DE CORRECCIÓN EN EL DISEÑO DE AMORTIGUADORES VISCOSOS NO LINEALES | 60 |
| 4.5.1. | Ejemplo de aplicación | 60 |
| CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | | 63 |
| 5.1. | CONCLUSIONES | 63 |
| 5.2. | RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS | 64 |
| REFERENCIAS | | 65 |

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Ciudad de México está ubicada en una zona altamente sísmica. Aunque se encuentra relativamente alejada de la zona de subducción de la placa de Cocos bajo la placa de Norte América, las características del suelo son muy desfavorables. La mayoría de la ciudad está construida sobre el lecho de un antiguo lago (Lago de Texcoco). Esto trae consigo efectos de amplificación de las ondas sísmicas y hundimientos, debido principalmente a las gruesas capas de arcilla lacustre muy blanda y altamente compresible y al alto contenido de agua del subsuelo (Ovando-Shelley et al. 2007; Mayoral et al. 2008)

Lo anterior ha provocado que sismos como los del 19 de septiembre de 1985 y 2017 hayan sido catastróficos para la ciudad, dejando un gran número de pérdidas humanas, estructuras colapsadas y daños cuantiosos; tal como lo describen Rosenblueth y Meli (1986) y Seed et al. (1988) para el sismo del 1985. Algunas imágenes de los sismos de 1985 y 2017 se pueden apreciar en la figura 1.1.



Figura 1.1. Daños provocados por los sismos del 19 de septiembre de (a) 1985 (Cruz, 2015) y (b) 2017 (Verdugo, 2017)

De las experiencias anteriores surge la necesidad de tener estructuras que sean capaces de resistir sismos futuros, ya sea aumentando la resistencia de sus elementos estructurales o incorporándoles sistemas de protección sísmica (SPS), como aisladores o dispositivos disipadores. Estos tienen como función proteger a la estructura y minimizar los daños.

Entre los dispositivos disipadores existen los que dependen de la velocidad entre sus extremos (DV) y los que dependen del desplazamiento entre sus extremos (DD). Estos últimos, tales como los contraventeos restringidos al pandeo (BRBs, por sus siglas en inglés), se basan en la fluencia en de un metal o en la fricción entre dos superficies (Ruiz, 2018a).

Los BRBs han sido estudiados ampliamente por varios investigadores (Guerrero et al. 2016; Teran Gilmore y Virto-Cambray, 2009), quienes han observado su comportamiento en las condiciones de sitio de la Zona del Lago de la Ciudad de México, y además han propuesto metodologías de diseño.

Por su parte, uno de los sistemas de protección sísmica DV más conocidos son los amortiguadores viscosos, que consisten básicamente en un cilindro de acero inoxidable con un líquido viscoso en su interior, generalmente silicón. El fluido se desplaza mediante la acción de un pistón entre cámaras por medio de orificios, generando fricción entre sus partículas y el pistón, disipando de esta forma la energía y resultando muy eficientes y prácticos cuando se busca proteger a las estructuras contra la acción de sismos fuertes (Symans et al, 2008).

La figura 1.2 muestra esquemáticamente a un amortiguador viscoso. Se puede observar que es un cilindro metálico con un pistón que se desplaza en su centro, las cámaras rellenas de silicón, y los orificios a través del cual pasa el fluido entre éstas. Además, se ejemplifican los elementos de conexión a la estructura, con dos placas conectoras en sus extremos.

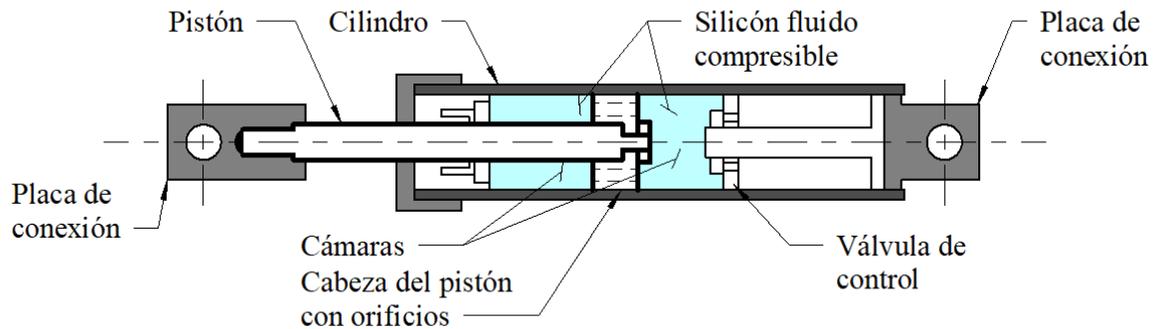


Figura 1.2. Características de un amortiguador viscoso

1.2. JUSTIFICACIÓN Y ALCANCES

La presente investigación se hizo con el objetivo de entender el comportamiento de estructuras equipadas con amortiguadores viscosos no lineales sometidas a movimientos sísmicos de suelos muy blandos, tal como el registro SCT del sismo 19 de septiembre de 1985, en la Zona del Lago de la Ciudad de México.

Se evaluaron diferentes estructuras elásticas de un grado de libertad con diferentes periodos entre 0.1 y 5 s y se estudió el efecto de la no linealidad del amortiguador en la respuesta de la estructura. Se modelaron siete valores del exponente de velocidad α (0.05, 0.1, 0.2, 0.35, 0.5, 0.7 y 1.0) para cada estructura.

En la segunda parte de este estudio se evaluaron cinco estructuras de varios grados de libertad, con periodos entre 0.4 y 3 s, considerando un 30% de amortiguamiento adicional y cuatro valores de α (0.05, 0.2, 0.5 y 1.0). Lo anterior permite analizar las ventajas y desventajas del uso de este tipo de amortiguadores en la Zona del Lago de la Ciudad de México, e identificar el efecto del exponente de velocidad (α) en la respuesta estructural.

1.3. ANTECEDENTES

Los amortiguadores viscosos surgieron como tecnología militar a finales del siglo XIX y rápidamente fueron adaptados a la industria automotriz (Taylor, 2003). Debido a sus características y la efectividad para reducir vibraciones se les encontró gran utilidad en la ingeniería estructural, principalmente en la

protección sísmica y contra vientos fuertes. En los primeros años de utilizar esta tecnología en edificios, se observó que dar un pequeño amortiguamiento a las estructuras aumentaba considerablemente la resistencia de la estructura, sin aumentar los esfuerzos y deformaciones de la misma (Taylor, 2003).

El caso más conocido de uso de estos dispositivos en México es la Torre Mayor, la cual cuenta con 98 amortiguadores distribuidos en sus 57 pisos, y que ha experimentado varios sismos de diferentes magnitudes sin presentar daños en su estructura (Taylor y Katz, 2003). La figura 1.3 muestra la colocación de estos dispositivos en la Torre Mayor. Se puede apreciar la forma de su conexión a los elementos estructurales del edificio.



Figura 1.3. Amortiguadores viscosos instalados en la Torre Mayor (Taylor y Katz, 2003)

La mayoría de las investigaciones sobre amortiguadores se han enfocado en amortiguadores viscosos del tipo lineal por Constantinou y Symans (1992). Los efectos de suelos blandos y cercanos a la falla se estudiaron para sistemas con este tipo de amortiguamiento por Pavlau y Constantinou (2004).

En México también se ha desarrollado investigación sobre este tipo de disipadores, principalmente por Ruiz (2011), que realizó recomendaciones para el diseño de edificios con disipadores de energía. Además, Castillo y Ruiz (2014) propusieron métodos de reducción de espectros de diseño para edificios con amortiguamiento viscoso. Ruiz (2018b) realizó comparaciones entre diferentes lineamientos para el diseño de estructuras con dispositivos disipadores de energía.

Los amortiguadores viscosos no lineales se caracterizan principalmente por lograr los mismos niveles de amortiguamiento que un amortiguador lineal en términos de porcentaje con respecto al amortiguamiento crítico, pero con la ventaja de que se desarrollan fuerzas de amortiguamiento menores. Esto permite proteger a los dispositivos y sus conexiones en escenarios de gran demanda.

Estos dispositivos no han sido suficientemente estudiados en suelos blandos como aquellos de la Ciudad de México. La mayoría de las investigaciones y experimentos se han desarrollado con registros de sismos como Loma Prieta (1989) y Northridge (1994), principalmente. En estas investigaciones se ha observado que la no linealidad de los amortiguadores no afecta de manera importante la respuesta en términos de desplazamientos, velocidades y aceleraciones, y que, aumentando la no linealidad, se logran reducir de manera importante las fuerzas de amortiguamiento desarrolladas por los dispositivos (Lin y Chopra, 2002; Seleemah y Constantinou, 1997; Terenzi, 1999).

En lo que respecta a la investigación realizada en México sobre los amortiguadores viscosos no lineales, se han propuesto métodos simplificados para la rehabilitación de edificios este tipo de dispositivos (Rivera y Ruiz, 2010). Además, se han realizado comparaciones de diferentes métodos siguiendo los pasos generales que recomiendan los documentos ASCE /SEI 7-10 (2010) y FEMA P 1050-1 (2015),

pero con algunas adaptaciones de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (2017). Tales métodos son: el de fuerzas laterales equivalentes y el dinámico modal espectral (Santos, Ruiz y Valenzuela, 2017). En este último, se resalta la importancia de utilizar la velocidad real en lugar de una pseudovelocidad en el diseño de los amortiguadores viscosos, debido a que se presentan variaciones considerables en los resultados.

1.4. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

Esta tesis está organizada en cinco capítulos, siendo el primero de ellos esta introducción. El segundo capítulo es el marco teórico, en el cual se describen detalladamente las ecuaciones fundamentales para el diseño de amortiguadores viscosos, los principios y deducciones que llevan a su obtención y los métodos de diseño conocidos.

El tercer capítulo presenta un estudio sobre estructuras de un grado de libertad con amortiguadores viscosos no lineales, se describe el registro de aceleraciones utilizado y se muestra la respuesta para estructuras con periodos entre 0.1 y 5 s. En el cuarto capítulo se estudian seis estructuras de varios grados de libertad, se describe el proceso de diseño de los amortiguadores y se muestra la respuesta sísmica de cada sistema.

Finalmente, se dan conclusiones y recomendaciones para el diseño de amortiguadores viscosos no lineales, ubicados en la Zona del Lago de la Ciudad de México.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. AMORTIGUADORES VISCOSOS LINEALES

La fuerza de amortiguamiento, $F_D(t)$, inducida en un amortiguador es lineal proporcional a la velocidad relativa entre sus dos extremos, tal como lo describe la ecuación (1):

$$F_D(t) = C_L \dot{x}(t) \quad (1)$$

donde C_L es la constante de amortiguamiento viscoso lineal y $\dot{x}(t)$ es la velocidad relativa entre los extremos del dispositivo, o la derivada de su desplazamiento con respecto al tiempo.

La amplitud de la fuerza máxima inducida en un amortiguador viscoso lineal es linealmente proporcional a la frecuencia de la excitación, a la amplitud del desplazamiento y a la constante de amortiguamiento.

Las fuerzas generadas por los amortiguadores viscosos lineales en una estructura están “fuera de fase” con las fuerzas generadas por el sistema estructural. Esto debido a que la máxima fuerza en el amortiguador viscoso se desarrolla en un desplazamiento cero, mientras que, en el desplazamiento máximo, la fuerza en el dispositivo es nula (Christopoulos y Filiatrault, 2006).

Además, la energía disipada, E_D , por ciclo es linealmente proporcional a la constante de amortiguamiento lineal, C_L , y está dada por la ecuación (2):

$$E_D = C_L \pi \omega X_0^2 \quad (2)$$

donde ω es la frecuencia de la excitación y X_0 es el desplazamiento máximo.

2.2. AMORTIGUADORES VISCOSOS NO LINEALES

Los amortiguadores viscosos no lineales se desarrollan a partir de los lineales mediante modificaciones en sus propiedades. Una de las principales ventajas que tienen es la reducción de las fuerzas inducidas en el amortiguador, pudiendo disipar la misma cantidad de energía.

La fuerza desarrollada por un amortiguador viscoso no lineal, $F_D(t)$, es expresada con la ecuación (3):

$$F_D(t) = C_{NL} \operatorname{sgn}(\dot{x}(t)) |\dot{x}(t)|^\alpha \quad (3)$$

donde C_{NL} es la constante del amortiguador viscoso no lineal, α es el exponente de velocidad y $\operatorname{sgn}(\cdot)$ es la función signo.

El exponente α define la no linealidad del amortiguador, toma valores entre 0.2 y 1 según la literatura, aunque comercialmente se pueden encontrar valores tan bajos como 0.05. Se puede notar que cuando

$\alpha = 1$, el comportamiento del amortiguador será lineal. Además, cuando el valor de $\alpha = 0$, el comportamiento del amortiguador es igual al de un amortiguador de fricción.

Como se puede apreciar en la figura 2.1, mientras menor sea el exponente de velocidad menor será la fuerza de amortiguamiento en altas velocidades respecto a la desarrollada por el amortiguador lineal. Por otro lado, para velocidades muy pequeñas, ocurre lo contrario.

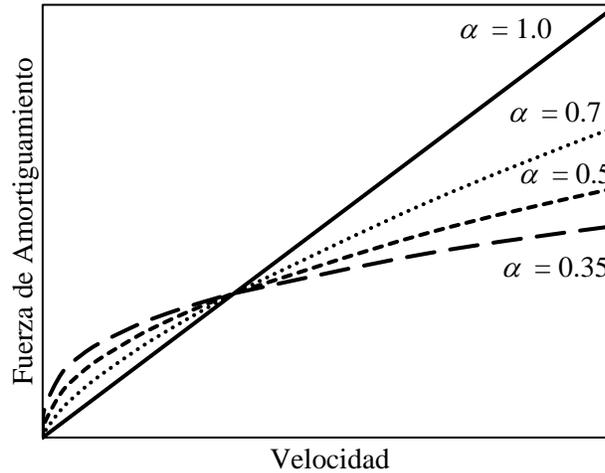


Figura 2.1. Curvas fuerza de amortiguamiento y velocidad, para diferentes exponentes de velocidad, α (Lin y Chopra, 2002)

Considerando movimiento armónico, el desplazamiento relativo, $x(t)$, y la velocidad, $\dot{x}(t)$, con respecto al tiempo, t , entre los extremos de un amortiguador viscoso no lineal se definen como:

$$x(t) = X_0 \sin \omega t \quad (4)$$

$$\dot{x}(t) = X_0 \omega \cos \omega t \quad (5)$$

Sustituyendo la ecuación (5) en la ecuación (3), se llega a:

$$F_D(t) = C_{NL} \operatorname{sgn}(\cos \omega t) |X_0 \omega \cos \omega t|^\alpha \quad (6)$$

aplicando la identidad trigonométrica $\cos^2 \omega t + \sin^2 \omega t = 1$, y despejando $\sin \omega t$ de la ecuación (4), se obtiene:

$$\cos \omega t = \pm \sqrt{1 - \left(\frac{x(t)}{X_0}\right)^2} \quad (7)$$

Si la ecuación (7) es sustituida en la ecuación (6), obtenemos la expresión que describe el comportamiento histerético de un amortiguador no lineal. Esta curva fuerza-desplazamiento está dada por:

$$\frac{F_D}{C_{NL}(X_0\omega)^\alpha} = \pm \left(1 - \left(\frac{x(t)}{X_0} \right)^2 \right)^{\frac{\alpha}{2}} \quad (8)$$

Como se puede notar en la ecuación (8), la fuerza desarrollada por el amortiguador es proporcional a la constante de amortiguamiento no lineal, a la amplitud del desplazamiento, a la frecuencia de la excitación y al exponente de velocidad.

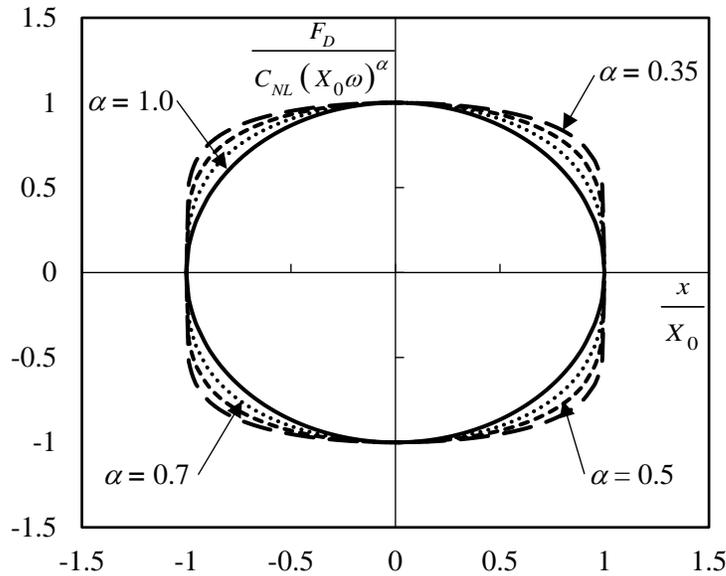


Figura 2.2. Curva de histéresis de amortiguadores viscosos no lineales para diferentes valores de α

La figura 2.2 muestra la curva dada por la ecuación (8), y describe el comportamiento histerético de los amortiguadores viscosos no lineales con diferentes valores de α . En esta gráfica se puede observar que los disipadores trabajan fuera de fase como se indicó anteriormente, pues cuando el desplazamiento es máximo, la fuerza es cero; y por el contrario, la fuerza máxima ocurre cuando el desplazamiento es nulo.

Nótese también que los ciclos de histéresis cambian de una forma elíptica (para $\alpha = 1$) a una forma rectangular a medida que α disminuye.

2.2.1. Energía Disipada por Amortiguadores Viscosos No Lineales

La energía disipada, E_D , por un amortiguador viscoso no lineal en un ciclo histerético es el área dentro de la curva fuerza-desplazamiento, y está dada por la siguiente integral:

$$E_D = \int_0^{2\pi/\omega} F_D(t) \dot{x}(t) dt \quad (9)$$

Sustituyendo (6) y (5) en (9), se obtiene:

$$E_D = 4C_{NL} (\omega X_0)^{\alpha+1} \int_0^{2\pi/\omega} \cos^{\alpha+1} \omega t dt \quad (10)$$

Resolviendo la integral anterior se obtiene:

$$E_D = 2\sqrt{\pi} C_{NL} (X_0)^{\alpha+1} \omega^\alpha \frac{\Gamma(1+\alpha/2)}{\Gamma(3/2+\alpha/2)} \quad (11)$$

donde Γ es la función gamma.

Se puede demostrar que, para un amortiguador lineal ($\alpha=1$) la ecuación (11) resulta en la ecuación (2).

La ecuación (11) se puede reordenar para llegar a (Symans y Constantinou, 1998) como sigue:

$$E_D = 4C_{NL} (\omega X_0)^\alpha 2^\alpha X_0 \frac{\Gamma^2(1+\alpha/2)}{\Gamma(2+\alpha)} \quad (12)$$

Esta ecuación puede ser simplificada, resultando (Lin y Chopra, 2002):

$$E_D = \pi \beta_\alpha C_{NL} \omega^\alpha X_0^{\alpha+1} \quad (13)$$

donde β_α es:

$$\beta_\alpha = \frac{2^{2+\alpha} \Gamma^2(1+\alpha/2)}{\pi \Gamma(2+\alpha)} \quad (14)$$

2.2.2. Constante de Amortiguamiento No Lineal

Para que un amortiguador viscoso no lineal disipe la misma cantidad de energía que un amortiguador viscoso lineal, las ecuaciones de las energías disipadas por cada dispositivo (2) y (13) tiene que igualarse, lo que permite relacionar las constantes de amortiguamiento, esto es:

$$C_{NL} = \frac{(\omega X_0)^{1-\alpha}}{\beta_\alpha} C_L \quad (15)$$

Christopoulos and Filiatrault (2006), sugieren que C_{NL} se aproxime como sigue:

$$C_{NL} \approx \frac{\sqrt{\pi}}{2} (\omega X_0)^{1-\alpha} C_L \quad (16)$$

Este valor puede servir como una aproximación inicial de la constante de amortiguamiento no lineal. Además, se puede considerar a ω como la frecuencia fundamental de la estructura original sin amortiguadores ω_n , y X_0 como el desplazamiento para el nivel de comportamiento deseado.

2.2.3. Fuerza de Amortiguamiento

Para comparar la fuerza de amortiguamiento desarrollada por un amortiguador no lineal con uno lineal se sustituye la ecuación (15) en (3):

$$F_D(t) = \frac{(\omega X_0)^{1-\alpha}}{\beta_\alpha} C_L \operatorname{sgn}(\dot{x}(t)) |\dot{x}(t)|^\alpha \quad (17)$$

Y teniendo en cuenta que la fuerza máxima en un amortiguador lineal es $F_D = C_L \dot{X}_0$, se obtiene que la relación entre las fuerzas de amortiguamientos es:

$$\frac{F_D(\alpha)}{F_D(\alpha=1)} = \frac{1}{\beta_\alpha} \left(\frac{\omega X_0}{\dot{X}_0} \right)^{1-\alpha} \quad (18)$$

Lin y Chopra (2002), proponen evaluar la ecuación (18) en $\omega = \omega_n$, por lo que se llega a:

$$\frac{F_D(\alpha)}{F_D(\alpha=1)} = \frac{1}{\beta_\alpha} \left(\frac{\omega_n X_0}{\dot{X}_0} \right)^{1-\alpha} = \frac{1}{\beta_\alpha} \left(\frac{S_V}{\dot{X}_0} \right)^{1-\alpha} \quad (19)$$

De la ecuación (19), se observa que $\omega_n X_0$ es la pseudovelocidad espectral, S_V . Entonces, la relación entre las fuerzas de amortiguamientos, depende de la relación entre pseudovelocidad y velocidad, y del valor de α .

Recordando la figura 2.1, se puede observar que existe una zona en la que las fuerzas de los amortiguadores no lineales son mayores a las del amortiguador lineal, por lo que con el objetivo de encontrar en qué punto cambian estas tendencias se iguala la ecuación (19) a uno, teniéndose que para que estas fuerzas sean iguales, se tiene que cumplir con:

$$\frac{S_V}{\dot{X}_0} = \beta_\alpha^{1/(1-\alpha)} \quad (20)$$

Como se puede ver, este límite depende del valor del exponente de velocidad, α . Como ejemplo S_V/\dot{X}_0 es 1.25, 1.24 y 1.23 para α igual a 0.35, 0.5 y 0.7, respectivamente.

2.2.4. Amortiguamiento Adicional Proporcionado por los Amortiguadores Viscosos No Lineales

Para representar el amortiguamiento agregado a las estructuras se utiliza el concepto de amortiguamiento viscoso equivalente. Cuando se trata del amortiguamiento dado por algún dispositivo disipador de energía, tal como los amortiguadores viscosos no lineales, este se denomina amortiguamiento adicional ζ_{sd} .

Dado lo anterior, para encontrar este amortiguamiento equivalente proporcionado por los amortiguadores, se iguala la energía disipada en un ciclo de vibración de la estructura y la energía disipada por un sistema viscoso equivalente. La figura 2.3 muestra la fuerza disipadora, F_D , contra el desplazamiento, x . Además, muestra la energía disipada por la estructura, E_D , como el área sombreada dentro del área de histéresis, mientras que E_{S0} es la energía de deformación elástica hasta el desplazamiento X_0 .

La energía disipada por el amortiguamiento viscoso en un ciclo está dada por:

$$E_D = 2\pi\zeta_{sd} \frac{\omega}{\omega_n} kX_0^2 \quad (21)$$

donde ζ_{sd} es el amortiguamiento equivalente adicional, k es la rigidez y ω_n es la frecuencia natural de la estructura.

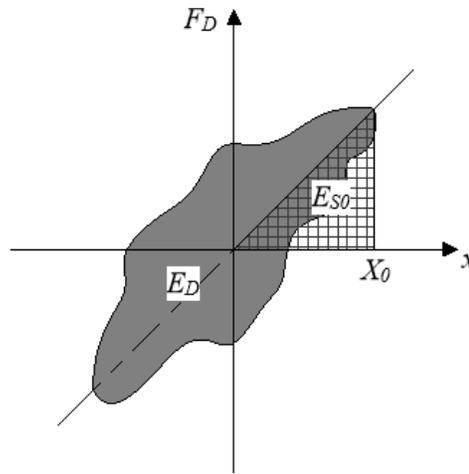


Figura 2.3. Energía disipada en un ciclo de vibración armónica por la estructura real, E_D , y energía de deformación, E_{S0} (Chopra, 2001)

Además, la energía de deformación máxima, E_{S0} , está definida por:

$$E_{S0} = \frac{1}{2} kX_0^2 \quad (22)$$

Sustituyendo la ecuación (22) en (21), y considerando que $\omega = \omega_n$, el amortiguamiento adicional resulta:

$$\zeta_{sd} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{S0}} = \frac{1}{2\pi} \frac{E_D}{kX_0^2} \quad (23)$$

Finalmente, para obtener el amortiguamiento equivalente adicional que proporcionan los amortiguadores viscosos no lineales, a una estructura se sustituye la ecuación (13) en la ecuación (23).

$$\zeta_{sd} = \frac{\beta_\alpha C_{NL} (\omega_n X_0)^\alpha}{2kX_0} \quad (24)$$

La ecuación (24) permite calcular el amortiguamiento adicional como función del desplazamiento máximo y la rigidez. Sabiendo que $k = \omega_n^2 m$, se puede simplificar la ecuación (24) como:

$$\zeta_{sd} = \frac{\beta_\alpha C_{NL} (\omega_n X_0)^{\alpha-1}}{2m\omega_n} \quad (25)$$

donde m es la masa de la estructura.

Además, de esta ecuación que define el amortiguamiento adicional proporcionado por los amortiguadores viscosos no lineales, Pekcan et al. (1999) propusieron un enfoque equivalente al consumo de energía y describen este amortiguamiento como:

$$\zeta_{sd} = \frac{1}{1+\alpha} \frac{C_{NL} (\omega_n X_0)^{\alpha-1}}{2m\omega_n} \quad (26)$$

La ecuación (26) es similar a la ecuación (25), donde se reemplazó el factor β_α por $1/(1+\alpha)$. Este último factor hace que el enfoque de consumo de energía, dado por la ecuación (26), calcule valores más altos de amortiguamiento.

2.2.5. Ecuación de Movimiento

La ecuación de movimiento que describe a un sistema de un grado de libertad sujeto a una aceleración del suelo $\ddot{x}_g(t)$ es:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + C_{NL} \operatorname{sgn}(\dot{x})|\dot{x}|^\alpha = -m\ddot{x}_g(t) \quad (27)$$

donde x , \dot{x} , \ddot{x} son el desplazamiento, velocidad y aceleración, respectivamente, c es el coeficiente de amortiguamiento viscoso inherente de la estructura, k es la rigidez de la estructura, y \ddot{x}_g es la aceleración de la excitación sísmica.

En la ecuación (27), la constante de amortiguamiento no lineal es no adimensional, por lo que es adecuado dejar este valor en función del amortiguamiento adicional, tal como se muestra en la ecuación (25), la cual se sustituye en la ecuación (27) y se divide entre la masa, llegándose a:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2 x + \frac{2\zeta_{sd}\omega_n}{\beta_\alpha} (\omega_n X_0)^{1-\alpha} \operatorname{sgn}(\dot{x})|\dot{x}|^\alpha = -\ddot{x}_g(t) \quad (28)$$

donde ζ es el amortiguamiento inherente de la estructura.

2.2.6. Diseño de Amortiguadores Viscosos No Lineales

En el diseño y rehabilitación de estructuras es común aproximar la respuesta de sistemas de varios grados de libertad con un sistema de un grado de libertad equivalente, que representa las características más importantes del sistema original (Pekcan et al, 1999).

Debido a que los amortiguadores viscosos son usualmente incorporados como miembros diagonales, la matriz global de amortiguamiento generada por los amortiguadores, es proporcional a la matriz de rigidez de la estructura (Christopoulos y Filiatrault, 2006).

El diseño de estructuras equipadas con amortiguadores viscosos es conceptualmente simple, aunque requiere de varias iteraciones para dar valores más aproximados, principalmente cuando se requiere obtener el valor de la deformación máxima, la fuerza de amortiguamiento y el porcentaje de amortiguamiento adicional proporcionado por los dispositivos.

El procedimiento para obtener el desplazamiento máximo y el porcentaje de amortiguamiento, aportados por un amortiguador viscoso no lineal, ya conocidas sus características como el valor de la constante de amortiguamiento C_{NL} y su respectivo valor de α , es el siguiente (Lin y Chopra, 2002):

1. Suponer un amortiguamiento inicial $\zeta_{sd}=0$, y determinar el desplazamiento, D , correspondiente al periodo y amortiguamiento de la estructura, con la ecuación (25).
2. Con el desplazamiento anterior, D , se calcula el porcentaje de amortiguamiento con la ecuación (25).
3. Repetir el paso anterior, hasta que los valores de amortiguamiento y desplazamiento obtenidos, sean lo suficientemente aproximados, entre cada iteración.

Cuando se pretende diseñar los amortiguadores viscosos no lineales, es necesario conocer las características de la estructura y establecer un comportamiento objetivo. Es decir, se puede asignar un porcentaje de amortiguamiento adicional o limitar el desplazamiento pico de la estructura.

Cuando se elige un porcentaje de amortiguamiento, usualmente entre 10 y 35%, el desplazamiento pico es obtenido del espectro de diseño. O viceversa, cuando se asigna un valor de desplazamiento pico, se obtiene del mismo espectro el porcentaje de amortiguamiento necesario para limitar a la estructura dicho desplazamiento.

La constante de amortiguamiento no lineal se puede obtener despejándola de la ecuación (25), y se sustituye el valor de X_0 por el desplazamiento deseado. La ecuación queda como:

$$C_{NL} = \frac{2m\omega_n \zeta_{sd} (\omega_n X_0)^{1-\alpha}}{\beta_\alpha} \quad (29)$$

El procedimiento de diseño que se puede seguir es (Lin y Chopra, 2002):

1. Obtener las propiedades dinámicas y características generales de la estructura. Tal como su periodo, frecuencia, peso total y amortiguamiento inherente ζ .
2. Definir el nivel de comportamiento deseado, es decir, establecer un desplazamiento pico, o un porcentaje de amortiguamiento.
3. Si se estableció el desplazamiento pico, obtener el porcentaje de amortiguamiento necesario del espectro de diseño. En caso contrario, si se eligió el porcentaje de amortiguamiento, se deberá obtener el desplazamiento pico del mismo espectro.
4. Elegir el valor del parámetro α que se considere adecuado. Cabe mencionar que las características del espectro de diseño y el periodo de la estructura, pueden servir para elegir un valor de α que sea eficiente.
5. Calcular el valor de la constante de amortiguamiento viscoso no lineal C_{NL} con la ecuación (29).

CAPÍTULO 3

RESPUESTA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS DE UN GRADO DE LIBERTAD CON AMORTIGUADORES VISCOSOS NO LINEALES

3.1. CARACTERÍSTICAS DEL MOVIMIENTO SÍSMICO

Con la finalidad de observar el comportamiento de los amortiguadores viscosos no lineales en suelo muy blando, como el que se encuentra en la Zona del Lago de la Ciudad de México, estructuras de un grado de libertad se sometieron al registro de aceleraciones del sismo del 19 de septiembre de 1985, obtenido en la estación SCT. En la figura 3.1, se muestra este registro, en el que se puede observar la duración de aproximadamente 160 s, con una etapa intensa entre el segundo 35 y 70, y aceleraciones máximas de alrededor de 0.16g.

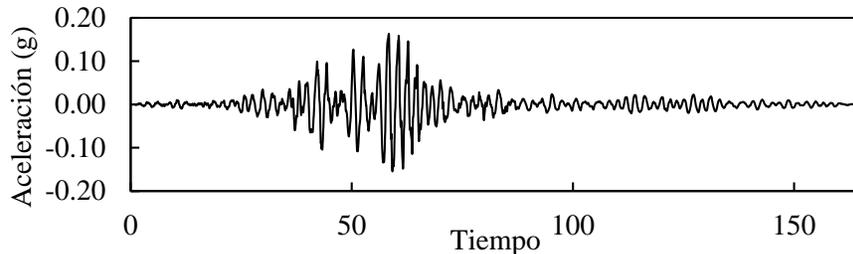


Figura 3.1. Registro de aceleraciones del sismo del 19/Septiembre/1985 en la estación SCT, componente E-W, de la Zona del Lago de la Ciudad de México

Como se indicó en los procedimientos de diseño en la sección anterior, es muy importante el conocer los espectros de respuesta, con el fin de obtener principalmente los desplazamientos pico según el porcentaje de amortiguamiento requerido. La figura 3.2, muestra los espectros de respuesta del registro de la figura 3.1.

De los espectros de respuesta mostrados en la figura 3.2 se puede observar que, en términos de pseudoaceleración, las estructuras con mayor demanda son las que tienen un periodo de alrededor de 2 s. Además, se puede apreciar un segundo modo de vibrar en el suelo, lo cual se puede ver en ese mismo espectro, en periodos de alrededor de 0.7 s.

En lo que se refiere a desplazamientos y velocidades, las estructuras con periodos entre 2 y 3 s, son las que sufrirán una mayor demanda, y por lo tanto requieren una fuerza de amortiguamiento mayor.

La figura 3.3 muestra el espectro de pseudo-velocidades en escala doble logarítmica, en el cual se puede identificar tres zonas espectrales: 1) las estructuras con periodos menores a 2 s son sensibles a la aceleración; 2) aquellas con periodos mayores a 2 y menores a 2.75 s se encuentran en la zona de sensibilidad a la velocidad; y finalmente 3) las estructuras con periodos mayores a 2.75 son sensibles al desplazamiento. Como se puede ver, la zona de estructuras sensibles a la velocidad es muy corta, comparada con las otras dos zonas, lo que es una característica de los movimientos en suelos blandos.

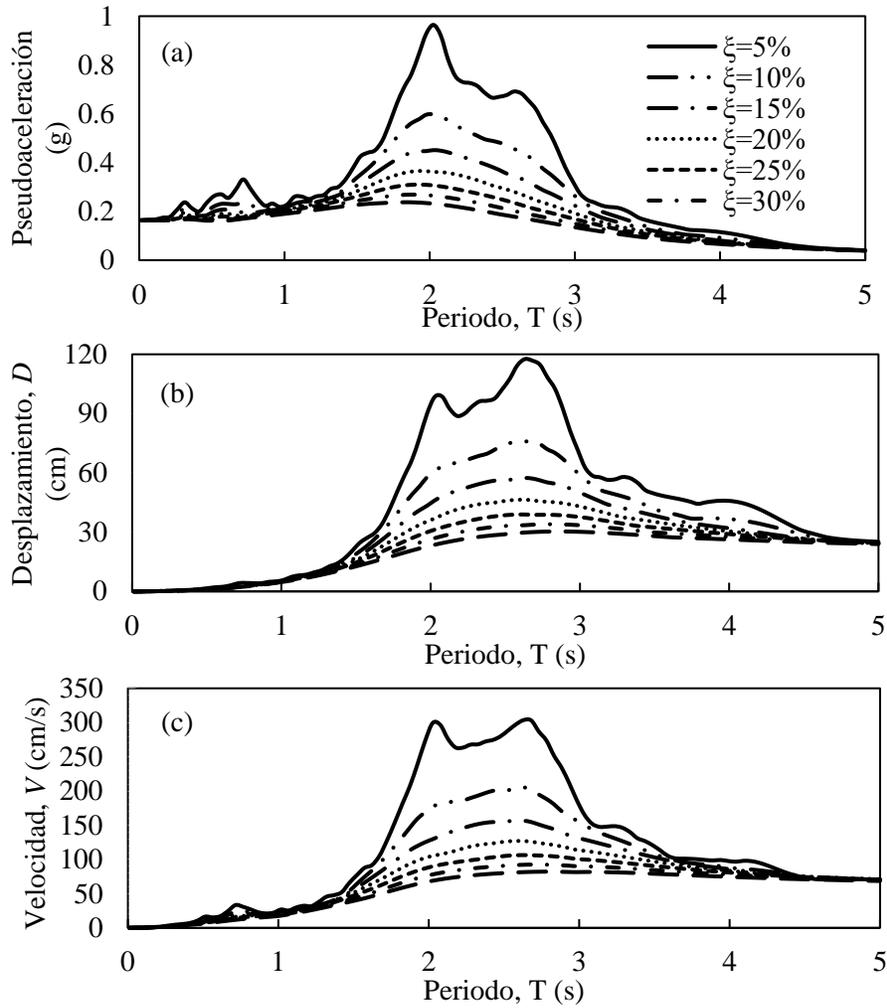


Figura 3.2. Espectros de respuesta de (a) Pseudoaceleraciones, (b) Desplazamientos y (c) Velocidades

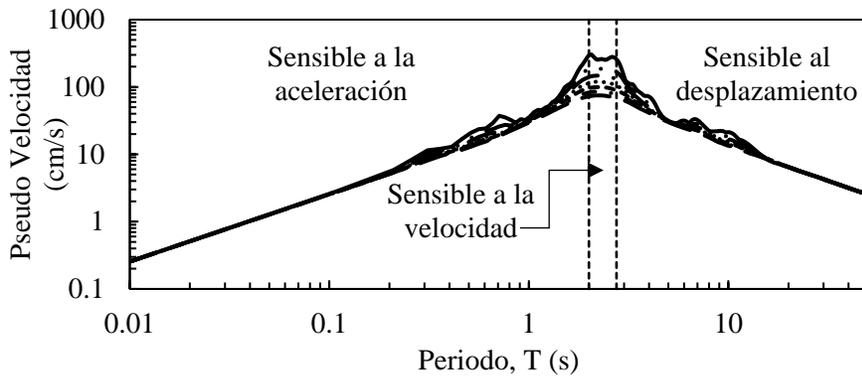


Figura 3.3. Espectro de pseudo-velocidad con regiones espectrales identificadas

3.2. RESPUESTA SÍSMICA

Con el fin de observar la respuesta de una estructura equipada con amortiguadores viscosos no lineales y el efecto de su no linealidad, se analizó una estructura de un grado de libertad con periodo $T_n = 2$ s, con un amortiguamiento inherente $\zeta=5\%$ y un amortiguamiento adicional $\zeta_{ad}=15\%$. Al someterla al registro de SCT, se obtuvieron los resultados descritos a continuación. Cabe mencionar que estas gráficas muestran parcialmente el registro, recortándose entre 20 y 100 s, que se consideró como la zona de interés.

En la figura 3.4, se puede apreciar como la no linealidad de los amortiguadores afecta en la respuesta de la estructura en términos de desplazamientos, velocidades y aceleraciones, observándose que para valores pequeños de α las respuestas máximas son menores a las obtenidas con el amortiguador lineal ($\alpha=1$). Esto se reafirma al ver las curvas de histéresis del amortiguador presentadas en la figura 3.5. Las fuerzas de amortiguamiento obtenidas para los diferentes valores de α (0.35, 0.5 y 0.7), fueron entre un 14, 12% y 8% menores a las que desarrolló el amortiguador lineal, respectivamente.

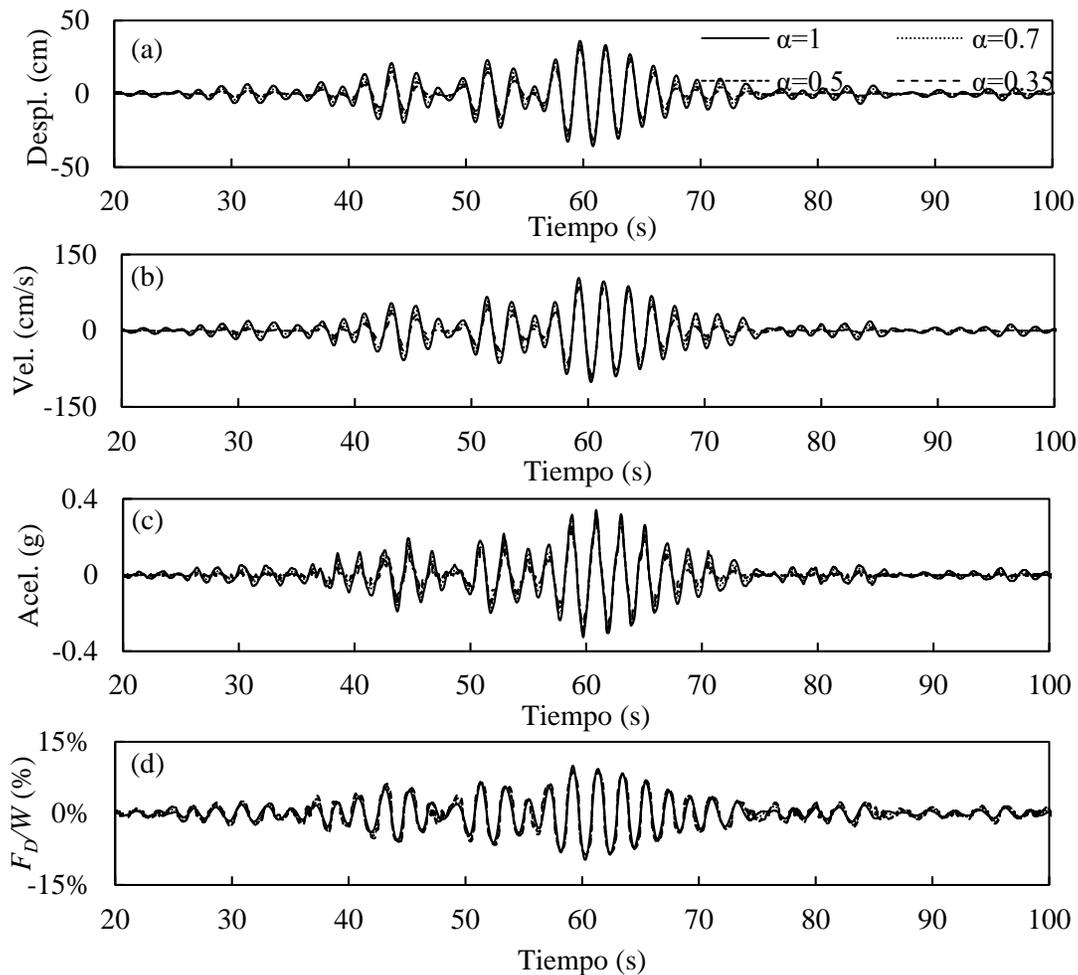


Figura 3.4. Respuesta en el tiempo de (a) Desplazamientos, (b)Velocidades (c) Aceleraciones y (d) Fuerza de amortiguamiento, para un sistema de un grado de libertad ($T_n = 2$ s y $\zeta=5\%$) con amortiguamiento adicional $\zeta_{ad}=15\%$

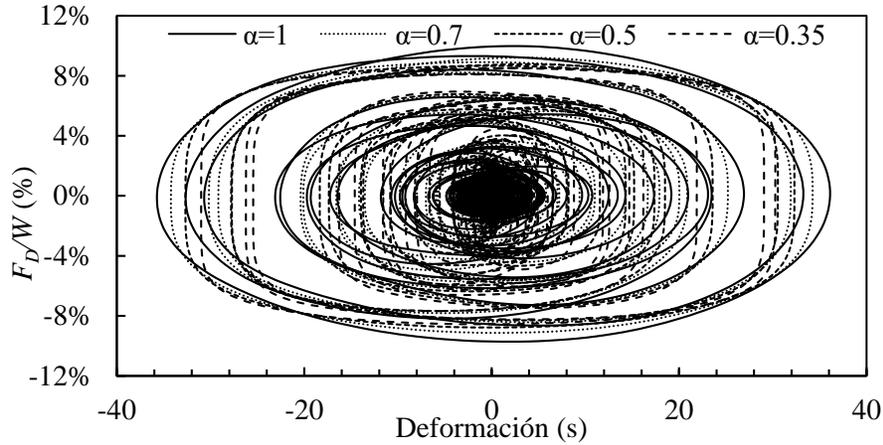


Figura 3.5. Curva de histéresis del amortiguador no lineal en estructura de un grado de libertad ($T_n = 2$ s y $\zeta=5\%$) con amortiguamiento adicional $\zeta_{sd}=15\%$

Además del caso anterior, se estudió una estructura similar con periodo $T_n = 1$ s, y las mismas características de amortiguamiento: amortiguamiento inherente $\zeta=5\%$ y un amortiguamiento adicional $\zeta_{sd}=15\%$.

En la figura 3.6 se muestra la respuesta de la estructura con periodo de 1 s. En ella se puede apreciar que la respuesta, para este porcentaje de amortiguamiento, y para cada uno de los valores de α es prácticamente la misma en términos de desplazamientos, velocidades y aceleraciones. Esto comprueba que se logra adecuadamente un amortiguamiento equivalente al establecido.

Por el contrario, cuando se analiza la respuesta de la fuerza disipada desarrollada por el amortiguador, F_D , se observa que la no linealidad de los amortiguadores tiene un efecto contrario al caso anterior ($T_n = 2$ s), ya que se tienen fuerzas mayores, cuando el valor de α es menor. Es decir, en este caso, un amortiguador lineal, presenta menores fuerzas que un amortiguador no lineal.

Para entender el comportamiento del amortiguador, en la figura 3.7 se muestran las curvas de histéresis para los diferentes valores de α . Se puede observar que, contrario a lo que sucedió con $T_n=2$ s, las fuerzas de amortiguamiento son mayores cuando el dispositivo tiene valores menores de α .

Las fuerzas de amortiguamiento desarrolladas por los dispositivos son 6%, 10% y 16% mayores que las del amortiguador lineal, para α de 0.7, 0.5 y 0.35, respectivamente.

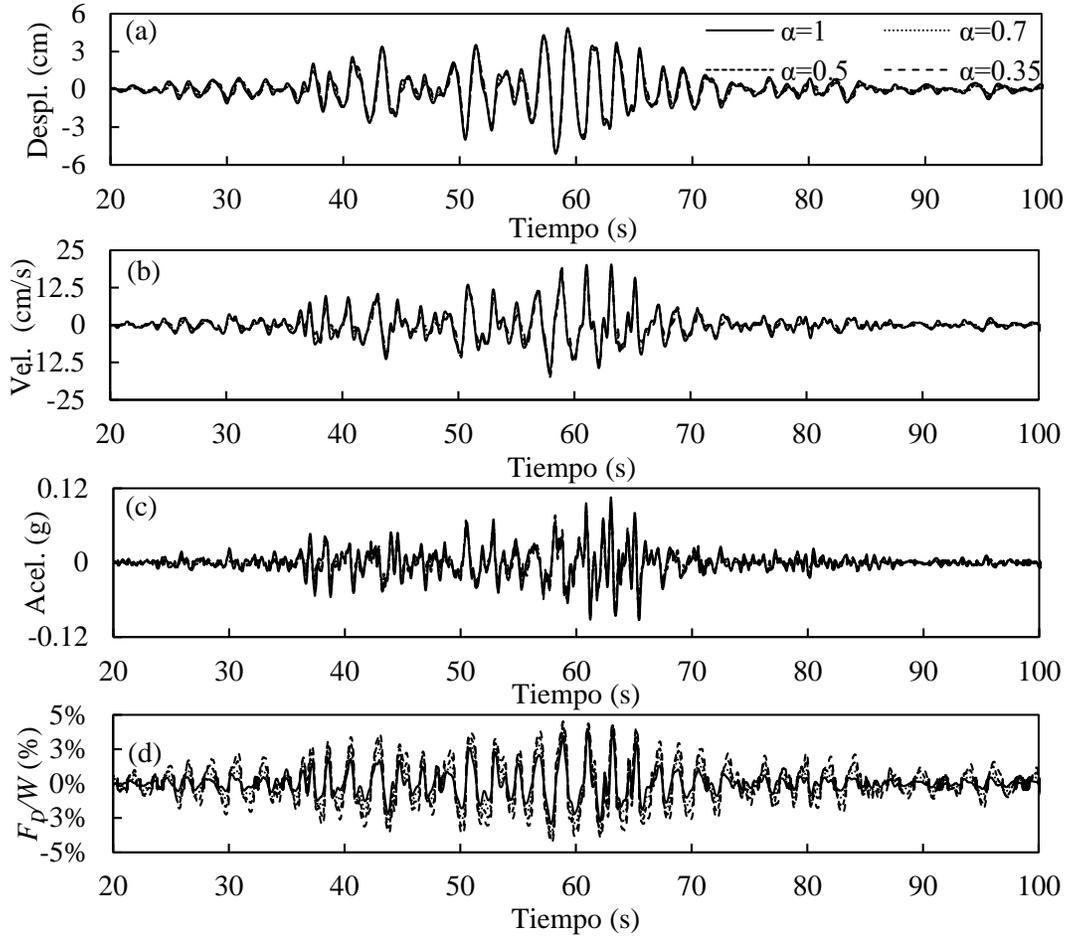


Figura 3.6. Respuesta en el tiempo de (a) Desplazamientos, (b) Velocidades (c) Aceleraciones (d) Fuerza de amortiguamiento, para un sistema de un grado de libertad ($T_n = 1$ s y $\zeta = 5\%$) con amortiguamiento adicional $\zeta_{sd} = 15\%$

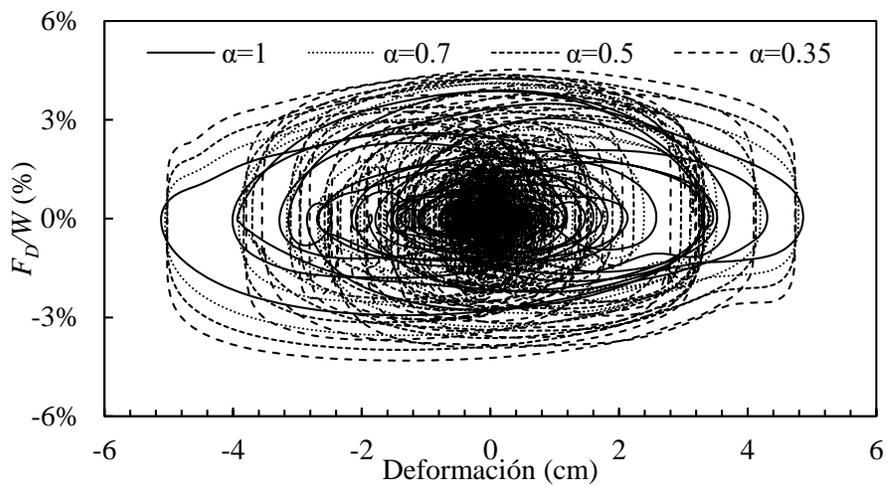


Figura 3.7. Curva de histéresis del amortiguador no lineal en estructura de un grado de libertad ($T_n = 1$ s y $\zeta = 5\%$) con amortiguamiento adicional $\zeta_{sd} = 15\%$

3.3 ESPECTROS DE RESPUESTA

Además de las dos estructuras analizadas anteriormente, se evaluaron amortiguadores viscosos no lineales en estructuras con diferentes periodos de vibrar, desde 0.01 s hasta 5 s. Esto con el fin de observar en qué tipo de estructuras se presentan resultados similares al caso que se ilustró en las figuras 3.6 y 3.7.

La figura 3.8 muestra los espectros de respuesta de desplazamientos para dos porcentajes de amortiguamiento adicional, 15% y 30%, considerando un amortiguamiento inherente de la estructura del 5%. Mientras que la figura 3.9, muestra los espectros de fuerza de amortiguamiento (normalizadas con respecto al peso, W) para los mismos porcentajes.

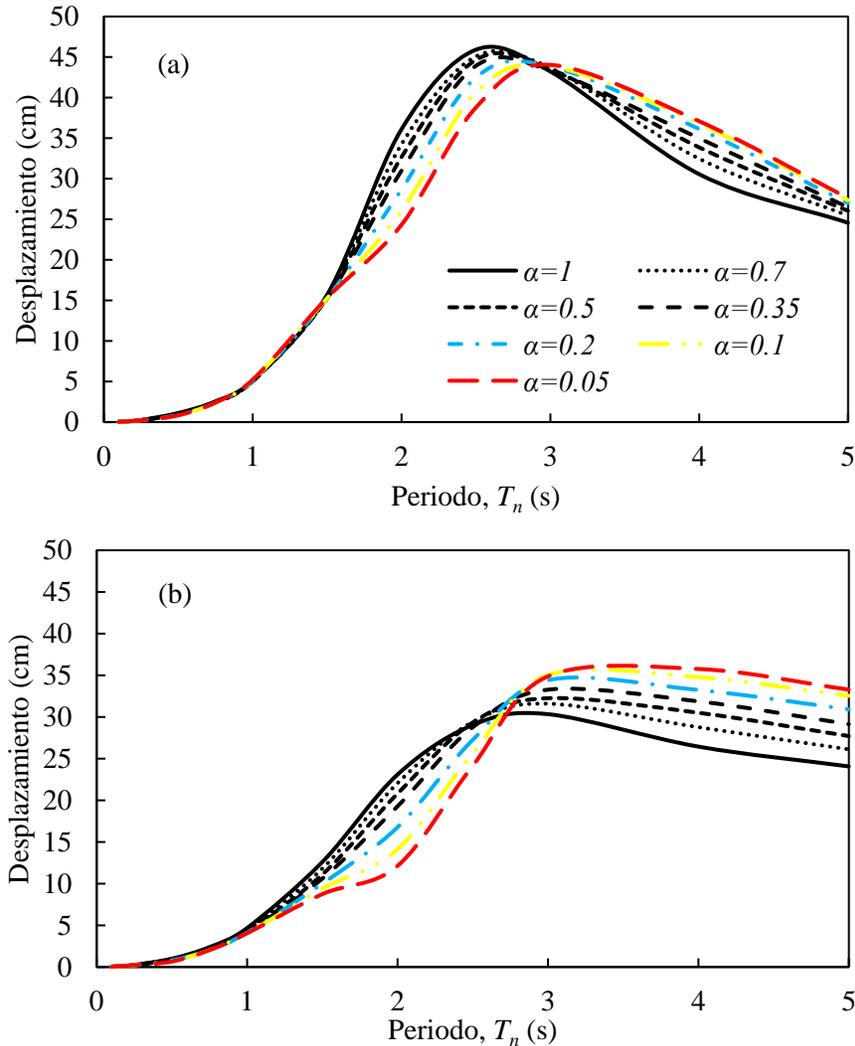


Figura 3.8. Espectros de respuesta de desplazamientos para estructuras equipadas con amortiguadores viscosos no lineales con amortiguamiento adicional de (a) $\zeta_{sd}=15\%$ y (b) $\zeta_{sd}=30\%$

En la figura 3.8 se observa que los desplazamientos son muy similares para los diferentes valores de α , en periodos cortos, pero en sistemas con periodos mayores a 1.5 s, existen diferencias considerables.

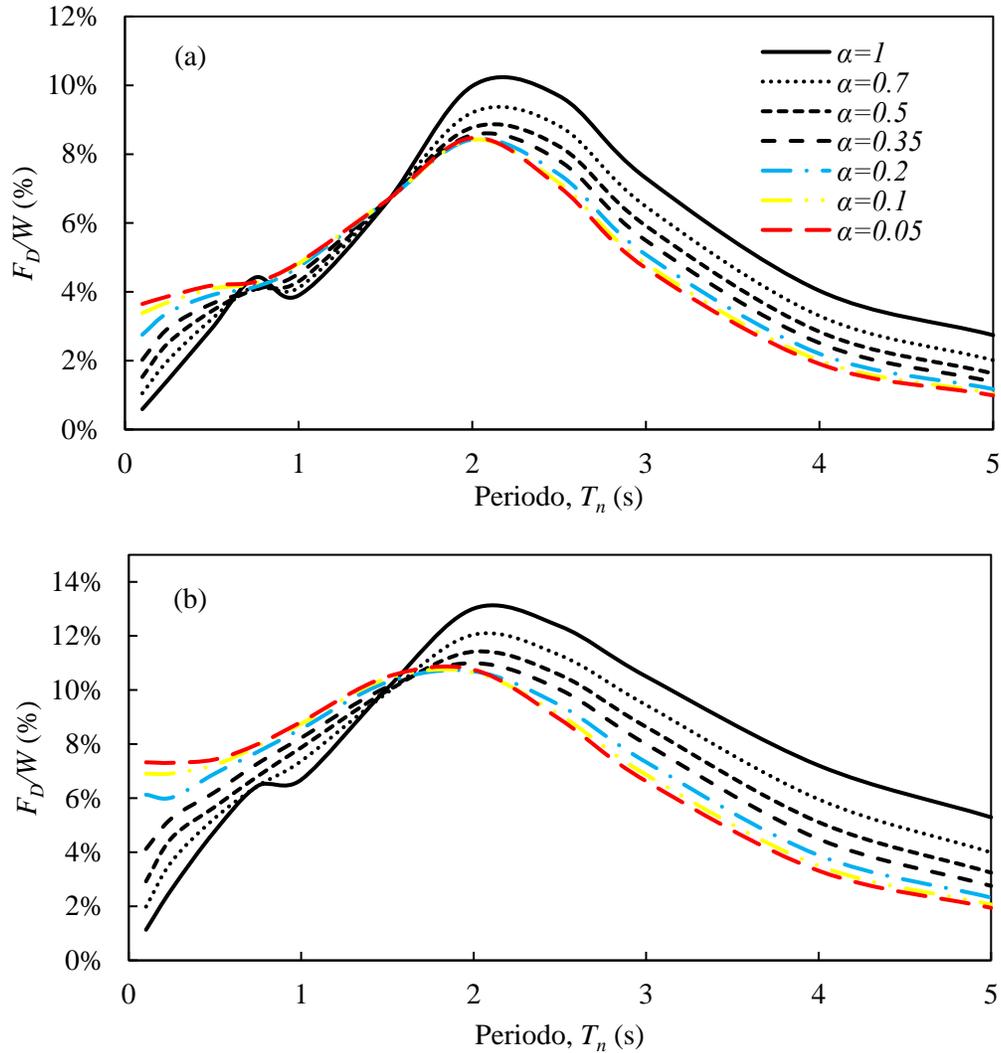


Figura 3.9. Espectros de respuesta de fuerza de amortiguamiento para estructuras equipadas con amortiguadores viscosos no lineales con amortiguamiento adicional de (a) $\zeta_{sd}=15\%$ y (b) $\zeta_{sd}=30\%$

De los espectros de fuerza de amortiguamiento que se grafican en la figura 3.9 se nota que para ambos porcentajes de amortiguamiento adicional en estructuras con periodos menores a 1.7 s aproximadamente, las fuerzas son mayores para los valores de α menores, respecto a las desarrolladas por un amortiguador lineal. Esto con excepción del periodo de 0.75 s, cuando el amortiguamiento es del 15%. Por otro lado, en estructuras con periodos mayores a 1.7, la fuerza desarrollada por el amortiguador es reducida con la no linealidad.

En el caso del periodo de 0.75 s muestra un comportamiento similar a la de estructuras con periodos mayores a 1.7 s. Este periodo coincide con los picos del segundo modo de vibrar del suelo que se muestran en los espectros presentados por la figura 3.2.

En la figura 3.10 se muestran las relaciones de fuerzas de amortiguamiento con respecto a los obtenidos para un amortiguador lineal. Es decir, se compara la respuesta de los amortiguadores no lineales y del amortiguador lineal, para observar el efecto de la no linealidad.

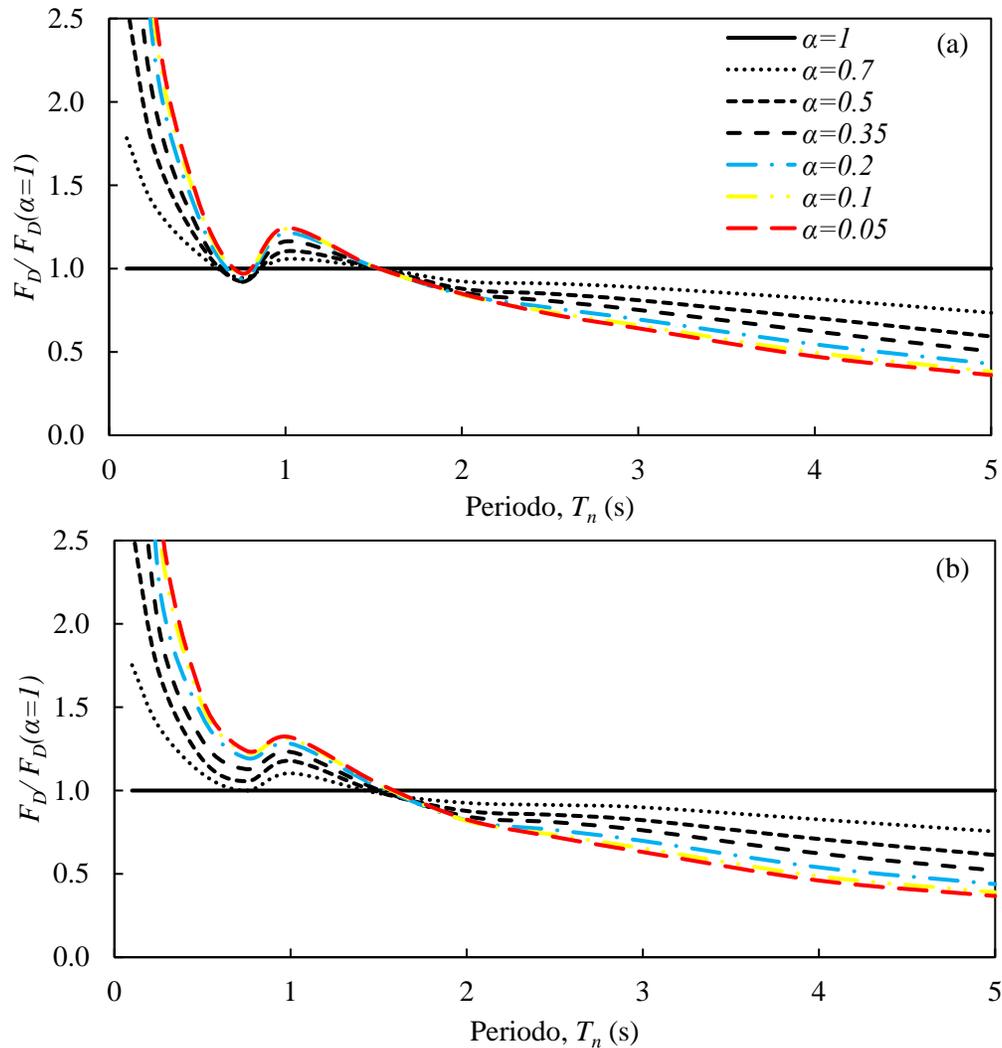


Figura 3.10. Relaciones de fuerzas de amortiguamiento para los diferentes valores de α con respecto al amortiguador lineal (a) $\zeta_{sd}=15\%$ y (b) $\zeta_{sd}=30\%$

Se puede observar de manera más clara que para periodos menores de 1.7 s las fuerzas de los amortiguadores viscosos no lineales sobrepasan las del amortiguador lineal. Siendo esta diferencia muy grande en periodos pequeños. Mientras que, en periodos mayores a 1.7 s, existe una notoria reducción, con variación prácticamente lineal, de las fuerzas de amortiguamiento desarrollada por los amortiguadores no lineales.

En ambos porcentajes de amortiguamiento, el comportamiento de las relaciones de fuerza es muy similar, con una ligera diferencia para el caso de 15% en la zona del segundo modo del suelo ($T_n=0.75$ s), donde las relaciones son menores a 1.

El cambio en las tendencias que se muestran en los espectros de fuerzas de amortiguamiento se debe a lo descrito por la ecuación (20), que establece que para que las fuerzas de amortiguamiento desarrolladas por dispositivos no lineales sean menores a las del amortiguador lineal, la relación S_V/\bar{X}_0 tiene que ser menor a 1.27, 1.265, 1.26, 1.25, 1.24 y 1.23, para α igual a 0.05, 0.1, 0.2, 0.35, 0.5 y 0.7, respectivamente.

Específicamente, los periodos que marcan el cambio de tendencias están entre 1.55 y 1.65 s, cuando el amortiguamiento total es del 20%, para los distintos valores de α . En el caso de amortiguamiento igual a 35%, estos periodos están entre 1.65 y 1.7 s.

De manera similar a la figura 3.10, la figura 3.11 compara la respuesta de los amortiguadores no lineales contra la de amortiguadores lineales, para el caso de desplazamientos.

La figura 3.11a y b muestran las relaciones de desplazamiento para los dos niveles de amortiguamiento ya mencionados. Se puede ver como, en algunos casos, la diferencia que provoca la no linealidad del amortiguador sobrepasa el 10%. Tal diferencia aumenta cuando el porcentaje de amortiguamiento adicional es mayor. La diferencia es más pronunciada en el periodo de 2 s.

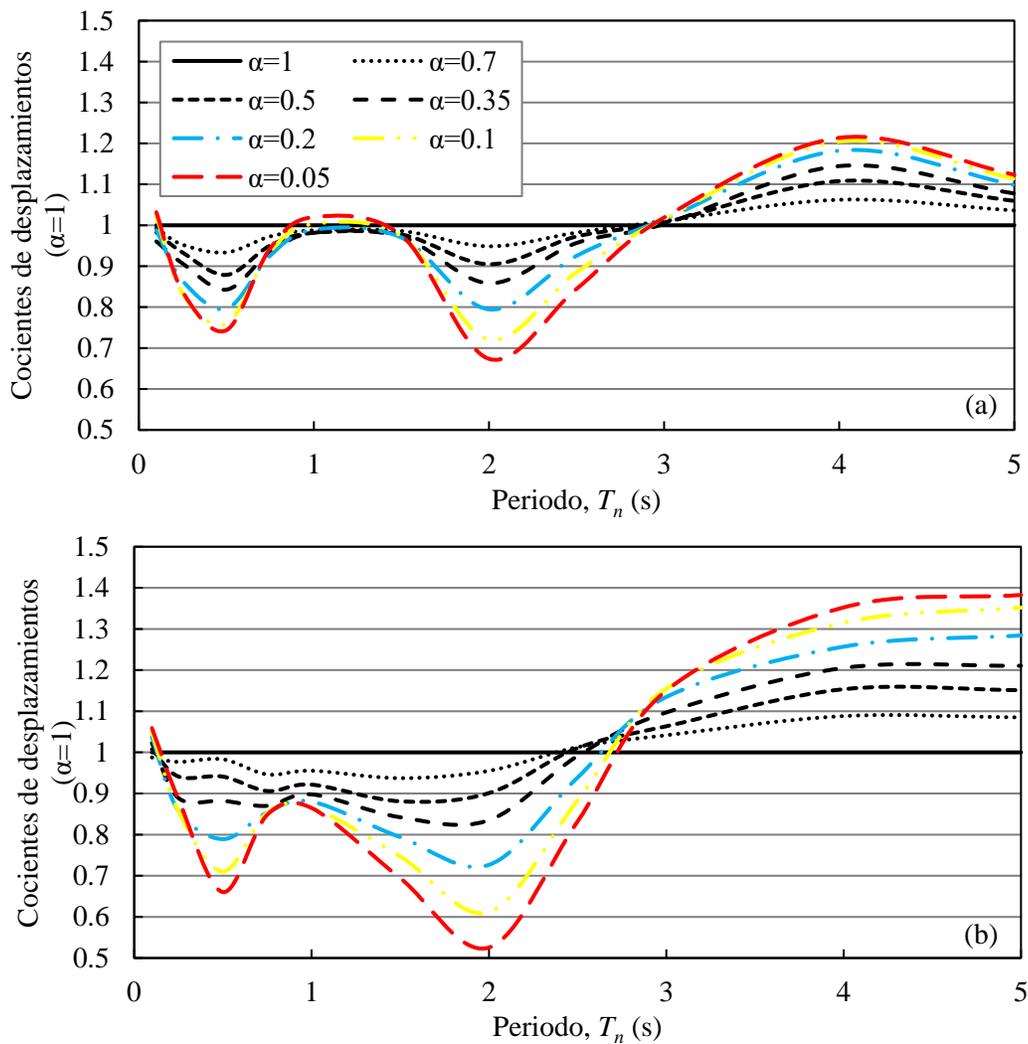


Figura 3.11. Relaciones de desplazamientos para los diferentes valores de α con respecto al amortiguador lineal (a) $\zeta_{sd}=15\%$ y (b) $\zeta_{sd}=30\%$

En ambos casos se presenta que, en estructuras con periodos mayores a 3 s, los desplazamientos picos son mayores con la no linealidad, lo cual puede representar una situación no conservadora. Es por eso que para controlar estas deformaciones pico, se podría adoptar un procedimiento iterativo para encontrar constantes de amortiguamiento viscoso no lineal, C_{NL} , que controlen mejor estos desplazamientos.

3.4. DISCUSIÓN

En esta sección se comparan los resultados de este estudio con aquellos obtenidos por Lin y Chopra (2002) en suelos firmes.

De acuerdo a los resultados de Lin y Chopra (2002) para suelos firmes, los amortiguadores viscosos no lineales tienen su principal ventaja en el hecho de presentar la misma reducción de la respuesta, con una significativa reducción en la fuerza de amortiguamiento, con excepción de estructuras de periodos muy cortos, ($T < 0.1$ s). Sin embargo, como se ha mostrado en este estudio, para registros como el descrito en las figuras 3.1, 3.2 y 3.3, la reducción de fuerzas de amortiguamiento provocada por la no linealidad de los amortiguadores, se cumple sólo para periodos mayores a 1.7 s (lo que representa la mayoría de las estructuras en cualquier ciudad del mundo).

En el estudio desarrollado por Lin y Chopra (2002) se utilizaron registros de sismos como el de Loma Prieta (1989), Northridge (1994), San Fernando (1971) y Superstition Hills, (1987). Las zonas espectrales de estos registros, están definidas como sigue: la zona sensible a la aceleración comprende periodos menores a 0.6 s, la zona sensible a la velocidad contiene periodos entre 0.6 s y 3 s, mientras que estructuras con periodo mayor a 3 s son sensibles al desplazamiento.

La figura 3.12 compara los espectros de respuesta de fuerza de amortiguamiento obtenida en este artículo (figura 3.9a), con la obtenida con un registro del sismo de Loma Prieta, en la estación Capitola (Lin y Chopra, 2002). Esta figura muestra que para registros como el de Loma Prieta, la no linealidad de los amortiguadores viscosos reduce las fuerzas de amortiguamiento, cuando se tiene periodos mayores a 0.1 s. Esto difiere con lo observado en este artículo, donde el cambio de tendencia se da hasta alrededor de 1.7 s, lo que representa una situación muy desfavorable para los amortiguadores viscosos no lineales, debido a que la gran mayoría de estructuras de la Ciudad de México se encuentran en esa zona espectral. Esto hace que el uso de este tipo de disipadores sísmicos pueda no ser económico, al necesitarse especificar mayores fuerzas en el amortiguador, aumentando su costo.

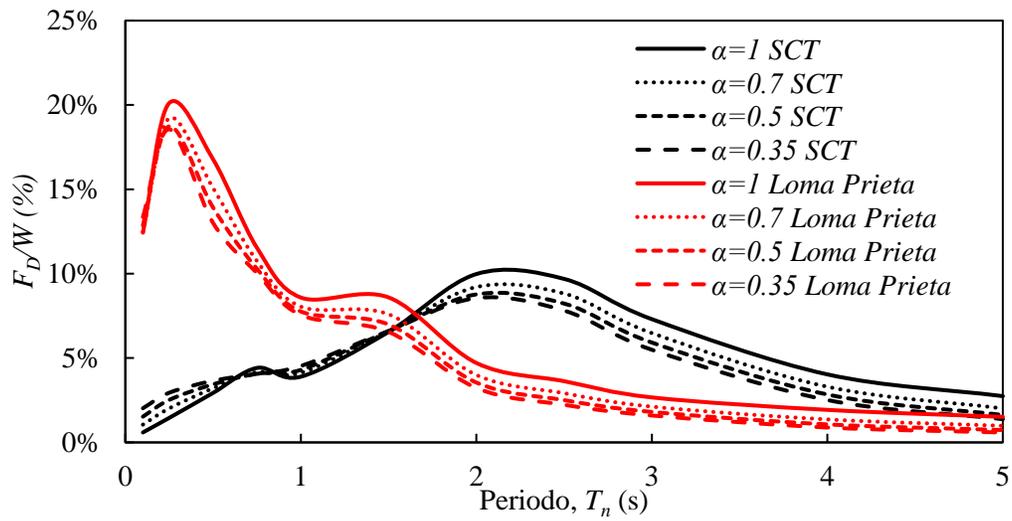


Figura 3.12. Espectros de respuesta para fuerzas de amortiguamiento, para el registro de la Ciudad de México (1985) y para el de Loma Prieta (1989), para un sistema de un grado de libertad con amortiguamiento inherente $\zeta=5\%$ y amortiguamiento adicional $\zeta_{sd}=15\%$

CAPÍTULO 4

RESPUESTA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD CON AMORTIGUADORES VISCOSOS NO LINEALES

Con la finalidad de observar el comportamiento de los amortiguadores viscosos no lineales en estructuras de varios grados de libertad, se analizaron seis estructuras, de 2, 5, 10, 15, 22 y 30 niveles, las cuales se describen a continuación.

4.1. DESCRIPCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS

4.1.1. Materiales

Se consideraron estructuras a base de marcos rígidos de concreto reforzado. Se consideró un sistema de piso a base de losa maciza de 15 cm de espesor, suponiendo diafragma rígido.

La tabla 4.1 muestra los materiales utilizados.

Tabla 4.1. Materiales

| | |
|------------------------|------------------------------|
| Concreto | $f'_c = 500 \text{ kg/cm}^2$ |
| Acero de refuerzo A615 | $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ |

4.1.2. Análisis de cargas

Las tablas 4.2 y 4.3 muestran las cargas muertas consideradas y las cargas vivas según las NTC (2017), respectivamente, considerándose un edificio para oficinas. El ancho tributario considerado fue de 6 metros.

Tabla 4.2. Cargas Muertas

| | |
|------------------|-----------------------|
| Losa | 360 kg/m ² |
| Muros divisorios | 100 kg/m ² |
| Acabados | 80 kg/m ² |
| Instalaciones | 20 kg/m ² |
| Sobrecarga | 40 kg/m ² |
| Total | 600 kg/m ² |

Tabla 4.3. Cargas Vivas

| | Entrepisos | Azotea |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Carga viva máxima, CVm | 250 kg/m ² | 100 kg/m ² |
| Carga viva instantanea, CVa | 180 kg/m ² | 70 kg/m ² |
| Carga viva media, CV | 181 kg/m ² | 15 kg/m ² |

4.1.3. Geometría y secciones

En las figuras 4.1 y 4.2 se muestra la geometría de cada modelo estudiado y sus respectivas secciones en la figura 4.3. Cabe señalar que se estudiaron estructuras en 2 dimensiones, en el plano XZ. Notese que las estructuras tienen el primer entrepiso de 4 m y los demás de 3 m. Se consideró base empotrada y se despreció la interacción suelo-estructura, por simplicidad.

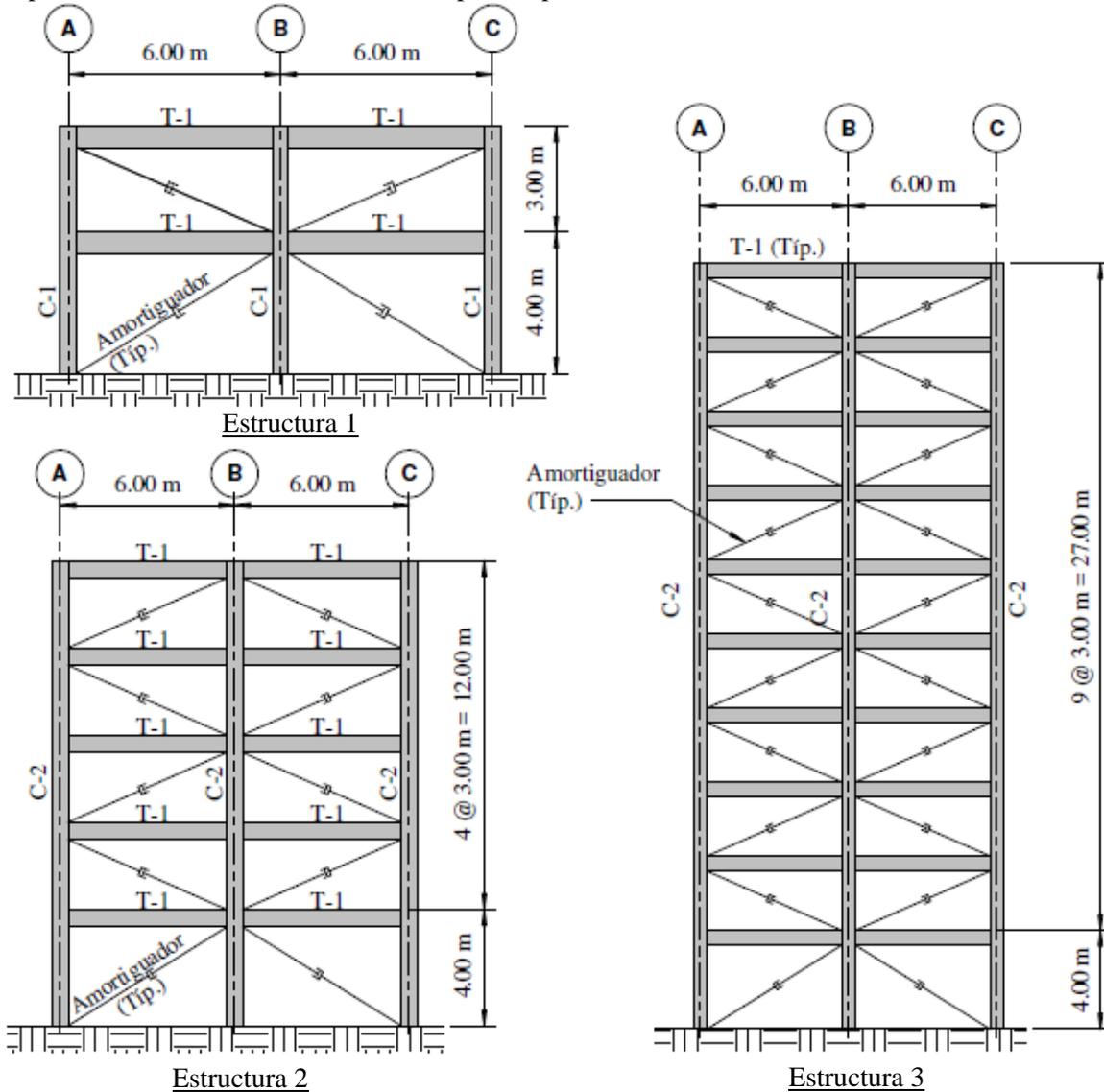


Figura 4.1. Características geométricas de las estructuras 1, 2 y 3

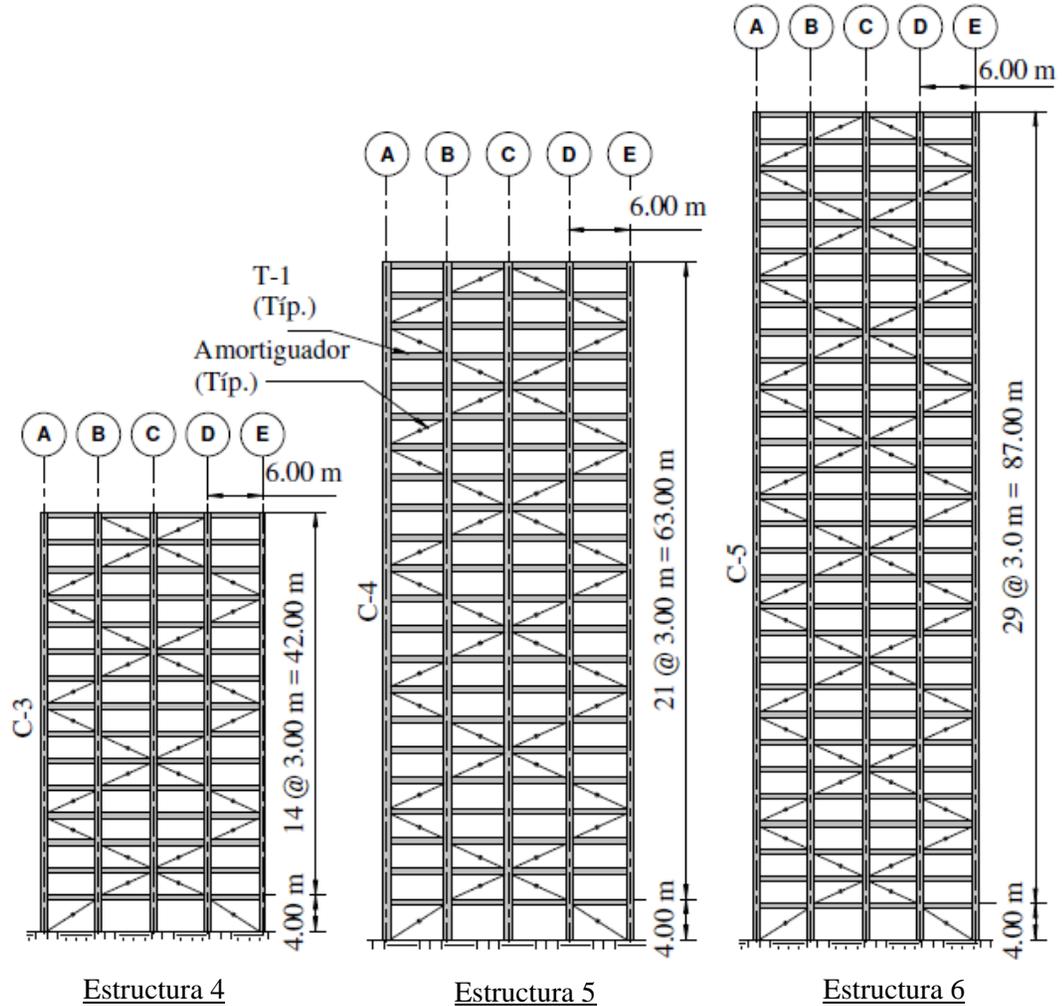


Figura 4.2. Características geométricas de las estructuras 4, 5 y 6

La figura 4.3 muestra las secciones de los elementos estructurales de los edificios estudiados. La sección T-1 representa la trabe que se utilizó para todos los niveles en las seis estructuras, es de dimensiones 30x60 cm y armada con 4 varillas de #6 en ambos lechos y estribos #4.

Las columnas se consideraron iguales en todos los niveles en cada una de las estructuras, la sección C-1 se utilizó en el edificio 1, la sección C-2 en los edificios 2 y 3, la sección C-3 en el edificio 4, la sección C-4 en el edificio 5 y la sección C-6 en la edificio 6.

La sección C-1 es una sección cuadrada de 50x50 cm con 8 varillas #6, la sección C-2 es de 55x55cm con 12#6, la sección C-3 es de 70x70 cm con 12#8, la sección C-4 es de 75x75 cm con 12#8, y la sección C-5 es de 85x85 cm con 16#8, en todos los casos se consideraron estribos #4.

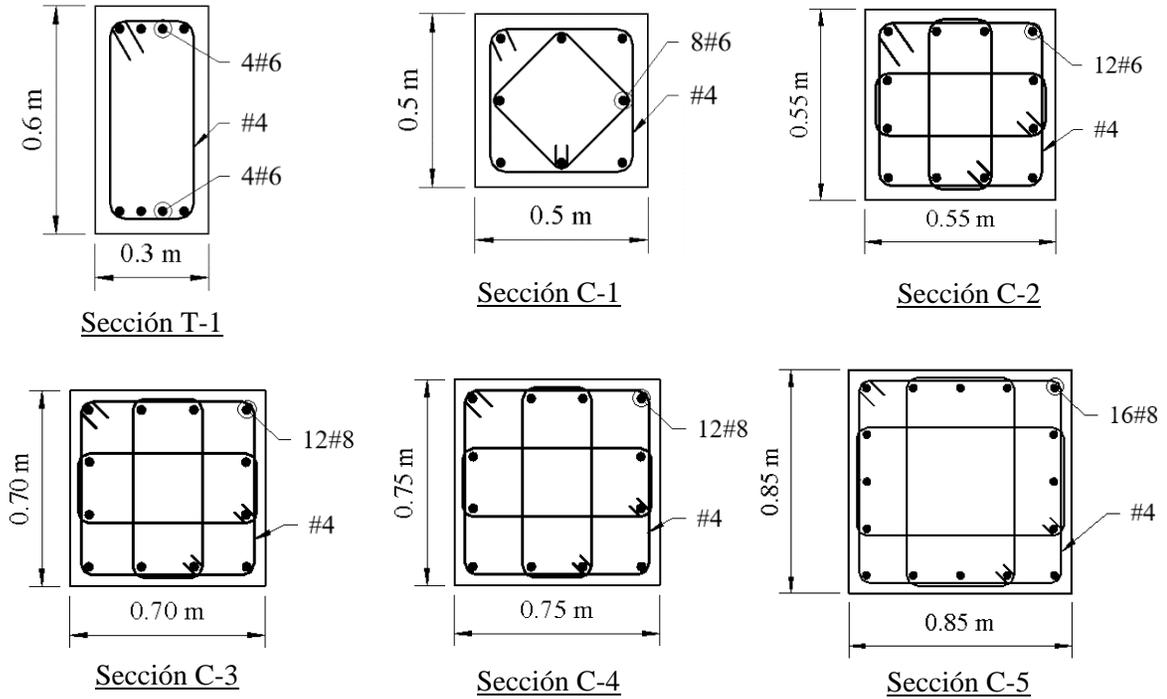


Figura 4.3. Secciones de vigas y columnas

4.1.4. Propiedades dinámicas

Las propiedades dinámicas de las estructuras estudiadas son mostradas en las tablas 4.4 a la 4.9, en ellas se indican los periodos, frecuencias, masas modales, factor de carga y participación, masa efectiva y el porcentaje de participación modal, esto para los modos de vibrar con al menos un 95% de participación.

4.1.4.1. Estructura 1

La tabla 4.4 muestra las propiedades dinámicas de la estructura 1. El primer modo de vibrar de la estructura tiene un periodo de 0.40 s y un porcentaje de participación de la masa efectiva del 95.9%. Mientras que el segundo modo tiene un periodo de 0.11 s y un 4.1% de participación de la masa efectiva. El factor de participación modal es de 1.16 y -0.16, para el modo 1 y el modo 2, respectivamente.

Tabla 4.4. Propiedades dinámicas de la estructura 1

| Propiedad | Modo 1 | Modo 2 |
|--|--------|--------|
| Periodo (s) | 0.40 | 0.11 |
| Frecuencia ω_n (rad/s) | 15.6 | 55.8 |
| Masa modal M_i^* (t) | 9.5 | 20.7 |
| Factor de carga L_I | 11.0 | -3.3 |
| Factor de participación modal Γ_I | 1.16 | -0.16 |
| Masa efectiva M_{ef}^* (t) | 12.7 | 0.4 |
| % Participación de M_{ef}^* | 95.9% | 4.1% |
| % Acumulado de M_{ef}^* | 95.9% | 100% |

La figura 4.4 muestra las formas modales de la estructura normalizadas a uno en la azotea, en el modo 1 se puede apreciar que los dos niveles se desplazan hacia el mismo lado, caso contrario al segundo modo, en el cual el nivel 1 se desplaza en sentido contrario y en una mayor magnitud a la del nivel 2.

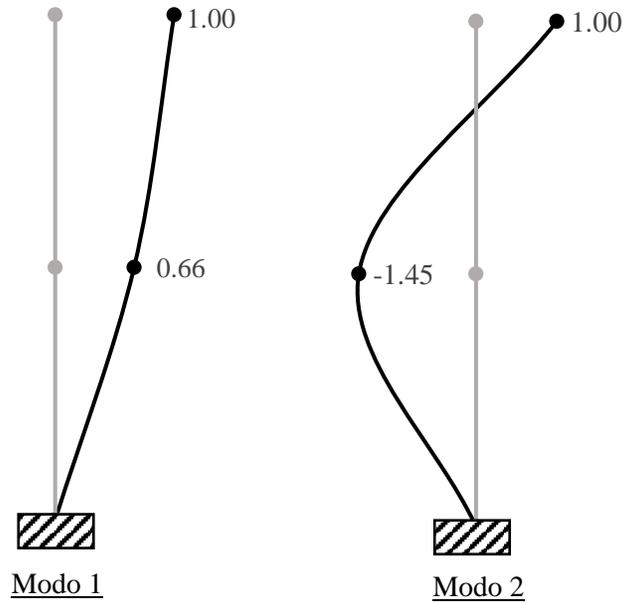


Figura 4.4. Formas modales de la estructura 1

4.1.4.2. Estructura 2

La tabla 4.5 muestra las propiedades dinámicas de la estructura 2. En ésta se puede observar que los primeros dos modos de vibrar acumulan un 96.3% de participación de la masa efectiva. El primer modo tiene un periodo de 0.74 s, un factor de participación modal de 1.28 y un 86.9% de participación de la masa efectiva. Mientras que el periodo del segundo modo es de 0.23 s, un factor de participación modal de -0.39 y un 9.4% de participación de la masa efectiva.

Tabla 4.5. Propiedades dinámicas de la estructura 2

| Propiedad | Modo 1 | Modo 2 |
|--|--------|--------|
| Periodo (s) | 0.74 | 0.23 |
| Frecuencia ω_n (rad/s) | 8.5 | 27.6 |
| Masa modal M_i^* (t) | 18.2 | 20.9 |
| Factor de carga L_i | 23.3 | -8.2 |
| Factor de participación modal Γ_i | 1.28 | -0.39 |
| Masa efectiva M_{ef}^* (t) | 29.9 | 3.2 |
| % Participación de M_{ef}^* | 86.9% | 9.4% |
| % Acumulado de M_{ef}^* | 86.9% | 96.3% |

Las formas modales de los primeros dos modos de estructura 2 se muestran en la figura 4.5. En el primer modo todos los niveles se desplazan en el mismo sentido, mientras que, en el segundo modo los primeros tres niveles se desplazan en sentido contrario a los últimos dos niveles.

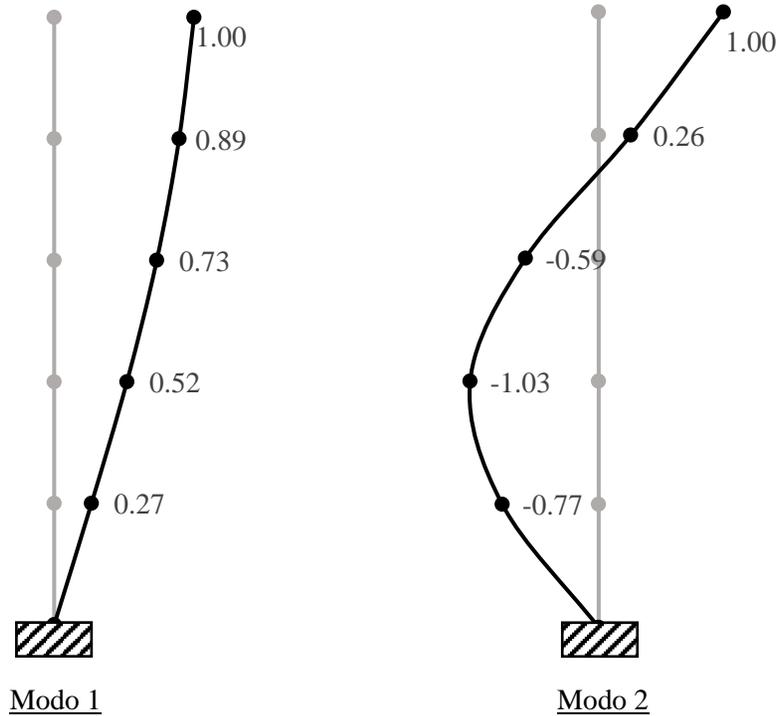


Figura 4.5. Formas modales de la estructura 2

4.1.4.3. Estructura 3

Las propiedades dinámicas de la estructura 3 se muestran en la tabla 4.6, en la cual se pueden observar los primeros tres modos de vibrar, los cuales acumulan un 96.5% de participación de la masa efectiva.

El modo 1 tiene un periodo de 1.47 s y un porcentaje de participación de la masa modal del 83.3%, mientras que los modos 2 y 3 tienen periodos de 0.47 y 0.27 s y porcentajes de participación de 10 y 3.2%, respectivamente.

Tabla 4.6. Propiedades dinámicas de la estructura 3

| Propiedad | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 |
|--|--------|--------|--------|
| Periodo (s) | 1.47 | 0.47 | 0.27 |
| Frecuencia ω_n (rad/s) | 4.3 | 13.3 | 23.7 |
| Masa modal M_i^* (t) | 34.1 | 35.3 | 38.4 |
| Factor de carga L_I | 44.2 | -15.6 | 9.2 |
| Factor de participación modal Γ_I | 1.30 | -0.44 | 0.24 |
| Masa efectiva M_{ef}^* (t) | 57.5 | -0.4 | 0.2 |
| % Participación de M_{ef}^* | 83.3% | 10.0% | 3.2% |
| % Acumulado de M_{ef}^* | 83.3% | 93.3% | 96.5% |

En la figura 4.6 se muestran las formas modales de la estructura en sus tres primeros modos de vibrar. En el modo 1 todos los niveles se desplazan en el mismo sentido, mientras que en el modo 2 los primeros

7 niveles se desplazan en sentido contrario a los últimos 3. Por su parte, en el modo 3 los niveles 1 al 4 se desplazan en el mismo sentido a los dos últimos niveles, mientras que los niveles 5 al 8 lo hacen en sentido contrario.

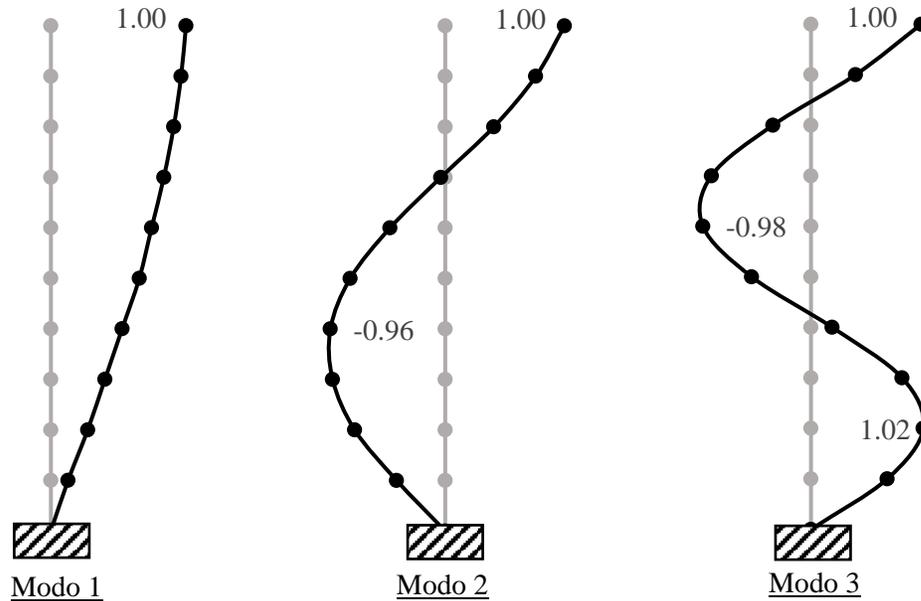


Figura 4.6. Formas modales de la estructura 3

4.1.4.4. Estructura 4

La tabla 4.7 contiene las propiedades dinámicas de la estructura 4 y se puede observar que los primeros cuatro modos de vibrar acumulan un porcentaje de participación del 96.3%. El primer modo de vibrar tiene un periodo de 2.02 s, un factor de participación modal de 1.31 y un 80.9% de participación modal.

Tabla 4.7. Propiedades dinámicas de la estructura 4

| Propiedad | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 | Modo 4 |
|--|--------|--------|--------|--------|
| Periodo (s) | 2.02 | 0.65 | 0.37 | 0.24 |
| Frecuencia ω_n (rad/s) | 3.1 | 9.7 | 17.1 | 25.7 |
| Masa modal M_i^* (t) | 101.2 | 100.9 | 100.4 | 107.5 |
| Factor de carga L_I | 132.4 | -45.7 | 28.3 | -21.4 |
| Factor de participación modal Γ_I | 1.31 | -0.45 | 0.28 | -0.20 |
| Masa efectiva M_{ef}^* (t) | 173.2 | 20.7 | 8.0 | 4.3 |
| % Participación de M_{ef}^* | 80.9% | 9.7% | 3.7% | 2.0% |
| % Acumulado de M_{ef}^* | 80.9% | 90.6% | 94.3% | 96.3% |

En la figura 4.7 se pueden observar las formas modales de la estructura 4 en sus primeros cuatro modos de vibrar, los primeros tres modos presentan una configuración similar a la descrita para la figura 4.6, mientras que en el cuarto modo los niveles 5 al 9 se desplazan en el mismo sentido que los últimos dos niveles, mientras que el resto se mueve en sentido contrario.

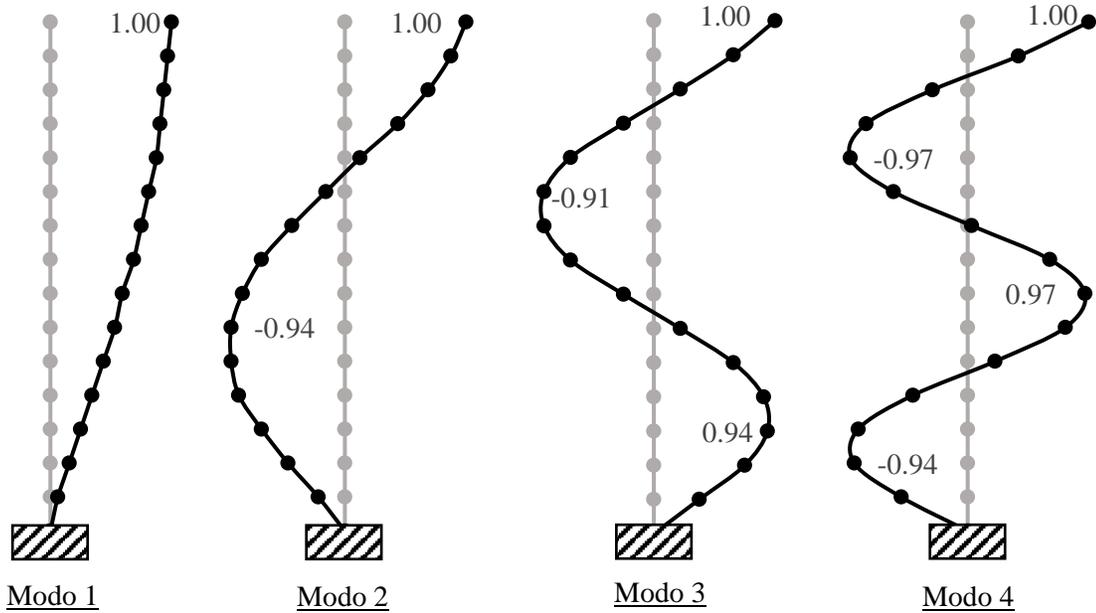


Figura 4.7. Formas modales de la estructura 4

4.1.4.5. Estructura 5

Las propiedades dinámicas de la estructura 5 se muestran en la tabla 4.8, en la cual se puede observar que los primeros cuatro modos de vibrar acumulan un 95.84% de participación de la masa modal efectiva.

El primer modo de vibrar de la estructura tiene un periodo de 2.97 s, un factor de participación modal de 1.29 y un porcentaje de participación de la masa efectiva del 80.1%. Mientras que los modos 2, 3 y 4 tienen periodos de 0.97, 0.55 y 0.37 s, respectivamente.

Tabla 4.8. Propiedades dinámicas de la estructura 5

| Propiedad | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 | Modo 4 |
|--|--------|--------|--------|--------|
| Periodo (s) | 2.97 | 0.97 | 0.55 | 0.37 |
| Frecuencia ω_n (rad/s) | 2.1 | 6.5 | 11.5 | 16.9 |
| Masa modal M_i^* (t) | 153.1 | 152.3 | 142.2 | 142.3 |
| Factor de carga L_i | 198.1 | -70.6 | 40.1 | -30.3 |
| Factor de participación modal Γ_i | 1.29 | -0.46 | 0.28 | -0.21 |
| Masa efectiva M_{ef}^* (t) | 256.3 | 32.5 | 11.3 | 6.5 |
| % Participación de M_{ef}^* | 80.1% | 10.2% | 3.5% | 2.0% |
| % Acumulado de M_{ef}^* | 80.1% | 90.3% | 93.8% | 95.8% |

La figura 4.8 muestra las primeras cuatro formas modales de la estructura 5. En ésta se puede observar que tienen una configuración similar a la de la estructura 4, descrita en la figura 4.7, en la cual en el primer modo todos los niveles se desplazan en el mismo sentido, mientras que en el resto de los modos los niveles se desplazan en diferente sentido, siendo mas variable en el modo 4.

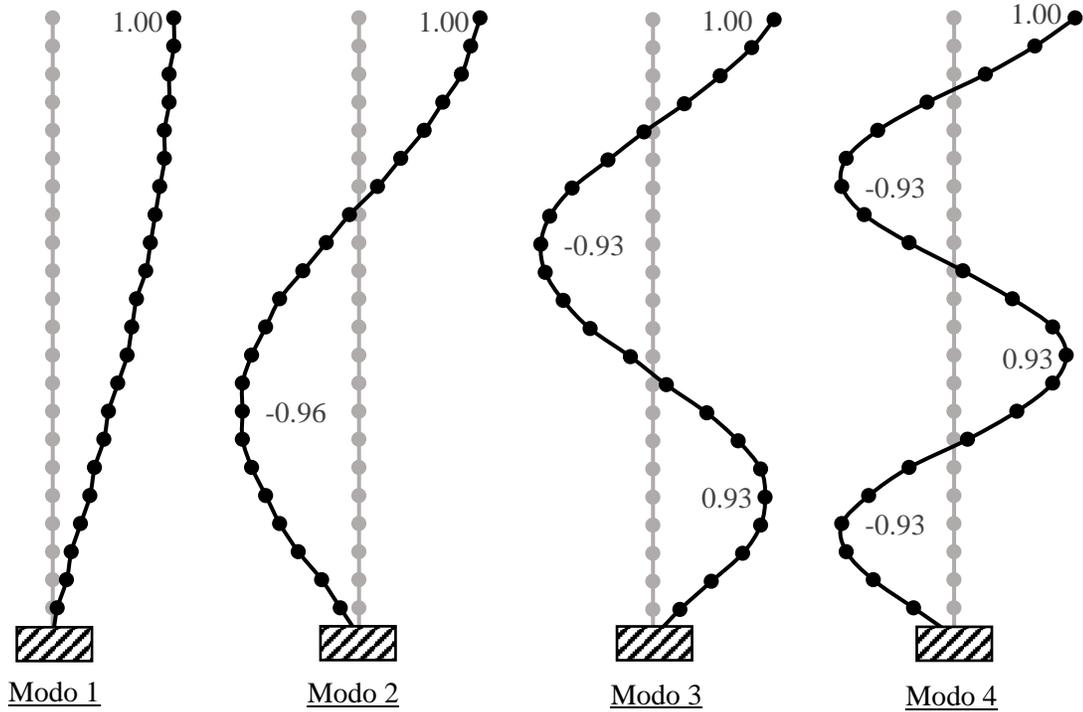


Figura 4.8. Formas modales de la estructura 5

4.1.4.6. Estructura 6

La tabla 4.9 contiene las propiedades dinámicas de la estructura 6 y se puede observar que los primeros cinco modos de vibrar acumulan un porcentaje de participación del 96.0%. El primer modo de vibrar tiene un periodo de 4.08 s, un factor de participación modal de 1.30 y un 78.8% de participación modal.

Tabla 4.9. Propiedades dinámicas de la estructura 6

| Propiedad | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 | Modo 4 | Modo 5 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| Periodo (s) | 4.08 | 1.32 | 0.75 | 0.51 | 0.38 |
| Frecuencia ω_n (rad/s) | 1.54 | 4.75 | 8.39 | 12.32 | 16.71 |
| Masa modal M_i^* (t) | 201.97 | 201.40 | 187.98 | 186.95 | 172.53 |
| Factor de carga L_1 | 262.08 | -93.62 | 53.52 | -40.42 | 29.26 |
| Factor de participación modal Γ_1 | 1.30 | -0.47 | 0.29 | -0.22 | 0.17 |
| Masa efectiva M_{ef}^* (t) | 340.10 | 43.52 | 15.24 | 8.74 | 4.96 |
| % Participación | 78.8% | 10.4% | 3.6% | 2.0% | 1.2% |
| % Acumulado | 78.8% | 89.2% | 92.8% | 94.8% | 96.0% |

En la figura 4.9 se pueden observar las formas modales de la estructura 6 en sus primeros cinco modos de vibrar, normalizados a uno en la azotea.

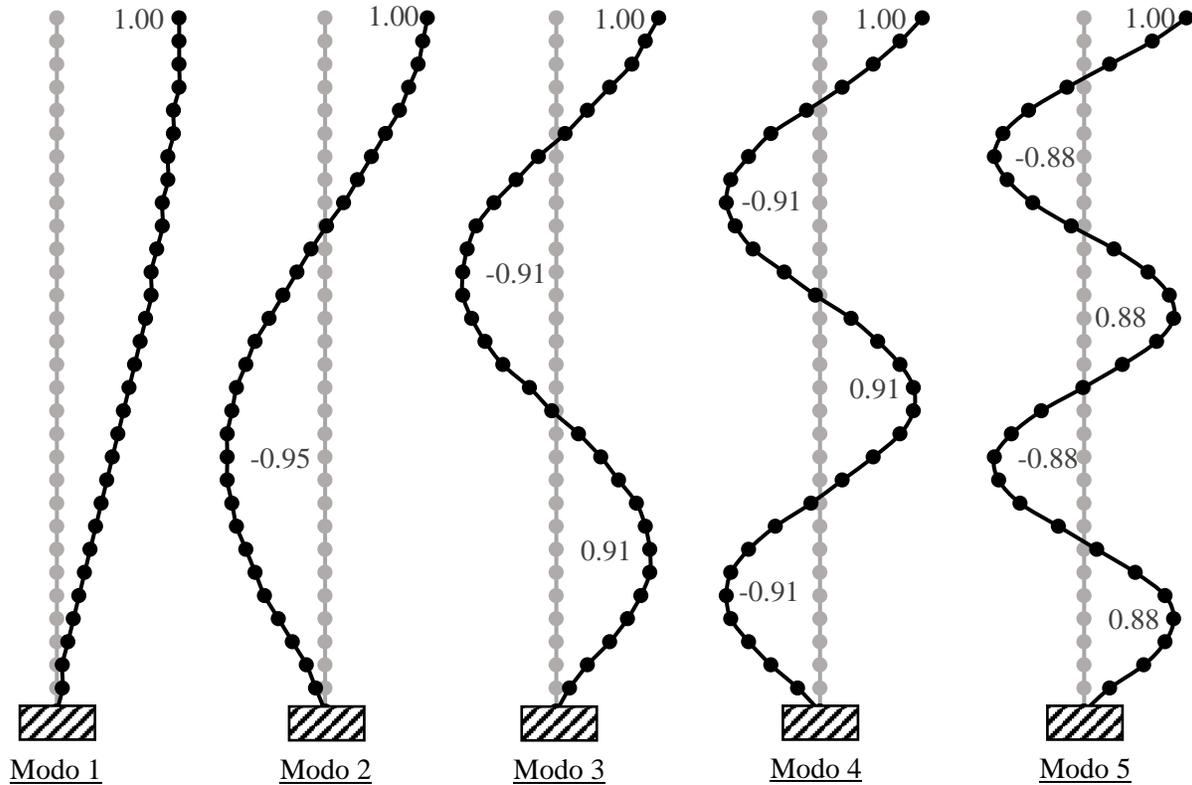


Figura 4.9. Formas modales de la estructura 6

4.1.5. Respuesta sísmica de las estructuras sin amortiguadores

Las estructuras previamente descritas, se sometieron al registro de aceleraciones de SCT (Sección 3.1). Se realizó un análisis en el tiempo, considerando comportamiento elástico lineal de las estructuras y un amortiguamiento inherente del 5%.

A continuación, se presenta la respuesta de las estructuras, en términos de su desplazamiento máximo, distorsión máxima y cortante de entrepiso. En las figuras 4.10 a 4.15 de distorsión máxima se indica el límite de las NTC(2017) como referencia.

4.1.5.1. Estructura 1

La figura 4.10 muestra la respuesta máxima de la estructura 1 sin amortiguadores. En ésta se pueden observar los desplazamientos máximos por nivel, el cual es menor a un centímetro en la azotea. Mientras que la distorsión máxima se presenta en el primer nivel, y se puede observar que es mucho menor al límite establecido por las NTC (2017) para el tipo de estructura estudiada.

También, es posible observar el cortante de entrepiso máximo, el cual es de 26.03 toneladas en el primer entrepiso, lo que representa aproximadamente el 20% del peso total de la estructura. En el segundo nivel el cortante es de 13.37 toneladas.

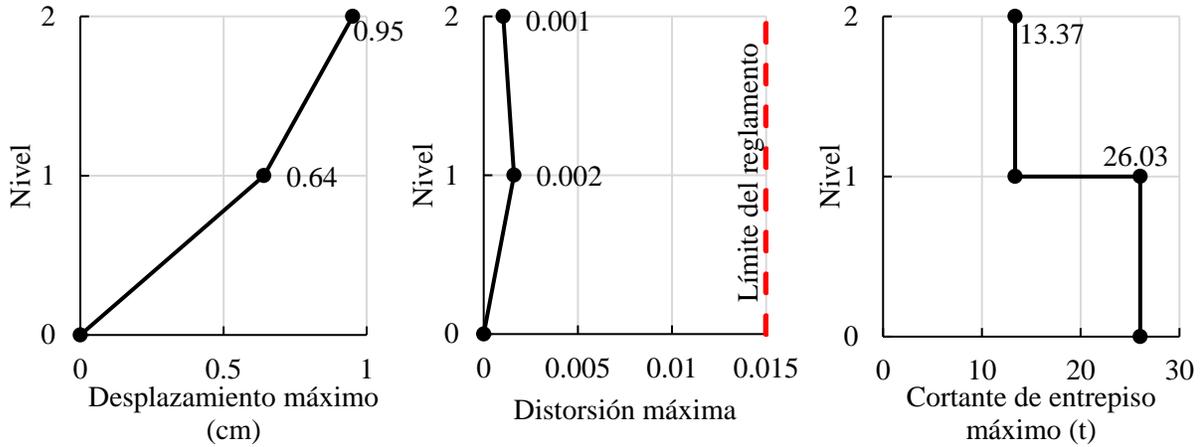


Figura 4.10. Respuestas máximas de la estructura 1

4.1.5.2. Estructura 2

La respuesta sísmica de la estructura 2 sin amortiguadores se muestra en la figura 4.11. En ésta se puede observar que el desplazamiento máximo en la azotea es de 5.51 cm, mientras que la distorsión máxima se presenta en el segundo nivel y es de 0.005, menor al límite del reglamento.

Además, se puede observar que el cortante de entrepiso máximo es de 95.10 toneladas en el primer nivel, representando un 28% del peso total de la estructura.

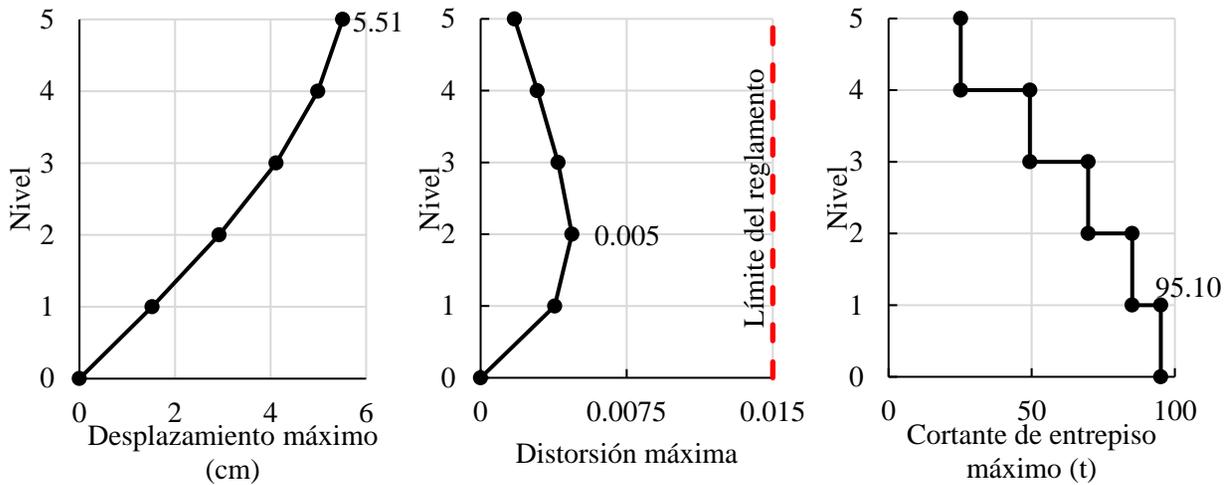


Figura 4.11. Respuestas máximas de la estructura 2

4.1.5.3. Estructura 3

En la figura 4.12 se muestra la respuesta máxima de la estructura 3. En lo que respecta a desplazamientos, el desplazamiento máximo presentado en la azotea es de 25.59 cm, mientras que la distorsión de entrepiso máxima se encuentra en el nivel 2, siendo ligeramente menor al límite.

El cortante de entrepiso máximo en el primer nivel es de 228 toneladas, representando el 34% del peso total de la estructura.

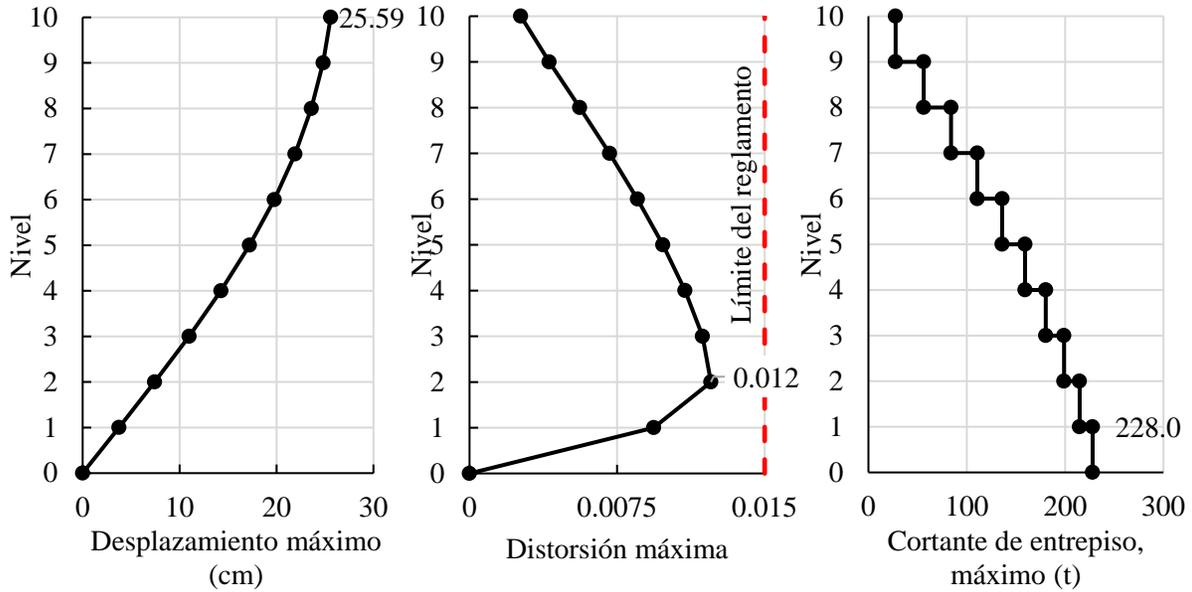


Figura 4.12. Respuestas máximas de la estructura 3

4.1.5.4. Estructura 4

La respuesta de la estructura 4 sin amortiguadores se muestra en la figura 4.13. El desplazamiento máximo en la azotea fue de 125.12 cm, mientras que la distorsión máxima de entrepiso se encuentra en el tercer nivel, además se puede observar que la mayoría de los niveles de la estructura rebasan el límite del reglamento para distorsiones de entrepiso.

El cortante de entrepiso máximo en el primer nivel es de 1673.4 toneladas, lo que es aproximadamente el 80% del peso total de la estructura.

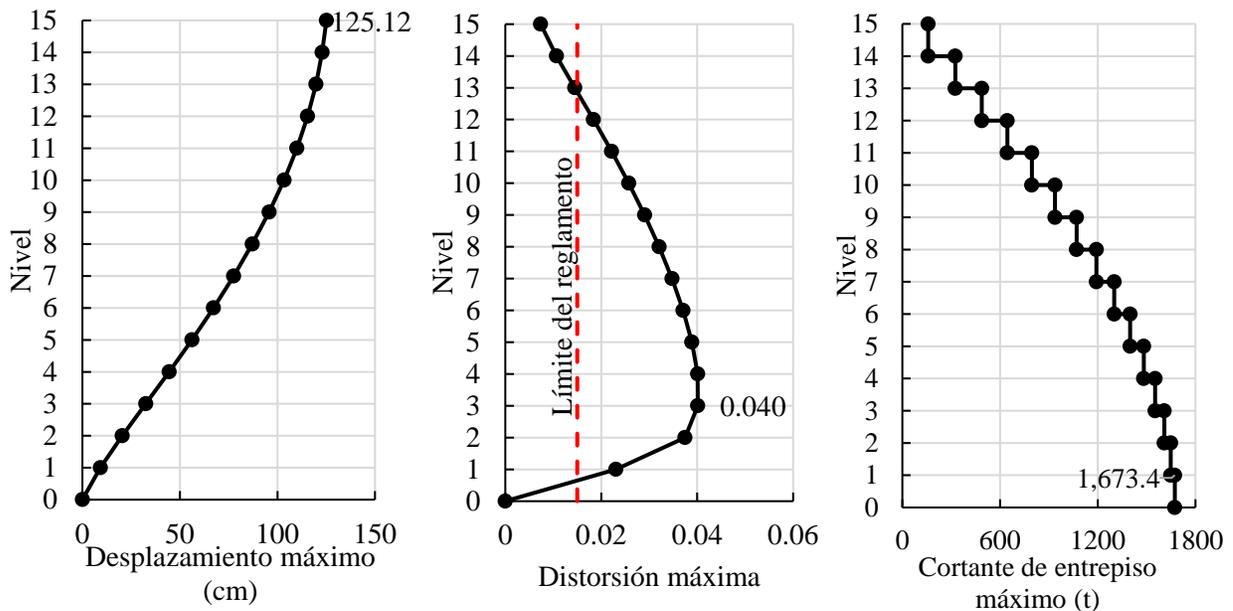


Figura 4.13. Respuestas máximas de la estructura 4

4.1.5.5. Estructura 5

La figura 4.14 muestra la respuesta de la estructura 5 sin amortiguadores. En ésta se puede apreciar el desplazamiento máximo en la azotea de 98.75 cm y una distorsión máxima en el nivel 6 de 0.02, sobrepasando el límite permisible por el reglamento la mayoría de sus niveles.

Por otra parte, el cortante de entrepiso máximo de encuentra en el nivel 5, siendo este de 786.4 toneladas, aproximadamente un 25% del peso total de la estructura. Mientras que en el nivel 1, el cortante máximo fue de 749.13 toneladas.

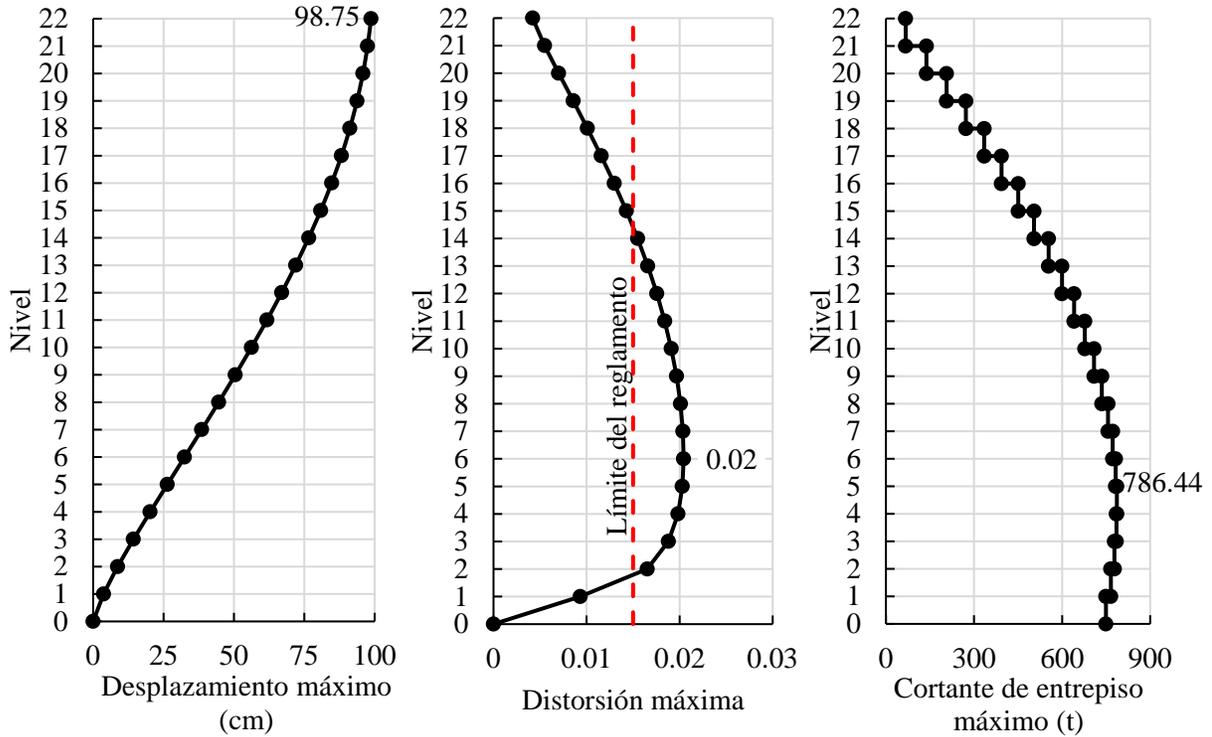


Figura 4.14. Desplazamientos y distorsiones máximas de la estructura 5

4.1.5.6. Estructura 6

La figura 4.15 muestra la respuesta de la estructura 6 sin amortiguadores. En ésta se puede apreciar el desplazamiento máximo en la azotea de 60.37 cm y una distorsión máxima en el nivel 9 de 0.009, siendo menor al límite permisible por el reglamento.

Ademas, se muestra el cortante de entrepiso máximo para cada nivel, y se puede observar que el mayor se encuentra en el nivel 8, siendo de 349.9 toneladas, aproximadamente un 8% del peso total de la estructura. Por otra parte, el cortante máximo en el primer nivel fue de 312.5 toneladas.

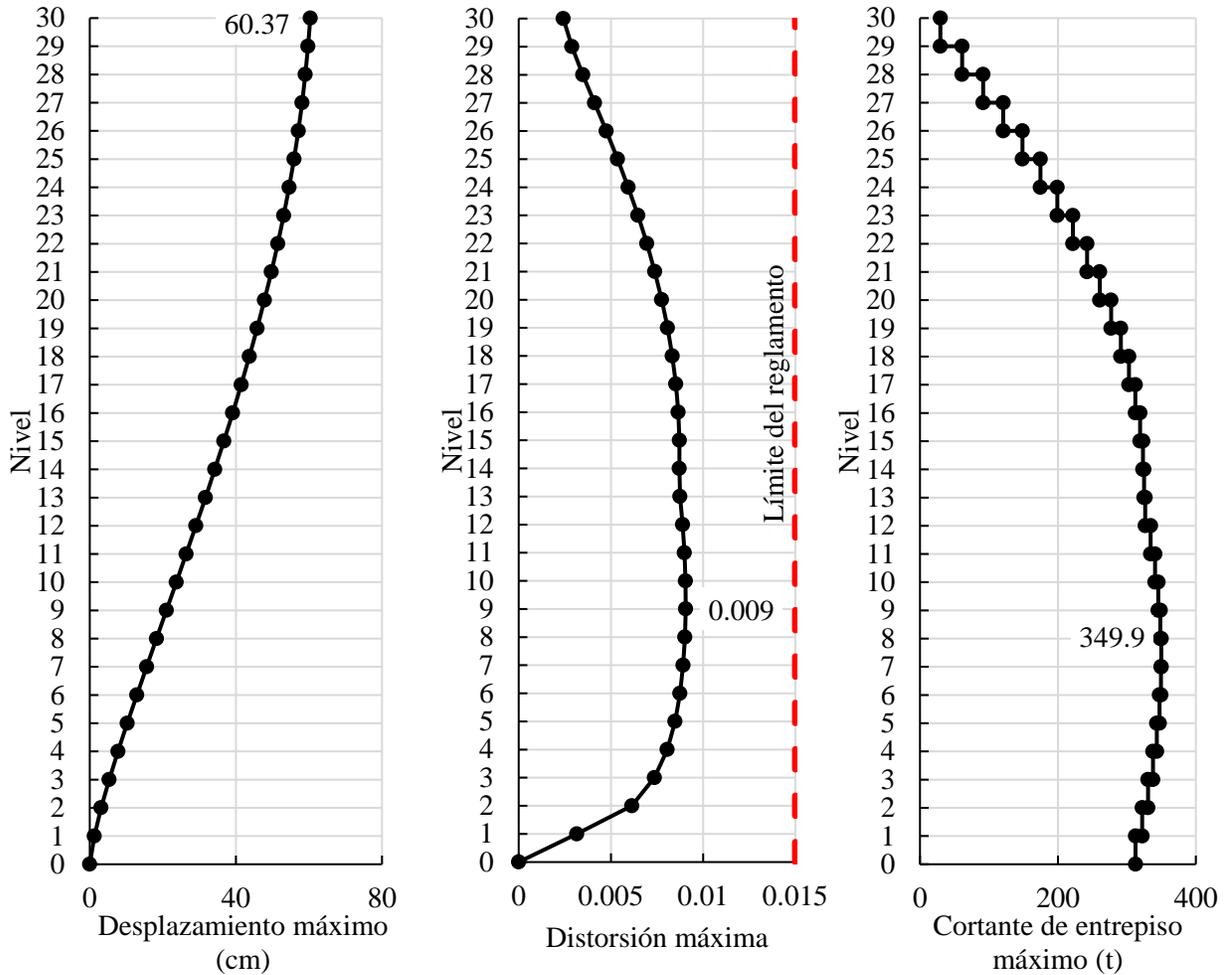


Figura 4.15. Desplazamientos y distorsiones máximas de la estructura 6

4.2. DISEÑO DE LOS AMORTIGUADORES VISCOSOS

Las estructuras descritas en la sección 4.1 se equiparon con amortiguadores viscosos lineales y no lineales, considerando un amortiguamiento adicional del 30% y un 5% de amortiguamiento inherente. En el caso de los amortiguadores viscosos no lineales se utilizarán tres valores para el exponente de velocidad α , estos fueron 0.5, 0.2 y 0.05. Como se ha mencionado anteriormente, usualmente se toman valores entre 0.2 y 1.0, pero en este caso se ha seleccionado también un valor de 0.05, ya que actualmente se ha comenzado a utilizar y es de interés observar su comportamiento comparado con los demás.

4.2.1. Diseño de amortiguadores viscosos lineales

Primero, se diseñaron los amortiguadores viscosos lineales. Las constantes de amortiguamiento lineal se obtuvieron siguiendo el procedimiento propuesto por Christopoulos y Filiatrault (2006), el cual considera que el amortiguamiento lineal produce una matriz de amortiguamiento proporcional a la rigidez.

El método consiste básicamente en definir una estructura con contraventeos ficticios, de tal rigidez que se tenga un periodo hipotético previamente definido para el nivel de amortiguamiento deseado. A partir de la rigidez de estos contraventeos ficticios se puede obtener la constante de amortiguamiento que provee un amortiguamiento aproximado al deseado. El procedimiento es el siguiente:

-*Paso 1.* Se obtienen las propiedades de la estructura inicial sin contraventeos, principalmente su periodo fundamental, T_1 .

-*Paso 2.* Seleccionar el porcentaje de amortiguamiento adicional proporcionado por los amortiguadores viscosos ζ_{sd} . Se recomienda usar hasta un 35% de amortiguamiento, como máximo.

-*Paso 3.* Calcular el periodo, \hat{T}_1 , para la estructura hipotética contraventeada, con la siguiente ecuación (Christopoulos y Filiatrault, 2006):

$$\hat{T}_1 = \frac{T_1}{\sqrt{2\zeta_{sd} + 1}} \quad (30)$$

-*Paso 4.* Colocar los contraventeos hipotéticos en la posición de los amortiguadores. La rigidez debe ser proporcional a la de los entresijos de la estructura sin amortiguadores. Esta rigidez debe ser tal que lleve a la estructura a tener el periodo hipotético, \hat{T}_1 , calculado en el paso 3. Para llegar a dicho periodo se puede llevar a cabo un proceso iterativo cambiando de manera proporcional el valor de la rigidez hipotética de cada amortiguador, \hat{k}_i .

-*Paso 5.* Obtener la constante de amortiguamiento lineal, C_{L_i} , para el i -ésimo amortiguador, a partir de la rigidez de los amortiguadores calculada en el paso 4, utilizando la siguiente ecuación (Christopoulos y Filiatrault, 2006):

$$C_{L_i} = \hat{k}_i \frac{T_1}{2\pi} \quad (31)$$

-*Paso 6.* La geometría final de los dispositivos se determinará al realizar análisis dinámicos en la estructura con los amortiguadores y obtener las fuerzas y los desplazamientos máximos a los que estarán sujetos los amortiguadores.

4.2.1.1. Estructura 1

La configuración de los amortiguadores de la estructura 1 se mostró en la figura 4.1, estos se diseñaron con el procedimiento descrito en el punto 4.2.1. En la tabla 4.10 se muestran las constantes de amortiguamiento lineal, C_{L_i} , para cada amortiguador por nivel.

Tabla 4.10. Amortiguadores de la estructura 1

| Nivel | Constante de Amortiguamiento, C_{L_i} (t·s/m) |
|-------|--|
| 1 | 110.21 |
| 2 | 115.53 |

Como se ha mencionado anteriormente, el método es aproximado, por lo cual a continuación se presenta la comparación entre la respuesta en términos de los desplazamientos en la azotea, para la estructura con

amortiguadores viscosos lineales ($\zeta_{sd}=30\%$ y $\zeta=5\%$) y la de la estructura considerando el 35% de amortiguamiento de Rayleigh.

El desplazamiento máximo para la estructura con amortiguadores lineales es 0.771 cm, mientras que considerando el 35% de amortiguamiento de Rayleigh es de 0.772 cm, lo que significa que la diferencia es menor al 0.1%. Con esto se puede considerar que los amortiguadores lineales que se muestran en la tabla 4.9 para la estructura 1 aportan el 30% de amortiguamiento adicional.

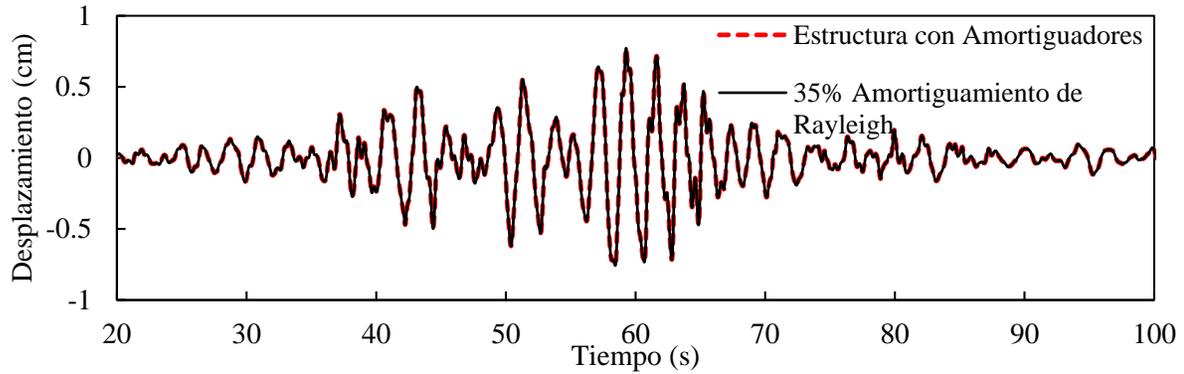


Figura 4.16. Desplazamientos en la azotea de la estructura 1 con amortiguadores lineales.

4.2.1.2. Estructura 2

En la figura 4.1 se indicó la ubicación de los amortiguadores para la estructura 2. En tabla 4.11 se muestran las constantes de amortiguamiento lineal, C_L , para cada amortiguador por nivel.

Tabla 4.11. Amortiguadores de la estructura 2

| Nivel | Constante de Amortiguamiento, C_L (t·s/m) |
|-------|--|
| 1 | 340.20 |
| 2 | 289.69 |
| 3 | 251.84 |
| 4 | 227.89 |
| 5 | 189.06 |

En la figura 4.17 se muestra la comparación entre la respuesta en términos de los desplazamientos en la azotea, para la estructura con amortiguadores y la de la estructura considerando el 35% de amortiguamiento de Rayleigh.

El desplazamiento máximo para la estructura con amortiguadores lineales es 2.914 cm, mientras que considerando el 35% de amortiguamiento de Rayleigh es de 2.917 cm, siendo la diferencia menor al 0.1%. Se puede considerar que el diseño de los amortiguadores mostrados en la tabla 4.10, aportan el 30% de amortiguamiento adicional deseado.

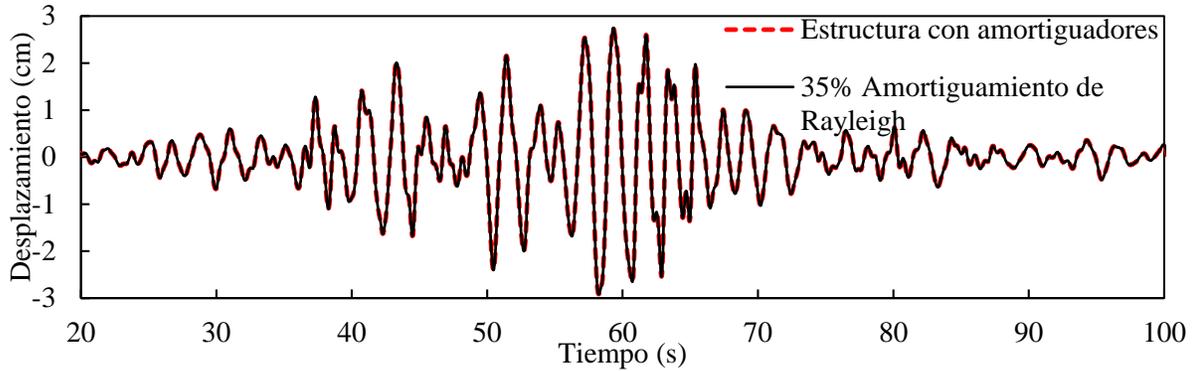


Figura 4.17. Desplazamientos en la azotea de la estructura 2 con amortiguadores lineales.

4.2.1.3. Estructura 3

La colocación de los amortiguadores de la estructura 3 se puede observar en la figura 4.1, mientras que en la tabla 4.12 se muestran las constantes de amortiguamiento lineal, C_L , calculados para cada uno de los 10 niveles de la estructura.

Tabla 4.12. Amortiguadores de la estructura 3

| Nivel | Constante de Amortiguamiento, C_L (t·s/m) |
|-------|--|
| 1 | 630.31 |
| 2 | 594.38 |
| 3 | 568.40 |
| 4 | 555.91 |
| 5 | 546.37 |
| 6 | 535.80 |
| 7 | 522.47 |
| 8 | 502.49 |
| 9 | 464.31 |
| 10 | 357.74 |

En la figura 4.18 se puede observar la respuesta en términos de los desplazamientos en la azotea para la estructura con amortiguadores lineales que se muestran en la tabla 4.12, y la respuesta de la estructura considerando un 35% de amortiguamiento de Rayleigh.

El desplazamiento máximo para la estructura con amortiguadores lineales es 15.02 cm, mientras que considerando el 35% de amortiguamiento de Rayleigh es de 16.26 cm, siendo la diferencia un poco menor al 1.6%, que, aunque es mayor que las diferencias observadas en los diseños de la estructura 1 y 2, es aproximada al 35% de amortiguamiento total que se desea.

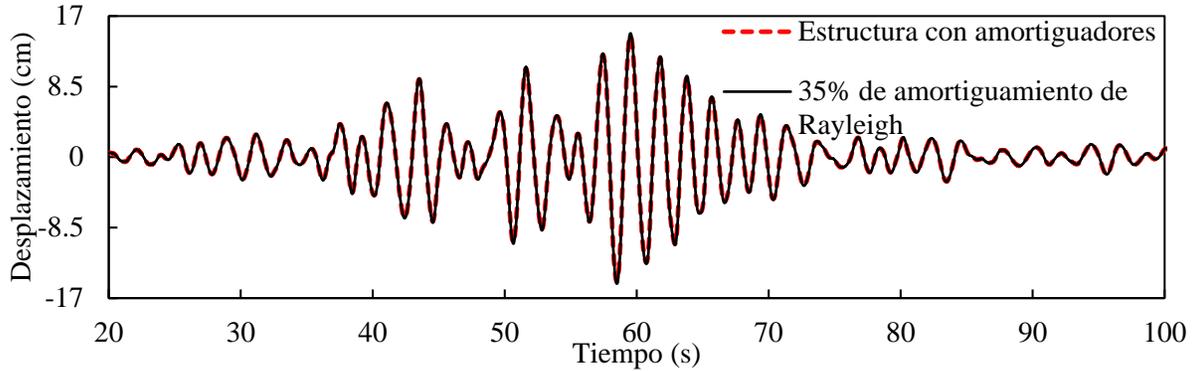


Figura 4.18. Desplazamientos en la azotea de la estructura 3 con amortiguadores lineales.

4.2.1.4. Estructura 4

La figura 4.2 muestra la colocación de los amortiguadores en la estructura 4, teniendo dos dispositivos en cada uno de los 15 niveles. En la tabla 4.13 se indican las constantes de amortiguamiento lineal, C_{Li} , calculadas para cada uno de sus amortiguadores.

Tabla 4.13. Amortiguadores de la estructura 4

| Nivel | Constante de Amortiguamiento, C_{Li} (t·s/m) |
|-------|---|
| 1 | 2540.8 |
| 2 | 1994.6 |
| 3 | 1806.0 |
| 4 | 1735.6 |
| 5 | 1703.4 |
| 6 | 1684.6 |
| 7 | 1668.5 |
| 8 | 1653.4 |
| 9 | 1636.1 |
| 10 | 1614.9 |
| 11 | 1587.5 |
| 12 | 1547.3 |
| 13 | 1480.3 |
| 14 | 1338.0 |
| 15 | 945.4 |

En la figura 4.19 se muestran los desplazamientos de la estructura con amortiguadores lineales y la estructura con un 35% de amortiguamiento de Rayleigh, en el primer caso el desplazamiento máximo es de 29.25 cm, y en el segundo de 30.00 cm, la diferencia entre estos desplazamientos es apenas superior al 2%.

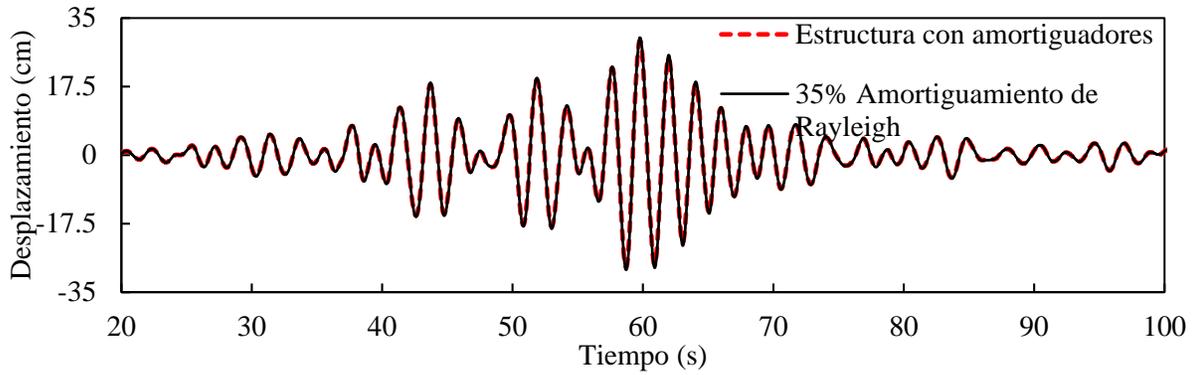


Figura 4.19. Desplazamientos en la azotea de la estructura 4 con amortiguadores lineales.

4.2.1.5. Estructura 5

La ubicación de los amortiguadores de la estructura 5 se muestran en la figura 4.2. En la tabla 4.14 se indican las constantes de amortiguamiento lineal, C_L , para cada dispositivo por nivel.

Tabla 4.14. Amortiguadores de la estructura 5

| Nivel | Constante de Amortiguamiento, C_L (t·s/m) |
|-------|--|
| 1 | 4492.0 |
| 2 | 3345.9 |
| 3 | 2956.7 |
| 4 | 2806.9 |
| 5 | 2736.8 |
| 6 | 2696.4 |
| 7 | 2667.0 |
| 8 | 2641.9 |
| 9 | 2617.5 |
| 10 | 2592.8 |
| 11 | 2566.6 |
| 12 | 2538.1 |
| 13 | 2506.4 |
| 14 | 2470.7 |
| 15 | 2428.1 |
| 16 | 2377.8 |
| 17 | 2313.9 |
| 18 | 2231.9 |
| 19 | 2113.9 |
| 20 | 1935.5 |
| 21 | 1630.6 |
| 22 | 1024.7 |

En la figura 4.20 se muestra la comparación entre la respuesta en términos de los desplazamientos en la azotea, para la estructura con amortiguadores y la de la estructura considerando el 35% de amortiguamiento de Rayleigh.

El desplazamiento máximo de la estructura con amortiguadores es de 39.50 cm, mientras que el de la estructura con 30% de amortiguamiento de Rayleigh es de 40.06 cm. La diferencia es de apenas el 1.4%, por lo que se puede decir que los amortiguadores diseñados logran el amortiguamiento deseado.

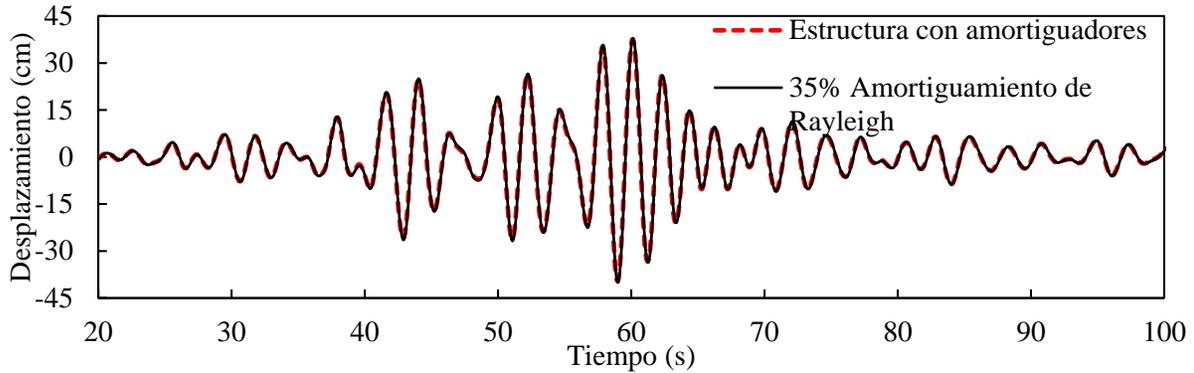


Figura 4.20. Desplazamientos en la azotea de la estructura 5 con amortiguadores lineales.

4.2.1.6. Estructura 6

La ubicación de los amortiguadores de la estructura 6 se muestran en la figura 4.2. En la tabla 4.15 se indican las constantes de amortiguamiento lineal, C_L , para cada dispositivo por nivel.

Tabla 4.15. Amortiguadores de la estructura 6

| Nivel | Constante de Amortiguamiento, C_L (t·s/m) | Nivel | Constante de Amortiguamiento, C_L (t·s/m) |
|-------|--|-------|--|
| 1 | 8266.4 | 16 | 3729.3 |
| 2 | 5695.8 | 17 | 3683.7 |
| 3 | 4795.0 | 18 | 3634.2 |
| 4 | 4429.1 | 19 | 3579.8 |
| 5 | 4250.6 | 20 | 3519.1 |
| 6 | 4150.4 | 21 | 3450.4 |
| 7 | 4085.6 | 22 | 3371.4 |
| 8 | 4037.2 | 23 | 3278.7 |
| 9 | 3996.5 | 24 | 3167.3 |
| 10 | 3959.2 | 25 | 3029.6 |
| 11 | 3923.1 | 26 | 2853.4 |
| 12 | 3887.0 | 27 | 2617.6 |
| 13 | 3850.1 | 28 | 2284.9 |
| 14 | 3811.9 | 29 | 1786.8 |
| 15 | 3771.8 | 30 | 1030.2 |

En la figura 4.21 se puede observar la respuesta en términos de los desplazamientos en la azotea para la estructura con amortiguadores lineales que se muestran en la tabla 4.15, y la respuesta de la estructura considerando un 35% de amortiguamiento de Rayleigh.

El desplazamiento máximo para la estructura con amortiguadores lineales es 35.99 cm, mientras que considerando el 35% de amortiguamiento de Rayleigh es de 35.75 cm, siendo la diferencia menor al 0.7%, por lo que se puede decir que el amortiguamiento obtenido es aproximado al 35% que se desea.

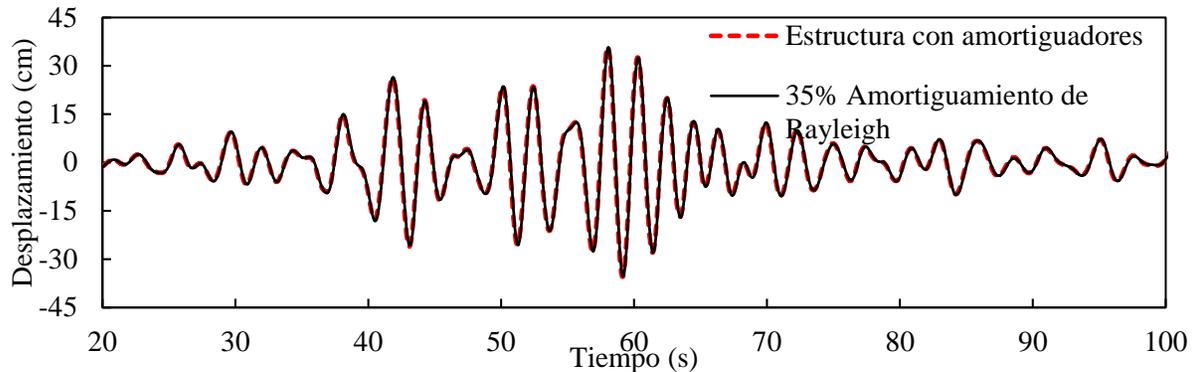


Figura 4.21. Desplazamientos en la azotea de la estructura 6 con amortiguadores lineales.

Como se pudo apreciar, el método descrito en la sección 4.2.1 permite obtener resultados muy aproximados a los deseados. Aunque al realizar más iteraciones en el cálculo de las constantes de amortiguamiento lineales se podría llegar a resultados aún más cercanos, los porcentajes de error que se lograron con los amortiguadores mostrados en las tablas 4.10 a la 4.15 son pequeños; por lo que esas constantes de amortiguamiento lineal son consideradas como base para obtener las constantes de amortiguamiento no lineal.

4.2.2. Diseño de los amortiguadores viscosos no lineales

Las constantes de amortiguamiento no lineal se obtuvieron para cada amortiguador a partir del valor de su constante de amortiguamiento lineal obtenido con el procedimiento descrito en la sección 4.2.1 y con ayuda de la ecuación (32).

$$C_{NL} = \frac{(\omega_n X_0)^{1-\alpha}}{\beta_\alpha} C_L \quad (32)$$

donde ω_n es la frecuencia de la estructura, X_0 es el desplazamiento máximo en el dispositivo, C_L es la constante de amortiguamiento lineal y β_α se calcula con la ecuación (14).

Como se ha mencionado anteriormente, el valor de X_0 puede ser considerado como el valor del desplazamiento máximo para el nivel de amortiguamiento deseado, es decir, la ordenada espectral en el espectro de desplazamientos.

En el caso de sistemas de varios grados de libertad, el desplazamiento X_0 podría ser tomado como el valor del desplazamiento máximo en la azotea, lo que daría lugar a constantes de amortiguamiento muy grandes, por lo que, con el fin de tener constantes adecuadas, se utilizó un desplazamiento X_0 por cada amortiguador, el cual se obtuvo al realizar un análisis dinámico de la estructura con amortiguadores

viscosos lineales, es decir, el desplazamiento X_0 fue el de los amortiguadores lineales descritos en la sección 4.2.1.

A continuación, se muestran los coeficientes de amortiguamiento no lineal calculados para cada nivel de cada estructura. Cabe mencionar que la ubicación de estos amortiguadores es la misma que los amortiguadores lineales (figuras 4.1 y 4.2).

Se seleccionaron tres diferentes valores para el exponente de velocidad, $\alpha = 0.5, 0.2$ y 0.05 , con el objetivo de comparar con la respuesta de las estructuras equipadas con amortiguadores lineales y observar los efectos de la no linealidad.

Las tablas 4.16 a 4.21 muestran las constantes de amortiguamiento no lineal, calculadas con la ecuación (32). Se puede observar que para las cinco estructuras que mientras menor es el valor de α , menor es el valor de C_{NL} . Además, los valores de C_{NL} son mayores en los niveles inferiores con respecto a los niveles superiores.

Tabla 4.16. Amortiguadores no lineales de la estructura 1

| Nivel | Constante de Amortiguamiento No Lineal, $C_{NL} (t \cdot (s/m)^\alpha)$ | | |
|-------|--|----------------|-----------------|
| | $\alpha = 0.5$ | $\alpha = 0.2$ | $\alpha = 0.05$ |
| 1 | 28.3 | 12.3 | 8.1 |
| 2 | 20.4 | 7.1 | 4.2 |

Tabla 4.17. Amortiguadores no lineales de la estructura 2

| Nivel | Constante de Amortiguamiento No Lineal, $C_{NL} (t \cdot (s/m)^\alpha)$ | | |
|-------|--|----------------|-----------------|
| | $\alpha = 0.5$ | $\alpha = 0.2$ | $\alpha = 0.05$ |
| 1 | 83.2 | 35.3 | 22.9 |
| 2 | 66.0 | 26.8 | 17.0 |
| 3 | 51.3 | 19.5 | 12.0 |
| 4 | 38.7 | 13.2 | 7.7 |
| 5 | 24.5 | 7.1 | 3.8 |

Tabla 4.18. Amortiguadores no lineales de la estructura 3

| Nivel | Constante de Amortiguamiento No Lineal, $C_{NL} (t \cdot (s/m)^\alpha)$ | | |
|-------|--|----------------|-----------------|
| | $\alpha = 0.5$ | $\alpha = 0.2$ | $\alpha = 0.05$ |
| 1 | 177.2 | 81.7 | 55.2 |
| 2 | 164.0 | 74.8 | 50.3 |
| 3 | 152.7 | 68.5 | 45.7 |
| 4 | 142.6 | 62.3 | 41.0 |
| 5 | 132.1 | 55.7 | 36.0 |
| 6 | 120.4 | 48.5 | 30.7 |
| 7 | 107.0 | 40.8 | 25.1 |
| 8 | 91.3 | 32.4 | 19.2 |
| 9 | 71.9 | 23.2 | 13.1 |
| 10 | 44.5 | 12.6 | 6.7 |

Tabla 4.19. Amortiguadores no lineales de la estructura 4

| Nivel | Constante de Amortiguamiento No Lineal, C_{NL} (t·(s/m) ^α) | | |
|-------|---|----------------|-----------------|
| | C_{NL} (t·(s/m) ^α) | | |
| | $\alpha = 0.5$ | $\alpha = 0.2$ | $\alpha = 0.05$ |
| 1 | 609.7 | 255.7 | 164.8 |
| 2 | 523.6 | 231.8 | 153.5 |
| 3 | 486.6 | 218.8 | 146.1 |
| 4 | 464.0 | 207.7 | 138.3 |
| 5 | 445.9 | 197.0 | 130.4 |
| 6 | 428.3 | 186.0 | 122.0 |
| 7 | 408.8 | 173.6 | 112.6 |
| 8 | 387.3 | 160.1 | 102.5 |
| 9 | 363.8 | 145.8 | 91.9 |
| 10 | 337.7 | 130.4 | 80.7 |
| 11 | 307.8 | 113.6 | 68.7 |
| 12 | 273.0 | 95.2 | 56.0 |
| 13 | 232.3 | 75.5 | 42.9 |
| 14 | 181.0 | 53.9 | 29.2 |
| 15 | 106.7 | 28.5 | 14.6 |

Tabla 4.20. Amortiguadores no lineales de la estructura 5

| Nivel | Constante de Amortiguamiento No Lineal, C_{NL} (t·(s/m) ^α) | | |
|-------|---|----------------|-----------------|
| | C_{NL} (t·(s/m) ^α) | | |
| | $\alpha = 0.5$ | $\alpha = 0.2$ | $\alpha = 0.05$ |
| 1 | 760.1 | 258.6 | 150.1 |
| 2 | 643.4 | 236.3 | 142.5 |
| 3 | 599.3 | 227.1 | 139.2 |
| 4 | 577.9 | 221.1 | 136.1 |
| 5 | 564.8 | 216.4 | 133.3 |
| 6 | 554.0 | 211.7 | 130.3 |
| 7 | 542.9 | 206.3 | 126.6 |
| 8 | 530.8 | 200.2 | 122.4 |
| 9 | 517.7 | 193.4 | 117.6 |
| 10 | 503.8 | 186.2 | 112.6 |
| 11 | 488.0 | 178.0 | 107.0 |
| 12 | 469.9 | 168.7 | 100.6 |
| 13 | 450.5 | 158.9 | 93.9 |
| 14 | 429.9 | 148.7 | 87.1 |
| 15 | 406.1 | 137.2 | 79.4 |
| 16 | 379.6 | 124.7 | 71.1 |
| 17 | 350.3 | 111.4 | 62.6 |
| 18 | 317.6 | 97.4 | 53.7 |
| 19 | 278.9 | 81.7 | 44.0 |
| 20 | 232.6 | 64.5 | 33.8 |
| 21 | 175.4 | 45.5 | 23.0 |
| 22 | 97.7 | 23.5 | 11.5 |

Tabla 4.21. Amortiguadores no lineales de la estructura 6

| Nivel | Constante de Amortiguamiento No Lineal, C_{NL} (t·(s/m) ^a) | | |
|-------|---|-----------|------------|
| | $a = 0.5$ | $a = 0.2$ | $a = 0.05$ |
| | 1 | 846.5 | 213.0 |
| 2 | 693.9 | 193.8 | 101.9 |
| 3 | 632.2 | 185.1 | 99.7 |
| 4 | 604.3 | 180.7 | 98.3 |
| 5 | 588.8 | 177.6 | 97.1 |
| 6 | 578.4 | 175.1 | 95.9 |
| 7 | 570.4 | 172.9 | 94.7 |
| 8 | 563.4 | 170.7 | 93.5 |
| 9 | 555.6 | 168.0 | 91.9 |
| 10 | 547.2 | 164.8 | 90.0 |
| 11 | 539.5 | 162.0 | 88.4 |
| 12 | 530.7 | 158.7 | 86.4 |
| 13 | 521.0 | 155.0 | 84.1 |
| 14 | 509.8 | 150.6 | 81.5 |
| 15 | 498.6 | 146.2 | 78.8 |
| 16 | 486.9 | 141.8 | 76.1 |
| 17 | 473.8 | 136.7 | 73.1 |
| 18 | 458.0 | 130.6 | 69.4 |
| 19 | 442.9 | 124.9 | 66.0 |
| 20 | 426.5 | 118.8 | 62.4 |
| 21 | 407.7 | 111.8 | 58.3 |
| 22 | 386.3 | 104.0 | 53.7 |
| 23 | 364.3 | 96.3 | 49.3 |
| 24 | 340.3 | 88.1 | 44.6 |
| 25 | 312.4 | 79.0 | 39.5 |
| 26 | 279.8 | 68.6 | 33.8 |
| 27 | 242.5 | 57.5 | 27.8 |
| 28 | 198.5 | 45.3 | 21.5 |
| 29 | 144.3 | 31.5 | 14.6 |
| 30 | 77.2 | 16.1 | 7.3 |

4.3. RESULTADOS Y COMPARACIONES

A continuación, se presentan los principales resultados de los análisis en el tiempo de las cinco estructuras con amortiguadores viscosos no lineales considerando diferentes valores de α . Como se mencionó anteriormente, se consideró comportamiento elástico lineal de las estructuras y un amortiguamiento inherente de la estructura del 5%. Las estructuras fueron sometidas al registro de aceleraciones SCT-19/09/85, descrito en la sección 3.1.

Se presentan las gráficas con desplazamientos, distorsiones de entrepiso, cortantes de entrepiso y fuerzas de amortiguamiento, en las que se comparan los amortiguadores no lineales ($\alpha < 1$) con los lineales (es decir $\alpha = 1$).

4.3.1. Resultados de la estructura 1

En la figura 4.22 se grafican los desplazamientos y distorsiones máximas en los dos niveles de la estructura. Para esta estructura la no linealidad de los amortiguadores reduce los desplazamientos, se observan reducciones del 9%, 27% y 46% , para $\alpha=0.5$, 0.2 y 0.05, respectivamente

Comparando la figura 4.22 con la 4.10 (sin amortiguadores), se puede observar que con los amortiguadores lineales ($\alpha=1$) hay una reducción de 19% con respecto a la respuesta de la estructura sin amortiguadores.

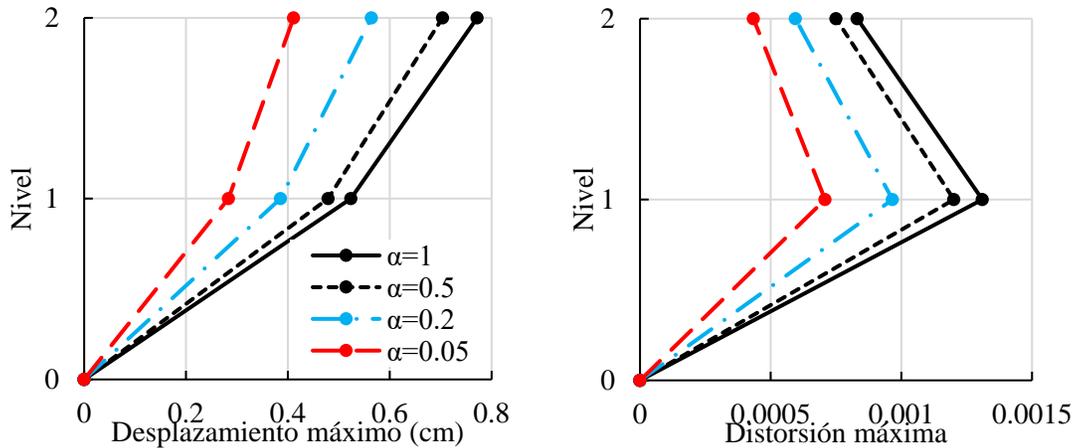


Figura 4.22. Desplazamientos y distorsiones máximas de la estructura 1 con amortiguadores viscosos

Por otra parte, la figura 4.23 muestra el cortante de entrepiso y las fuerzas de amortiguamiento. La no linealidad de los amortiguadores no afectó significativamente el cortante de entrepiso, pues la variación es menor de 1% entre los diferentes valores de α .

Las fuerzas de amortiguamiento desarrolladas por los dispositivos viscosos no lineales aumentaron considerablemente con respecto al amortiguador lineal, al observarse incrementos del 40%, 85% y 110%, para $\alpha=0.5$, 0.2 y 0.05, respectivamente.

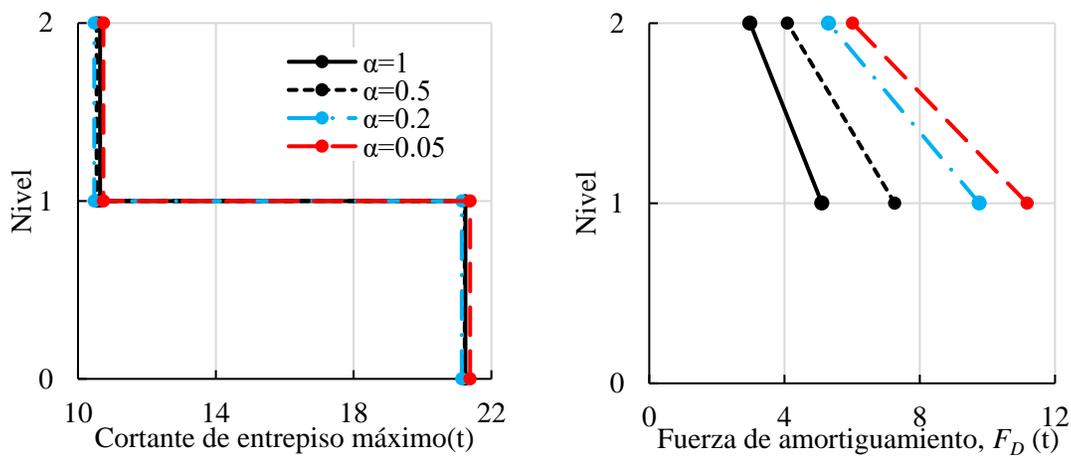


Figura 4.23. Cortante de entrepiso y fuerzas de amortiguamiento de la estructura 1 con amortiguadores viscosos

En la figura 4.24 se grafican las curvas de histéresis de uno de los dos amortiguadores del primer nivel de la estructura 1, en ella se puede ver claramente como los desplazamientos son menores en los valores de α más pequeños y como las fuerzas de amortiguamiento aumentan, confirmando lo observado en las figuras 4.22 y 4.23.

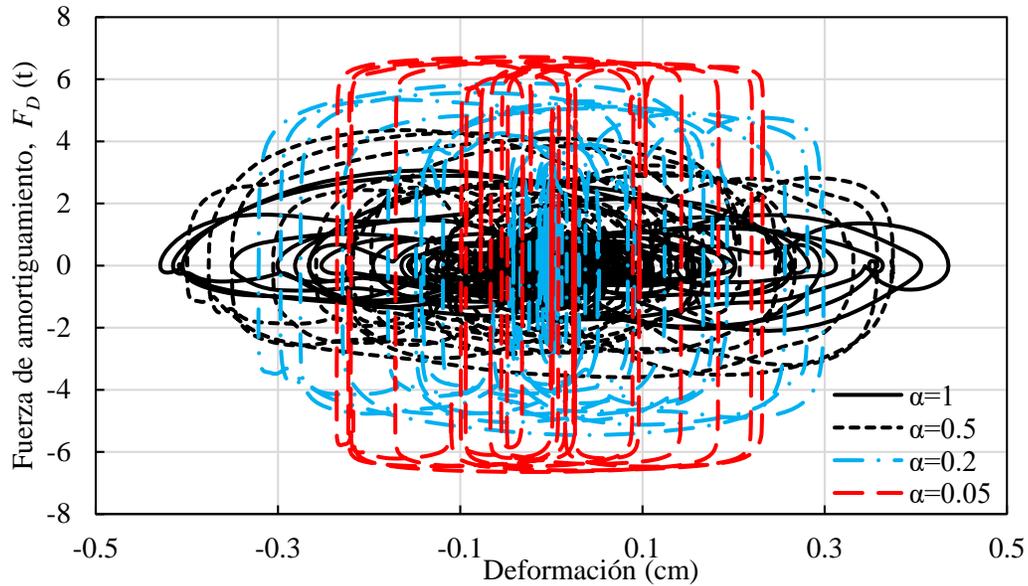


Figura 4.24. Curva de histéresis de amortiguador del nivel 1 de la estructura 1

4.3.2. Resultados de la estructura 2

Como se puede observar en la figura 4.25, la no linealidad de los amortiguadores redujo los desplazamientos en un 11%, 22% y 27% para $\alpha=0.5$, 0.2 y 0.05, respectivamente.

Comparando la figura 4.25 con la 4.11, se observa que los amortiguadores lineales redujeron un 45% los desplazamientos con respecto a los de la estructura sin amortiguadores.

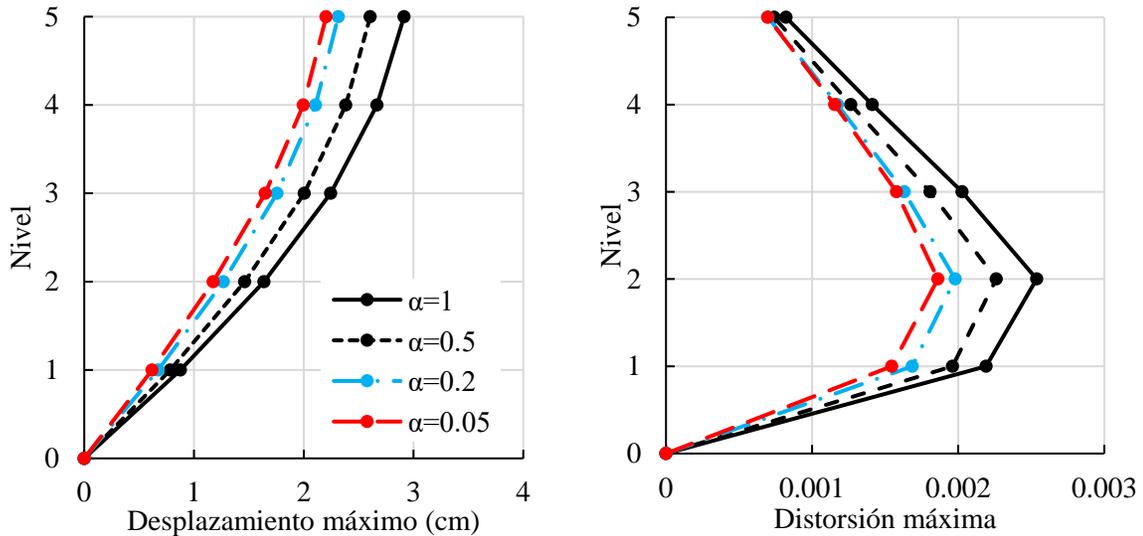


Figura 4.25. Desplazamientos y distorsiones máximas de la estructura 2 con amortiguadores viscosos

La figura 4.26 muestra el cortante de entrepiso y las fuerzas de amortiguamiento por nivel de la estructura 2. La no linealidad de los amortiguadores aumentó el cortante de entrepiso en un 4%, 14% y 24% para $\alpha=0.5$, 0.2 y 0.05, respectivamente. Comparando con la figura 4.11 (estructura sin amortiguadores), el cortante de entrepiso se redujo un 49% con la incorporación de amortiguadores viscosos lineales.

Con respecto a las fuerzas de amortiguamiento, se puede observar que estas aumentaron con la no linealidad en un 11%, 30% y 39% para $\alpha=0.5$, 0.2 y 0.05, respectivamente.

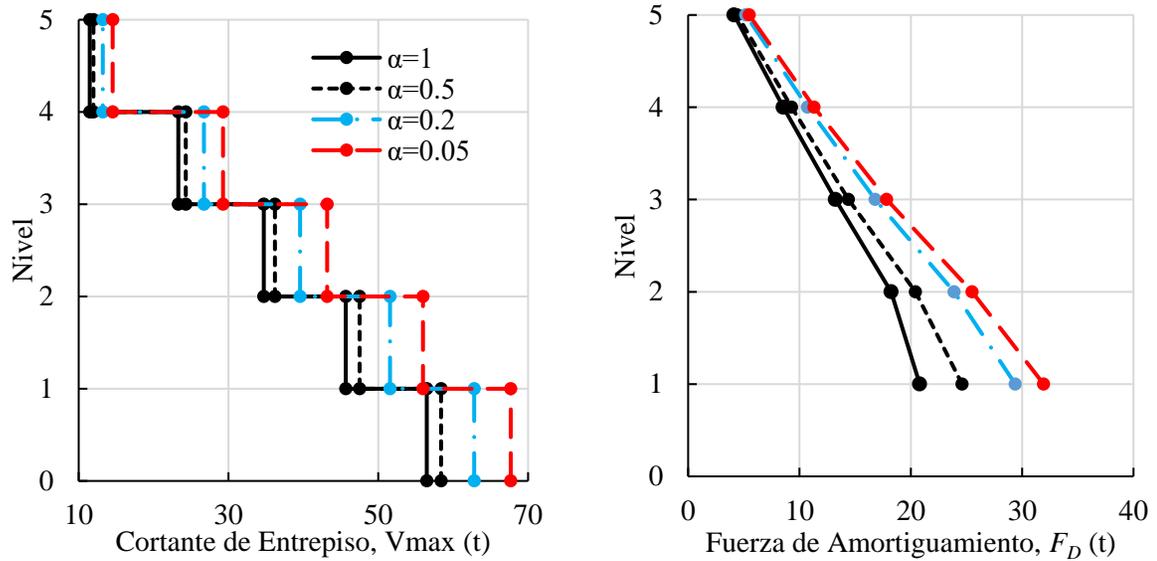


Figura 4.26. Cortante de entrepiso y fuerzas de amortiguamiento de la estructura 2 con amortiguadores viscosos

La figura 4.27 muestra las curvas de histéresis de uno de los amortiguadores del nivel 1 de la estructura 2, en la cual se aprecia que los desplazamientos son menores con la no linealidad y las fuerzas de amortiguamiento son mayores, confirmando lo observado anteriormente.

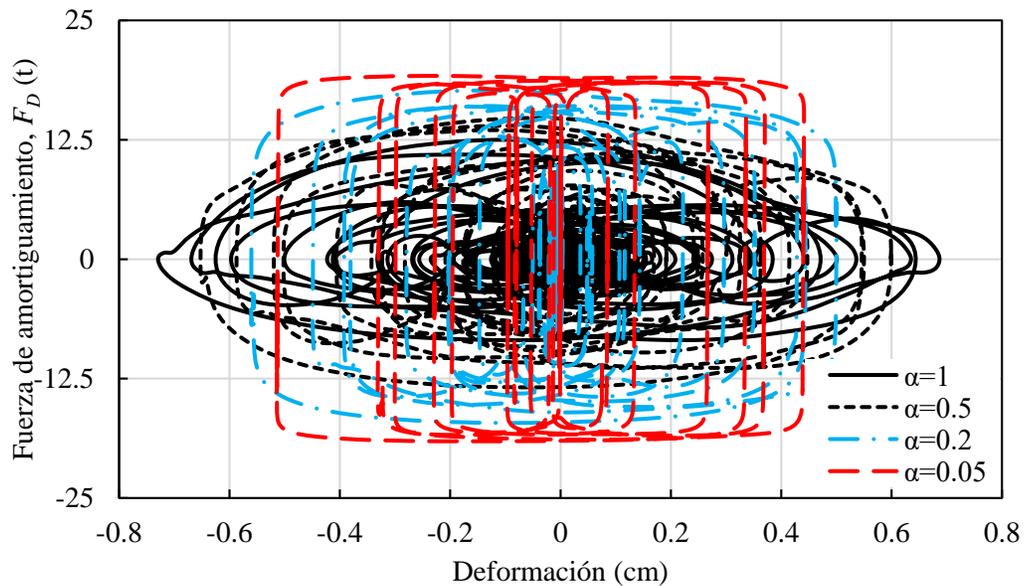


Figura 4.27. Curva de histéresis de amortiguador del nivel 1 de la estructura 2

4.3.3. Resultados de la estructura 3

La respuesta, en términos de los desplazamientos y distorsiones de la estructura 3, se muestra en la figura 4.28. La no linealidad de los amortiguadores redujo la respuesta en un 18%, 40% y 63% con respecto al amortiguador lineal, para $\alpha=0.5$, 0.2 y 0.05, respectivamente.

La estructura con amortiguadores lineales redujo un 40% los desplazamientos con respecto a la estructura sin amortiguadores (figura 4.12).

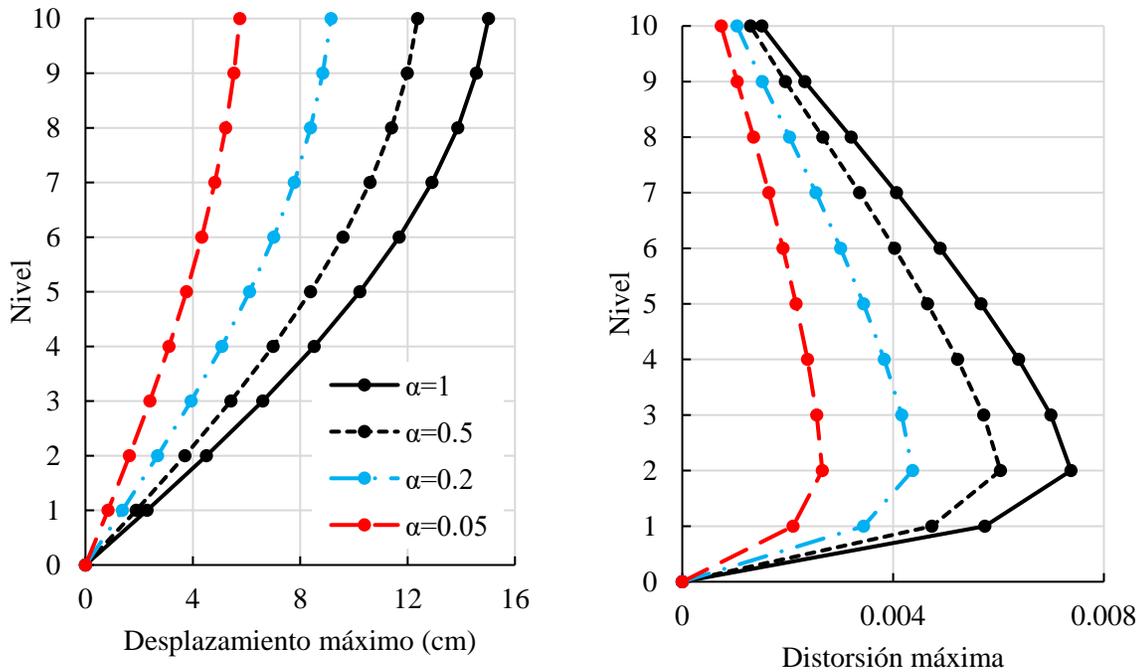


Figura 4.28. Desplazamientos y distorsiones máximas de la estructura 3 con amortiguadores viscosos

El efecto de la no linealidad de los amortiguadores en el cortante de entrepiso fue de un aumento del 5% cuando se tiene $\alpha=0.5$, y una reducción del 1% y 9% cuando un $\alpha=0.2$ y 0.05 respectivamente, como se puede apreciar en la figura 4.29.

En lo que refiere a las fuerzas de amortiguamiento, se puede observar que la no linealidad aumentó las fuerzas que desarrollan los amortiguadores en un 4%, 14% y 24%, para $\alpha=0.5$, 0.2 y 0.05, respectivamente.

Lo anterior se puede observar también en las curvas de histéresis de un amortiguador del primer nivel de la estructura 3, en la figura 4.30.

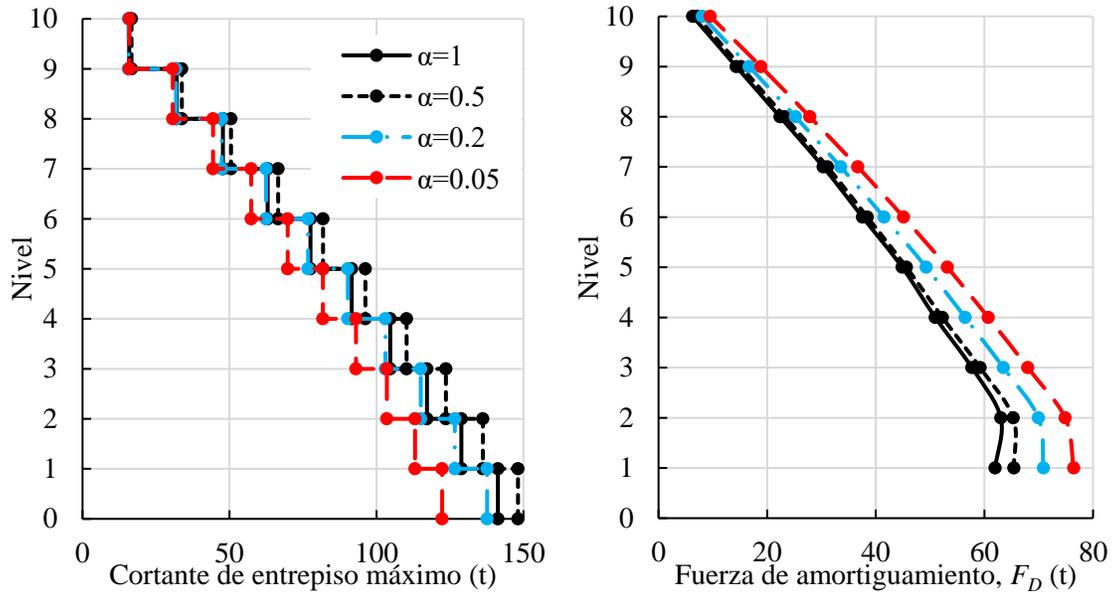


Figura 4.29. Cortante de entrespiso y fuerzas de amortiguamiento de la estructura 3 con amortiguadores viscosos

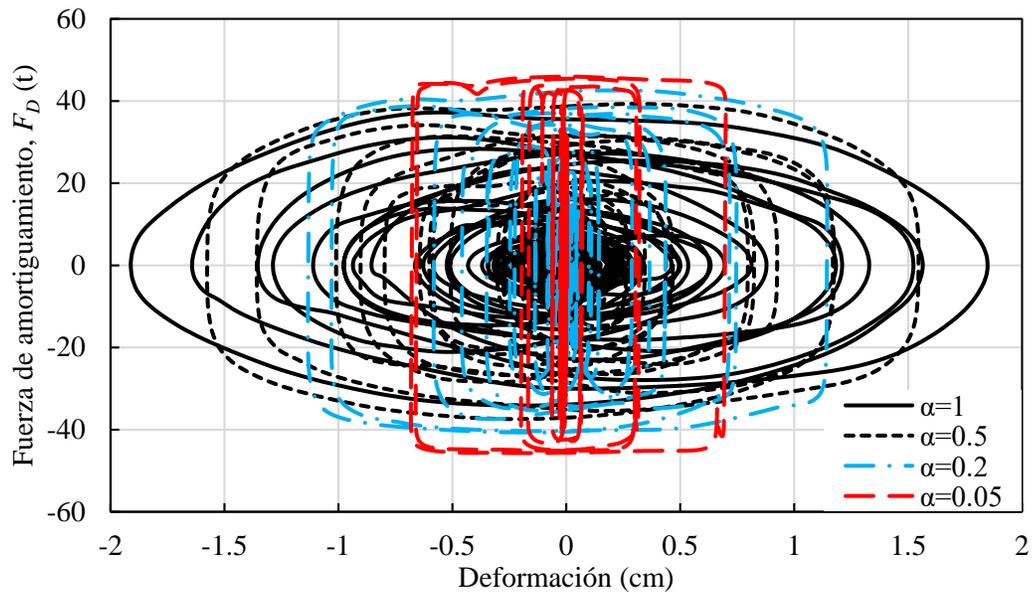


Figura 4.30. Curva de histéresis de amortiguador del nivel 1 de la estructura 3

4.3.4. Resultados de la estructura 4

En la figura 4.31 se muestran los desplazamientos y distorsiones de entrespiso de la estructura 4. En ésta se puede observar que la no linealidad de los amortiguadores provoca desplazamientos menores en un 18%, 44% y 71% que los del amortiguador lineal, para $\alpha=0.5$, 0.2 y 0.05, respectivamente. Comparando con los de la estructura sin amortiguadores (figura 4.13) se puede notar que los amortiguadores viscosos lineales, redujeron un 76% los desplazamientos.

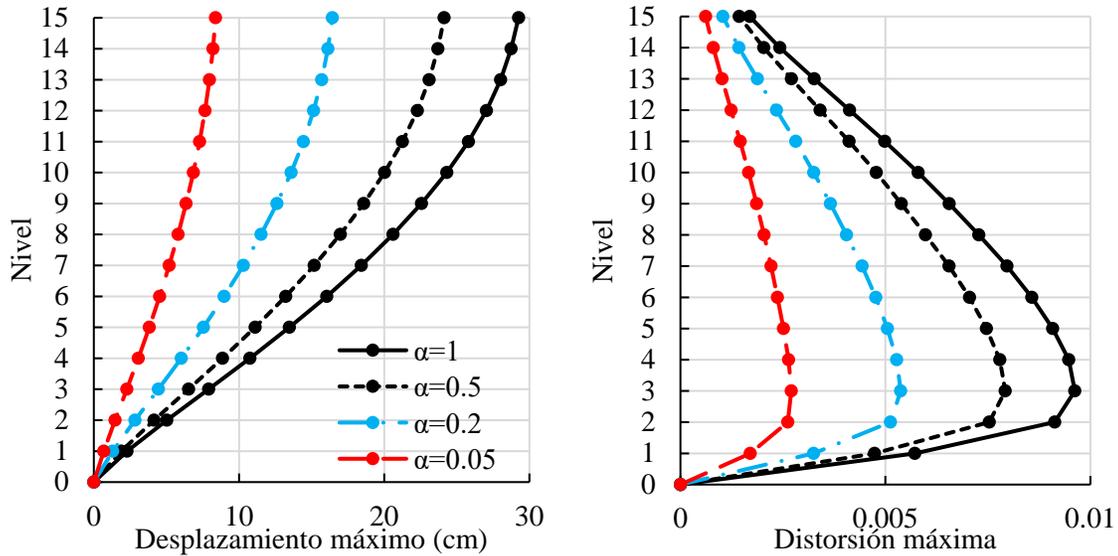


Figura 4.31. Desplazamientos y distorsiones máximas de la estructura 4 con amortiguadores visicosos

El cortante de entrepiso y las fuerzas de amortiguamiento de la estructura 4 se muestran en la figura 4.32. La no linealidad provocó cortantes mayores en un 9% para los amortiguadores con $\alpha=0.5$, respecto al amortiguador lineal, y reducciones del 6% y 22% para $\alpha=0.2$ y 0.05 , respectivamente. La incorporación de amortiguadores visicosos lineales redujo un 77% el cortante de entrepiso de la estructura, comparado con el de la estructura sin amortiguadores (figura 4.13).

En lo que respecta a las fuerzas desarrolladas por los amortiguadores, se presentó que las diferencias entre los amortiguadores no lineales y lineales fueron en promedio un 8%, 9% y 4% menores, para $\alpha=0.5$, 0.2 y 0.05 , respectivamente.

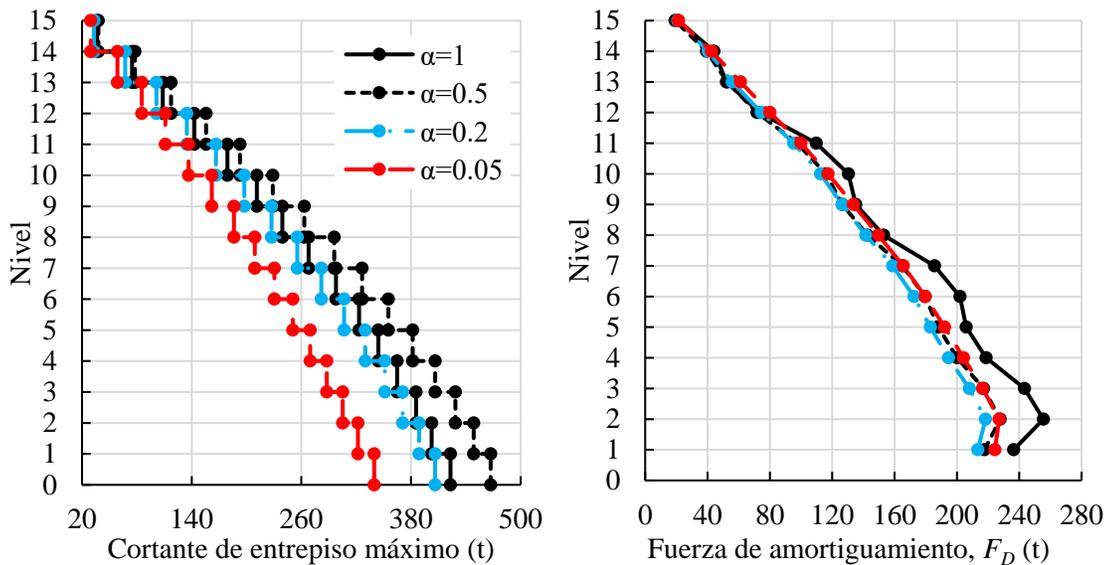


Figura 4.32. Cortante de entrepiso y fuerzas de amortiguamiento de la estructura 4 con amortiguadores visicosos

En la figura 4.33 se grafican las curvas de histéresis de uno de los amortiguadores del primer nivel de la estructura 4, en las cuales se puede observar que los desplazamientos del amortiguador lineal son mayores que las de los no lineales, mientras que no es tan evidente la disminución de las fuerzas de amortiguamiento con la no linealidad.

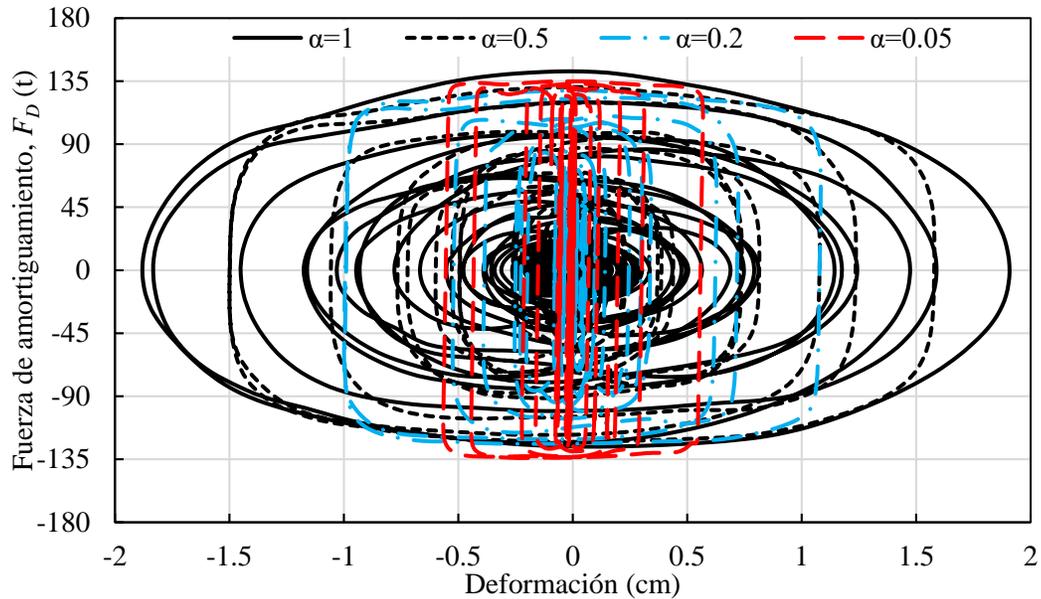


Figura 4.33. Curva de histéresis de amortiguador del nivel 1 de la estructura 4

4.3.5. Resultados de la estructura 5

La figura 4.34 muestra los desplazamientos y distorsiones máximas de la estructura 5. El efecto de la no linealidad de los amortiguadores aumentó los desplazamientos un 1%, 3% y 1%, para $\alpha=0.5$, 0.2 y 0.05, respectivamente. Comparando con los desplazamientos de la estructura sin amortiguadores que se grafican en la figura 4.14, se puede ver que los amortiguadores viscosos lineales redujeron un 59% de las deformaciones que sufre la estructura.

En la figura 4.35 se observa que el cortante aumentó con la no linealidad con respecto a aquel en los amortiguadores lineales, en un 40%, 53% y 67% para $\alpha=0.5$, 0.2 y 0.05, respectivamente. Además, comparando con la figura 4.12, el cortante de entrepiso se redujo un 60% con la incorporación de amortiguadores viscosos lineales en la estructura 5, con respecto a la misma sin amortiguadores.

En lo que respecta a las fuerzas de amortiguamiento desarrolladas por los dispositivos, se pudo observar que la no linealidad disminuyó las fuerzas en promedio en un 7%, 11% y 16% para $\alpha=0.5$, 0.2 y 0.05, respectivamente. También se puede ver que en los niveles superiores las fuerzas desarrolladas por los amortiguadores no lineales son mayores a las de los lineales y el efecto de los modos superiores de vibrar de la estructura afecta la forma de las curvas de fuerza de amortiguamiento.

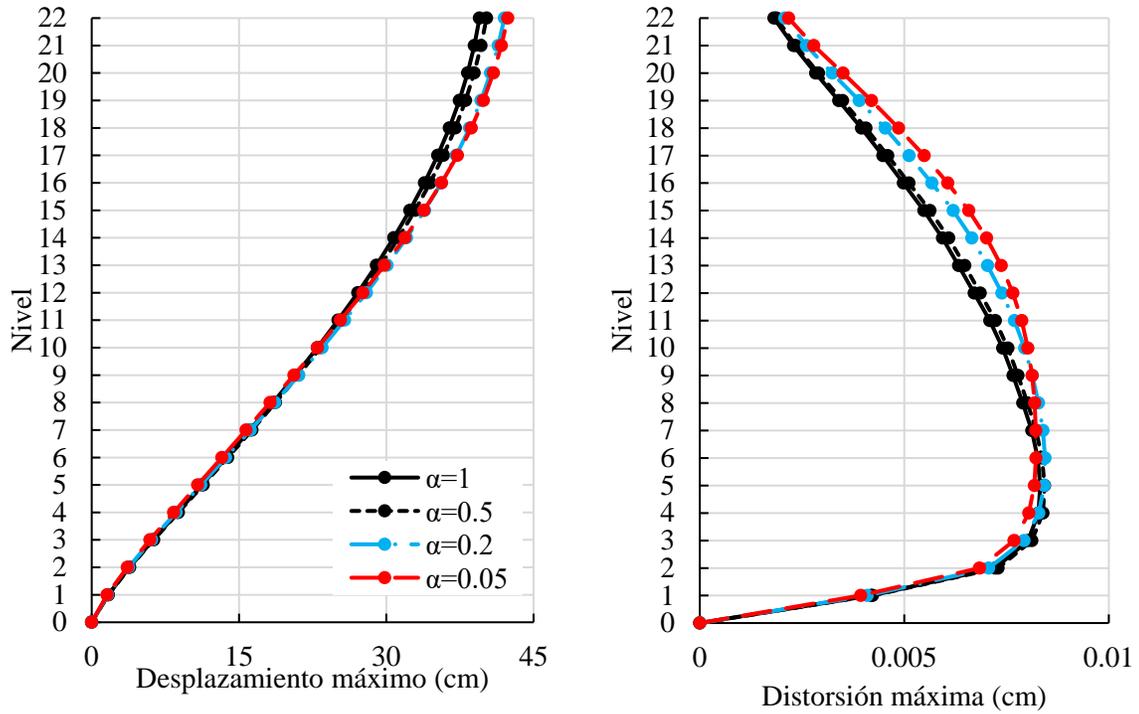


Figura 4.34. Desplazamientos y distorsiones máximas de la estructura 5 con amortiguadores viscosos

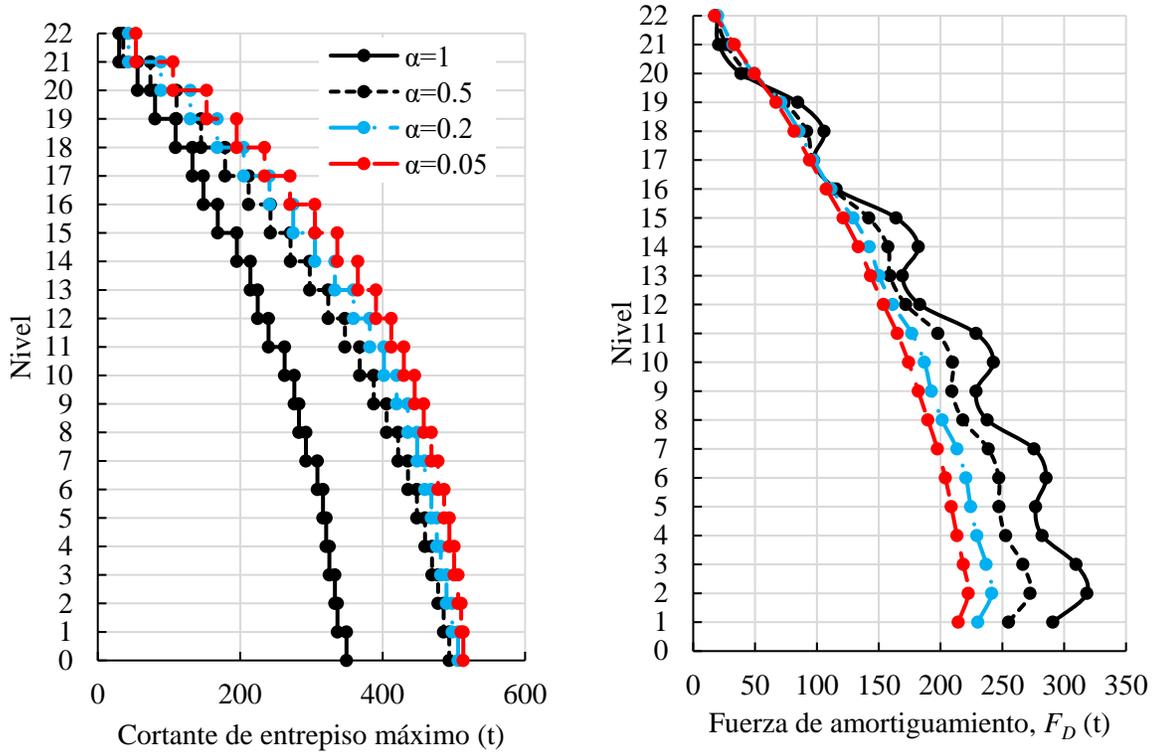


Figura 4.35. Cortante de entrepiso y fuerzas de amortiguamiento de la estructura 5 con amortiguadores viscosos

En la figura 4.36 se muestran las curvas de histéresis de uno de los amortiguadores del primer nivel de la estructura 5. En ellas se puede observar claramente lo previamente comentado, las fuerzas desarrolladas por los amortiguadores disminuyen con la no linealidad, mientras que los desplazamientos son ligeramente menores.

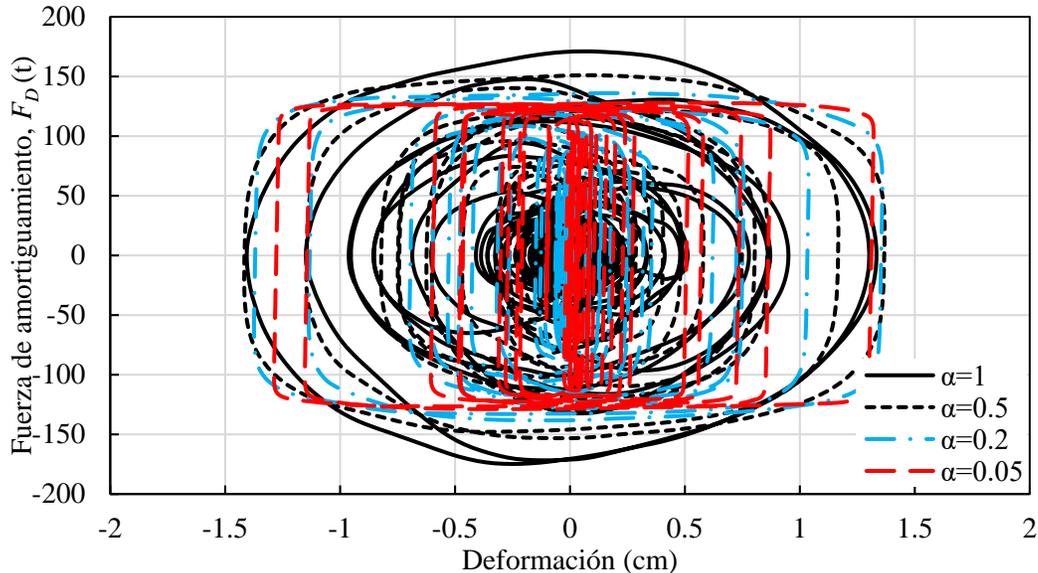


Figura 4.36 Curva de histéresis de amortiguador del nivel 1 de la estructura 5

4.3.6. Resultados de la estructura 6

En la figura 4.37 se muestran los desplazamientos y distorsiones de entrepiso máximas de la estructura 6. El efecto de la no linealidad de los amortiguadores aumentó los desplazamientos un 15%, 25% y 28%, para $\alpha=0.5$, 0.2 y 0.05, respectivamente. Comparando con los desplazamientos de la estructura sin amortiguadores que se grafican en la figura 4.14, se puede ver que los amortiguadores viscosos lineales redujeron un 40% de las deformaciones que sufre la estructura.

El cortante de entrepiso y las fuerzas de amortiguamiento de la estructura 6 se muestran en la figura 4.38. La no linealidad aumentó el cortante de entrepiso, siendo estos un 68%, 93% y 110% para $\alpha=0.5$, 0.2 y 0.05, respectivamente, con respecto a los obtenidos en la estructura con amortiguadores lineales. La incorporación de amortiguadores viscosos lineales redujo un 44% el cortante de entrepiso de la estructura, comparado con el de la estructura sin amortiguadores (figura 4.15).

Respecto a las fuerzas desarrolladas por los amortiguadores, se puede observar que la no linealidad las reduce con respecto a las de los amortiguadores lineales, disminuyendo en un 20%, 34% y 43% para $\alpha=0.5$, 0.2 y 0.05, respectivamente. Al igual que en las estructuras 4 y 5, los modos superiores de vibrar de la estructura influyen en la forma de la curva, principalmente en el amortiguador lineal y un poco menos en el amortiguador de $\alpha=0.5$.

Las curvas de histéresis de los amortiguadores del primer nivel de la estructura 6 se muestran en la figura 4.36. Se puede observar lo que se mostró en las figuras 4.34 y 4.35, la no linealidad de los amortiguadores aumenta los desplazamientos y reduce las fuerzas desarrolladas en los dispositivos.

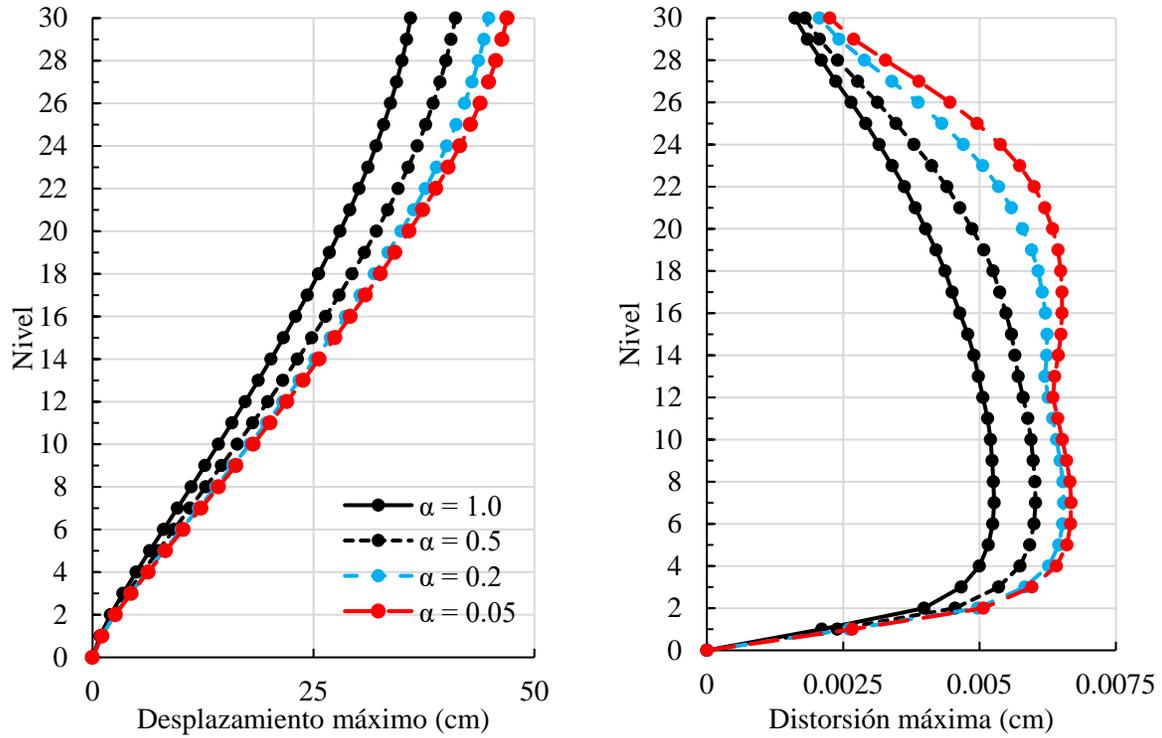


Figura 4.37. Desplazamientos y distorsiones máximas de la estructura 6 con amortiguadores visicosos

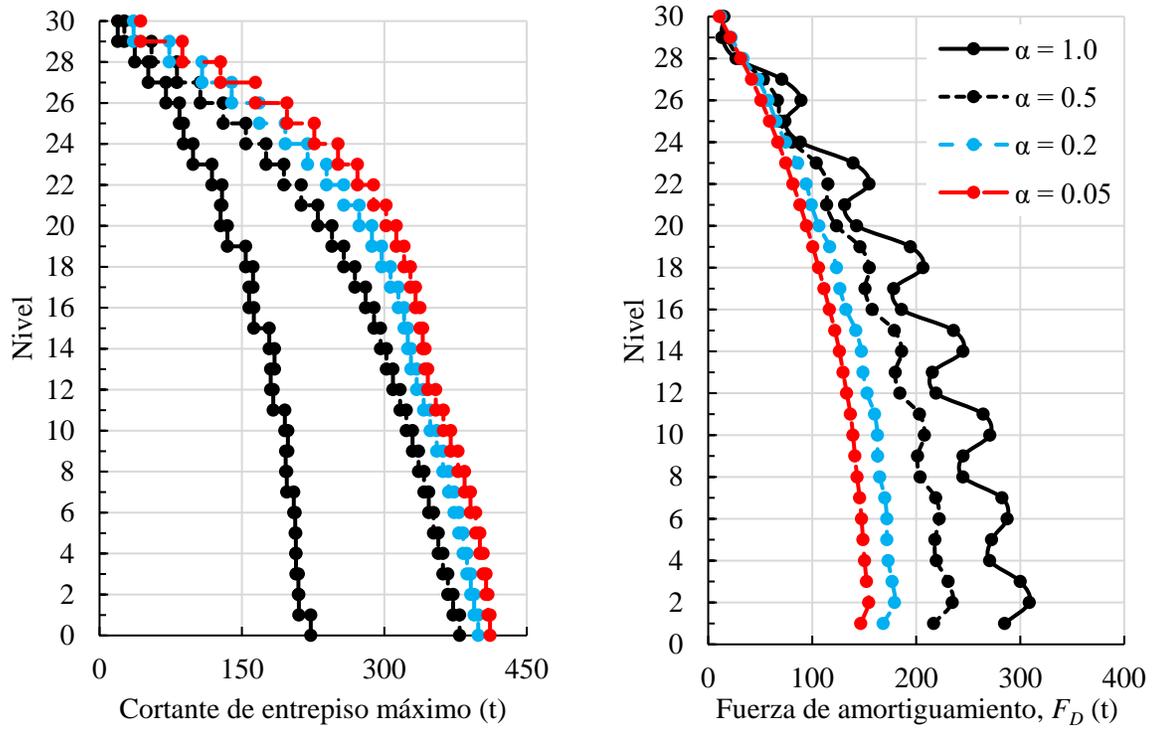


Figura 4.38. Cortante de entrepiso y fuerzas de amortiguamiento de la estructura 5 con amortiguadores visicosos

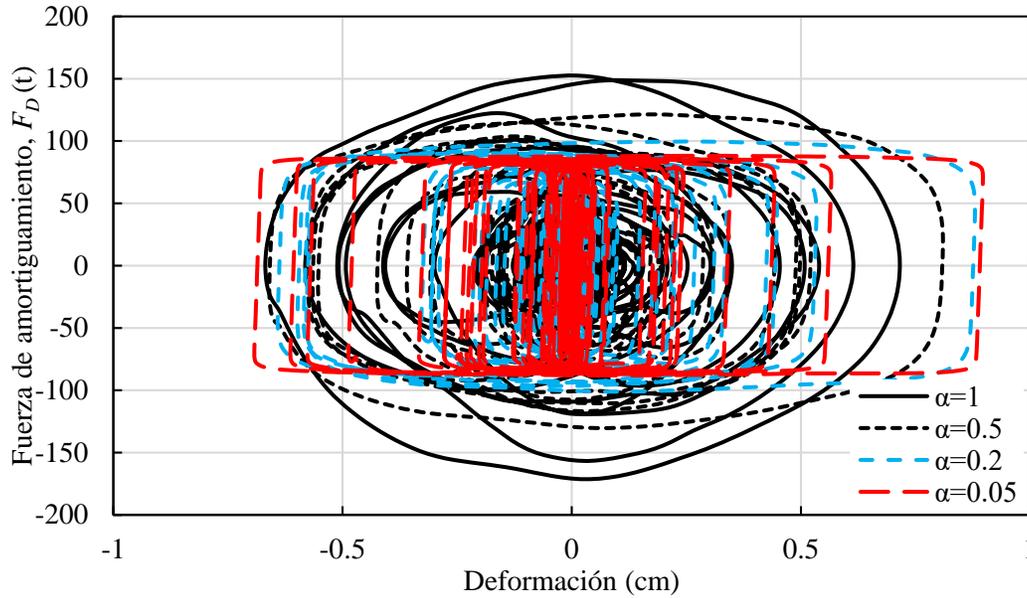


Figura 4.39. Curva de histéresis de amortiguador del nivel 1 de la estructura 6

4.4. RELACIONES DE DESPLAZAMIENTOS Y FUERZAS DE AMORTIGUAMIENTO

En la sección 3.3 se presentaron los espectros de respuesta de estructuras de un grado de libertad equipadas con amortiguadores viscosos lineales y no lineales. Además, en las figuras 3.10 y 3.12 se muestran las relaciones entre estos dispositivos, comparando desplazamientos y fuerzas de amortiguamiento.

Con el objetivo de identificar las similitudes y diferencias entre los resultados obtenidos tanto en estructuras de un grado de libertad (1GL) como en las de varios niveles (MGL), en las figuras 4.40 y 4.41, se superponen las relaciones de desplazamientos y fuerzas de amortiguamiento de las estructuras de varios grados de libertad, para los tres valores de α utilizados en este capítulo.

En la figura 4.40 se puede observar que las tendencias son similares en estructuras de varios grados de libertad como en las de uno solo, aunque las relaciones se amplifican en las de varios niveles. En las primeras cuatro estructuras estudiadas (2, 5, 10 y 15 niveles) se obtuvieron desplazamientos menores cuando se usaron amortiguadores no lineales, mientras que en las estructuras 5 y 6 (22 y 30 niveles), los desplazamientos fueron mayores.

Por otra parte, en la figura 4.41 se muestran las relaciones de fuerzas de amortiguamiento máximas y promedio. Al igual que en los desplazamientos, las tendencias de las estructuras de un grado de libertad se confirman en las de varios grados. Se observa que en las estructuras con periodos menores a 1.7 s las fuerzas que desarrollan los amortiguadores no lineales son mayores a las de los amortiguadores lineales. Mientras que en las estructuras con periodos mayores a 1.7 s, las fuerzas son menores en amortiguadores no lineales. A diferencia de las relaciones de desplazamientos para estructuras de varios grados de libertad, las relaciones de fuerzas de amortiguamiento se acercan más a las relaciones de estructuras de un grado de libertad.

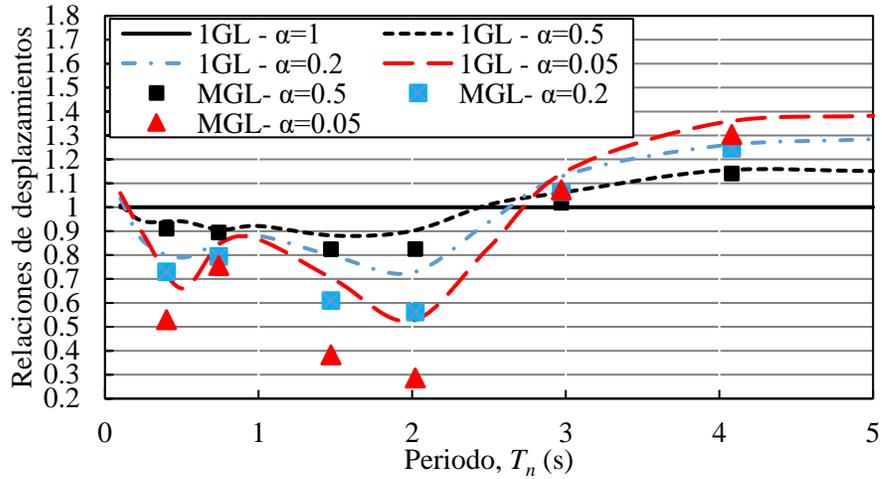


Figura 4.40. Relaciones de desplazamientos en la azotea de estructuras de uno y varios grados de libertad, con 30% de amortiguamiento adicional.

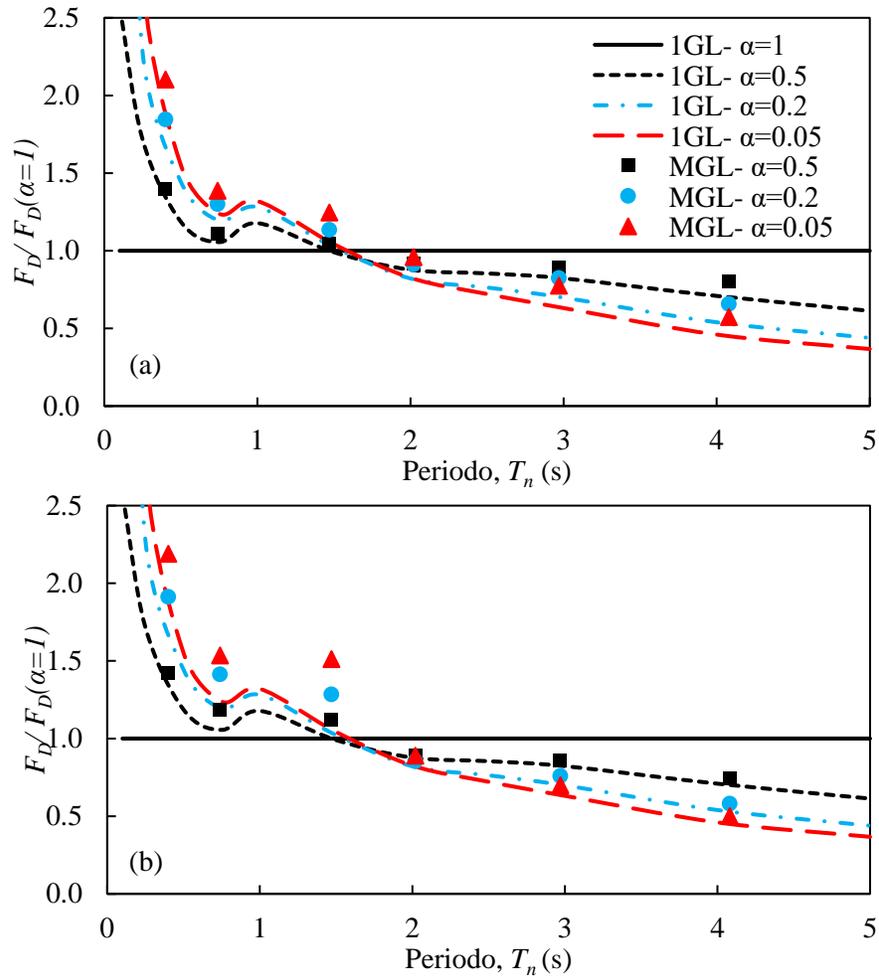


Figura 4.41. Relaciones de fuerzas de amortiguamiento (a) promedio y (b) máximas de estructuras de uno y varios grados de libertad, con 30% de amortiguamiento adicional.

4.5. PROCEDIMIENTO DE CORRECCIÓN EN EL DISEÑO DE AMORTIGUADORES VISCOSOS NO LINEALES

Dado que los desplazamientos que experimentan las estructuras equipadas con amortiguadores viscosos no lineales son en algunos casos muy diferentes a los que se demandan con amortiguadores lineales, se puede adoptar un proceso iterativo si se requiere ajustar estos desplazamientos, modificando la constante de amortiguamiento no lineal.

Conocidas las relaciones de desplazamientos calculadas para estructuras de un grado de libertad (Figura 3.12) éstas se pueden utilizar como un factor de ajuste de la constante de amortiguamiento no lineal calculada con la ecuación (32), descrita en la sección 4.2.2.

A continuación, se describe un breve procedimiento de ajuste del coeficiente de amortiguamiento no lineal, C_{NL} , para obtener desplazamientos iniciales más aproximados a los que se obtendrían con un amortiguador lineal.

Paso 1. Obtener el periodo de la estructura.

Paso 2. Calcular los coeficientes de amortiguamiento lineales, C_{Li} , con el procedimiento descrito en la sección 4.2.1.

Paso 3. Seleccionar un valor para el exponente de velocidad α .

Paso 4. De la figura 3.12 obtener la relación de desplazamientos, R , correspondientes al periodo de la estructura y al valor de α seleccionado.

Paso 5. Calcular los coeficientes de amortiguamiento no lineales, C_{NLi} , con la ecuación (33), que es la ecuación (32) multiplicada por la relación de desplazamientos, R .

$$C_{NLi} = \frac{(\omega_n X_0)^{1-\alpha}}{\beta_\alpha} C_{Li} \times R \quad (33)$$

Paso 6. Calcular las demandas de desplazamientos máximos en la estructura equipada.

Paso 7. Si los desplazamientos no son los esperados, modificar iterativamente C_{NLi} hasta lograr una respuesta satisfactoria.

4.5.1. Ejemplo de aplicación

Para realizar un ejemplo de aplicación del procedimiento descrito anteriormente se seleccionó la estructura 2 (5 niveles) y se diseñaron los amortiguadores no lineales con α igual a 0.5, 0.2 y 0.05, para un 30% de amortiguamiento equivalente adicional.

La geometría de la estructura se mostró en la figura 4.1 y sus propiedades dinámicas en la tabla 4.5. Mientras que las constantes de amortiguamiento lineal se indicaron en la tabla 4.11.

El periodo de la estructura es de 0.74 s y, de la figura 3.12, se obtiene la relación R que es de 0.91, 0.85 y 0.85 para $\alpha=0.5$, 0.2 y 0.05, respectivamente. Con esto se aplica la ecuación (33) y se obtienen los valores para C_{NL} iniciales.

Con los valores iniciales de C_{NL} se obtuvo que la no linealidad redujo los desplazamientos en un 9%, 15% y 17% para $\alpha=0.5$, 0.2 y 0.05, respectivamente. Mientras que en la figura 4.22 las diferencias fueron de 11%, 22% y 27%.

Aunque con los valores iniciales hubo una reducción en las diferencias con respecto a los valores presentados en la figura 4.25. Siguiendo el paso 7 del procedimiento propuesto, se procedió a iterar los valores de C_{NL} hasta lograr desplazamientos mas cercanos a los que se obtuvieron de la estructura con amortiguadores lineales.

En la tabla 4.22 se muestran las constantes de amortiguamiento no lineal, C_{NL} , obtenidas del proceso iterativo. Comparando estos valores con los de la tabla 4.15 calculados a partir de la ecuación (32), se tiene que para $\alpha=0.5$, el valor de C_{NL} de la tabla 4.22 representan un 51% del valor de la tabla 4.17, mientras que los valores para $\alpha=0.2$ y 0.05, representan un 43% .

Tabla 4.22. Amortiguadores no lineales de la estructura 2

| Nivel | Constante de Amortiguamiento No Lineal, C_{NL} (t·(s/m) ^{α}) | | |
|-------|---|----------------|-----------------|
| | $\alpha = 0.5$ | $\alpha = 0.2$ | $\alpha = 0.05$ |
| 1 | 42.27 | 14.99 | 9.72 |
| 2 | 33.54 | 11.40 | 7.24 |
| 3 | 26.05 | 8.28 | 5.08 |
| 4 | 19.67 | 5.61 | 3.26 |
| 5 | 12.44 | 3.01 | 1.61 |

La figura 4.42 muestra los desplazamientos y distorsiones máximas de la estructura 2 con las constantes de amortiguamiento no lineal calculadas con el procedimiento propuesto y mostradas en la tabla 4.22. Como se puede observar los desplazamientos son mejores que los mostrados en la figura 4.25, ya que la diferencia entre los desplazamientos de la estructura equipada con amortiguadores no lineales y la que tiene amortiguadores lineales es menor al 1%.

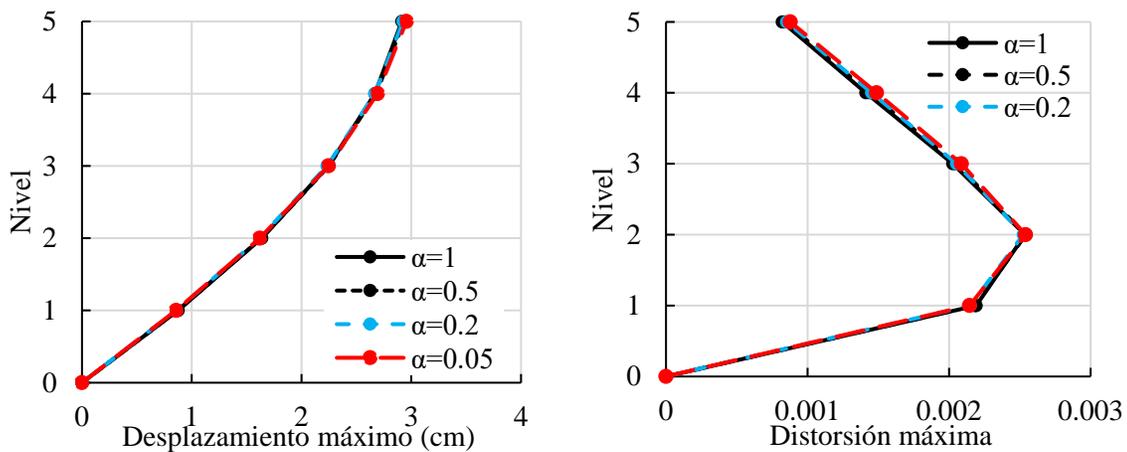


Figura 4.42. Desplazamientos y distorsiones máximas de la estructura 2 con C_{NL} de la tabla 4.22

La figura 4.43 muestra los cortantes de entrepiso, en esta se puede observar que no existe una variación notable con los resultados de la figura 4.26. Los cortantes de entrepiso son mayores a medida que el valor de α disminuye.

La fuerza de amortiguamiento se muestra en la figura 4.43. Se puede observar que las fuerzas en los amortiguadores no lineales son menores que la que desarrollan los amortiguadores lineales, ya que existen reducciones del 35%, 42% y 40% para $\alpha = 0.5$, 0.2 y 0.05 respectivamente.

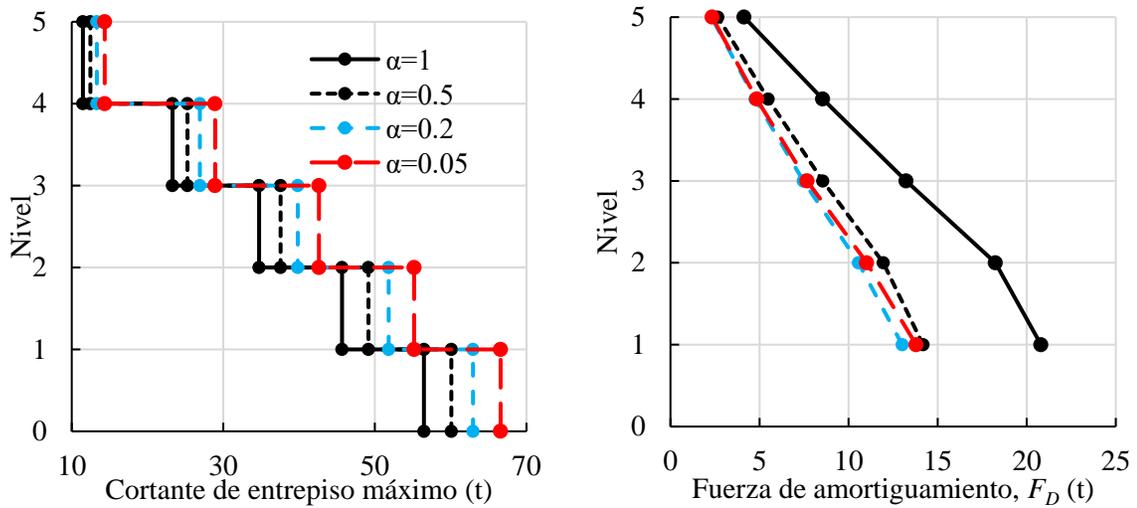


Figura 4.43. Cortante de entrepiso y fuerzas de amortiguamiento de la estructura 2 con C_{NL} de la tabla 4.22

En la figura 4.44 se muestran las curvas de histéresis en las cuales se reafirma lo anteriormente descrito para las figuras 4.42 y 4.43, en las que las fuerzas de amortiguamientos son menores en los amortiguadores viscosos no lineales, con respecto a los lineales, y los desplazamientos máximos son muy similares.

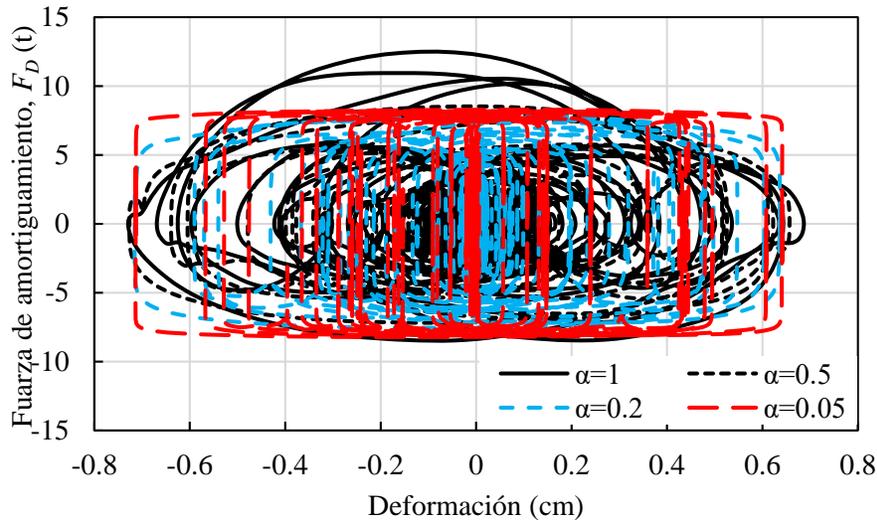


Figura 4.44. Curva de histéresis de amortiguador del nivel 1 de la estructura 2 con C_{NL} de la tabla 4.22

La aplicación del procedimiento iterativo propuesto ajustó los desplazamientos de la estructura con los amortiguadores no lineales a aquellos con amortiguadores lineales. Las constantes de amortiguamiento no lineal resultaron mucho menores a las que se obtuvieron con la ecuación (32) pero se observó una reducción importante en las fuerzas máximas en los amortiguadores.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Con base en lo observado en este estudio sobre el comportamiento de amortiguadores viscosos no lineales en estructuras de uno y varios grados de libertad, y su comparación con estudios previos en diferentes condiciones de sitio, se puede concluir lo siguiente:

1. Los amortiguadores viscosos no lineales se caracterizan por la constante de amortiguamiento no lineal, C_{NL} , y el exponente de velocidad α .
2. El valor del exponente de velocidad, α , define la no linealidad de los amortiguadores viscosos, toma valores entre 0.2 y 1, según la bibliografía, aunque comercialmente existen valores de hasta 0.05. Cuando $\alpha=1$, el comportamiento del amortiguador es lineal. Por el contrario, cuando el valor de $\alpha=0$, el comportamiento del amortiguador es de fricción.
3. En el diseño de amortiguadores viscosos no lineales el porcentaje de amortiguamiento equivalente adicional ζ_{sd} , proporcionado por un amortiguador con constante de amortiguamiento no lineal y exponente de velocidad, ya definidos, se debe obtener mediante un proceso iterativo.
4. Cuando se diseñan las características de un amortiguador viscoso no lineal es necesario establecer un porcentaje de amortiguamiento o un nivel de desempeño deseado, este nivel de desempeño o amortiguamiento se define como un desplazamiento pico, que puede ser obtenido del espectro de respuesta del movimiento sísmico de diseño.
5. El introducir amortiguamiento viscoso a una estructura ya sea lineal o no lineal, reduce considerablemente las solicitaciones producidas por un sismo.
6. Al comparar la respuesta máxima en términos de desplazamientos, en estructuras equipadas con amortiguadores no lineales respecto a aquellas equipadas con amortiguadores lineales, las relaciones muestran diferencias mayores al 30%. Mientras mayor es la no linealidad del amortiguador, mayor es la diferencia en sus desplazamientos.
7. Para periodos menores a 1.7 s se observó en este estudio que la no linealidad no reduce las fuerzas de amortiguamiento desarrolladas por el amortiguador, al contrario, éstas aumentan con respecto a las que se obtienen para amortiguadores lineales.
8. Para periodos mayores a 1.7 s se observó que la no linealidad de los amortiguadores reduce la fuerza de amortiguamiento.
9. La reducción de fuerzas de amortiguamiento es mayor en estructuras con periodos grandes (Zona espectral sensible a desplazamientos), observándose reducciones de más de 20% entre un amortiguador con $\alpha=0.35$ y un amortiguador lineal en estructuras con periodos de 3 s. Estas diferencias fueron mayores al 40% para estructuras con periodos de 5 s.
10. Al aumentar el porcentaje de amortiguamiento, la no linealidad incrementa la diferencia entre las respuestas máximas en términos de los desplazamientos.
11. Para amortiguamientos adicionales grandes, el efecto del segundo modo de vibrar del suelo es menor.
12. Los resultados en este estudio difieren con los obtenidos en estudios realizados en suelos firmes.
13. Para lograr reducir las relaciones de desplazamientos, se puede adoptar un proceso iterativo como el propuesto en la sección 4.5 para encontrar una constante de amortiguamiento viscoso no lineal más apropiada.

14. El uso de amortiguadores viscosos lineales o no lineales mejora el desempeño de las estructuras, al reducir de manera efectiva los desplazamientos, velocidades, aceleraciones y fuerzas inducidas por movimientos sísmicos.
15. Al estudiar el uso de amortiguadores viscosos no lineales en estructuras de varios grados de libertad, se observó que las diferencias en los desplazamientos debidas a la no linealidad, aumentan con respecto a lo observado en estructuras de un grado de libertad.
16. Las relaciones de fuerza de amortiguamiento entre amortiguadores no lineales y lineales, en estructuras de varios grados de libertad, tienen una tendencia similar a las de estructuras de un grado de libertad, pero con relaciones mayores.

5.2. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Para investigaciones futuras se recomienda:

1. En este estudio se utilizó únicamente un registro de aceleraciones (SCT-19/09/85), por lo que se recomienda utilizar otros registros sísmicos correspondientes a suelo blando, con el fin de observar similitudes y diferencias entre estos.
2. Analizar estructuras con otros sistemas estructurales y considerar comportamiento inelástico de los materiales.
3. Como se pudo observar en este estudio, las constantes de amortiguamiento no lineal calculadas con ecuación (32) dan como resultado desplazamientos diferentes a los obtenidos en una estructura con amortiguadores lineales. Con el objetivo de ajustar esos desplazamientos, se recomienda proponer procedimientos o ecuaciones alternativas que permitan obtener mejores constantes de amortiguamiento no lineal.
4. Estudiar estructuras en 3 dimensiones y analizar los efectos de torsión por irregularidad en geometría, rigidez, masas, etc.
5. Evaluar los efectos de la interacción suelo-estructura.

REFERENCIAS

- Castillo T. y Ruiz S.E. (2014), "Reduction factors for seismic design spectra for structures with viscous energy dampers", *Journal of Earthquake Engineering*, 18: 3, 323-349.
- Chopra A.K. (2001), "Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering" (3rd edn), Prentice-Hall: Upper Saddle River, NJ.
- Christopoulos C. y Filiatrault A. (2006), "Principles of passive supplemental damping and seismic isolation", IUSS Press: Pavia, Italy.
- Constantinou M.C. y Symans M.D. (1992), "Experimental and analytical investigation of seismic response of structures with supplemental fluid viscous dampers", Report No. NCEER-92-0032, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.
- Cruz, M. (2015), "Memoria del terremoto de 1985". El edificio Nuevo León en Tlatelolco [Fotografía]. Recuperado de <https://cdn.proceso.com.mx/media/2015/09/er6.jpg>
- Guerrero H., Ji T., Teran-Gilmore A., y Escobar J.A. (2016), "A method for preliminary seismic design and assessment of low-rise structures protected with buckling-restrained braces", *Engineering Structures*, 123:141–54.
- Lin W-H y Chopra A.K. (2002), "Earthquake response of elastic SDF systems with non-linear fluid viscous dampers", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 31: 1623-1642.
- Mayoral J.M., Romo M.P., y Osorio L. (2008), "Seismic parameters characterization at Texcoco lake, Mexico", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28: 507-521.
- Ovando E, Ossa A, and Romo M. (2007), "The sinking of Mexico City: Its effects on soil properties and seismic response", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27: 333–343.
- Pavlau E.A. y Constantinou M.C. (2004), "Response of elastic and inelastic structures with damping systems to near-field and soft-soil ground motions", *Engineering Structures* 26: 1217-1230.
- Pekcan G., Mander J.B. y Chen S.S. (1999), "Fundamental considerations for the design of non-linear viscous dampers", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 28:1405 –1425.
- Rivera V.M, y Ruiz S.E. (2010), "Método dinámico modal para edificios con disipadores de energía viscosos no-lineales", XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, León Guanajuato.
- Rosenblueth E. y Meli R. (1986), "The 1985 earthquake: causes and effects in Mexico City", *Concrete International, ACI*, 8: 23-24.
- Ruiz S.E. (2011), "Recomendaciones para diseño de edificios con disipadores de energía (en el marco de las NTCDS del RCDF) con Comentarios", Serie Investigación y Desarrollo, SID 667. Instituto de Ingeniería, UNAM.

Ruiz S.E. (2018a), “Comentarios al apéndice B (Edificios con disipadores de energía sísmica) de las NTCS-2017”. Informe de investigación para el Instituto de Seguridad para la Construcción del D.F., Instituto de Ingeniería, UNAM.

Ruiz S.E. (2018b) “Review of Guidelines for Seismic Design of Structures with Damping Systems”, *The Open Civil Engineering Journal*, 12, 195-204.

Santos M.A, Ruiz S.E., Santos A., y Valenzuela F. (2017), “Comparación de dos métodos simplificados para el diseño sísmico de edificios con amortiguadores viscosos no lineales”, XXI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Guadalajara, Jalisco.

Seed H.B., Romo M.P., Sun J.I., Jaime A., y Lysmer J. (1988), “The Mexico Earthquake of September 19, 1985—Relationships Between Soil Conditions and Earthquake Ground Motions”, *Earthquake Spectra*, 4(4): 687-729.

Seleemah A.A. y Constantinou M.C. (1997), “Investigation of seismic response of buildings with linear and non-linear fluid viscous dampers”, National Center for Earthquake Engineering Research, NCEER Report No. 97-0004, State University of NY at Buffalo, Buffalo, NY.

Symans M.D. y Constantinou M.C. (1998), “Passive fluid viscous damping systems for seismic energy dissipation”, *ISET Journal of Earthquake Technology*, Paper No. 382; 35(4):185 –206.

Symans M.D., Charney F.A., Whittaker A.S., Constantinou M.C., Kircher C.A., Johnson M.W. y McNamara R.J. (2008), “Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments”, *Journal of Structural Engineering*, 134(1), 3-21.

Taylor D.P. (2003), “History, design, and application of fluid dampers in structural engineering”, Taylor Devices, Inc., <http://www.taylordevices.com/papers/history/design.htm>.

Taylor D.P. y Katz I. (2003), “Seismic protection with fluid viscous dampers for the torre mayor, a 57-story office tower in Mexico City, Mexico”, Taylor Devices, Inc., <http://taylordevices.com/Tech-Paper-archives/literature-pdf/71-SeismicProtectionwithFVD.pdf>

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*, 25: 185–211.

Terenzi G. (1999), “Dynamics of SDOF systems with non-linear viscous damping”, *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)* 125(8):956–963.

Verdugo E. (2017), “El terremoto de México en imágenes”. [Fotografía]. Recuperado de <https://www.nytimes.com/es/2017/09/19/terremoto-fotos-mexico/>