



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Comportamiento sísmico de  
rehabilitación de edificios con  
un sistema inercial rotacional en  
su primer piso débil**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Civil**

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

Isaac Daniel Franco Macias

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Miguel Ángel Jaimes Téllez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

---

## **Dedicatoria**

*A mis padres por darme la vida, consejos, tiempo, las herramientas necesarias, y estar siempre apoyándome incondicionalmente, gracias por ayudarme a llegar a cumplir este logro, las palabras no son suficientes para expresar lo agradecido que me siento con ustedes.*

*A la hermosa familia que tengo que siempre expreso amor, apoyo sincero y que sin importar las circunstancias siempre estuvieron para mí.*

---

## **Agradecimientos**

*A la Universidad Nacional Autónoma de México y la Facultad de Ingeniería por brindarme los conocimientos requeridos.*

*A todos mis profesores por brindarme su ayuda a lo largo de la carrera.*

*A mi director de tesis por ofrecerme el apoyo, tiempo y la oportunidad de desarrollar este trabajo.*

*Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM IN102021 “Estudio de riesgo sísmico de rehabilitación de edificios existentes denominados de planta baja débil con un sistema inercial rotacional”. También, esta investigación fue financieramente soportada por el proyecto IG100623-PAPIIT-UNAM denominado “Evaluación del daño acumulado por efectos sísmicos y corrosivos durante el ciclo de vida en edificios de concreto reforzado”. Agradezco a la DGAPA-UNAM la beca recibida. Apoyo adicional fue auspiciado por el instituto de ingeniería de la UNAM a través del Fondo de investigación R528.*

---

# Índice

<b>Resumen</b> .....	1
<b>Abstract</b> .....	1
<b>1. Introducción</b> .....	2
<b>2. Marco teórico</b> .....	4
2.1 Sistema simple de masa-resorte-amortiguador de un grado de libertad (1GDL) .....	4
2.2 Espectro de respuesta .....	5
2.3 Distorsión de entrepiso.....	5
2.4 Análisis no lineal paso a paso.....	6
2.5 Planta baja débil.....	7
2.6 Sistema de un grado de libertad (1GDL) con un amortiguador lineal viscoso sobre un marco rígido Chevron.....	7
2.7 Sistema de un 1GDL con un sistema inercial rotacional sobre un marco rígido Chevron....	8
<b>3. Metodología</b> .....	10
<b>4. Sismos usados</b> .....	11
4.1 Sismos usados en la Ciudad de México.....	11
4.1.1 Sismo del 19 de septiembre de 2017 ( $M_w=7.1$ ).....	11
4.1.2 Sismo del 19 de septiembre de 1985 ( $M_w=8.1$ ).....	13
4.2 Sismos usados internacionales .....	13
4.2.1 Sismo de San Fernando, California de 1971 (Pacoima) ( $M_w=6.6$ ).....	13
4.2.2 Sismo de Kobe, Takarazuka de 1995 ( $M_w=7.2$ ) .....	14
4.2.3 Espectros de respuesta .....	15
4.2.4 Aceleraciones y periodos de vibrar del suelo .....	18
<b>5. Ejemplos ilustrativos</b> .....	19
5.1 Caso 1: Respuesta sísmica de sistemas de un grado de libertad (1GDL) .....	19
5.1.1 1GDL.....	19
5.1.2 1GDL con amortiguador lineal viscoso.....	20
5.1.3 1GDL con sistema inercial rotacional .....	21
5.1.4 Comparaciones de sistemas de 1GDL analizados.....	22
5.2 Caso 2: Respuesta sísmica de edificio de múltiples grados de libertad (MGDL) .....	29
5.2.1 Edificio sin rehabilitar (ORIGINAL) .....	31
5.2.2 MGDL con amortiguador lineal viscoso .....	32

---

5.2.3	<i>MGDL con sistema inercial rotacional</i> .....	33
5.2.4	<i>Comparaciones de sistemas de MGDL analizados</i> .....	34
5.2.4.1	<i>Curvas de histéresis</i> .....	44
5.3	<i>Comparación de curvas de fragilidad de construcciones analizadas</i> .....	50
<b>6.</b>	<b><i>Discusiones</i></b> .....	64
<b>7.</b>	<b><i>Conclusiones</i></b> .....	66
<b>8.</b>	<b><i>Referencias</i></b> .....	67
<b>Anexos</b>	.....	69
<b>Anexo A:</b>	<b>Armado de las columnas y vigas del edificio de MGDL</b> .....	69
<b>Anexo B:</b>	<b>Diagramas de interacción de las columnas</b> .....	71
<b>Anexo C:</b>	<b>Distorsión de entrepiso de estructuras de MGDL</b> .....	73
<b>Anexo D:</b>	<b>Distorsión de entrepiso de estructuras de 2GDL</b> .....	76

---

## **Índice de figuras**

Figura 2.1 Sistema simple masa-resorte-amortiguador.....	4
Figura 2.2 Registro de la estación SCT del sismo del 19 de septiembre de 2017 y su espectro de respuesta en función del periodo, $\xi = 0.05$ .....	5
Figura 2.3 Modelo de 1GDL con un amortiguador lineal viscoso sobre un marco rígido Chevron.....	8
Figura 2.4 Modelo de 1GDL con sistema inercial rotacional sobre un marco rígido Chevron....	9
Figura 4.1 Registro de la estación GR27 del sismo del 19 de septiembre de 2017 Mw=7.1 (GR27-2017) unidades en g.....	11
Figura 4.2 Registro de la estación CH84 del sismo del 19 de septiembre de 2017 Mw=7.1 (CH84-2017) unidades en g.....	12
Figura 4.3 Registro de la estación SCT del sismo del 19 de septiembre de 2017 Mw=7.1 (SCT-2017) unidades en g.....	12
Figura 4.4 Registro de la estación SCT del sismo del 19 de septiembre de 1985 Mw=8.1 (SCT-1985) unidades en g.....	13
Figura 4.5 Registro del sismo de 1971 en San Fernando Mw=6.6 (Pacoima) unidades en g..	14
Figura 4.6 Registro del sismo de Kobe de 1995 Mw=7.2 (Takarazuka) unidades en g. ....	15
Figura 4.7 Espectros de respuesta de las en función del periodo de los sismos de la Ciudad de México unidades en g. ....	16
Figura 4.8 Espectros de respuesta de las aceleraciones en función del periodo de los sismos internacionales unidades en g.....	17
Figura 5.1.1 Modelos de 1GDL usados para el análisis sísmico. a) sin amortiguamiento (ORIGINAL), b) con amortiguador viscoso, c) con sistema inercial rotacional. ....	19
Figura 5.1.2 Modelo de 1GDL (original).....	20
Figura 5.1.3 Historias de desplazamiento y aceleraciones del modelo original para el registro CH84-2017. ....	20
Figura 5.1.4 Modelo de 1GDL con amortiguador lineal viscoso.....	21
Figura 5.1.5 Historias de desplazamiento y aceleraciones del modelo con amortiguador viscoso para el registro CH84-2017.....	21
Figura 5.1.4 Modelo de 1GDL con sistema inercial rotacional.....	21
Figura 5.1.7 Historias de desplazamiento y aceleraciones del modelo con sistema inercial rotacional para el registro CH84-2017. ....	22
Figura 5.1.8 Historias de desplazamientos y aceleraciones del sistema de 1GDL sin amortiguamiento (ORIGINAL), con amortiguador viscoso y el sistema inercial rotacional para el registro GR27-2017.....	23

---

Figura 5.1.9 Historias de desplazamientos y aceleraciones del sistema de 1GDL sin amortiguamiento (ORIGINAL), con amortiguador viscoso y el sistema inercial rotacional para el registro CH84-2017. ....	24
Figura 5.1.10 Historias de desplazamientos y aceleraciones del sistema de 1GDL sin amortiguamiento (ORIGINAL), con amortiguador viscoso y el sistema inercial rotacional para el registro SCT-2017. ....	25
Figura 5.1.11 Historias de desplazamientos y aceleraciones del sistema de 1GDL sin amortiguamiento (ORIGINAL), con amortiguador viscoso y el sistema inercial rotacional para el registro SCT-1985. ....	26
Figura 5.1.12 Historias de desplazamientos y aceleraciones del sistema de 1GDL sin amortiguamiento (ORIGINAL), con amortiguador viscoso y el sistema inercial rotacional para el registro Pacoima.....	27
Figura 5.1.13 Historias de desplazamientos y aceleraciones del sistema de 1GDL sin amortiguamiento (ORIGINAL), con amortiguador viscoso y el sistema inercial rotacional para el registro Takarazuka.....	28
Figura 5.2.1 Geometría y dimensiones generales del edificio de 7 niveles de múltiples grados de libertad, unidades en m. ....	29
Figura 5.2.2 Primeros 3 modos de vibrar del edificio de 7 niveles. ....	30
Figura 5.2.3 Modelos usados para el análisis del comportamiento sísmico a) original, b) amortiguador viscoso, c) sistema inercial rotacional. ....	30
Figura 5.2.4 Edificio sin rehabilitar. ....	31
Figura 5.2.5 Historias de distorsión de entrepiso y aceleraciones del edificio sin rehabilitar para el registro CH84-2017. ....	31
Figura 5.2.6 Edificio con amortiguador viscoso en su primer piso débil. ....	32
Figura 5.2.7 Historias de distorsión de entrepiso y aceleraciones del edificio con amortiguador lineal viscoso para el registro CH84-2017. ....	32
Figura 5.2.8 Edificio con sistema inercial rotacional en su primer piso débil. ....	33
Figura 5.2.9 Historias de distorsión de entrepiso y aceleraciones del edificio con sistema inercial rotacional para el registro CH84-2017.....	33
Figura 5.2.10 Historias de distorsiones de entrepiso y aceleraciones del edificio de 7 niveles para el primer nivel y nivel de azotea, a) modelo original, b) modelo con amortiguador viscoso, c) modelo con sistema inercial rotacional para el registro GR27-2017.....	34
Figura 5.2.11 Historias de distorsiones de entrepiso y aceleraciones del edificio de 7 niveles para el primer nivel y nivel de azotea, a) modelo original, b) modelo con amortiguador viscoso, c) modelo con sistema inercial rotacional para el registro CH84-2017.....	35
Figura 5.2.12 Historias de distorsiones de entrepiso y aceleraciones del edificio de 7 niveles para el primer nivel y nivel de azotea, a) modelo original, b) modelo con amortiguador viscoso, c) modelo con sistema inercial rotacional para el registro SCT-2017.....	36

---

Figura 5.2.13 Historias de distorsiones de entrepiso y aceleraciones del edificio de 7 niveles para el primer nivel y nivel de azotea, a) modelo original, b) modelo con amortiguador viscoso, c) modelo con sistema inercial rotacional para el registro SCT-1985.....	37
Figura 5.2.14 Historias de distorsiones de entrepiso y aceleraciones del edificio de 7 niveles para el primer nivel y nivel de azotea, a) modelo original, b) modelo con amortiguador viscoso, c) modelo con sistema inercial rotacional para el registro Pacoima.....	38
Figura 5.2.15 Historias de distorsiones de entrepiso y aceleraciones del edificio de 7 niveles para el primer nivel y nivel de azotea, a) modelo original, b) modelo con amortiguador viscoso, c) modelo con sistema inercial rotacional para el registro Takarazuka.....	39
Figura 5.2.16 Gráfica de las distorsiones de entrepiso expresadas en porcentaje del edificio de 7 niveles para los sismos de la Ciudad de México. ....	40
Figura 5.2.17 Gráfica de las distorsiones expresadas en porcentaje de entrepiso del edificio de 7 niveles para los sismos internacionales.....	41
Figura 5.2.18 Gráfica del cortante global de entrepiso del edificio de 7 niveles para los sismos de la Ciudad de México.....	42
Figura 5.2.19 Gráfica del cortante global de entrepiso del edificio de 7 niveles para los sismos internacionales. ....	43
Figura 5.2.20 Curvas de histéresis de primer nivel del edificio de 7 niveles de los modelos estudiados para el registro GR27-2017. ....	44
Figura 5.2.21 Curvas de histéresis de primer nivel del edificio de 7 niveles de los modelos estudiados para el registro CH84-2017. ....	45
Figura 5.2.22 Curvas de histéresis de primer nivel del edificio de 7 niveles de los modelos estudiados para el registro SCT-2017. ....	46
Figura 5.2.23 Curvas de histéresis de primer nivel del edificio de 7 niveles de los modelos estudiados para el registro SCT-1985. ....	47
Figura 5.2.24 Curvas de histéresis de primer nivel del edificio de 7 niveles de los modelos estudiados para el registro Pacoima.....	48
Figura 5.2.25 Curvas de histéresis de primer nivel del edificio de 7 niveles de los modelos estudiados para el registro Takarazuka.....	49
Figura 5.3.1 Estaciones consideradas sobre suelo blando en la Ciudad de México (triángulo magenta).....	51
Figura 5.3.2 Espectros de respuesta de los registros de la zona GR27 escalados a una intensidad de 0.432 g en el periodo fundamental de la estructura $T=0.93$ s. ....	54
Figura 5.3.3 Espectros de respuesta de los registros de la zona CH84 escalados a una intensidad de 0.432 g en el periodo fundamental de la estructura $T=0.93$ s. ....	55
Figura 5.3.4 Graficas de las distorsiones de entrepiso máximas para cada modelo analizado de los registros de la zona GR27.....	56
Figura 5.3.5 Graficas de las distorsiones de entrepiso máximas para cada modelo analizado de los registros de la zona CH84. ....	57

---

Figura 5.3.6 Graficas de los cortantes de entrepiso máximos para cada modelo analizado de los registros de la zona GR27.....	59
Figura 5.3.7 Graficas de los cortantes de entrepiso máximos para cada modelo analizado de los registros de la zona CH84.....	60
Figura 5.3.8 Curvas de fragilidad sísmica de los modelos de MGDL analizados en el sitio GR27.....	62
Figura 5.3.9 Curvas de fragilidad sísmica de los modelos de MGDL analizados en el sitio CH84.....	63
Figura 9.1 Armado de la columna y viga del nivel 1.....	69
Figura 9.2 Armado de la columna y viga del nivel 2,3,4.....	69
Figura 9.3 Armado de la columna y viga del nivel 5.....	70
Figura 9.4 Armado de la columna y viga del nivel 6.....	70
Figura 9.5 Armado de la columna y viga del nivel 7.....	71
Figura 9.6 diagrama de interacción de columnas del nivel 1 de la estructura de MGDL.....	71
Figura 9.7 diagrama de interacción de columnas de los niveles 2,3 y 4 de la estructura de MGDL.....	72
Figura 9.8 diagrama de interacción de columnas de los niveles 5,6 y 7 de la estructura de MGDL.....	72
Figura 9.9 distorsión de entrepiso estructura de MGDL original para el sismo del 19 de septiembre de 2017 en zona CH84.....	73
Figura 9.10 distorsión de entrepiso estructura de MGDL con amortiguador viscoso para el sismo del 19 de septiembre de 2017 en zona CH84.....	73
Figura 9.11 distorsión de entrepiso estructura de MGDL con sistema inercial rotacional para el sismo del 19 de septiembre de 2017 en zona CH84.....	74
Figura 9.12 distorsión de entrepiso estructura de MGDL original para el sismo del 19 de septiembre de 2017 en zona GR27.....	74
Figura 9.10 distorsión de entrepiso estructura de MGDL con amortiguador viscoso para el sismo del 19 de septiembre de 2017 en zona GR27.....	75
Figura 9.11 distorsión de entrepiso estructura de MGDL con sistema inercial rotacional para el sismo del 19 de septiembre de 2017 en zona GR27.....	75
Figura 9.12 distorsión de entrepiso estructura de 2GDL con sistema inercial rotacional para el sismo del 19 de septiembre de 2017 en zona GR27 y zona CH84.....	76
Figura 9.13 distorsión de entrepiso estructura de 2GDL con sistema inercial rotacional de los registros escalados a una intensidad de 0.432 g en zona GR27.....	77
Figura 9.14 promedio de las distorsiones de entrepiso estructura de 2GDL de los registros escalados a una intensidad de 0.432 g en zona GR27.....	78

---

Figura 9.15 distorsión de entepiso estructura de 2GDL con sistema inercial rotacional de los registros escalados a una intensidad de 0.432 g en zona CH84. ....	79
Figura 9.16 promedio de las distorsiones de entepiso estructura de 2GDL de los registros escalados a una intensidad de 0.432 g en zona CH84. ....	80

---

## ***Índice de tablas***

Tabla 4.1 Periodos de vibrar y aceleraciones máximas de los sismos usados para la Ciudad de México .....	18
Tabla 5.3.1 Sismos considerados de 1964 a 2017 asociados a los PGA más grandes en la estación CU. ....	51

---

## ***Resumen***

El propósito del estudio es evaluar la respuesta sísmica de un edificio de vivienda de 7 pisos denominado “de planta baja débil”, rehabilitado con un sistema de control para la protección sísmica en su planta baja llamado “sistema inercial rotacional” durante los sismos de la Ciudad de México, el comportamiento sísmico del sistema de control será analizado en diferentes tipos de suelos, basados en las soluciones numéricas de las ecuaciones diferenciales gobernantes del sistema inercial rotacional para un sistema de un grado de libertad (1GDL), así como a través como un análisis numérico no lineal y peligro sísmico de los sitios de estudio para un sistema de múltiples grados de libertad. Para fines del estudio el sistema de control será comparado con un sistema más usual tal como el dispositivo de amortiguamiento suplementario.

## ***Abstract***

This study is to evaluate the seismic response of a 7-story structure with soft first story engaged with a supplemental rotational inertia system to protect them against the action of earthquake activity in México City the seismic behavior of the control system will be analyzed in different types of soils, based on the numerical solutions of the governing differential equations of the rotational inertial system for a one degree of freedom (1GDL) system, as well as through a nonlinear numerical and seismic hazard analysis of the study sites for a multiple degree of freedom system. For the purpose of the study the control system will be compared with a more usual system such as the supplementary damping device.

---

## **1. Introducción**

Los eventos sísmicos que han ocurrido recientemente en la Ciudad de México han mostrado que algunas estructuras tienen una alta vulnerabilidad, que generan fallas en el primer piso débil de las estructuras, las fallas son consecuencia de las demandas de desplazamientos a las que están sujetas las columnas de la estructura en su primer nivel, la baja rigidez lateral en su primer piso en relación con el resto de niveles hace que cuando ocurre un sismo de magnitud importante provoque el colapso de toda la estructura.

La condición de las estructuras denominadas como “de planta baja débil” es muy común en la Ciudad de México, debido al uso de la primera planta que es diferente al uso de los pisos superiores, comúnmente se ocupa el primer nivel para colocar locales para comercio o estacionamientos, mientras que los pisos superiores son ocupados para uso habitacional, lo que obliga a tener una altura de entrepiso más grande en el primer nivel, y una configuración de la estructuración distinta al resto de los niveles. El cambio de estructuración en el primer nivel causa una rigidez lateral menor en el primer piso de la estructura, causando el efecto de edificio de planta baja débil.

El Reglamento de Construcciones del Distrito Federal del 2017 (RCDF, 2017) menciona que se pueden utilizar dispositivos para el control de la respuesta dinámica de estructuras. Los dispositivos de control pueden mejorar el desempeño de las estructuras existentes o en proceso de rehabilitación denominadas “de planta baja débil” durante el movimiento sísmico. En la actualidad los dispositivos más comunes son los basados en un amortiguamiento suplementario y diagonales restringidas al pandeo, a pesar de la existencia de estos dispositivos en este estudio se evalúa la factibilidad del uso de un nuevo “sistema inercial rotacional”, como un sistema de control para la protección sísmica en la planta baja de las estructuras de edificios que presenten planta baja débil. La evaluación de un nuevo sistema de control puede agregar una alternativa extra para la rehabilitación de edificios, ayudando a tener un panorama más amplio para los encargados de la toma de decisiones.

Un factor de gran importancia en la elección del sistema de control es el tipo de suelo, en la Ciudad de México se pueden identificar tres tipos: suelo blando, suelo firme y suelo de transición, cada uno posee características dinámicas propias que cambian la transmisión de los efectos sísmicos, en suelo blando suelen existir amplificaciones de las aceleraciones lo que provocan una demanda mayor para las estructuras, los sistemas de control tienen como

---

objetivo modificar el comportamiento sísmico de las estructuras para tener desplazamientos laterales menores, y por consecuencia disminuyen los esfuerzos internos de los elementos que resisten los efectos dinámicos.

El propósito del estudio es evaluar la respuesta sísmica de un edificio de vivienda de 7 pisos denominado “de planta baja débil”, rehabilitado con un sistema de control para la protección sísmica en su planta baja llamado “sistema inercial rotacional” durante los sismos de la Ciudad de México, el comportamiento sísmico del sistema de control será analizado en diferentes tipos de suelos, basados en las soluciones numéricas de las ecuaciones diferenciales gobernantes del sistema inercial rotacional para un sistema de un grado de libertad (1GDL), así como a través como un análisis numérico no lineal y peligro sísmico de los sitios de estudio para un sistema de múltiples grados de libertad.

La respuesta sísmica de la estructura rehabilitada con el sistema de control analizado en este estudio será representada mediante el cortante, aceleración y las distorsiones de entrepiso, la peligrosidad sísmica de la estructura será mostrada a través de la curva de fragilidad, se evalúa el comportamiento de la estructura sometida al sismo de la Ciudad de México ocurrido en 2017, para un registro tomado por un acelerógrafo en una estación ubicada en suelo blando. El comportamiento sísmico presentado con el sistema inercial rotacional para fines de este estudio se compara con otro sistema de control más convencional tal como el dispositivo de amortiguamiento suplementario, con los resultados obtenidos se podrá tener noción del funcionamiento del sistema de control, el uso del sistema para rehabilitación de una estructura estará sujeto a las características y necesidades particulares de cada proyecto.

---

## 2. Marco teórico

### 2.1 Sistema simple de masa-resorte-amortiguador de un grado de libertad (1GDL)

En un sistema simple conformado por una masa ( $m$ ), un resorte ( $k$ ) y un amortiguador ( $c$ ) cuando está sujeto a un movimiento en su base se generan 3 fuerzas en el sistema (fuerza de inercia, rigidez y amortiguamiento), los cuales son representados en la ecuación de equilibrio dinámico.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_o \quad (2.1)$$

donde  $m$  es la masa del sistema,  $c$  el coeficiente de amortiguamiento,  $k$  la rigidez lateral en la dirección de análisis y  $\ddot{u}_o$  la aceleración del suelo producido por las ondas sísmicas.

En la figura 2.1 se muestra la representación de un sistema de 1GDL y sus componentes que se participan en el análisis dinámico del sistema, las columnas proporcionan una rigidez lateral y un coeficiente de amortiguamiento al sistema, se considera que la masa de todo el sistema se encuentra concentrada en la parte superior de este, estas variables interactúan cumpliendo la ecuación de equilibrio dinámico mostrando el comportamiento sísmico propio del sistema.

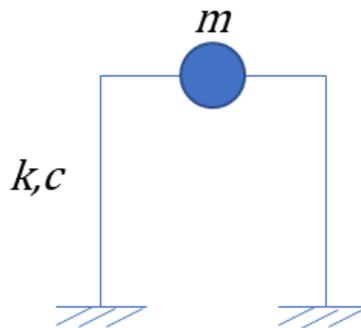


Figura 2.1 Sistema simple masa-resorte-amortiguador.

De acuerdo con Meli para el cálculo del periodo natural de vibrar y frecuencia del sistema se determina con las fórmulas 2.2 y 2.3 que se muestran (2010).

$$w = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.2)$$

$$T = \frac{2\pi}{w} \quad (2.3)$$

donde  $T$  es el periodo de vibrar del sistema y  $w$  es la frecuencia circular del sistema.

## 2.2 Espectro de respuesta

Chopra (2014) menciona que es un concepto importante de la ingeniería sísmica, debido al uso para resumir la respuesta máxima de los sistemas de 1GDL a un componente particular del terreno, es una gráfica del valor máximo de la respuesta de un sistema en función del periodo de vibración natural  $T_n$  del sistema, tienen una fracción de amortiguamiento fijo  $\xi$ .

En la figura 2.2 se muestra el espectro de respuesta del registro del sismo ocurrido en 2017 en la Ciudad de México (CDMX), las respuestas máximas de aceleración están en función del periodo de vibrar natural de una estructura de 1GDL, estos espectros también pueden representar la respuesta máxima del sistema en términos de las velocidades inducidas por el sismo.

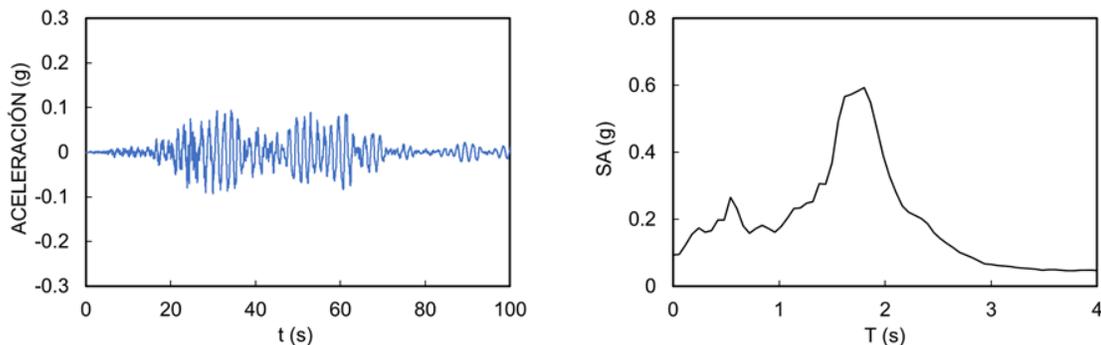


Figura 2.2 Registro de la estación SCT del sismo del 19 de septiembre de 2017 y su espectro de respuesta en función del periodo,  $\xi = 0.05$ .

## 2.3 Distorsión de entrepiso

Meli (2010) establece que un índice muy importante para poder dimensionar la magnitud de los posibles daños es la distorsión de entrepiso, que es el

---

desplazamiento relativo entre dos pisos sucesivos dividido entre la altura de entrepiso  $h$ .

$$\gamma = \frac{\Delta x}{h} \quad (2.7)$$

donde  $\Delta x$  es el desplazamiento relativo entre dos entrepisos sucesivos en la dirección de análisis y  $h$  altura de entrepiso.

#### 2.4 Análisis no lineal paso a paso

En un análisis no lineal las ecuaciones de equilibrio dinámico de la estructura se ven afectadas debido a cambios en las relaciones cargas-deformación, y de igual forma con la consideración de no linealidad de los materiales y la geometría se generan alteraciones a las ecuaciones de movimiento. Este tipo de análisis nos proporciona una aproximación más cercana al comportamiento real del sistema.

Las ecuaciones de movimiento se modifican como se muestra a continuación.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + [F(u) - K_g u] = -M\ddot{u}_o \quad (2.4)$$

donde  $K_g$  es la matriz de rigidez que toma en cuenta los efectos de esbeltez,  $F(u)$  es un vector de fuerzas que es función no lineal del vector de desplazamientos  $u$ .

Para un sistema de masa-resorte-amortiguador de 1GDL las ecuaciones de equilibrio dinámico son:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + [f(u) - (mg/h)] = -m\ddot{u}_o \quad (2.5)$$

donde  $h$  es la altura de la masa ( $m$ ),  $u$  su desplazamiento horizontal y  $c$  el coeficiente de amortiguamiento viscoso

De acuerdo con Bazán y Meli (2004) para resolver este sistema se realiza un análisis paso a paso, incorporando la no linealidad de los materiales tomando como base la formulación para sistemas lineales, considerando para cada paso la integración de la rigidez tangente  $k_t$ , definida como el cociente entre los incrementos de fuerzas en el resorte y desplazamientos en el intervalo.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + k_t u = -m\ddot{u}_o \quad (2.6)$$

---

Se debe iniciar iterativamente ya que  $k_t$  depende del desplazamiento del paso anterior.

### 2.5 Planta baja débil

De acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para sismo de la Ciudad de México publicadas en 2020 (NTC), si en un edificio el cociente de la capacidad resistente entre la fuerza cortante de diseño para el primer piso es menor que la fuerza cortante del segundo piso en un 60% se considera un edificio con planta baja débil (2020).

### 2.6 Sistema de un grado de libertad (1GDL) con un amortiguador lineal viscoso sobre un marco rígido Chevron

Las ecuaciones diferenciales que nos ayudan a modelar la respuesta sísmica de una estructura con un amortiguador suplementario se presentan a continuación.

$$\ddot{u} = \frac{A}{1 - \gamma} \quad (2.8)$$

$$A = -\ddot{u}_g(1 - \gamma) - 2\xi\omega\dot{u} - \omega^2u \quad (2.9)$$

donde el valor de  $\xi$  esta determinada por la suma del amortiguamiento que se presenta en las columnas del nivel y por el amortiguamiento proporcionado por el amortiguador viscoso suplementario y  $\gamma = m_2/m_1 + m_2$  es una relación unidimensional para relacionar las masas de los pisos.

En la figura 2.3 se muestra cómo se encuentra conformado el modelo de 1GDL amortiguado mediante un amortiguador viscoso sobre un marco Chevron, las variables que interactúan para determinar la respuesta dinámica del sistema son la rigidez de las columnas del marco, la rigidez del marco Chevron, el amortiguamiento de las columnas y del amortiguador viscoso y de la masa del sistema.

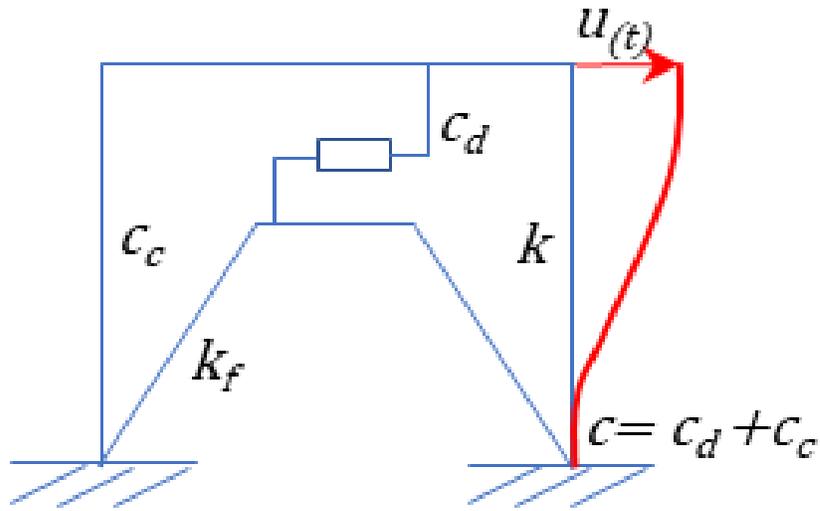


Figura 2.3 Modelo de 1GDL con un amortiguador lineal viscoso sobre un marco rígido Chevron.

### 2.7 Sistema de un 1GDL con un sistema inercial rotacional sobre un marco rígido Chevron

Para poder modelar la respuesta sísmica de un sistema de 1GDL se requiere hacer uso de las ecuaciones diferenciales presentadas a continuación.

$$\ddot{u} = \frac{A}{\tau} \quad (2.10)$$

$$\tau = 1 + \sigma - \gamma \quad (2.11)$$

$$\sigma = M_R/m \quad (2.12)$$

$$M_R = (1/2)m_W(R^2/\rho^2) \quad (2.13)$$

$$A = -\ddot{u}_g(1 - \gamma) - 2\xi\omega\dot{u} - \omega^2u \quad (2.14)$$

donde  $\tau$  es la relación de inercia,  $M_R$  es la inercia del sistema de inercia rotacional suplementario,  $R$  es el radio del volante,  $m_W$  es la masa del volante que gira en torno a un eje,  $\rho$  es el radio del piñón concéntrico al volante y la fuerza transmitida por el volante al primer piso se obtiene con  $F_1 = M_R\ddot{u}$ .

En la figura 2.4 se muestran los componentes del sistema de sistema inercial rotacional, está conformado por un volante en el cual se concentra la masa rotacional del sistema, el volante esta unido a un eje en dirección perpendicular al plano y conectado con piñón, el piñón se asemeja a un engrane el cual se desplaza por un rack que es compatible con el engranaje del piñón. El sistema trabaja impidiendo el desplazamiento ejercido por un movimiento sísmico, mediante la aplicación de una sistema inercial rotacional que impide que el desplazamiento lateral, causando desplazamientos menores a los producidos en un sistema sin amortiguamiento.

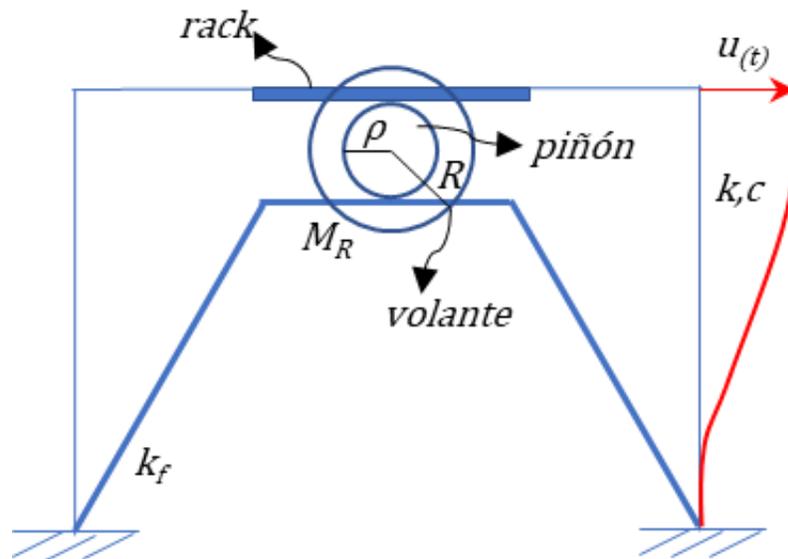


Figura 2.4 Modelo de 1GDL con sistema inercial rotacional sobre un marco rígido Chevron.

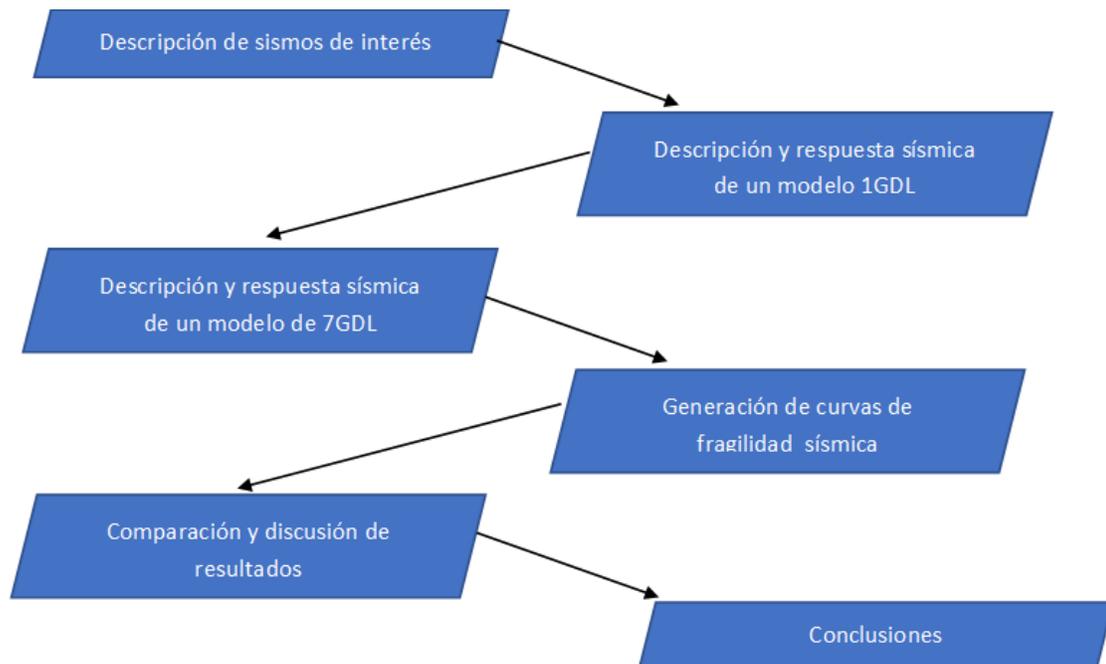
---

### 3. Metodología

La metodología considerada analizará el comportamiento sísmico del sistema inercial rotacional, ofreciendo una alternativa para la rehabilitación de edificaciones denominadas “de planta baja débil”, construidas en la Ciudad de México (CDMX), evaluando los desplazamientos de entrepiso, aceleración y cortante.

Los puntos realizados son:

1. Describir sismos de interés para el análisis del comportamiento sísmico
2. Describir modelo de 1GDL
3. Obtener y analizar la respuesta sísmica de un modelo de 1GDL
4. Describir las propiedades dinámicas del edificio de siete niveles
5. Revisar distorsiones de entrepiso del sistema inercial rotacional para sismos de interés
6. Revisar aceleraciones del sistema inercial rotacional para sismos de interés
7. Revisar cortante del sistema inercial rotacional para sismos de interés
8. Obtener de la curva de fragilidad del sistema inercial rotacional
9. Comparar el sistema inercial rotacional con otros sistemas de amortiguamiento.



---

## 4. Sismos usados

### 4.1 Sismos usados en la Ciudad de México

#### 4.1.1 Sismo del 19 de septiembre de 2017 ( $M_w=7.1$ )

El sismo ocurrió a 120 km al sur de la Ciudad de México el 19 de septiembre de 2017, de acuerdo con Cruz, Singh y Ordaz (2017) el movimiento sísmico tuvo una magnitud de 7.1, provocó daños en las edificaciones por las aceleraciones máximas registradas que superan a las aceleraciones causadas por el sismo de 1985, el tipo de suelo compuesto por sedimentos blandos generaron una amplificación de las ondas sísmicas. Los edificios más afectados fueron estructuras relativamente pequeñas de entre 4 a 7 niveles, y las estructuras denominadas de planta baja débil, ubicadas en la zona de transición (entre suelo firme y blando) y zona de suelo blando.

En la figura 4.1 se muestra la historia de aceleraciones para el registro GR27-2017, los datos son obtenidos del acelerógrafo de la estación GR27, ubicada en la secundaria No.55 en la colonia Agrícola Oriental, alcaldía Iztacalco, localizada en suelo de transición con un periodo de vibrar predominante del suelo de  $T_s = 0.8$  s, la aceleración máxima tiene un valor aproximado de  $\ddot{u}_{0m\acute{a}x} = 0.15$  g.

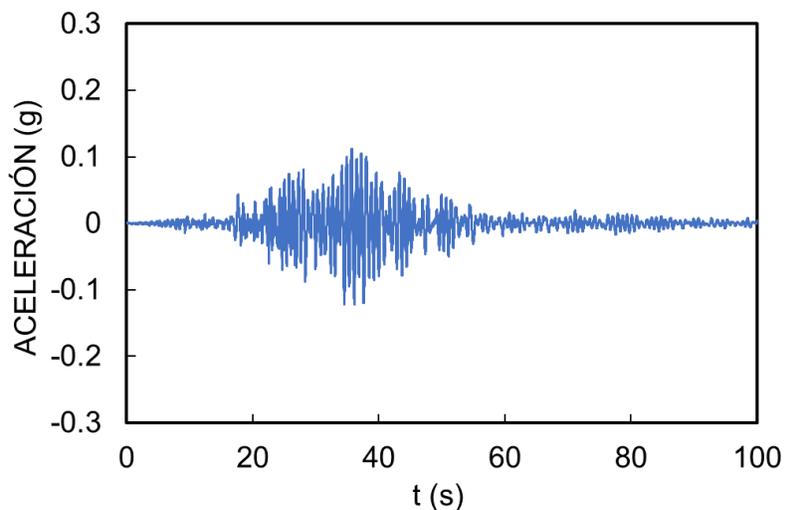
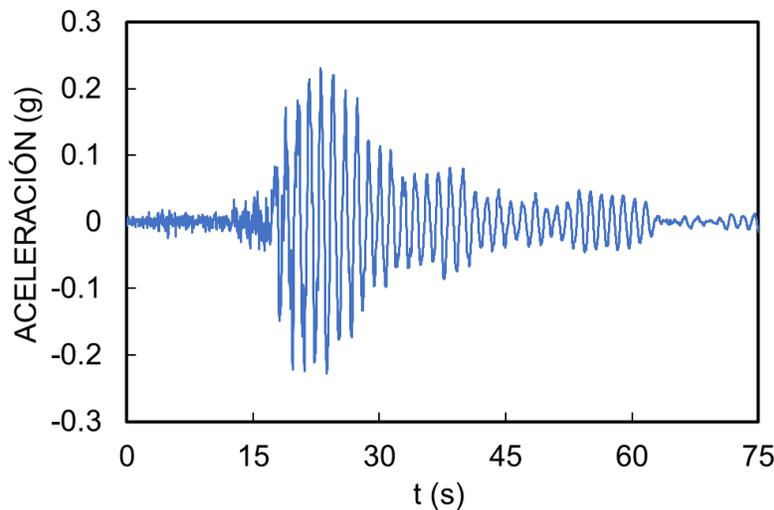


Figura 4.1 Registro de la estación GR27 del sismo del 19 de septiembre de 2017  $M_w=7.1$  (GR27-2017) unidades en g.

En la figura 4.2 se muestra la historia de aceleraciones para el registro CH84-2017, los datos son obtenidos del acelerógrafo de la estación CH84, ubicada en la primaria L. Portillo W. en la colonia Ex-Ejido de San Francisco Culhuacán, alcaldía Coyoacán, localizada en zona de lago (suelo blando) con un periodo de

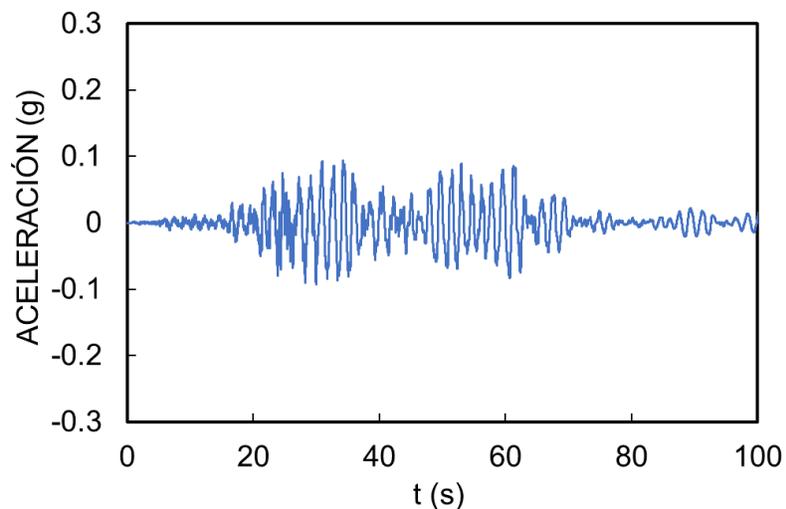
---

vibrar predominante del suelo de  $T_S = 1.2 \text{ s}$ , la aceleración máxima tiene un valor aproximado de  $\ddot{u}_{0m\acute{a}x} = 0.25 \text{ g}$ .



*Figura 4.2 Registro de la estación CH84 del sismo del 19 de septiembre de 2017  $M_w=7.1$  (CH84-2017) unidades en g.*

En la figura 4.3 se muestra la historia de aceleraciones para el registro SCT-2017, los datos son obtenidos del acelerógrafo de la estación SCT, ubicada en el edificio de la SEDESOL en la colonia Narvarte Poniente, alcaldía Benito Juárez, localizada en zona de lago (suelo blando) con un periodo de vibrar predominante del suelo de  $T_S = 1.7 \text{ s}$ , la aceleración máxima tiene un valor aproximado de  $\ddot{u}_{0m\acute{a}x} = 0.1 \text{ g}$ .



*Figura 4.3 Registro de la estación SCT del sismo del 19 de septiembre de 2017  $M_w=7.1$  (SCT-2017) unidades en g.*

---

#### 4.1.2 Sismo del 19 de septiembre de 1985 ( $M_w=8.1$ )

El sismo ocurrió a uno 700 km de la Ciudad de México el 19 de septiembre de 1985, las consideraciones que el reglamento de construcción para la ciudad de México contemplaba fueron superadas por la magnitud de las aceleraciones el movimiento sísmico, de acuerdo con Meli (1986) el 65% de los edificios de 6 a 12 niveles para uso habitacional resultaron dañados, 775 edificios resultaron severamente dañados, 265 colapsaron y un total aproximado de 7,400 estructuras fueron afectadas en la Ciudad de México. El sismo tuvo una magnitud de 8.1 y hasta el año del 2017 fue el movimiento sísmico más relevante para el diseño y construcción de edificios.

En la figura 4.4 se muestra la historia de aceleraciones para el registro SCT-1985, los datos son obtenidos del acelerógrafo de la estación SCT, la aceleración máxima tiene un valor aproximado de  $\ddot{u}_{0m\acute{a}x} = 0.18 g$ .

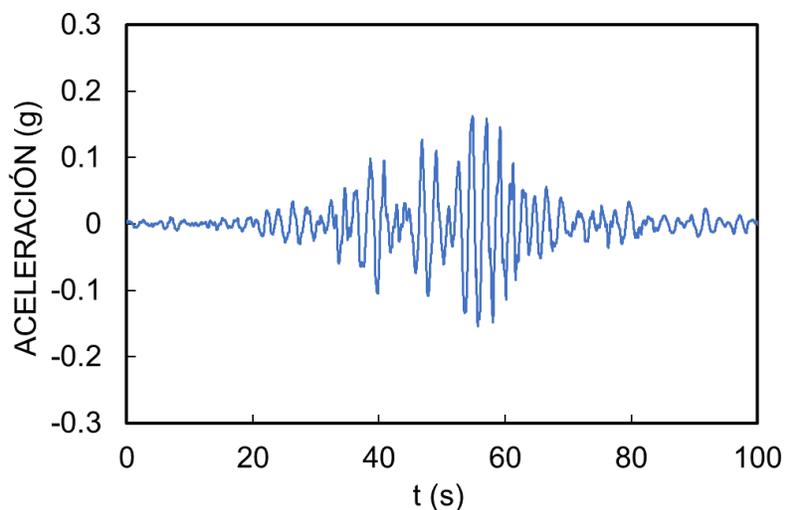


Figura 4.4 Registro de la estación SCT del sismo del 19 de septiembre de 1985  $M_w=8.1$  (SCT-1985) unidades en g.

#### 4.2 Sismos usados internacionales

##### 4.2.1 Sismo de San Fernando, California de 1971 (Pacoima) ( $M_w=6.6$ )

El sismo ocurrió a 14 km al norte San Fernando, California el 9 de febrero de 1971, según el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2021) el movimiento sísmico tuvo una magnitud de 6.6, tuvo una duración de aproximadamente 12 segundos, y 200 réplicas de una magnitud de 3, este

---

movimiento fue el primero en registrar una aceleración de  $1 g$  en la zona, esta medición fue tomada por un acelerógrafo ubicado en la presa Pacoima.

En la figura 4.5 se muestra la historia de aceleraciones para el registro de San Fernando, los datos son obtenidos del acelerógrafo de la estación ubicada en la presa Pacoima. Es un movimiento sísmico de gran intensidad y corta duración.

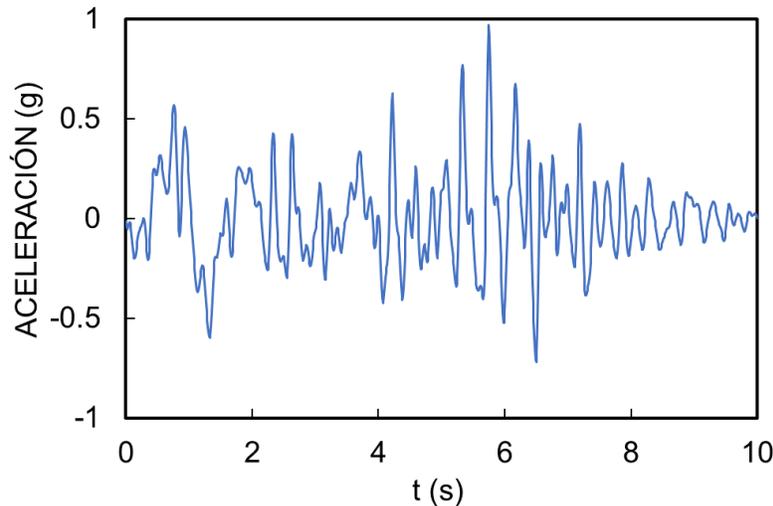


Figura 4.5 Registro del sismo de 1971 en San Fernando  $M_w=6.6$  (Pacoima) unidades en g.

#### 4.2.2 Sismo de Kobe, Takarazuka de 1995 ( $M_w=7.2$ )

El sismo ocurrió el 17 de enero de 1995 en la región de Kobe, Japón, de acuerdo con el trabajo realizado por Sato y Kumagai (1996) se tuvo una magnitud de 7.2, mencionan que las estructuras de concreto reforzado que colapsaron o sufrieron daños severos corresponden a las construidas antes de 1970, aproximadamente 94,500 viviendas de madera colapsaron debido al excesivo peso en los techos y falta de paredes.

En la figura 4.6 se muestra la historia de aceleraciones para el registro Takarazuka, los datos son obtenidos del acelerógrafo de la estación ubicada al sur de la prefectura de Hyogo. La aceleración máxima registrada tiene un valor aproximado de  $\ddot{u}_{0m\acute{a}x} = 0.84 g$ .

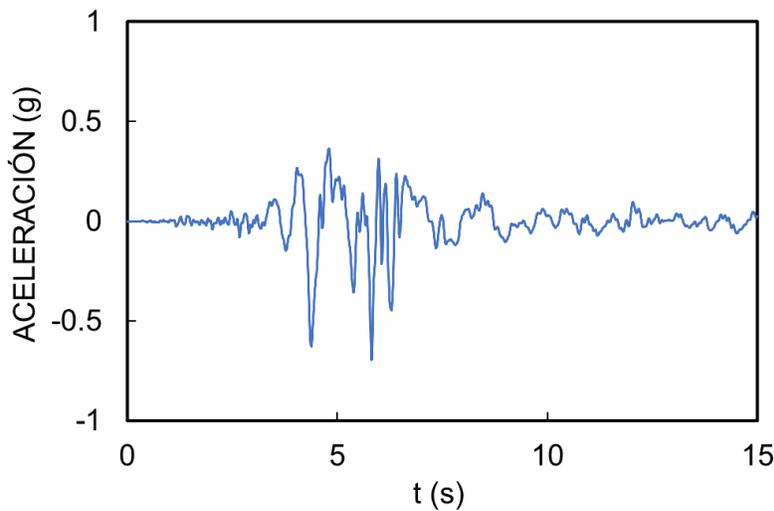


Figura 4.6 Registro del sismo de Kobe de 1995  $M_w=7.2$  (Takarazuka) unidades en g.

#### 4.2.3 Espectros de respuesta

Los registros de los sismos de la Ciudad de México de 1985 y 2017 serán analizados para poder evaluar el comportamiento del sistema inercial rotacional, los distintos registros del sismo del 2017 fueron elegidos con la finalidad de obtener el desempeño del sistema en distintos periodos de vibrar del suelo, tanto para el modelo de 1GDL como para el modelo de siete niveles serán sometidos al efecto de las aceleraciones presentadas por los registros antes mencionados.

Los espectros de respuesta de los sitios de interés se muestran en la figura 4.7, en el gráfico se puede identificar los periodos de las estructuras que sufren una demanda mayor, para el caso GR27 la aceleración máxima tienen un valor de 1.6 g para un periodo del suelo aproximado de 0.85 s, mientras que en el caso de CH84 la aceleración máxima es de 1.6 g para un periodo de 1.4 s, en el caso SCT-2017 la aceleración máxima tienen un valor cercano a 0.6 g para un periodo de 1.9 s, por último para el caso SCT-1985 para un periodo de 2 s se tuvieron aceleraciones que llegaron a un valor de 1 g.

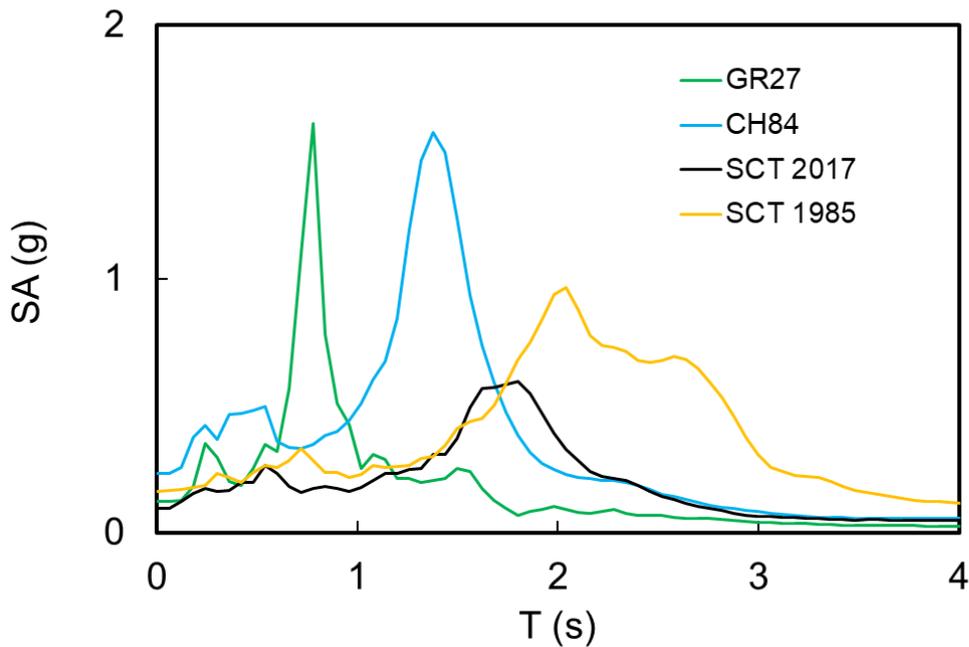
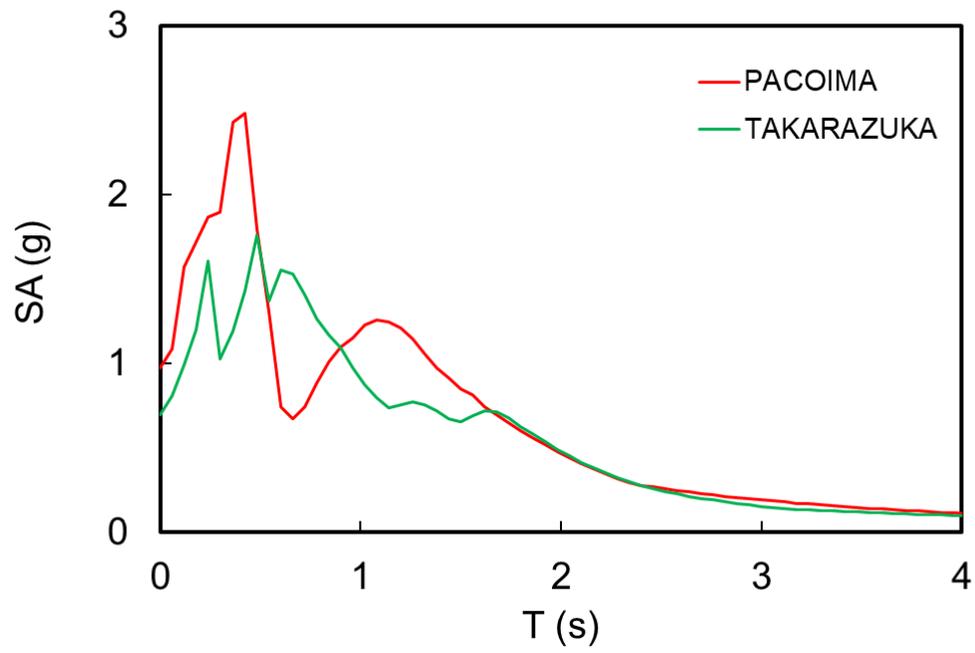


Figura 4.7 Espectros de respuesta de las en función del periodo de los sismos de la Ciudad de México unidades en g.

La relevancia que tienen los registros de estos sismos en este análisis es que marcan los requerimientos de la reglamentación para las construcciones en la Ciudad de México, dicho esto los resultados y conclusiones estarán enfocados en determinar si la aplicación como sistema de control es adecuado en la rehabilitación de las edificaciones de la Ciudad de México.

De igual forma se evaluará el desempeño del sistema de control a sismos internacionales, que corresponden a los sismos de Pacoima Y Takarazuka, serán considerados como una referencia del comportamiento del sistema sometido a otro tipo de sismos, las características son diferentes en cuanto a duración, intensidad y tipo de suelo. Pueden servir para poder determinar si la implementación es correcta del sistema inercial rotacional en los sitios correspondientes.

En la figura 4.8 se muestran los espectros de respuesta de los sismos internacionales, para el caso Pacoima se cuenta con aceleraciones máximas de 2.5 g para un periodo de aproximadamente 0.4 s, en el caso de Takarazuka para un periodo de 0.6 s se llegan a presentar aceleraciones de 1.8 g.



*Figura 4.8 Espectros de respuesta de las aceleraciones en función del periodo de los sismos internacionales unidades en g.*

---

#### 4.2.4 Aceleraciones y periodos de vibrar del suelo

Los registros son elegidos por tener características diferentes provocadas por el tipo de suelo, el sismo del 2017 es el que rige el diseño sísmico en la Ciudad de México, por lo que se usaran 3 distintos registros de dicho sismo, en la tabla 4.1 se muestran las características de los registros que nos importan en el análisis sísmico, podemos observar que los tipo de suelo son el de transición y lago porque son las zonas en la Ciudad de México en las cuales los movimientos sísmicos generan daños importantes a las estructuras.

*Tabla 4.1 Periodos de vibrar y aceleraciones máximas de los sismos usados para la Ciudad de México*

<b>Estación</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Registro</b>	<b>Periodo del suelo</b>	<b>Aceleración del suelo máxima</b>
GR27	Transición	GR27-2017	0.8 s	0.15 g
CH84	Lago	CH84-2017	1.2 s	0.25 g
SCT	Lago	SCT-2017	1.7 s	0.10 g
SCT	Lago	SCT-1985	1.7 s	0.18 g

Se realiza el análisis del comportamiento del sistema inercial rotacional para distintos tipos de suelo y periodos de vibrar, que tienen valores entre 0.8 s a 1.7 s, esto con la finalidad de verificar si la respuesta de los modelos analizados con el sistema inercial rotacional tiene una correlación con el periodo de vibrar del suelo, y así poder determinar si el sistema es apto para usarse en cualquier tipo de suelo en el que se encuentre un edificio que requiera rehabilitación dentro de la Ciudad de México, otro aspecto importante de los registros es la aceleración máxima y como se puede apreciar en la tabla 4.1 los registros tienen magnitudes de las aceleraciones lo que nos permitirá observar el comportamiento del sistema inercial rotacional sometido a distintas condiciones.

---

## 5. Ejemplos ilustrativos

### 5.1 Caso 1: Respuesta sísmica de sistemas de un grado de libertad (1GDL)

El objetivo del análisis de este modelo es observar el desempeño del sistema inercial rotacional en un modelo simple de 1GDL, para posteriormente obtener el comportamiento sísmico de un modelo de múltiples grados de libertad y observar si el funcionamiento es similar para los distintos modelos. El análisis para obtener las respuestas sísmicas que se realizó es uno lineal paso a paso, el modelo de 1GDL con sistema inercial rotacional tiene un periodo de vibrar de 1 s, por razones de comparación de igual forma se obtiene la respuesta para dos modelos de 1GDL con amortiguamiento suplementario y sin amortiguamiento (Original), estos modelos de igual forma tienen un periodo de vibrar de 1 s, en la figura 5.1.1 se muestran los modelos que serán sometidos al análisis sísmico.

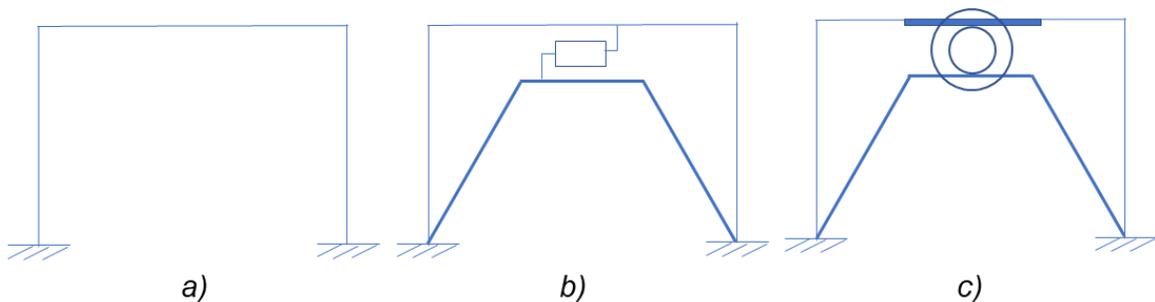


Figura 5.1.1 Modelos de 1GDL usados para el análisis sísmico. a) sin amortiguamiento (ORIGINAL), b) con amortiguador viscoso, c) con sistema inercial rotacional.

#### 5.1.1 1GDL

El sistema de un grado de libertad se muestra en la figura 5.1.2 es representado en este estudio como un marco de concreto reforzado, tiene un periodo natural de vibrar de 1 s, se obtiene la respuesta sísmica para el registro CH84-2017, el comportamiento experimentado por el modelo sirve para poder tener una referencia de los efectos que deben ser disminuidos por el sistema de amortiguamiento propuesto.

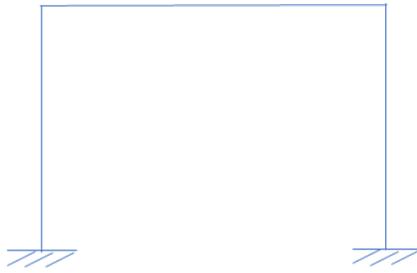


Figura 5.1.2 Modelo de 1GDL (original).

En la figura 5.1.3 se muestran la historia de desplazamientos y aceleraciones del modelo sometido bajo los efectos del sismo de 2017 en la Ciudad de México en la zona CH84, en donde se observa que el desplazamiento máximo tiene un valor de 12 cm aproximadamente, mientras que las aceleraciones máximas del modelo estuvieron en el rango de 0.6 g, la magnitud de los desplazamientos que se presentan en el modelo de 1GDL son los que se buscan disminuir con la implementación del sistema inercial rotacional.

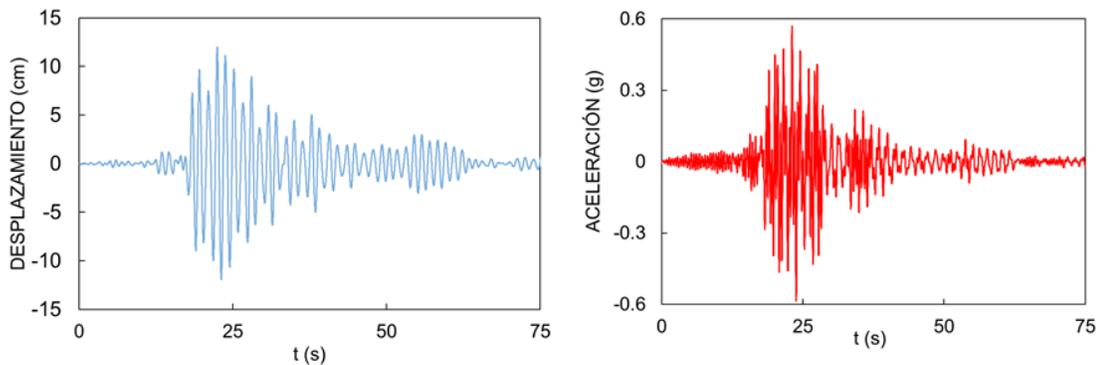


Figura 5.1.3 Historias de desplazamiento y aceleraciones del modelo original para el registro CH84-2017.

El modelo también fue evaluado para los registros anteriormente descritos y se compararan las distintas respuestas.

### 5.1.2 1GDL con amortiguador lineal viscoso

El modelo se muestra en la figura 5.1.4 está compuesto de un marco de concreto reforzado con un marco tipo Chevron con un amortiguador lineal viscoso, el periodo de vibrar de la estructura es de 1 s.

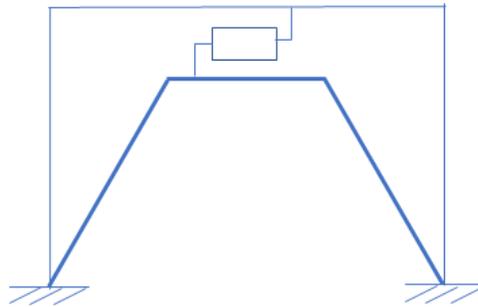


Figura 5.1.4 Modelo de 1GDL con amortiguador lineal viscoso.

Para el registro CH84-2017 se obtiene la respuesta sísmica, en la figura 5.1.5 se muestran las historias de desplazamientos y aceleraciones del modelo con amortiguador viscoso, el desplazamiento máximo tiene un valor cercano a 5 cm y una aceleración máxima de 0.3 g.

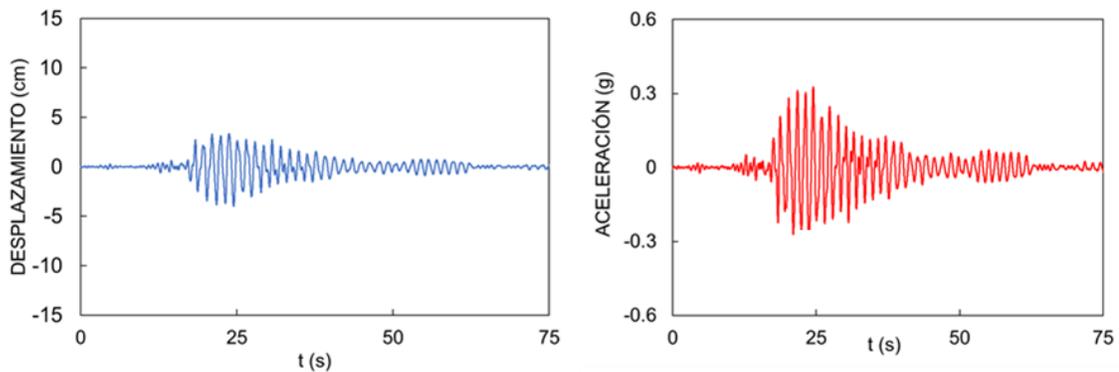


Figura 5.1.5 Historias de desplazamiento y aceleraciones del modelo con amortiguador viscoso para el registro CH84-2017.

### 5.1.3 1GDL con sistema inercial rotacional

El modelo con sistema inercial rotacional se muestra en la figura 5.1.6 compuesto por un marco de concreto armado y un sistema inercial rotacional soportado por un marco tipo Chevron.

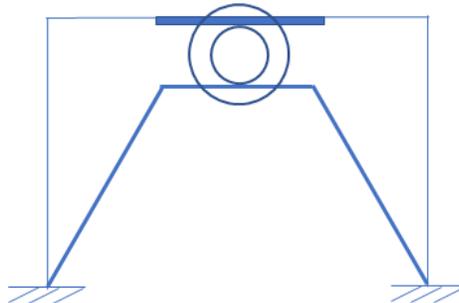
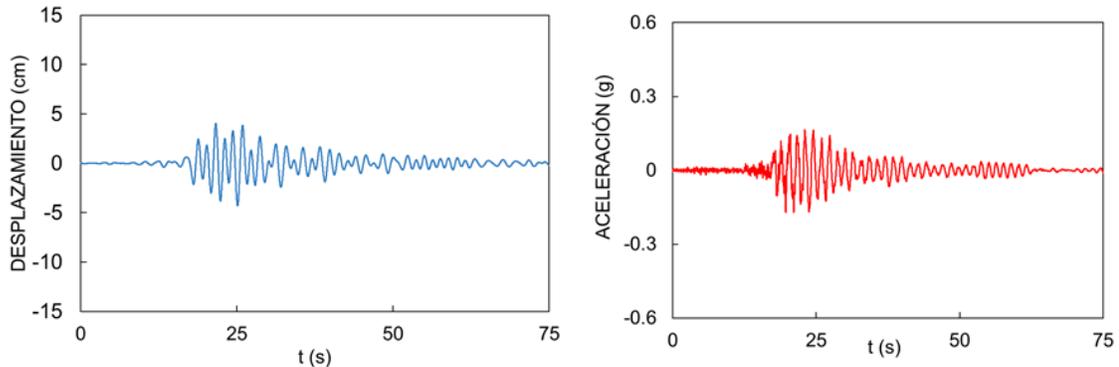


Figura 5.1.4 Modelo de 1GDL con sistema inercial rotacional.

En la figura 5.1.7 se muestran las historias de desplazamientos y aceleraciones para el modelo con sistema inercial rotacional para el registro CH84-2017, los desplazamientos mostrados tienen un valor aproximado de 4.5 cm y unas aceleraciones con un valor de 0.25 g.



*Figura 5.1.7 Historias de desplazamiento y aceleraciones del modelo con sistema inercial rotacional para el registro CH84-2017.*

La respuesta sísmica del modelo de 1GDL con sistema inercial rotacional resulta tener un comportamiento bueno disminuyendo las acciones a comparación de los otros dos modelos, pero para poder determinar si es una solución adecuada para cualquier tipo de suelo se evalúan más registros de los sismos de la Ciudad de México.

#### *5.1.4 Comparaciones de sistemas de 1GDL analizados*

Los desplazamientos y las aceleraciones que experimentan los modelos generados por el movimiento sísmico para el registro GR27-2017 se muestran en la figura 5.1.8, se observa que el modelo que tiene mejor desempeño es el de sistema inercial rotacional, debido a la disminución de los desplazamientos comparado con los otros dos modelos, dicha disminución es aproximadamente del 60% del desplazamiento presentado en el modelo ORIGINAL. Las aceleraciones de igual forma tienen una reducción notable del 60% en el modelo de sistema inercial rotacional comparado con los otros modelos. La respuesta del modelo de sistema inercial rotacional para el registro GR27-2017 tiene un desempeño correcto, debido a que el mejoramiento en las variables mostradas, en un suelo con un periodo de 0.8 s el sistema genero una respuesta satisfactoria.

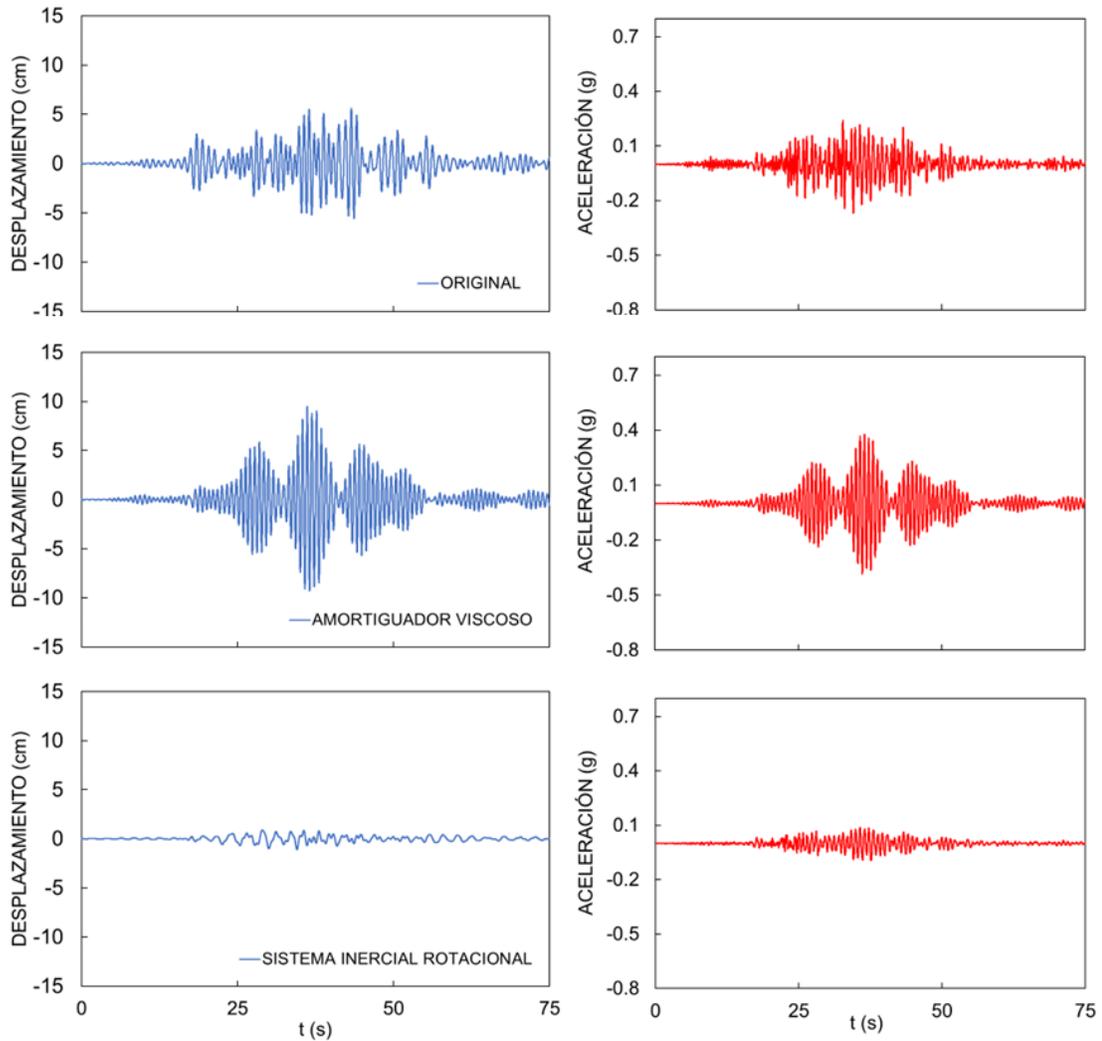
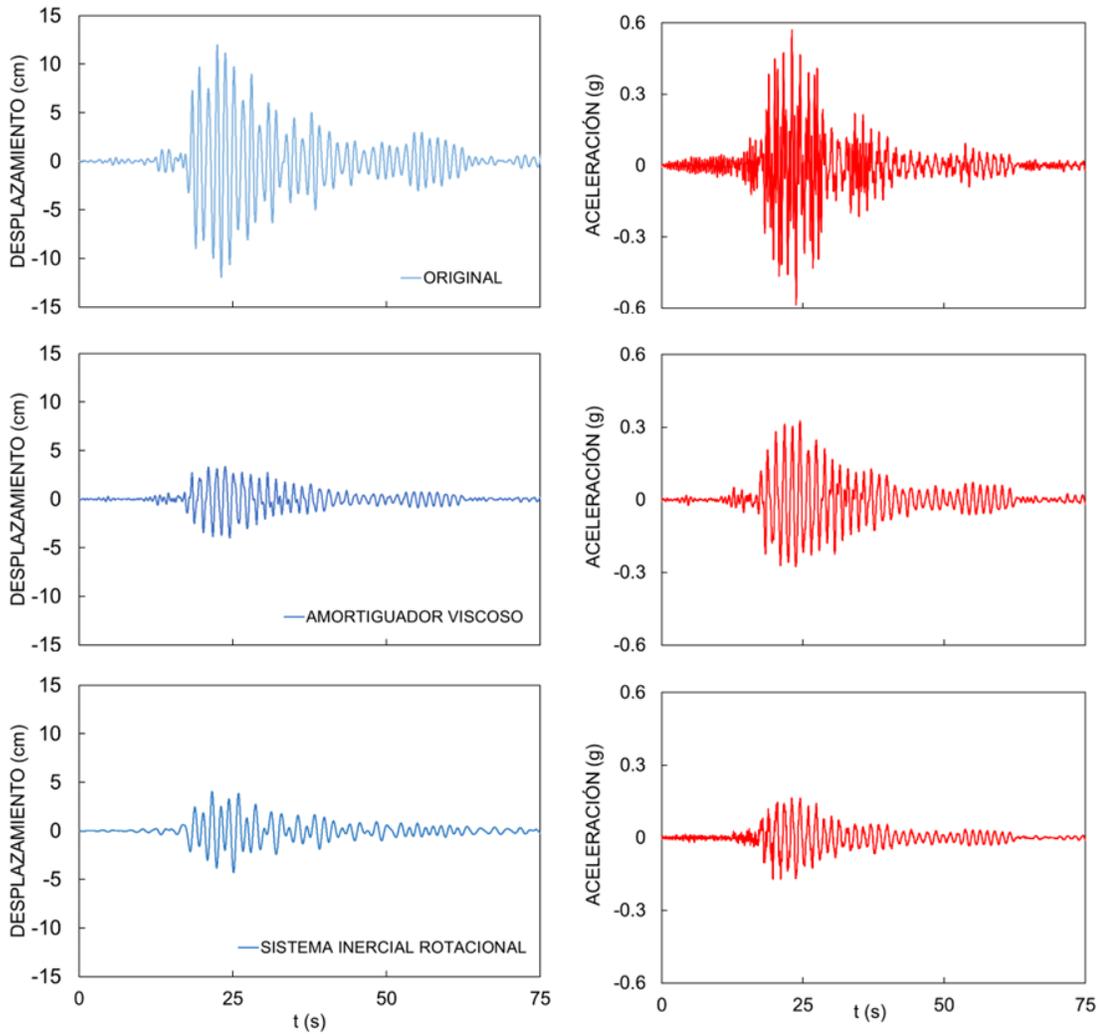


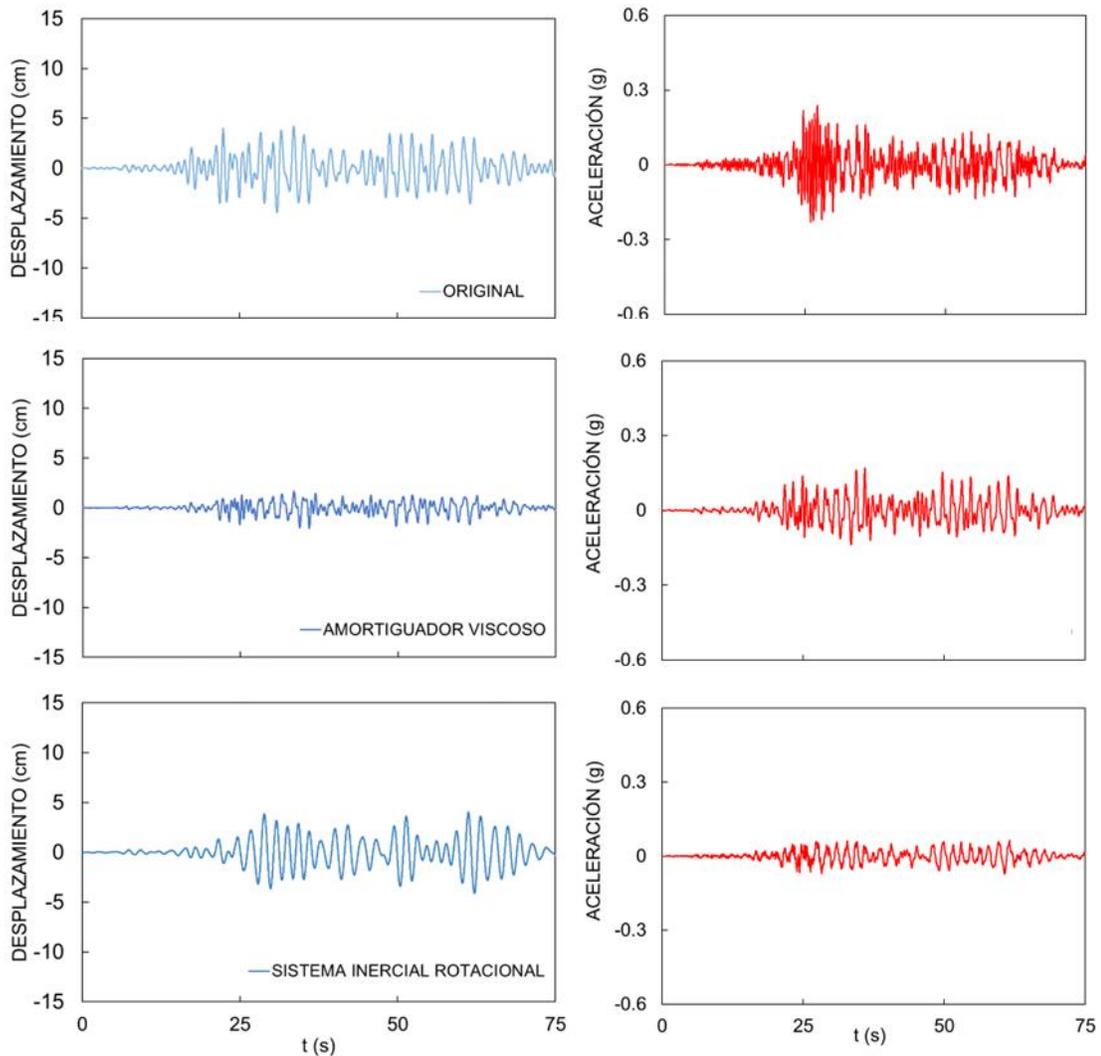
Figura 5.1.8 Historias de desplazamientos y aceleraciones del sistema de 1GDL sin amortiguamiento (ORIGINAL), con amortiguador viscoso y el sistema inercial rotacional para el registro GR27-2017.

En la figura 5.1.9 se muestran los desplazamientos y las aceleraciones de los modelos para el registro CH84-2017, se observa que el comportamiento en los desplazamientos del sistema inercial rotacional es similar al obtenido con un amortiguador viscoso, mejora la magnitud de los desplazamientos en un 60% comparándolo con el modelo sin amortiguamiento, en cuanto a las aceleraciones se tiene una disminución importante y es el modelo que mejor se desempeñó reduciendo en un 55% las aceleraciones. En un suelo con un periodo que corresponde a 1.2 s el sistema se desempeña correctamente.



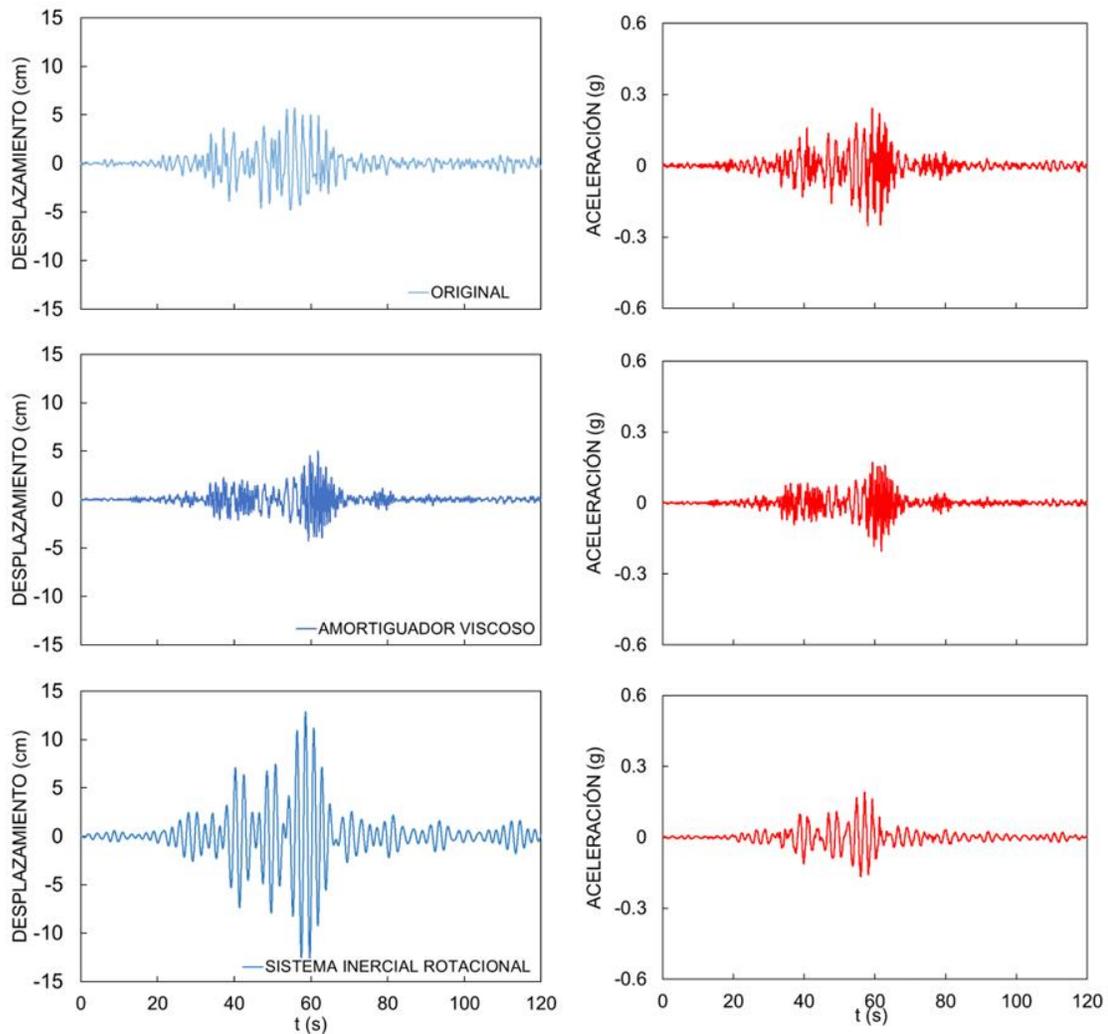
*Figura 5.1.9 Historias de desplazamientos y aceleraciones del sistema de 1GDL sin amortiguamiento (ORIGINAL), con amortiguador viscoso y el sistema inercial rotacional para el registro CH84-2017.*

En la figura 5.1.10 se muestran los desplazamientos y las aceleraciones de los modelos para el registro SCT-2017, el sistema inercial rotacional tiene un comportamiento de los desplazamientos similar al modelo denominado ORIGINAL, se observa que el comportamiento en los desplazamientos es prácticamente igual a el modelo sin amortiguamiento, el modelo que presenta mejor desempeño en las aceleraciones generadas es el sistema inercial rotacional. En un suelo con un periodo de 1.7 s el sistema no mejora el desempeño del modelo de 1GDL.



*Figura 5.1.10 Historias de desplazamientos y aceleraciones del sistema de 1GDL sin amortiguamiento (ORIGINAL), con amortiguador viscoso y el sistema inercial rotacional para el registro SCT-2017.*

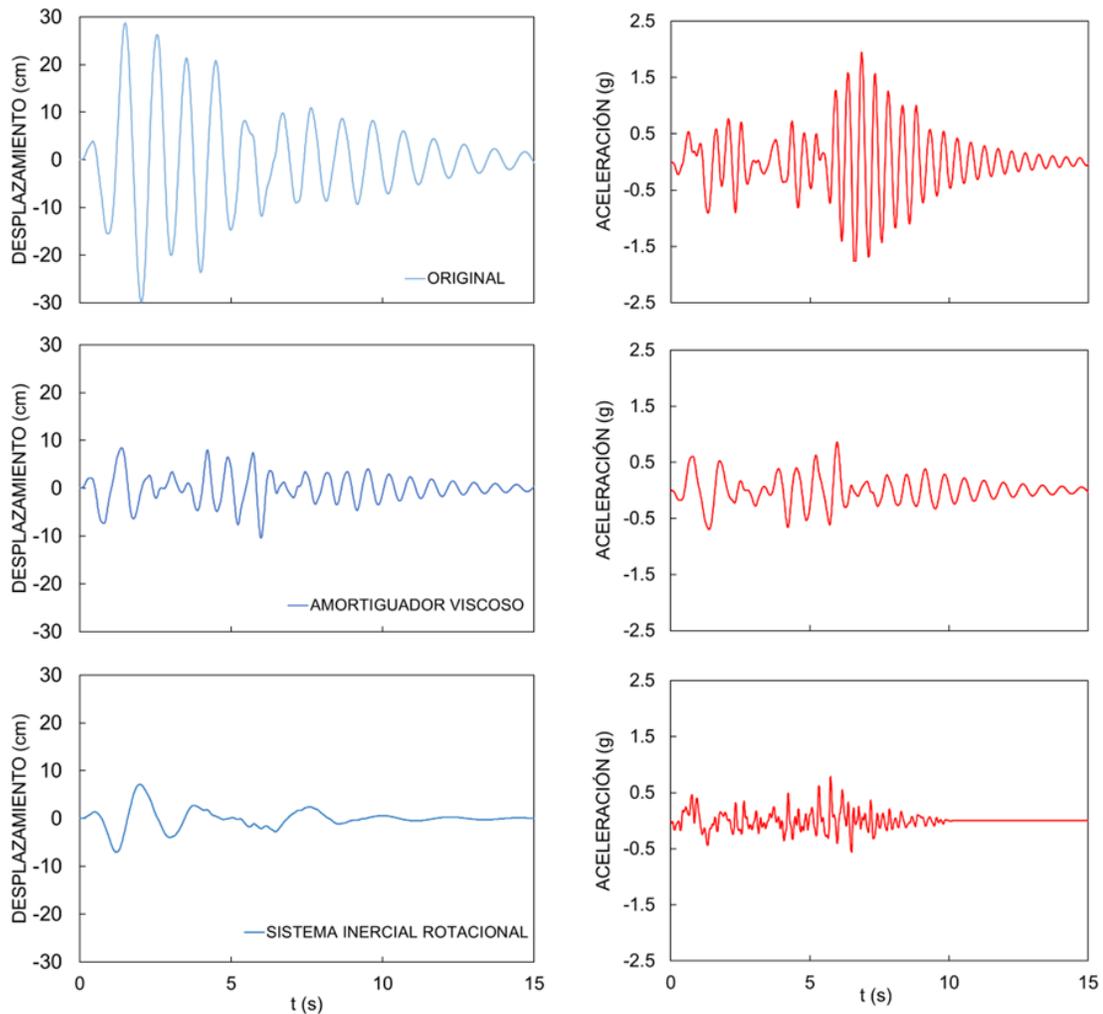
En la figura 5.1.11 se muestran los desplazamientos y las aceleraciones de los modelos para el registro SCT-1985, se observa que el comportamiento en los desplazamientos del sistema inercial rotacional aumenta a más del doble a comparación de los obtenidos con el sistema sin amortiguación, en cuanto a las aceleraciones se tiene un comportamiento similar al modelo sin amortiguamiento.



*Figura 5.1.11 Historias de desplazamientos y aceleraciones del sistema de 1GDL sin amortiguamiento (ORIGINAL), con amortiguador viscoso y el sistema inercial rotacional para el registro SCT-1985.*

Después de observar los datos obtenidos podemos determinar en qué zonas de la Ciudad de México el sistema inercial rotacional tuvo un buen desempeño, para el modelo de 1GDL la respuesta del sistema mejoró para los registros GR27-2017 y CH84-2017, mientras que en el registro SCT-2017 no se observó un cambio en el comportamiento, para el registro SCT-1985 la respuesta del modelo empeoró causando desplazamientos de magnitud mayor.

En el caso de los sismos internacionales, en la figura 5.1.12 se muestran los desplazamientos y las aceleraciones de los modelos para el registro Pacoima, se observa que el modelo de 1GDL con sistema inercial rotacional disminuye en un 65% los desplazamientos y aceleraciones en comparación con los modelos ORIGINAL y el sistema con amortiguador viscoso.



*Figura 5.1.12 Historias de desplazamientos y aceleraciones del sistema de 1GDL sin amortiguamiento (ORIGINAL), con amortiguador viscoso y el sistema inercial rotacional para el registro Pacoima.*

En la figura 5.1.13 se muestran los desplazamientos y las aceleraciones de los modelos para el registro Takarazuka, se observa que el modelo de 1GDL con sistema inercial rotacional genera un decremento de 55% en los desplazamientos y las aceleraciones, el sistema muestra un desempeño mejor

que el modelo con amortiguador viscoso. En sismos con intensidades importantes y de corta duración el sistema parece ser adecuado.

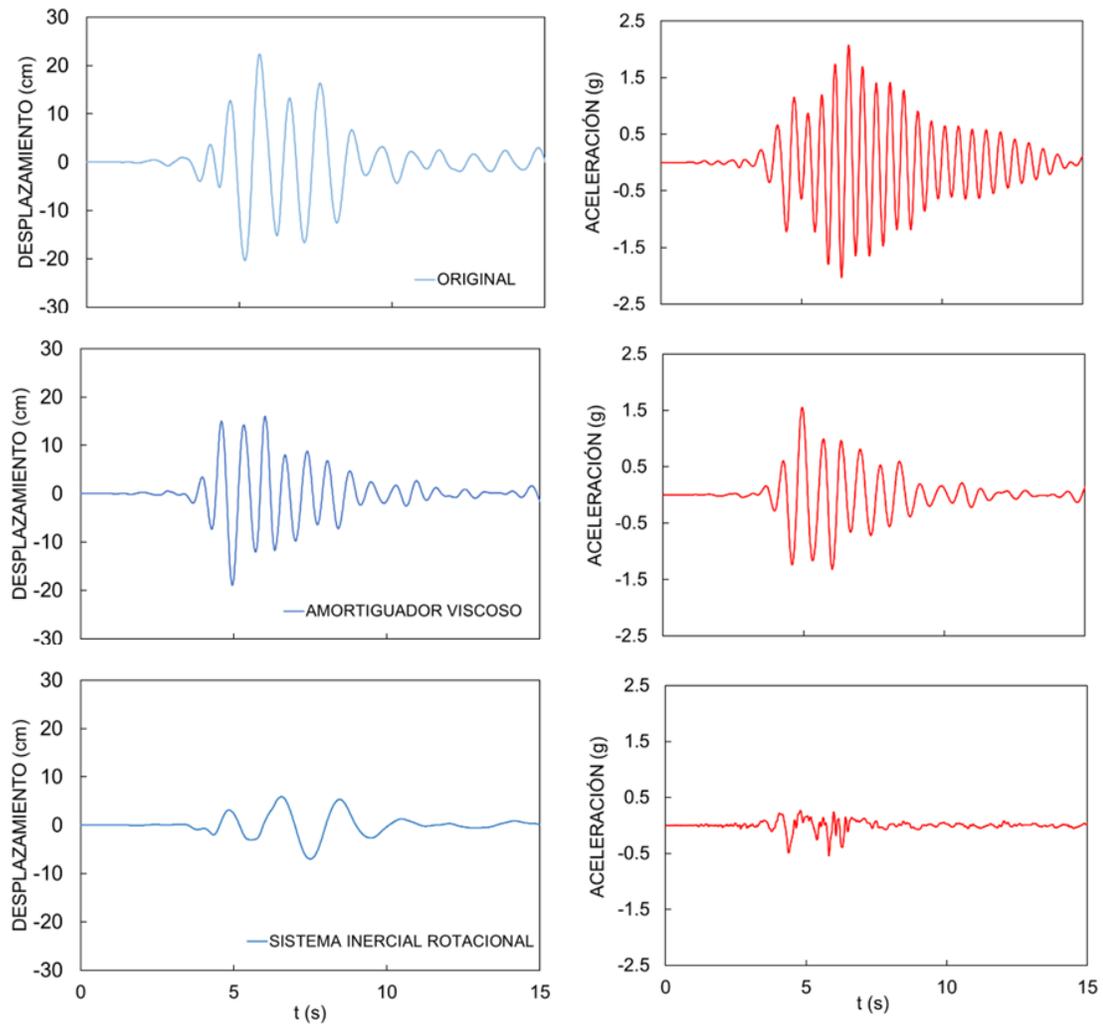


Figura 5.1.13 Historias de desplazamientos y aceleraciones del sistema de 1GDL sin amortiguamiento (ORIGINAL), con amortiguador viscoso y el sistema inercial rotacional para el registro Takarazuka.

## 5.2 Caso 2: Respuesta sísmica de edificio de múltiples grados de libertad (MGDL)

Se evaluará el sistema inercial rotacional en un edificio de 7 niveles con la condición denominada de planta baja débil, la estructura fue construida en el año de 1976 con un sistema estructural de marcos de concreto reforzado. La estructura se compone de tres claros de una longitud de cinco metros cada uno, tiene una altura de entrepiso de 3 metros en el primer nivel y 2.4 metros en los niveles superiores, teniendo una altura global de 17.4 metros.

En la figura 5.2.1 se muestran las características generales del edificio de estudio, se evaluará un modelo de marcos en la dirección X, los niveles del edificio se definen como N1 a N7.

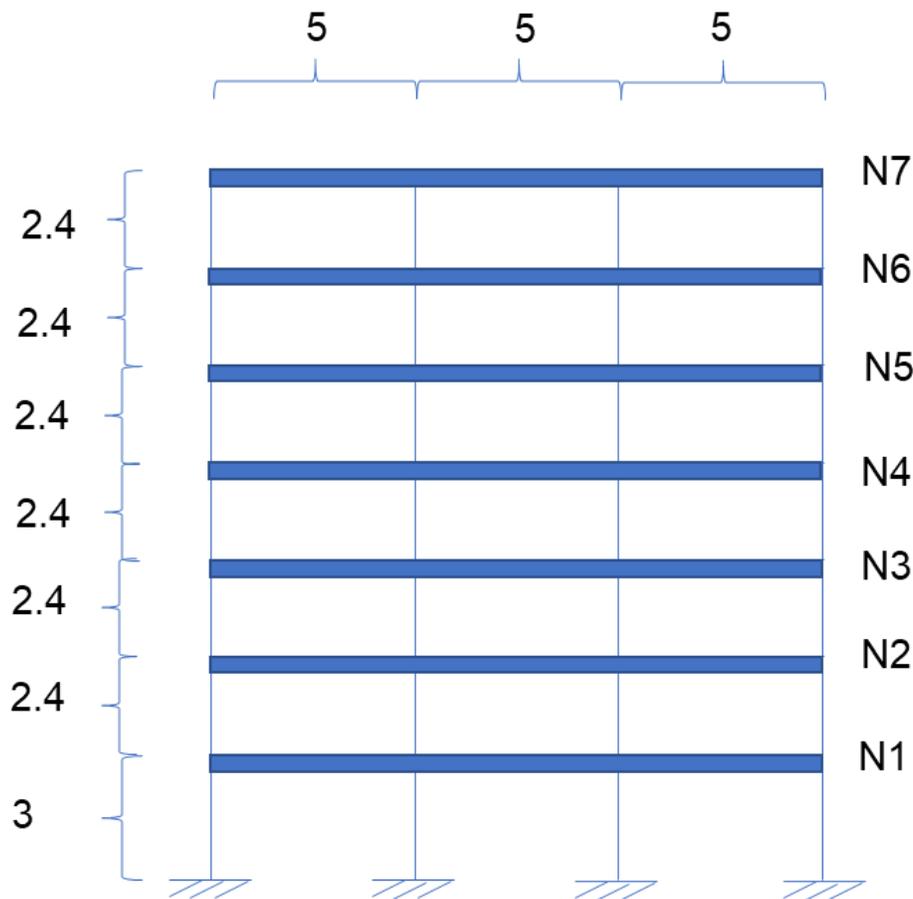


Figura 5.2.1 Geometría y dimensiones generales del edificio de 7 niveles de múltiples grados de libertad, unidades en m.

El periodo natural de vibrar de la estructura es de 0.935 s, en la figura 5.2.2 se muestran derivado del análisis modal los modos de vibrar de la estructura del

edificio de 7 niveles que corresponden a los periodos de 0.935 s, 0.305 s y 0.175 s respectivamente.

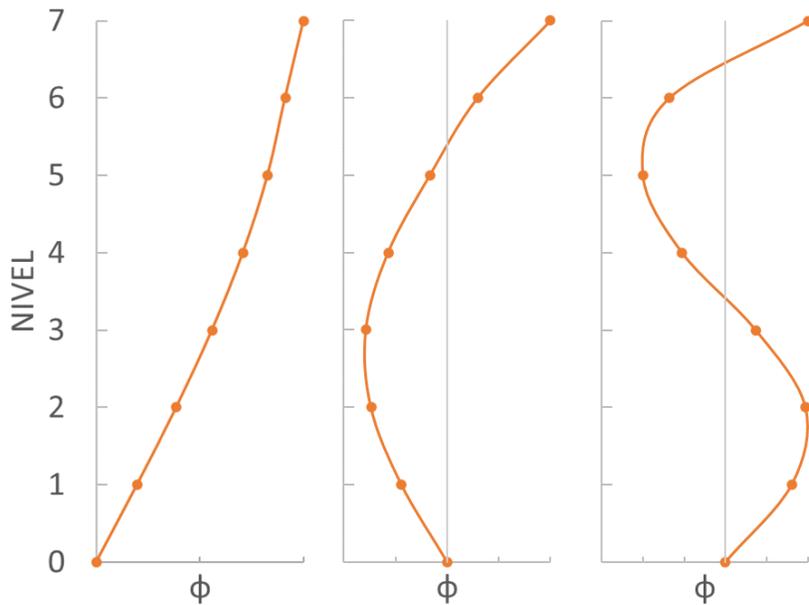


Figura 5.2.2 Primeros 3 modos de vibrar del edificio de 7 niveles.

El comportamiento sísmico del edificio de 7 niveles con rehabilitación en su primer piso con un sistema inercial rotacional será analizado comparando con 2 casos, el caso Original o sin amortiguamiento se tomará la respuesta de la estructura sin ningún tipo de rehabilitación, en el caso de amortiguador viscoso se calcula la respuesta del edificio rehabilitado con un sistema de amortiguamiento suplementario convencional. En la figura 5.2.3 se muestran los modelos de los tres casos analizados que serán sometidos a la acción de las aceleraciones correspondientes a los registros usados.

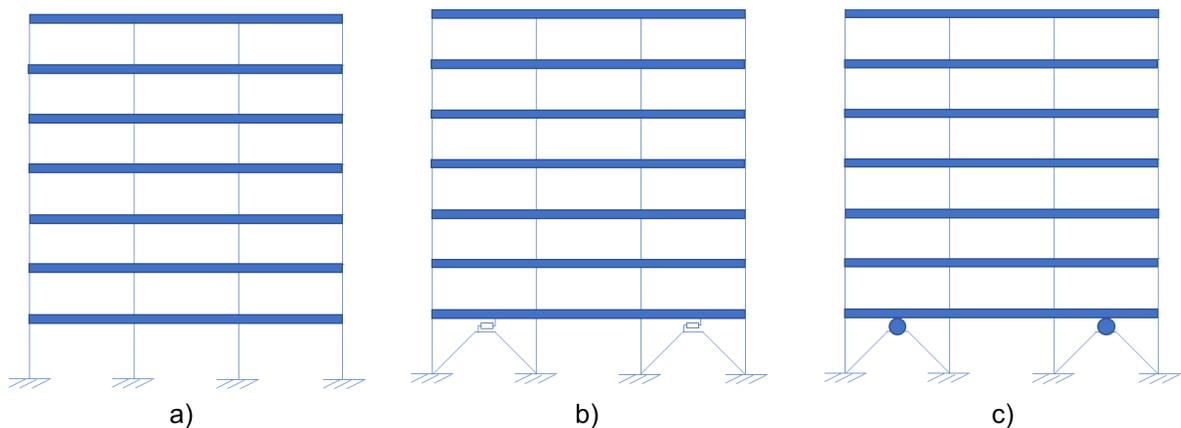


Figura 5.2.3 Modelos usados para el análisis del comportamiento sísmico a) original, b) amortiguador viscoso, c) sistema inercial rotacional.

### 5.2.1 Edificio sin rehabilitar (ORIGINAL)

El modelo del edificio sin rehabilitar se muestra en la figura 5.2.4, se observa que no se tiene ningún sistema para mitigar o modificar la respuesta sísmica.

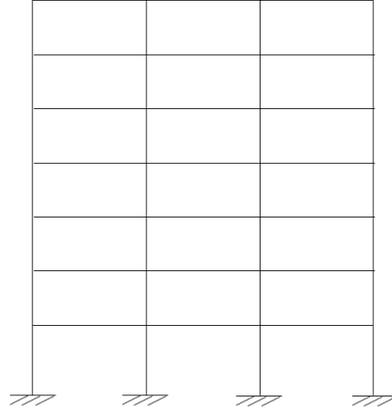


Figura 5.2.4 Edificio sin rehabilitar.

Se evalúa el comportamiento sísmico para el registro CH84-2017, para poder conocer los desplazamientos que debemos mejorar con la implementación del sistema inercial rotacional, se realiza un análisis no lineal paso a paso para calcular la respuesta sísmica del edificio, en la figura 5.2.5 se muestran las historias de distorsiones de entrepiso y aceleraciones correspondientes al primer nivel y al nivel de azotea, podemos ver que la máxima distorsión de entrepiso del primer nivel tiene un valor de 0.18, dicho valor es superior al máximo límite permisible que indican las normas técnicas complementarias para el diseño de sismos de la Ciudad de México. La aceleración máxima en el nivel de azotea tiene un valor de 0.58 g.

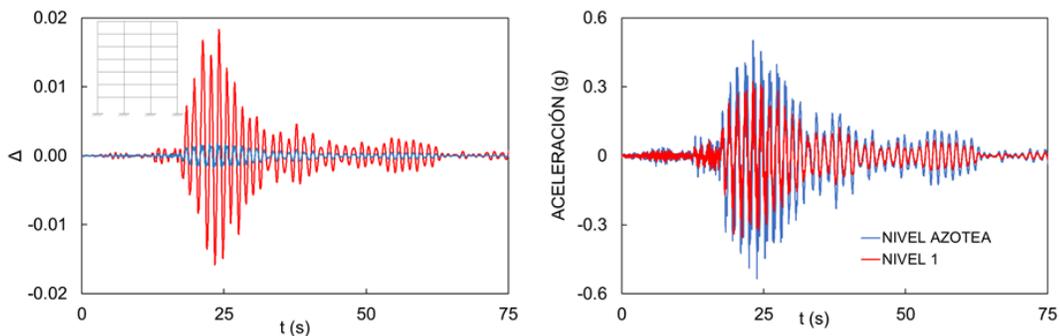


Figura 5.2.5 Historias de distorsión de entrepiso y aceleraciones del edificio sin rehabilitar para el registro CH84-2017.

## 5.2.2 MGDL con amortiguador lineal viscoso

El modelo del edificio con amortiguador lineal viscoso se muestra en la figura 2.5.6, tiene dos amortiguadores viscosos en los marcos extremos del primer nivel, están instalados en marcos tipo Chevron, se colocan en este nivel debido a que al tratarse de un edificio de planta baja débil se debe reforzar dicho nivel.

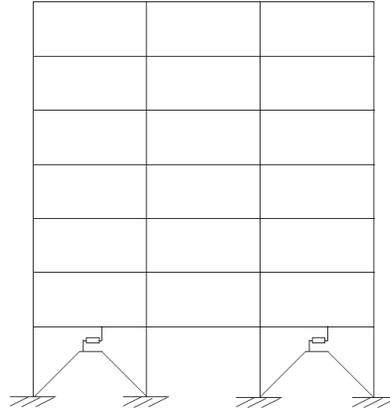


Figura 5.2.6 Edificio con amortiguador viscoso en su primer piso débil.

Se evalúa el comportamiento del edificio para el registro CH84-2017, mediante un análisis no lineal paso a paso se obtienen las historias de distorsiones de entrepiso y aceleraciones para el primer nivel y el nivel de azotea que se muestran en la figura 5.2.7, la máxima distorsión de entrepiso en el primer nivel tiene un valor de 0.0145, valor que se encuentra por debajo del límite último permisible que nos indica la normativa de la Ciudad de México, mientras que la máxima aceleración en el nivel de azotea es de 0.5 g, se nota un mejor comportamiento que con el edificio sin rehabilitar. Es importante indicar que se producen distorsiones residuales en la estructura.

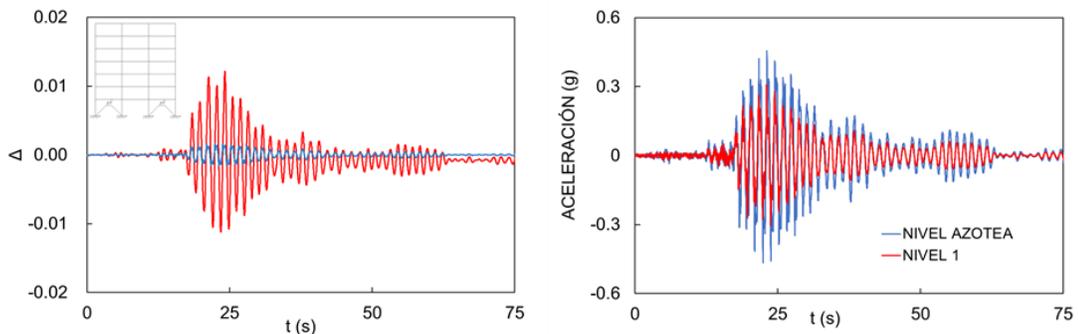


Figura 5.2.7 Historias de distorsión de entrepiso y aceleraciones del edificio con amortiguador lineal viscoso para el registro CH84-2017.

### 5.2.3 MGDL con sistema inercial rotacional

El modelo del edificio con sistema inercial rotacional se muestra en la figura 5.2.8, tiene en los marcos extremos un sistema inercial rotacional que será el encargado de modificar el comportamiento sísmico de la estructura, dicho sistemas están instalados en marcos tipo Chevron.

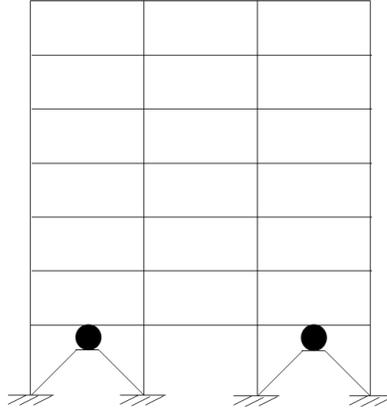


Figura 5.2.8 Edificio con sistema inercial rotacional en su primer piso débil.

La inercia rotacional del modelo fue calculada con las fórmulas 2.12 a 2.14 antes expuestas, considerando una  $\sigma$  de 0.85 y el radio del volante de 0.5 m.

El comportamiento sísmico se obtiene mediante un análisis no lineal paso a paso, en la figura 5.2.9 se muestran las historias de distorsiones de entrepiso y aceleraciones del primer nivel y el nivel de azotea, se observa que la máxima distorsión de entrepiso tiene un valor de 0.0085, la cual es inferior al límite máximo permisible impuesto por la normatividad de la Ciudad de México, se crean de igual forma distorsiones residuales en el primer nivel de la estructura, mientras que la aceleración máxima en el nivel de azotea tiene un valor de 0.4 g aproximadamente, valor que es inferior al obtenido con el edificio con amortiguador viscoso.

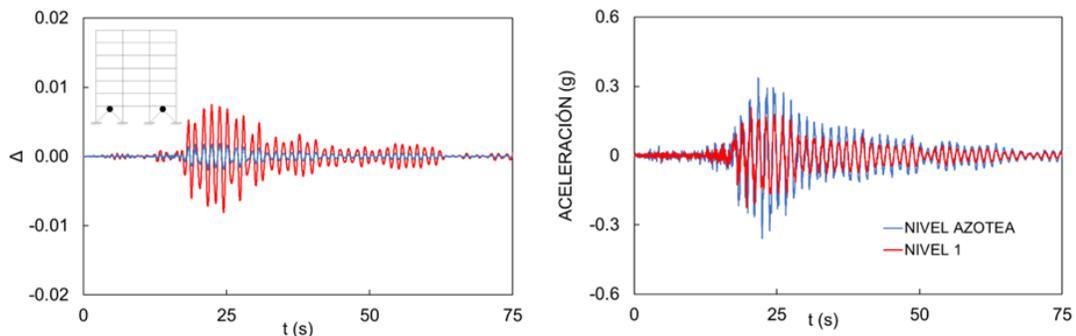


Figura 5.2.9 Historias de distorsión de entrepiso y aceleraciones del edificio con sistema inercial rotacional para el registro CH84-2017.

#### 5.2.4 Comparaciones de sistemas de MGDL analizados

En la figura 5.2.10 se muestran las historias de distorsiones de entrepiso y las aceleraciones del primer nivel y el nivel de azotea, se considera que estos niveles tienen mayor relevancia en el análisis sísmico, como se puede observar para el registro GR27-2017, las distorsiones de entrepiso del modelo con sistema inercial rotacional son menores en un 16% a las presentadas por el modelo original, además tienen un comportamiento similar al modelo de amortiguador viscoso, cabe destacar que se presentan distorsiones residuales causadas por el movimiento sísmico las cuales son disminuidas por el sistema inercial rotacional. En cuanto a las aceleraciones se ven amplificadas en el nivel de la azotea en comparación con el modelo original.

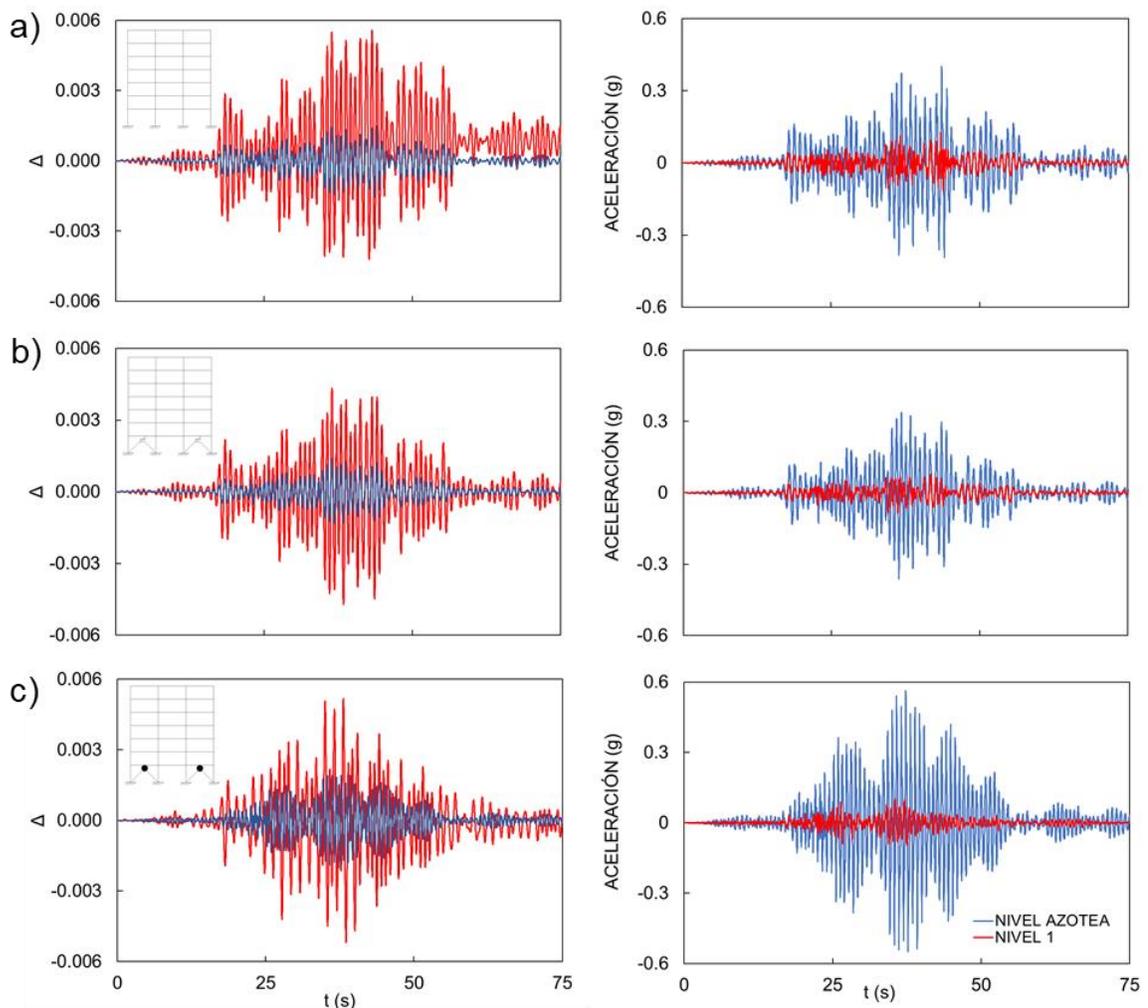


Figura 5.2.10 Historias de distorsiones de entrepiso y aceleraciones del edificio de 7 niveles para el primer nivel y nivel de azotea, a) modelo original, b) modelo con amortiguador viscoso, c) modelo con sistema inercial rotacional para el registro GR27-2017.

En la figura 5.2.11 se muestra las historias de distorsiones de entrepiso y las aceleraciones para el registro CH84-2017, se puede notar que el sistema inercial rotacional reduce en un 60 % las distorsiones de entrepiso en el primer nivel comparándolo con el modelo original, como se observa en el modelo con amortiguador viscoso se generan distorsiones residuales en el primer nivel de la estructura, y en el modelo rehabilitado con el sistema inercial rotacional se controlan estas distorsiones reduciéndolas en un 45%, en cuanto a las aceleraciones que se presentan en el edificio con sistema inercial rotacional son menores a las generadas en el modelo original y el modelo de amortiguador viscoso, el decremento en las aceleraciones es del 50% en el nivel de azotea y primer nivel del edificio.

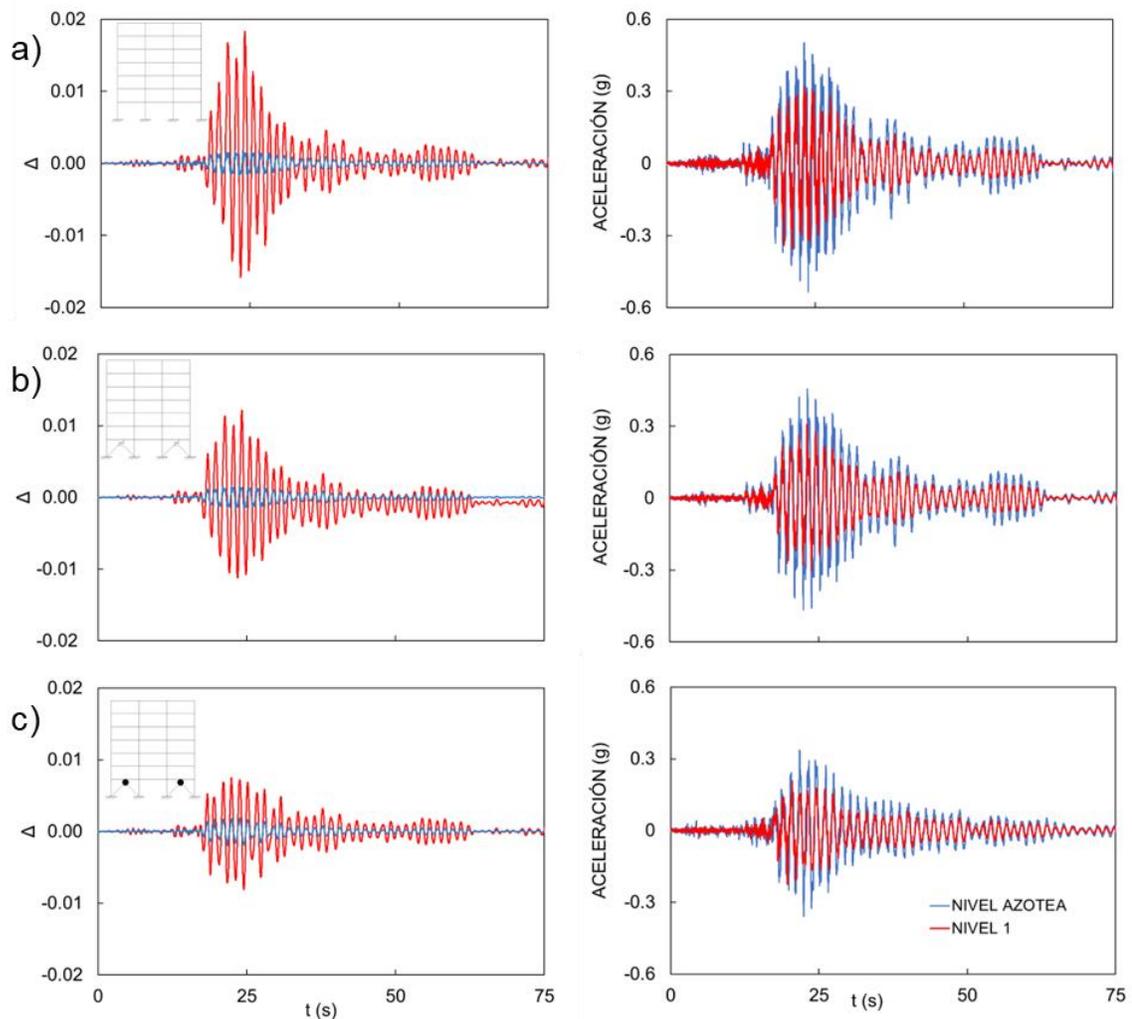


Figura 5.2.11 Historias de distorsiones de entrepiso y aceleraciones del edificio de 7 niveles para el primer nivel y nivel de azotea, a) modelo original, b) modelo con amortiguador viscoso, c) modelo con sistema inercial rotacional para el registro CH84-2017.

En la figura 5.2.12 se muestra las historias de distorsiones de entrepiso y las aceleraciones para el registro SCT-2017, en donde el sistema inercial rotacional disminuye las distorsiones de entrepiso para el primer nivel en 44% en comparación del modelo original y controla las distorsiones residuales que se presentan en el modelo original, reduciéndolas a un valor prácticamente nulo, mientras que en las aceleraciones no se refleja un cambio notable, debido que los tres modelos presentan un comportamiento similar para este registro.

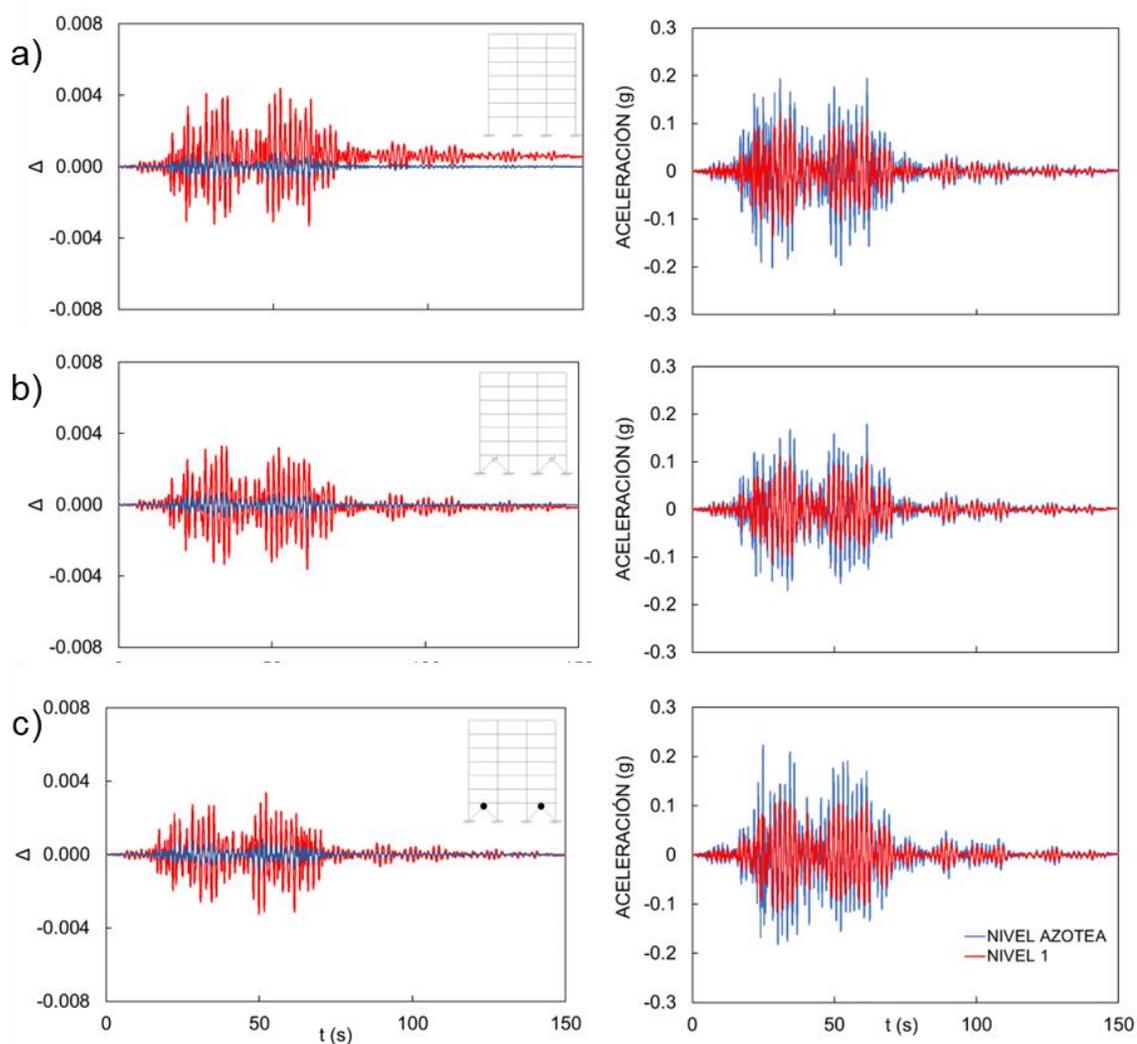


Figura 5.2.12 Historias de distorsiones de entrepiso y aceleraciones del edificio de 7 niveles para el primer nivel y nivel de azotea, a) modelo original, b) modelo con amortiguador viscoso, c) modelo con sistema inercial rotacional para el registro SCT-2017.

En la figura 5.2.13 se muestran las historias de distorsiones de entrepiso y las aceleraciones para el registro SCT-1985, el comportamiento presentado en las distorsiones del modelo con sistema inercial rotacional es el mejor en comparación a los otros dos modelos, debido a que disminuye las distorsiones de entrepiso en el primer nivel en un 28% comparado con el modelo original, además controla de igual forma las distorsiones residuales reduciéndolas en un 84%, mientras que en las aceleraciones que se presentan en los tres modelos son muy similares en magnitud tanto en el primer nivel como en el nivel de azotea.

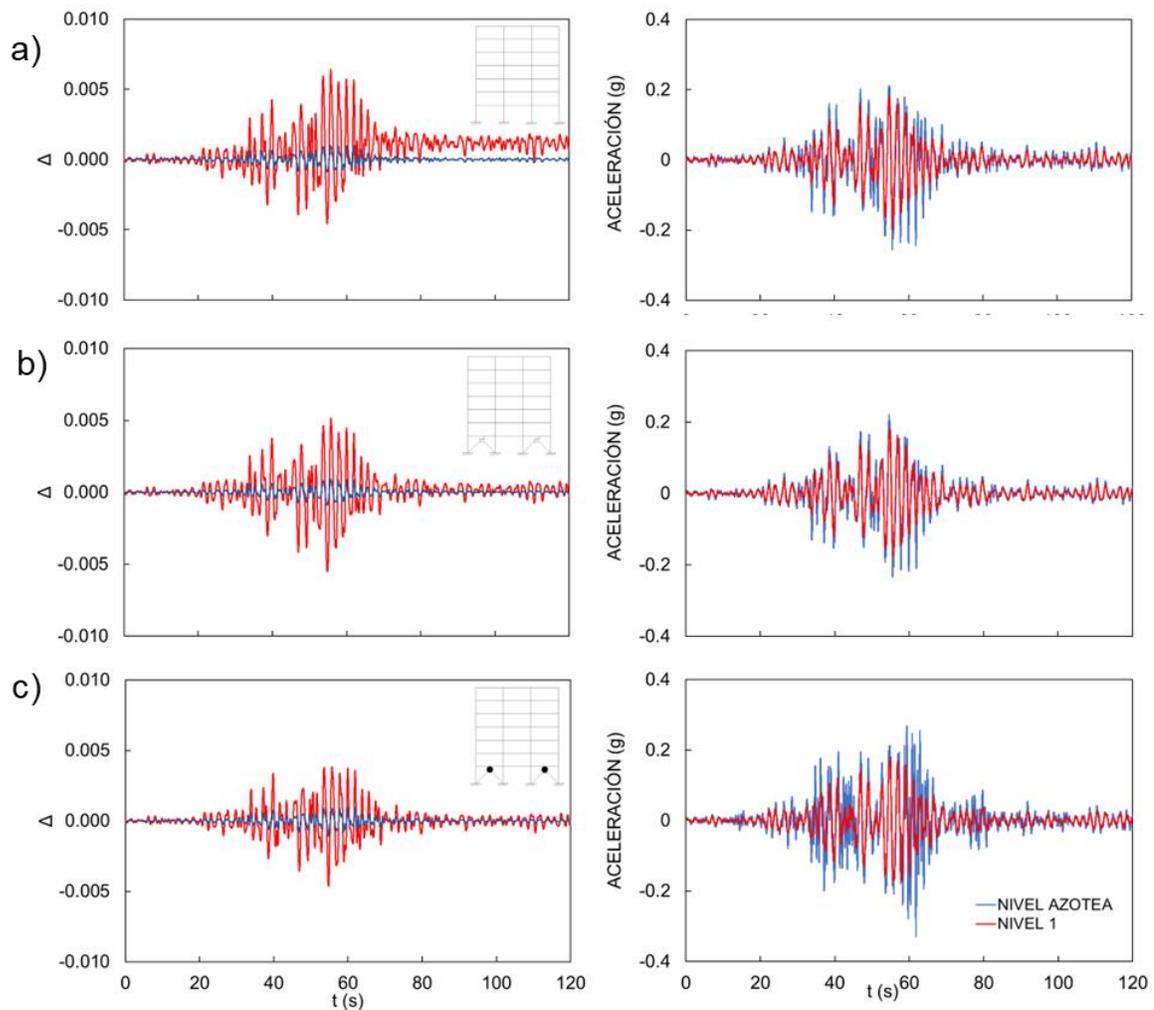


Figura 5.2.13 Historias de distorsiones de entrepiso y aceleraciones del edificio de 7 niveles para el primer nivel y nivel de azotea, a) modelo original, b) modelo con amortiguador viscoso, c) modelo con sistema inercial rotacional para el registro SCT-1985.

Ahora para los resultados obtenidos para los sismos internacionales, en la figura 5.2.14 se muestran las historias de distorsiones de entrepiso y las aceleraciones para el registro Pacoima, el sistema inercial rotacional disminuye las distorsiones de entrepiso en el primer nivel en un 50% comparado con el modelo original, presenta un mejor desempeño que el obtenido con el modelo con amortiguador viscoso ya que presenta distorsiones menores en el primer piso, en cuanto a las aceleraciones los tres modelos presentan un comportamiento similar en cuanto a magnitud llegando a valores máximos de 1 g.

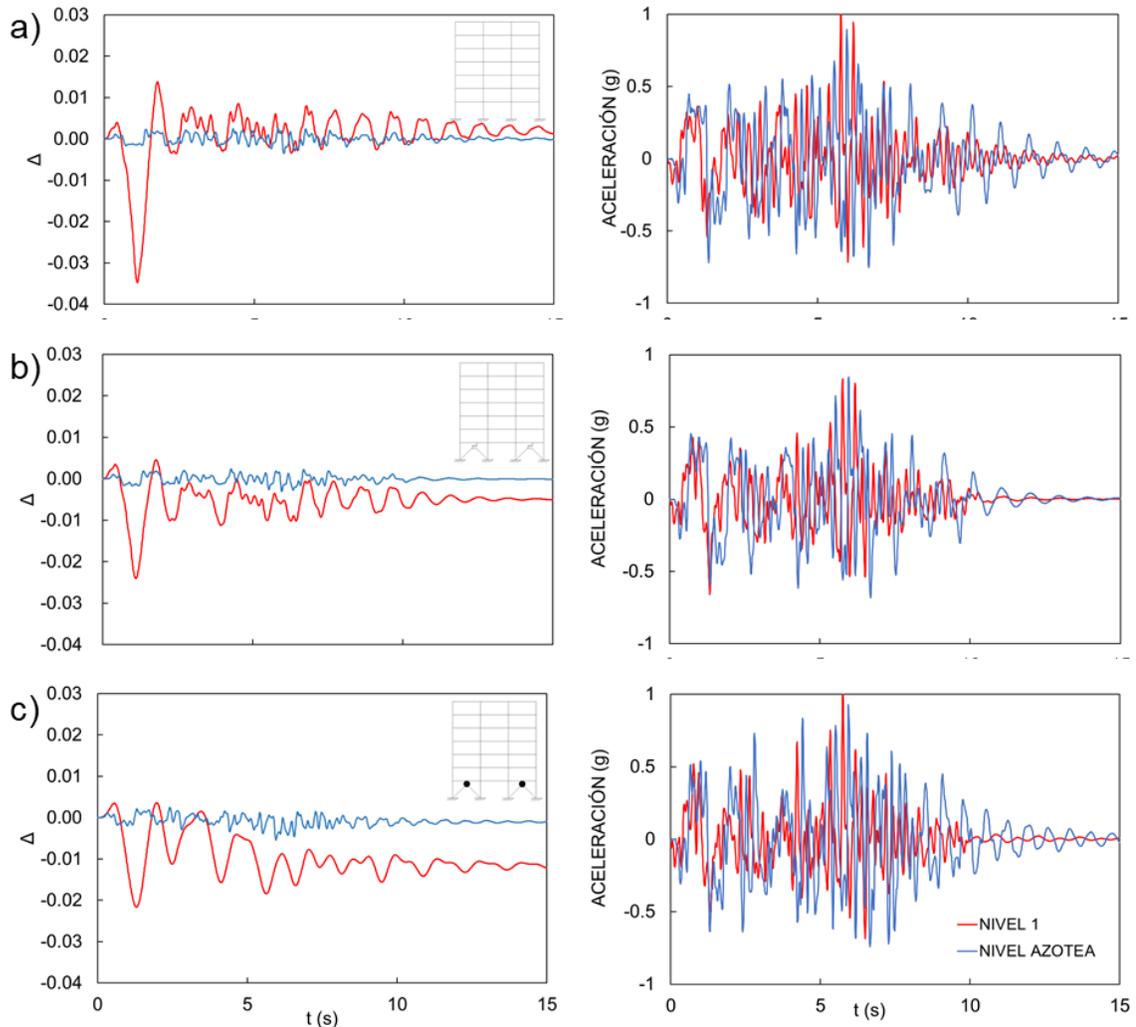


Figura 5.2.14 Historias de distorsiones de entrepiso y aceleraciones del edificio de 7 niveles para el primer nivel y nivel de azotea, a) modelo original, b) modelo con amortiguador viscoso, c) modelo con sistema inercial rotacional para el registro Pacoima.

En la figura 5.2.15 se muestran las historias de distorsiones de entrepiso y las aceleraciones para el registro Takarazuka, las distorsiones de entrepiso presentadas en el sistema inercial rotacional son mayores a las obtenidas por el modelo original en un 17% aproximadamente y en un 50% a las obtenidas del modelo con amortiguador viscoso para el primer nivel, mientras que las aceleraciones presentan un comportamiento similar al caso original.

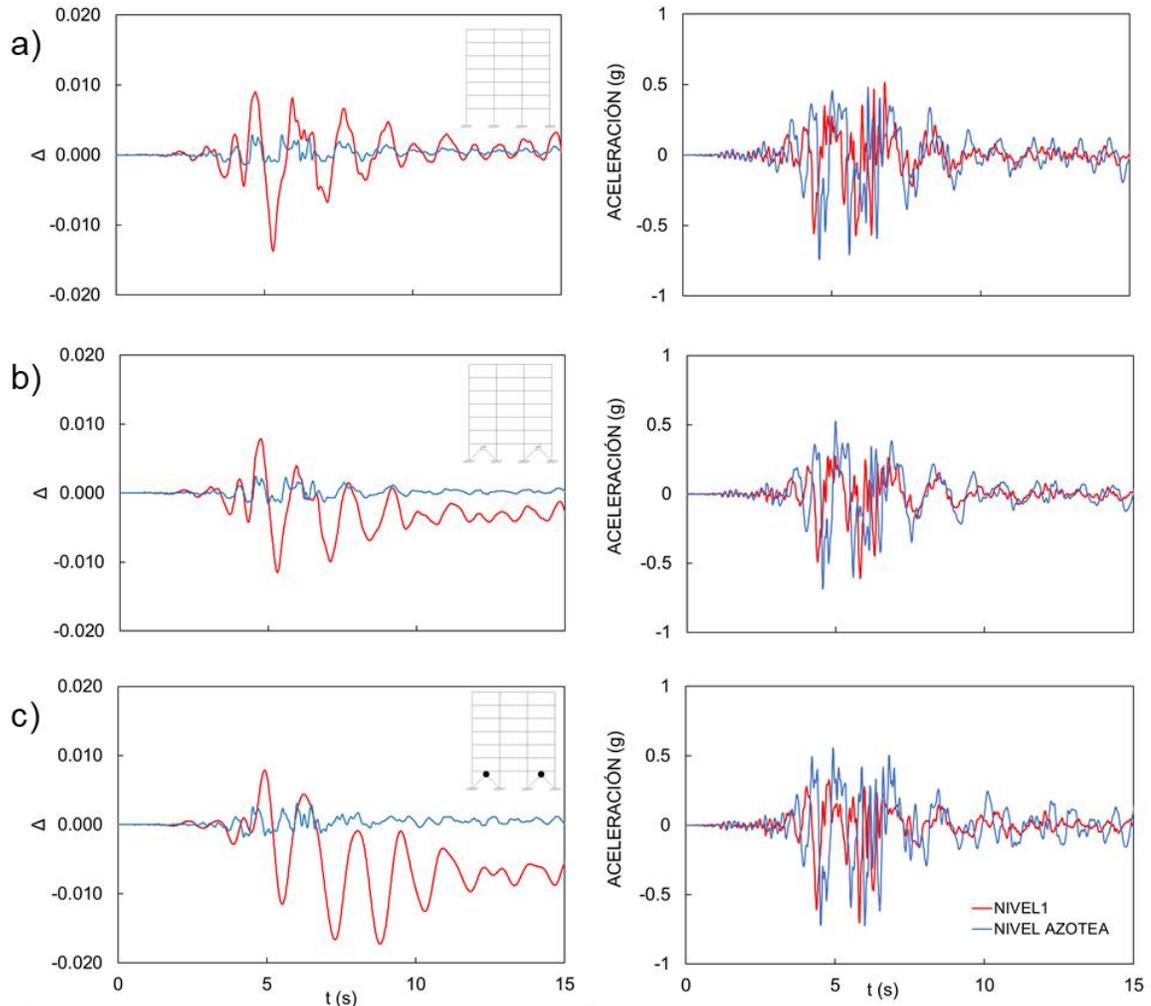


Figura 5.2.15 Historias de distorsiones de entrepiso y aceleraciones del edificio de 7 niveles para el primer nivel y nivel de azotea, a) modelo original, b) modelo con amortiguador viscoso, c) modelo con sistema inercial rotacional para el registro Takarazuka.

Para poder ver de una forma más sencilla el comportamiento general en la estructura se obtuvieron graficas de las distorsiones máximas presentadas en cada nivel y el cortante de entrepiso, con la finalidad de poder comparar el comportamiento del sistema inercial rotacional, en la figura 5.2.16 se muestran los resultados de las gráficas de las distorsiones de entrepiso para los sismos de la Ciudad de México.

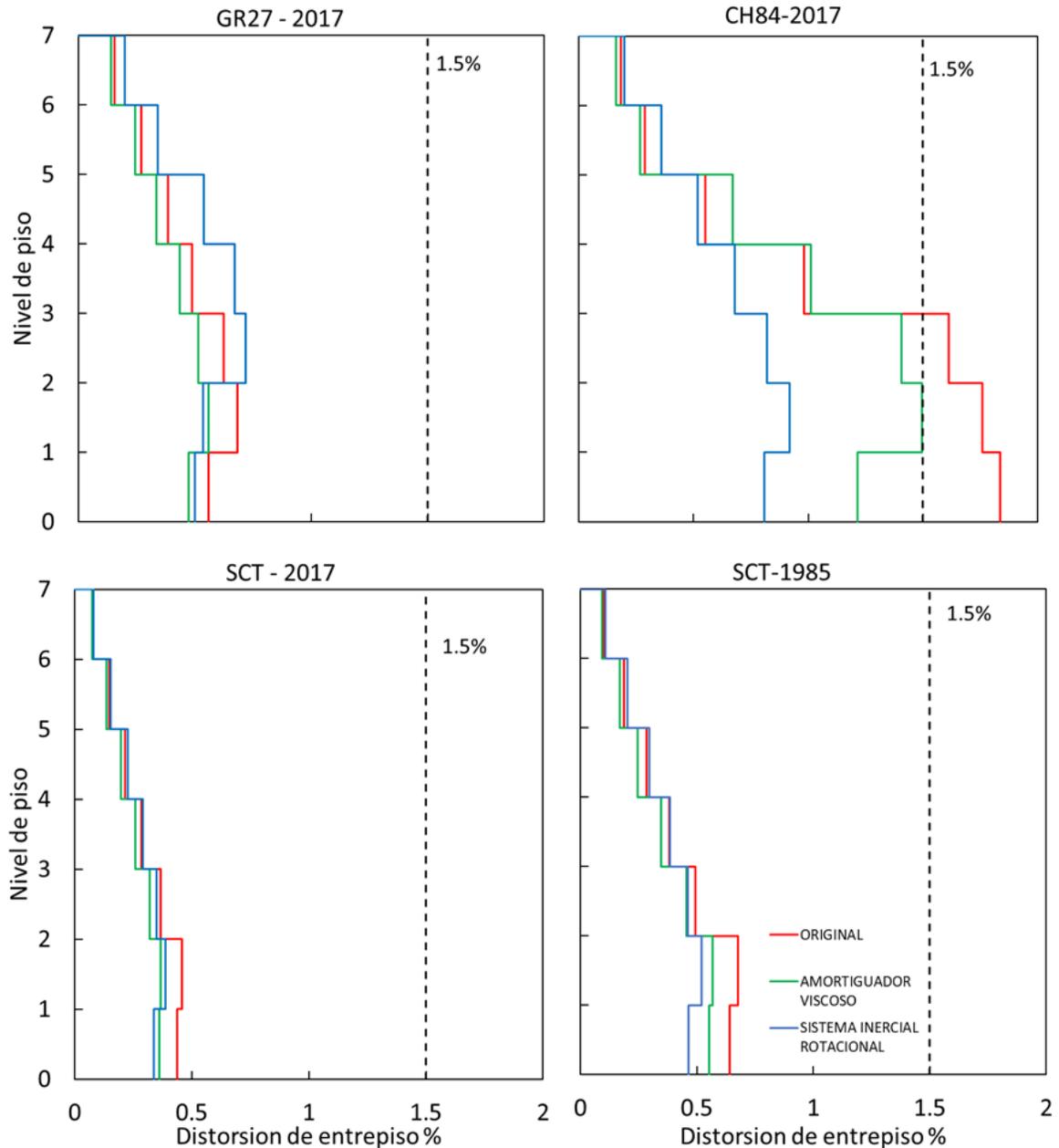


Figura 5.2.16 Gráfica de las distorsiones de entrepiso expresadas en porcentaje del edificio de 7 niveles para los sismos de la Ciudad de México.

Para el registro GR27-2017 el sistema inercial rotacional disminuye las distorsiones en el primer nivel comparado con el caso original, en el caso del registro CH84-2017 el sistema inercial rotacional presenta una disminución de distorsiones máximas en todos los niveles comparado con el modelo original e incluso tiene mejor desempeño que el amortiguador viscoso, reduciendo la distorsión del primer nivel en 60% a comparación del modelo original, en el registro SCT-2017 el sistema inercial rotacional presenta un comportamiento similar al obtenido con el modelo de amortiguador viscoso, mejorando el comportamiento sísmico del edificio original y controlando de mejor manera las distorsiones a comparación del modelo con a amortiguamiento viscoso, por último en el registro SCT-1985 de igual forma que en el anterior registro el desempeño del sistema inercial rotacional es adecuado ya que genera distorsiones inferiores a los otros modelos. Como se observa el sistema inercial rotacional presenta un comportamiento constante, disminuyendo las distorsiones en el primer nivel del edificio en los 4 registros correspondientes a los sismos de la Ciudad de México.

Para el caso de los sismos internacionales en la figura 5.2.17 se muestran las gráficas de las distorsiones de entrepiso máximas de cada nivel, se observa que para el caso del registro Pacoima las distorsiones de entrepiso disminuyen en los primeros 5 niveles en comparación con el caso sin amortiguamiento, ahora para el registro Takarazuka el sistema inercial rotacional tiene distorsiones similares a las obtenidas por el modelo original.

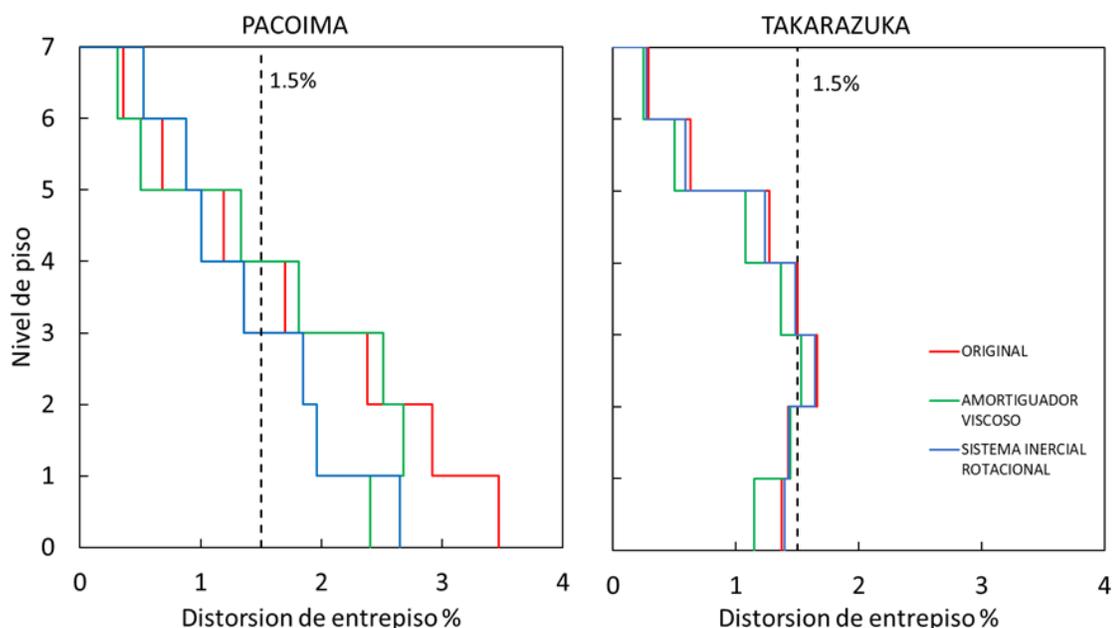


Figura 5.2.17 Gráfica de las distorsiones expresadas en porcentaje de entrepiso del edificio de 7 niveles para los sismos internacionales.

Ahora para el caso del cortante global en la figura 5.2.18 se muestra el cortante máximo global de cada entrepiso de la estructura para cada caso analizado para los sismos de la Ciudad de México, el cortante se encuentra dividido entre el peso de la estructura, en el caso del registro GR27-2017 se observa que el cortante del primer nivel es de magnitud similar al caso original, siendo el modelo con amortiguamiento viscoso el que presenta una reducción en el primer nivel con un valor de 0.15.

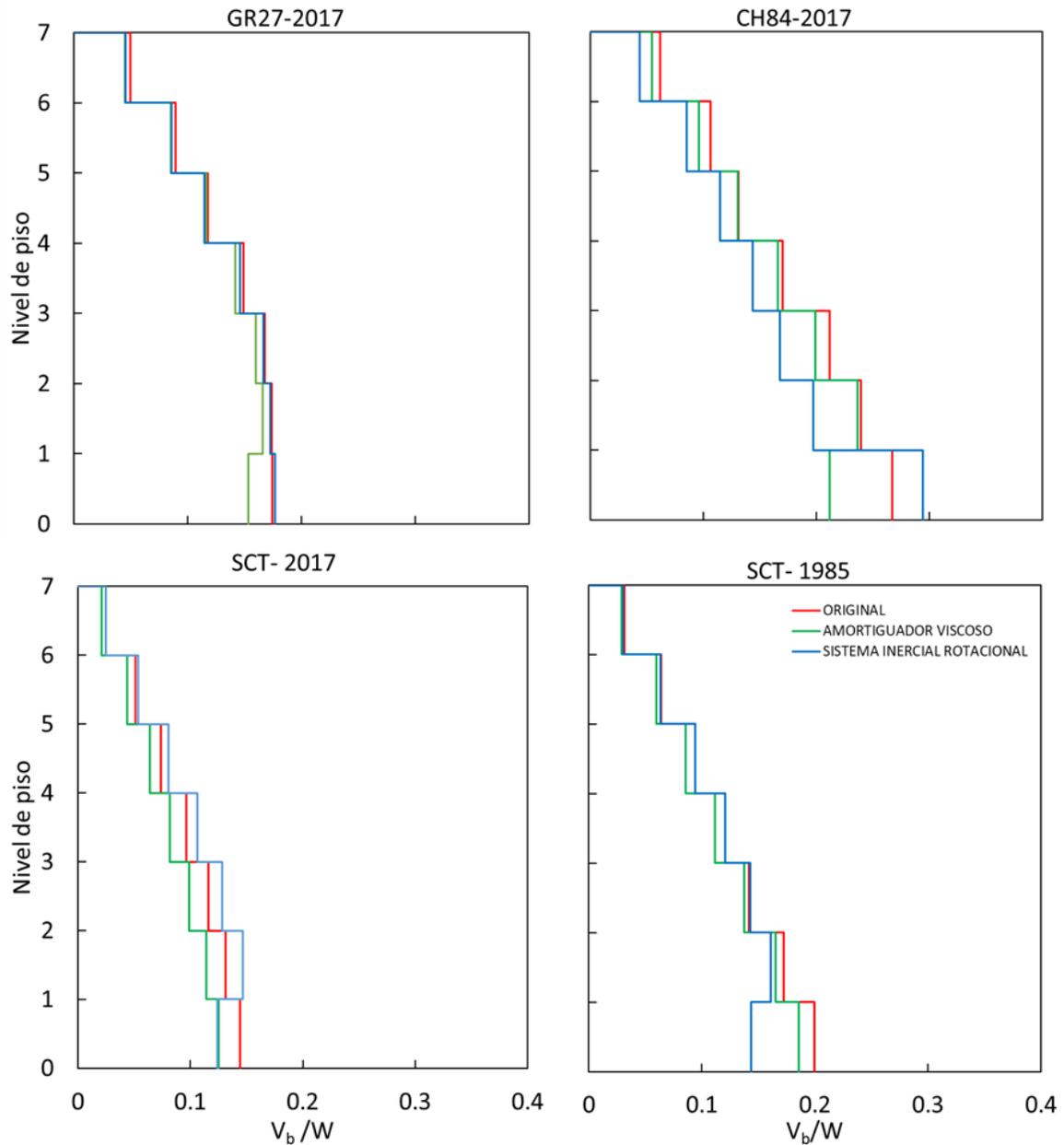


Figura 5.2.18 Gráfica del cortante global de entrepiso del edificio de 7 niveles para los sismos de la Ciudad de México.

En el caso del registro CH84-2017 únicamente en el primer nivel se presenta un cortante superior al obtenido con los otros dos modelos analizados, el valor es muy cercano a 0.3, mientras que para el registro SCT-2017 el sistema inercial rotacional presenta un comportamiento similar al modelo con amortiguamiento viscoso en su primer nivel, teniendo un valor de 0.11, reduciendo el cortante en el primer nivel a comparación del modelo original, para el registro SCT-1985 el sistema inercial rotacional presenta valores del cortante menores en el primer nivel superando al modelo con amortiguamiento viscoso y al modelo original con un valor aproximado de 0.14.

Para el caso de los sismos internacionales en la figura 5.2.19 se muestran los cortantes máximos de entrepiso, para el registro Pacoima se nota que el sistema inercial rotacional es sometido a un cortante mayor en su primer nivel con un valor de 0.3, mientras que el modelo con amortiguador viscoso presenta un cortante máximo en el primer nivel de 0.2, ahora bien para el registro Takarazuka se presenta un comportamiento similar al anteriormente descrito, el sistema inercial rotacional genera un cortante mayor en el primer nivel que es 25% mayor al del modelo con amortiguador viscoso y un 12% mayor al presentado por el modelo original.

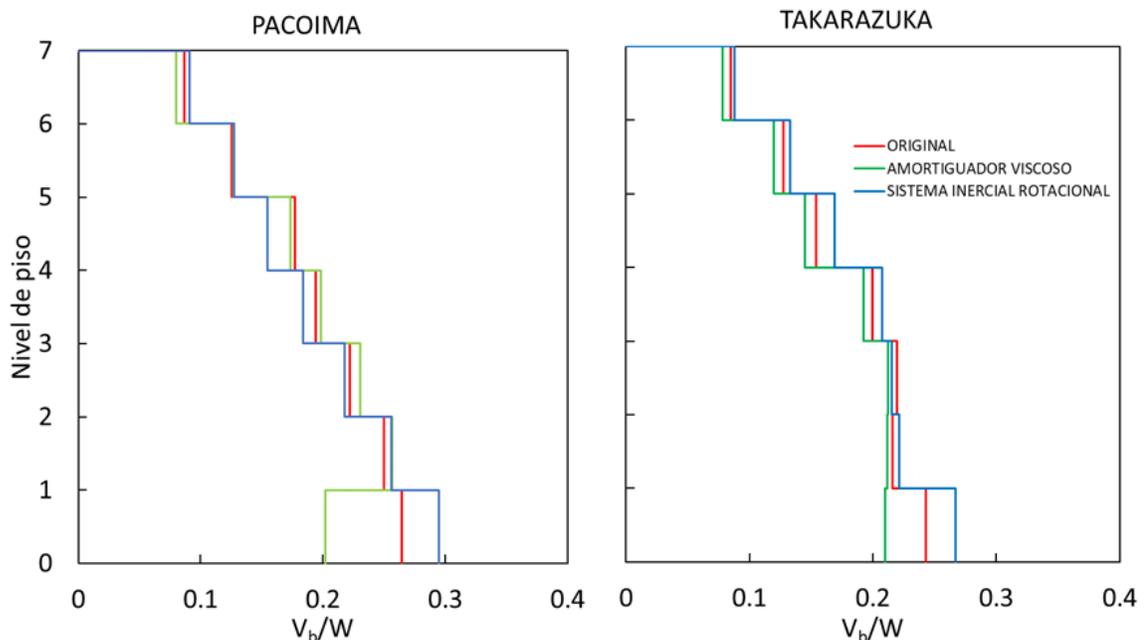


Figura 5.2.19 Gráfica del cortante global de entrepiso del edificio de 7 niveles para los sismos internacionales.

### 5.2.4.1 Curvas de histéresis

El comportamiento no lineal que se presenta en el edificio con los distintos tipos de amortiguamiento se muestra en la figura 5.2.20 con las curvas de histéresis para el primer nivel de los tres modelos analizados para el registro GR27-2017. En el caso del sistema inercial rotacional se puede notar más el comportamiento plástico a comparación del modelo con amortiguador viscoso en donde se muestra un comportamiento elástico. En comparativa podemos ver que se tienen un comportamiento similar en los tres modelos analizados, comparando el modelo original con el caso del edificio rehabilitado con un sistema inercial rotacional se observa un comportamiento muy parecido.

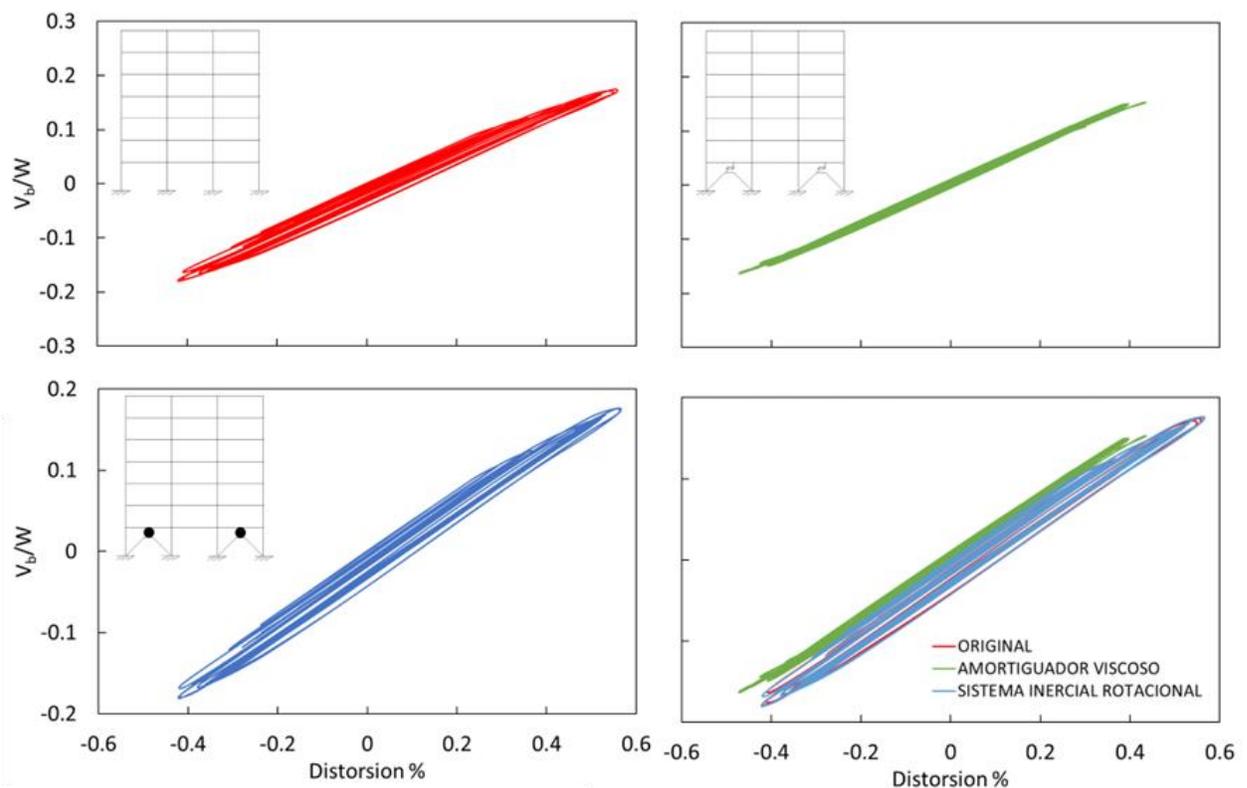


Figura 5.2.20 Curvas de histéresis de primer nivel del edificio de 7 niveles de los modelos estudiados para el registro GR27-2017.

La curva de histéresis del primer nivel del modelo de MGD L para el registro CH84-2017 se muestra en la figura 5.2.21, en donde se aprecia que el comportamiento plástico se reduce con el uso del sistema inercial rotacional comparándolo con el modelo original. También podemos notar que se producen

mayores cortantes con el sistema inercial rotacional que con el sistema con amortiguador viscoso.

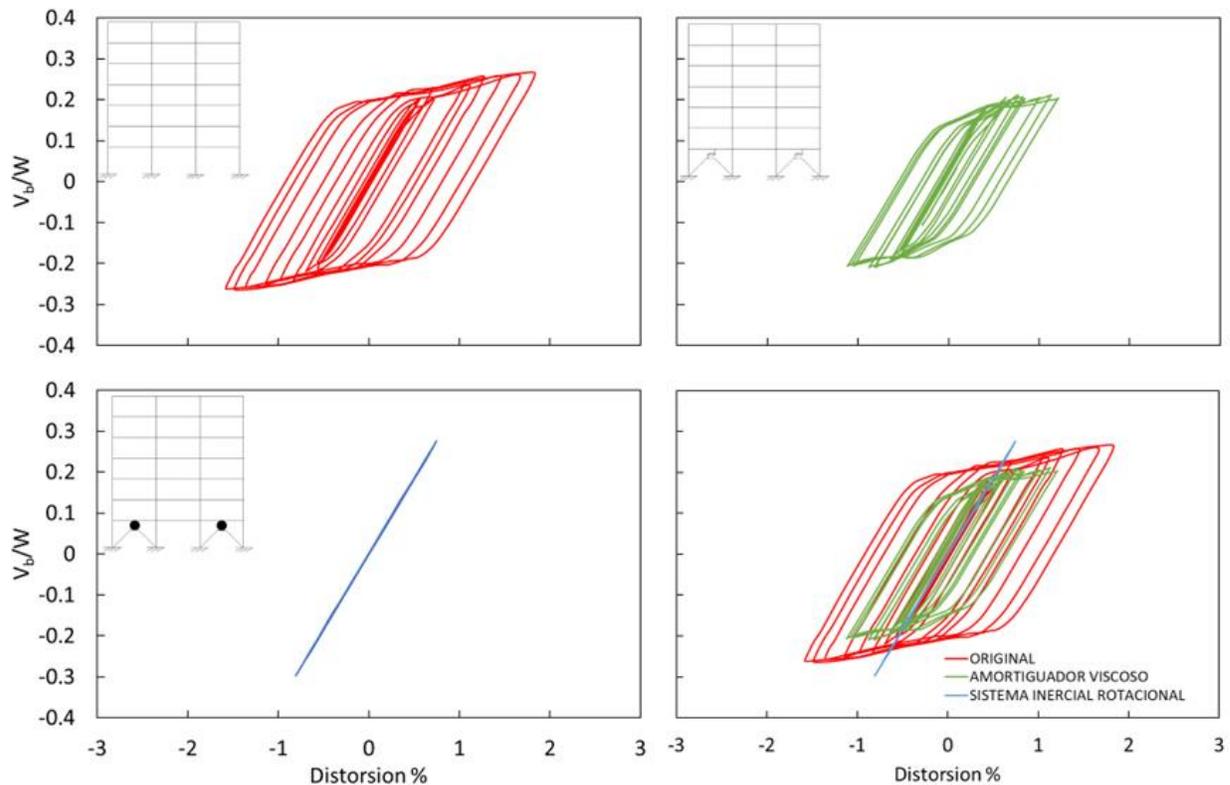


Figura 5.2.21 Curvas de histéresis de primer nivel del edificio de 7 niveles de los modelos estudiados para el registro CH84-2017.

El comportamiento presentado para el registro SCT-2017 se muestra en la figura 5.2.22 con la curva de histéresis del primer nivel de los modelos analizados sísmicamente, para el caso original y el sistema con amortiguador viscoso se puede observar un comportamiento elástico similar para ambos casos, sin embargo, para el modelo con sistema inercial rotacional se muestran decrementos tanto en el cortante generado como en las distorsiones, presentando un comportamiento lineal.

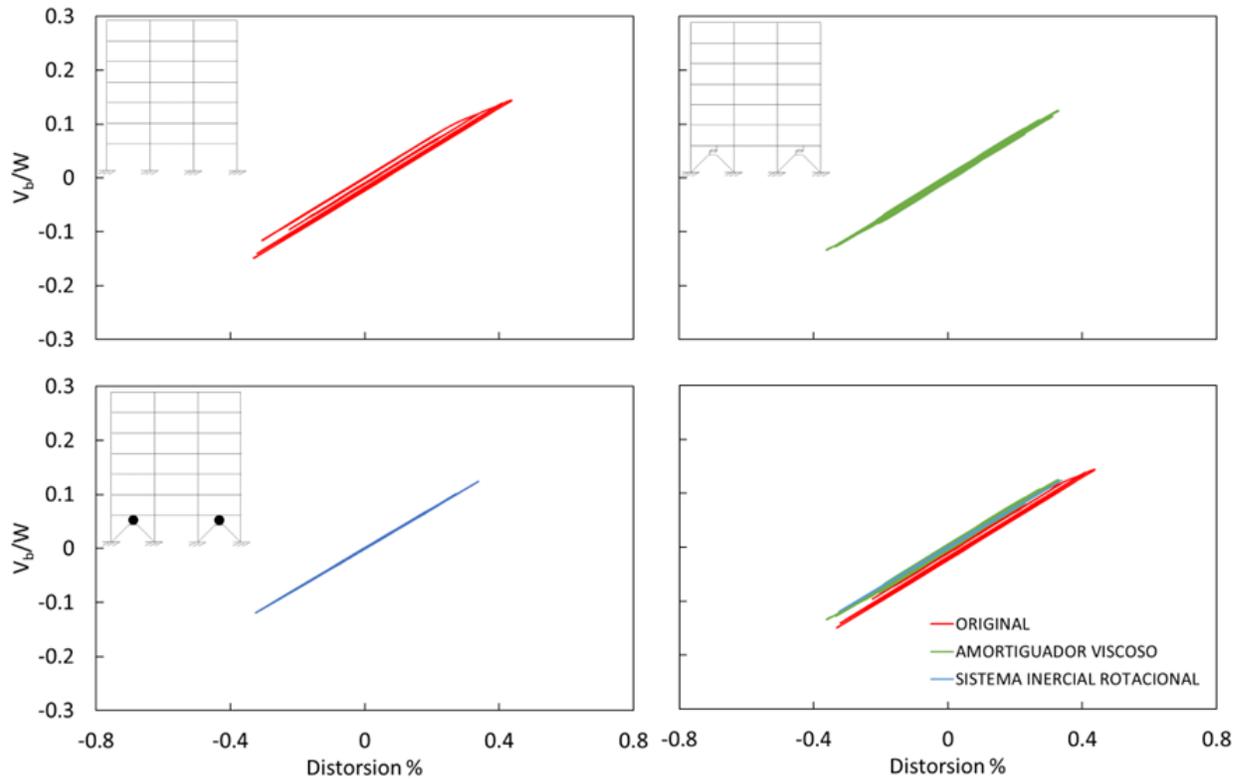


Figura 5.2.22 Curvas de histéresis de primer nivel del edificio de 7 niveles de los modelos estudiados para el registro SCT-2017.

En el caso del sismo de 1985 de la Ciudad de México con el registro SCT-1985 se obtienen las curvas de histéresis para el primer nivel de los modelos, se muestra el comportamiento obtenido en la figura 5.2.23, en donde se observa que el sistema inercial rotacional reduce los efectos generados por el sismo, debido a la disminución en el cortante y las distorsiones de entrepiso, en el modelo con amortiguador viscoso y en modelo original podemos observar un comportamiento elástico en la mayoría del tiempo, en el caso del sistema inercial rotacional de igual forma se tiene un comportamiento elástico comparativa con los otros modelos analizados.

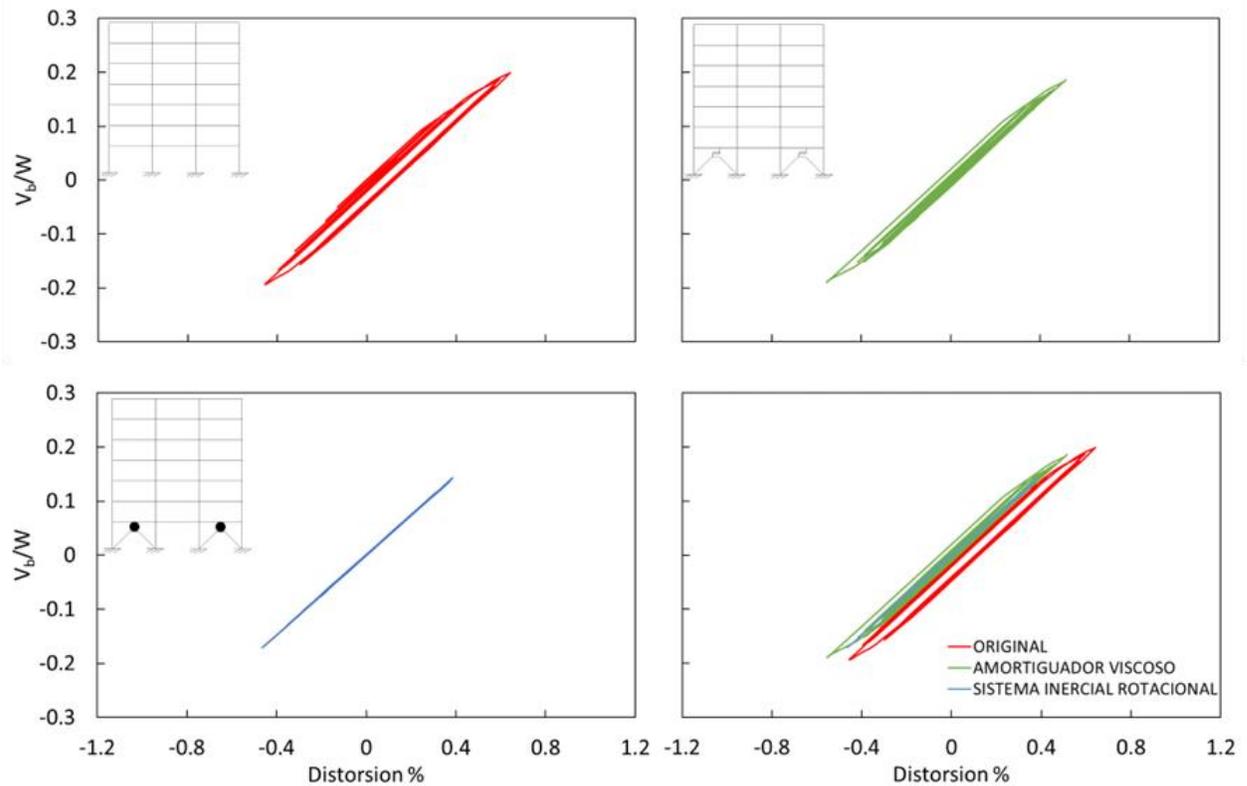


Figura 5.2.23 Curvas de histéresis de primer nivel del edificio de 7 niveles de los modelos estudiados para el registro SCT-1985.

Para el caso de los sismos internacionales de igual forma se obtuvieron las curvas de histéresis, únicamente para mostrar el comportamiento del sistema inercial rotacional en movimientos sísmicos de distintos a los que ocurren en la Ciudad de México, el comportamiento presentado por el sistema inercial rotacional en estos sitios nos sirve para poder observar la respuesta que se presenta en un tipo de suelo y condiciones distintas, y tener una referencia de su aplicación en otros países. Las curvas de histéresis del primer nivel de los modelos ocupados se muestran en la figura 5.2.24 para el registro Pacoima, se observa un decremento en las distorsiones de entrepiso por parte del sistema inercial rotacional a comparación del sistema sin amortiguamiento (Original), pero se incrementan un poco los cortante en el nivel, mientras que el sistema con amortiguador viscoso presenta disminución en cortantes y distorsiones comparándolo con el sistema original. Si se observa el grafico comparativo podemos notar que el sistema inercial rotacional genera distorsiones de entrepiso similares a los obtenidos con el sistema con amortiguador lineal.

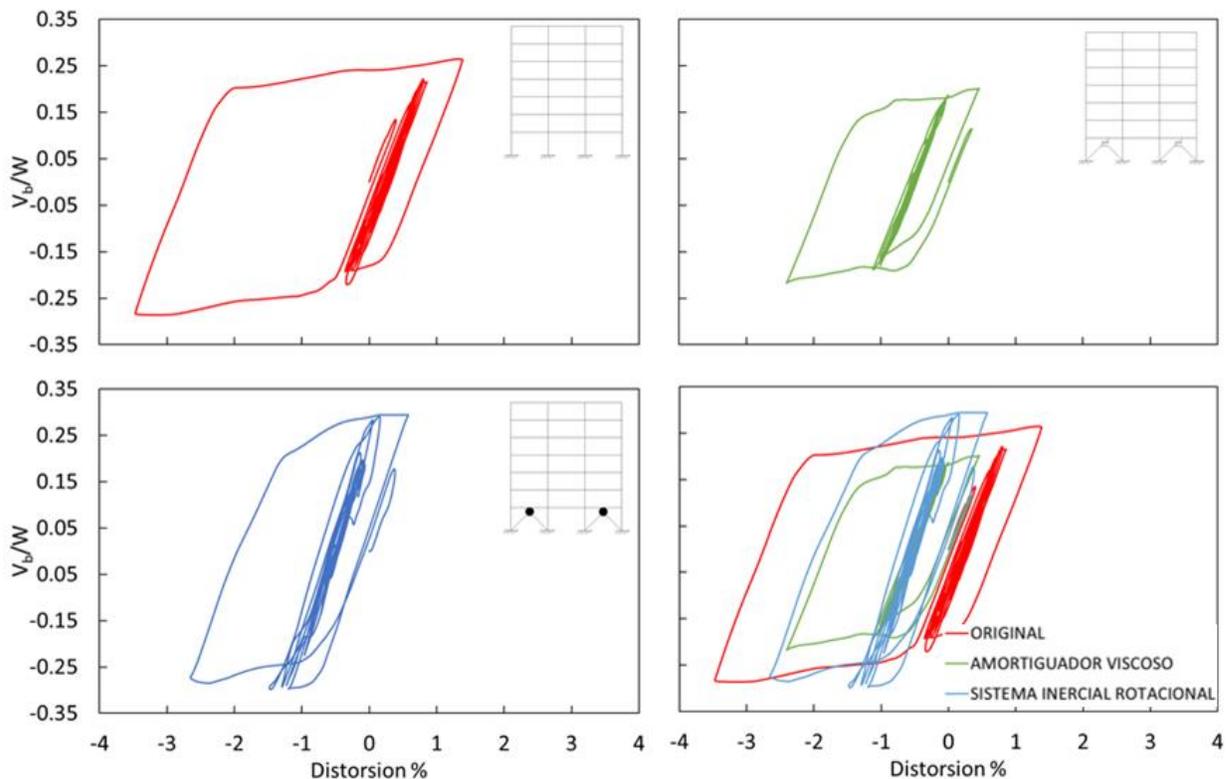


Figura 5.2.24 Curvas de histéresis de primer nivel del edificio de 7 niveles de los modelos estudiados para el registro Pacoima.

Para el registro Takarazuka se obtuvieron las curvas de histéresis para el primer nivel de los modelos seleccionados y se muestran en la figura 5.2.25 en donde se nota el comportamiento elástico y plástico generado en el primer nivel del sistema para cada ciclo de histéresis, comparando los modelos se observa partiendo del modelo original que se disminuyen los cortantes y distorsiones de entrepiso para el modelo con amortiguador viscoso, mientras que el sistema inercial rotacional genera incrementos tanto en las distorsiones de entrepiso como en los cortantes, dichos incrementos son más notables en las distorsiones de entrepiso en donde se presentan incrementos de aproximadamente un 25%.

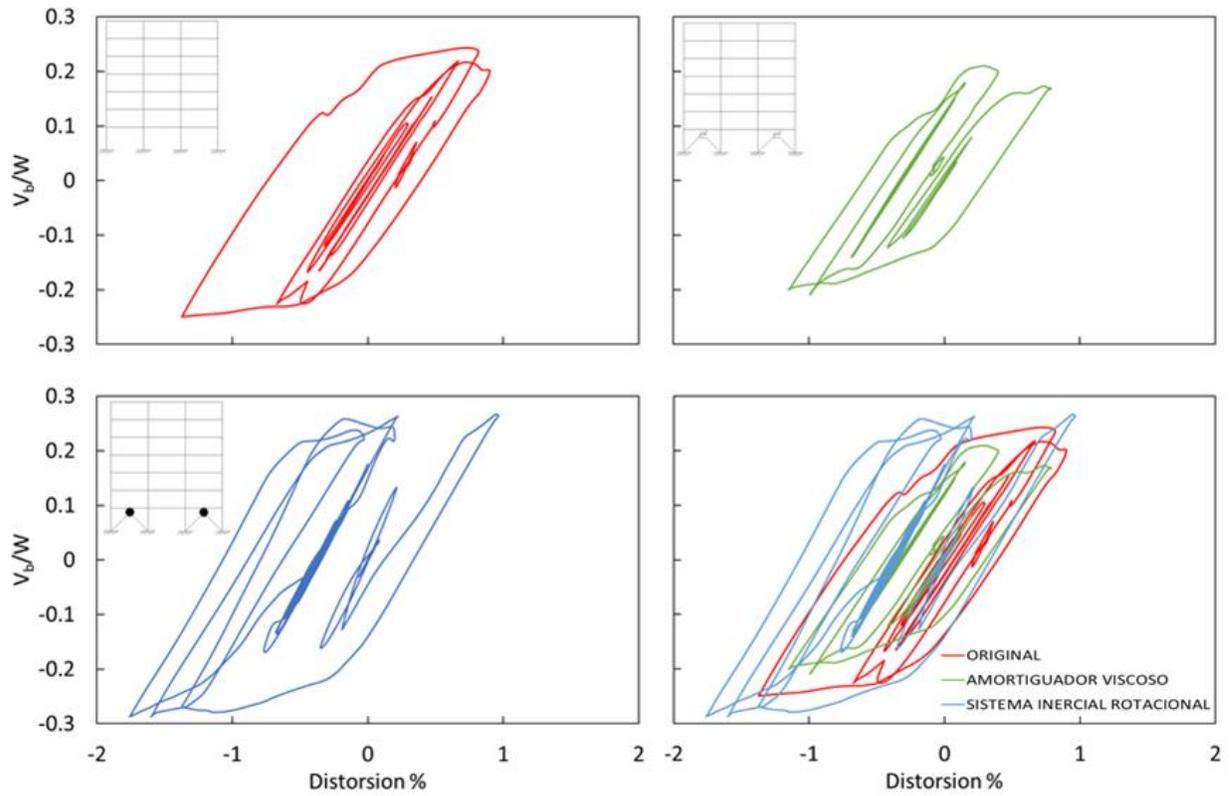


Figura 5.2.25 Curvas de histéresis de primer nivel del edificio de 7 niveles de los modelos estudiados para el registro Takarazuka.

---

### 5.3 Comparación de curvas de fragilidad de construcciones analizadas

Algunos de los principales parámetros que influyen en el comportamiento sísmico estructural de las estructuras de MGDL son SA y la duración significativa establecida con la intensidad de Arias (Arias 1970) para el rango de 5% a 95% (Jaimes y García-Soto, 2021), pero también el contenido de frecuencia y otras medidas de intensidad. El impacto del contenido, en términos de frecuencia, para eventos de banda angosta, así como su amplificación espectral (comúnmente muy alta) en el comportamiento sísmico de las estructuras consideradas, se cubrirá mediante el uso de un conjunto de registros generados por sismos mexicanos con Mw superior a 5.8 y hasta 8.1 (Tabla 5.3.1). Los eventos se registraron en 61 sitios equipados con estaciones acelerográficas sobre suelo blando. Las estaciones acelerográficas están ubicadas en la Ciudad de México en la denominada zona del lago; bajo estas estaciones existen depósitos de arcilla altamente compresible con alto contenido de agua, que a su vez están sustentados por arenas de alta resistencia como lo documentan Ordaz y Singh (1992). En la Tabla 5.3.1 se incluye información adicional para los sismos de intercapa de subducción e intraplaca de profundidad intermedia, así como el número de registros para cada evento, las distancias de ruptura R de 99 km hasta 415 km y las profundidades focales HD de 14 km hasta 61 km. En la Tabla 5.3.1, 6 de los eventos corresponden a terremotos de intercapa de subducción para los cuales se obtuvieron 508 registros; los cuatro eventos restantes corresponden a terremotos intraplaca para los cuales se obtuvieron 496 registros.

Los eventos y registros en la Tabla 5.3.1 se seleccionaron porque abarcan el período 1964 a 2017, en donde se registraron las mayores aceleraciones pico del suelo (*PGA*) en la Estación CU (conocida con este nombre debido a su ubicación en Ciudad Universitaria) ubicada en Ciudad de México, pero en zona de Lomas, a diferencia del resto de estaciones (ubicadas sobre suelo blando). Esta estación se usa como herramienta principal para estimar el peligro sísmico en sitios de suelos blandos, mediante el uso de las tasas de excedencia derivadas de la estación CU y factores de amplificación. El uso de la estación CU para determinar el peligro sísmico en sitios de suelos blandos no es sorprendente, se han registrado más de 40 sismos allí y es históricamente (desde 1964) el sitio de referencia para investigar los movimientos del suelo en la Ciudad de México (Jaimes et al.2015).

Tabla 5.3.1 Sismos considerados de 1964 a 2017 asociados a los PGA más grandes en la estación CU.

N°	Fecha Año-mes-día	Mecanismos	Mw	R (km)	Lat (°)	Lon (°)	HD (km)	PGA† (cm/s/s)	No. de registros
1	2017-09-19	Intra	7.1	100	18.40	-98.71	57	56.15	54
2	1985-09-19	Sub	8.1	295	18.14	-102.71	15	36.39	6
3	2013-06-16	Intra	5.9	103	18.25	-99.18	49.6	19.34	52
4	2014-05-08	Sub	6.5	268	17.36	-100.74	21.3	14.07	51
5	2014-04-18	Sub	7.3	278	17.55	-101.25	18.9	13.73	50
6	2012-03-20	Sub	7.5	294	16.60	-98.39	15.4	12.98	46
7	1989-04-25	Sub	6.9	290	16.60	-99.40	19	11.81	47
8	1999-06-15	Intra	6.9	218	18.13	-97.54	61	11.54	52
9	1995-09-14	Sub	7.3	320	16.31	-98.88	45	11.04	48
10	1999-09-30	Intra	7.4	415	16.03	-96.96	47	7.65	

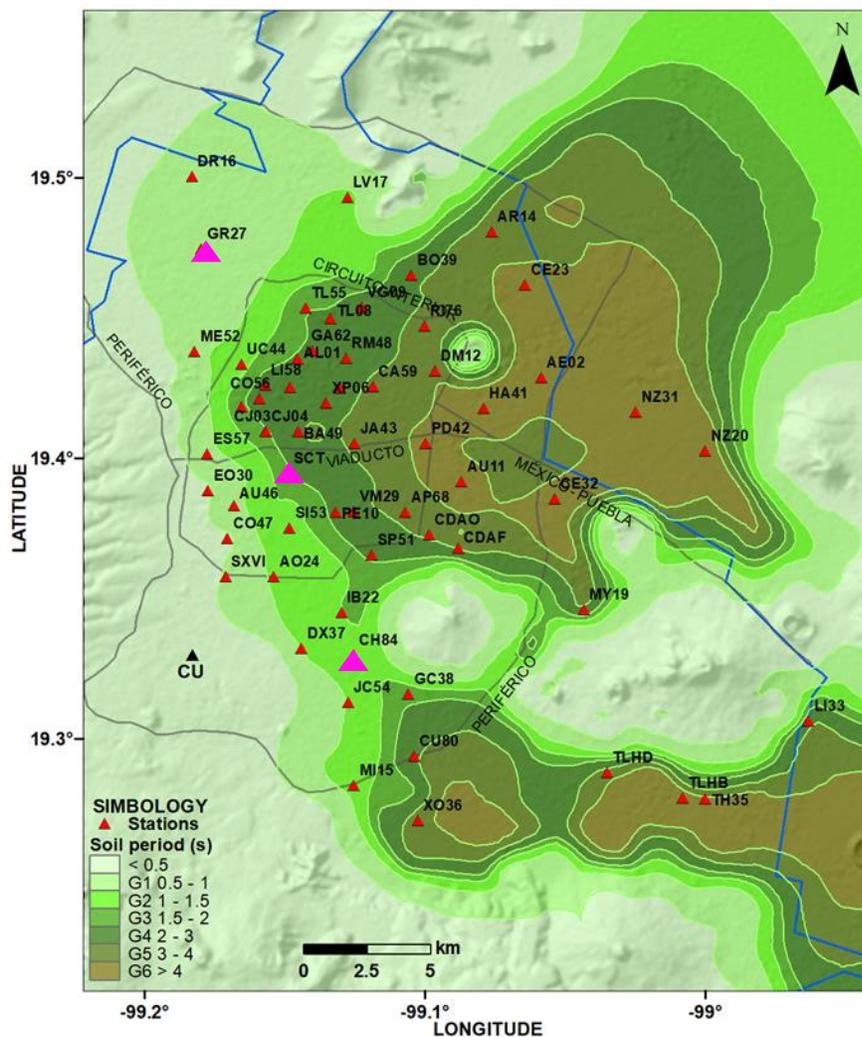


Figura 5.3.1 Estaciones consideradas sobre suelo blando en la Ciudad de México (triángulo magenta)

Se supone que las estructuras de MGDL están ubicadas en sitios con suelo blando en la Ciudad de México, con el objetivo de evaluar el impacto de diferentes  $T_s$  en su respuesta sísmica. Los sitios corresponden a las ubicaciones de la estación GR27, la estación CH84 y la estación SCT con  $T_s$  de aproximadamente 0.8s, 1.2s y 1.7s, respectivamente. Los sitios están situados aproximadamente a 110 km al noroeste del epicentro del sismo de 2017 Morelos-Puebla Mw 7.1 que azotó a la Ciudad de México. En dos de los sitios anteriores, en las estaciones CH84 y SCT respectivamente, el sismo del 19 de septiembre de 2017 Mw7.1 y el gran sismo del 19 de septiembre de 1985 Mw8.1 se registraron. Por tanto, estos dos sitios son muy relevantes dado que en estas estaciones se registraron los sismos más intensos y dañinos antes mencionados.

Las tasas de excedencia en términos de  $SA$  para períodos estructurales dados se obtuvieron para los tres sitios mediante la metodología Esteva-Cornell (McGuire 2008) (i.e., el llamado Análisis Probabilístico de Riesgo Sísmico, *PSHA*). Dado que no existen ecuaciones específicas de predicción del movimiento del suelo (*GMPE*) para las estaciones GR27, CH84 y SCT, excepto por la Estación CU, la técnica desarrollada por Esteva (1970) se emplea para incluir los efectos del sitio en la *PSHA*. En consecuencia, las tasas de excedencia denotadas como  $\lambda_s(y)$  de una medida de intensidad dada  $y$  y en cualquier sitio de suelo blando dado, se determinan con

$$\lambda_s(y) = \lambda_r(y/AF) \quad (5.3.1)$$

donde  $\lambda_r(\cdot)$  también denota una tasa de excedencia para  $y$ , pero en un sitio de referencia ubicado sobre roca, y  $AF$  se denomina factor de amplificación para traducir la medida de intensidad de la roca a la medida de intensidad de suelo blando. Implica un  $AF$  relativamente constante, a pesar de la magnitud, el azimut de la distancia de un terremoto y el nivel de intensidad implícito. También se da a entender que  $AF$  no es probabilístico o ni posee una incertidumbre igual en la predicción del movimiento para un sitio blando o un sitio rocoso. Es de destacar que en la Ciudad de México las arcillas en la zona del lago se comportan casi linealmente en casi todas partes de la ciudad, y que cualquier comportamiento no lineal observado no es significativo (Reinoso y Ordaz, 1999; Singh et al.2011).

Como se mencionó anteriormente, para calcular la tasa de excedencia para  $y$ , se requiere un sitio de referencia en la roca para obtener el  $AF$ . La estación

---

seleccionada para este propósito es la estación CU (19.326oN, 99.182oW). Se elige la estación CU como sitio de referencia porque durante varias décadas (desde 1964) se han registrado muchas excitaciones sísmicas de campo lejano en los acelerómetros instalados allí sobre depósitos gruesos de lava basáltica; muchos investigadores lo habían considerado previamente (Singh et al., 1988a, b; Ordaz et al., 1989; Montalvo-Arrieta et al., 2002) para investigar los efectos del sitio en la zona del lecho del lago de la Ciudad de México.

Como se mencionó anteriormente, *PSHA* determina las tasas de excedencia en CU en términos de *SA*. Para la evaluación de peligros, se utilizan las ecuaciones de predicción del movimiento del suelo (*GMPE*) para cada fuente sísmica. Para los eventos de inter-capa de subducción originados a lo largo de la Costa Pacífica, se considera el *GMPE* de Jaimes (2006). Para terremotos intraplaca de profundidad intermedia, se considera el *GMPE* de Jaimes (2015). Finalmente, para terremotos corticales poco profundos, se considera el *GMPE* de Jaimes (2016).

Después de calcular las tasas de excedencia en el sitio de la roca de referencia, se pueden calcular los factores de amplificación *AF* en los sitios blandos. Se asume un fuerte movimiento del suelo en CU como una medida de las excitaciones sísmicas en los sitios de suelo blando de la Ciudad de México. Esta amplificación en sitios de suelos blandos se realiza mediante el concepto de relación espectral de respuesta (Rosenblueth y Arciniega, 1992; Reyes, 1999). Las relaciones espectrales en el mismo sitio de interés se calculan como el promedio de la medida de intensidad calculada para cada estación considerada (la estación GR27, la estación CH84 y la estación SCT consideradas anteriormente) con respecto a la misma medida de intensidad en la estación CU. Esto se llevará a cabo para cualquier sismo registrado simultáneamente en cualquier sitio de suelo blando y en la estación CU. En este estudio, estas relaciones espectrales de respuesta empírica se calculan para los sismos que exhiben los PGA más grandes en la estación CU enumerados en la Tabla 5.3.1 y registrados desde 1964 hasta 2017.

Para comparar la efectividad del sistema inercial rotacional se obtendrá la curva de fragilidad sísmica y se comparará con las curvas de los otros dos modelos analizados, se busca determinar cómo modifica el sistema inercial rotacional las características sísmicas de una estructura de MGDL y poder obtener conclusiones del funcionamiento del sistema en distintos tipo de suelo, para poder obtener la curva de fragilidad sísmica se ocupan los 100 registros pertenecientes a la zona GR27 escalados en grupos de 10 registros a una intensidad distinta para poder generar una respuesta del sistema a diferentes

magnitudes y poder obtener los resultados deseados, se realiza un análisis no lineal y se generan las respuestas sísmicas de la estructura de MGD, el proceso se realiza de tanto para el sitio de la estación GR27 como para el sitio de la estación CH84, la cantidad de registros ocupados puede variar dependiendo el enfoque y precisión que se requiera para obtener los resultados del estudio que se esté realizando, en el caso particular de este trabajo se ocuparon 100 registros ya que se considera que la precisión obtenida es buena y cumple con los objetivos planteados a los cuales se desea llegar.

En la figura 5.3.2 se muestran los espectros de respuesta de una estructura de 1GDL generados a través de los registros del sitio GR27, los cuales fueron escalados a una intensidad de 0.432 g con los cuales se realiza el cálculo de las curvas de fragilidad, se puede observar gráficamente que los registros cuentan con características diferentes, pero como se resalta en la figura todos coinciden en la intensidad en la cual fueron escalados, se muestra que la intensidad máxima presentada por este grupo de registros es de 0.72 g, la intensidad máxima se presenta aproximadamente en el periodo de la estructura analizada de 0.93 s.

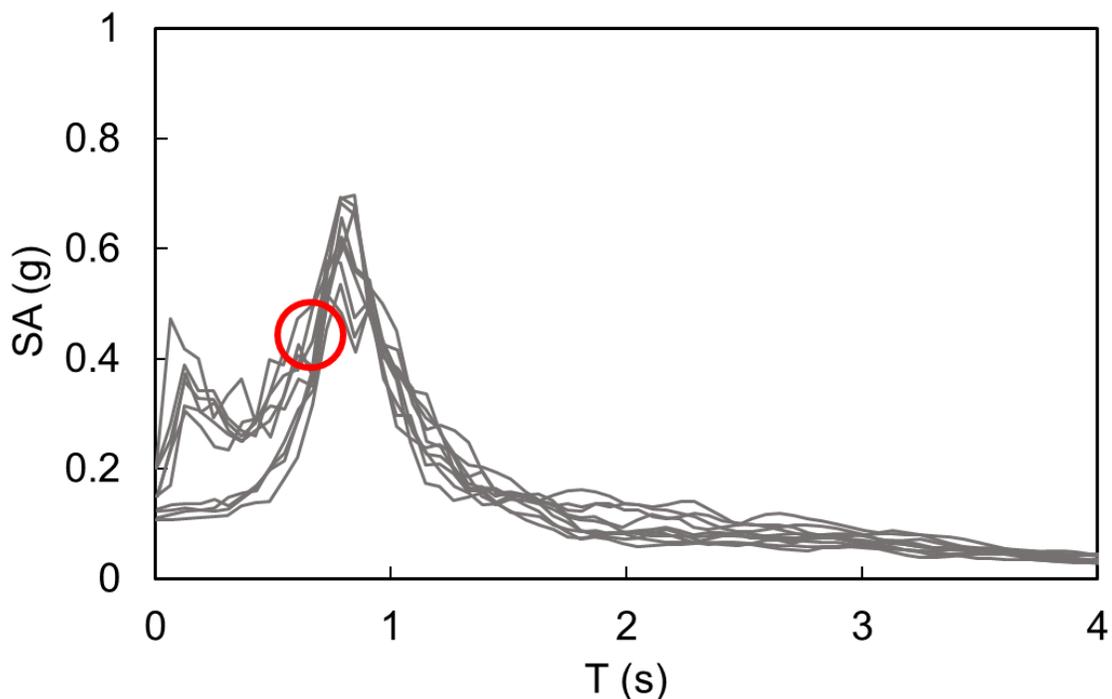
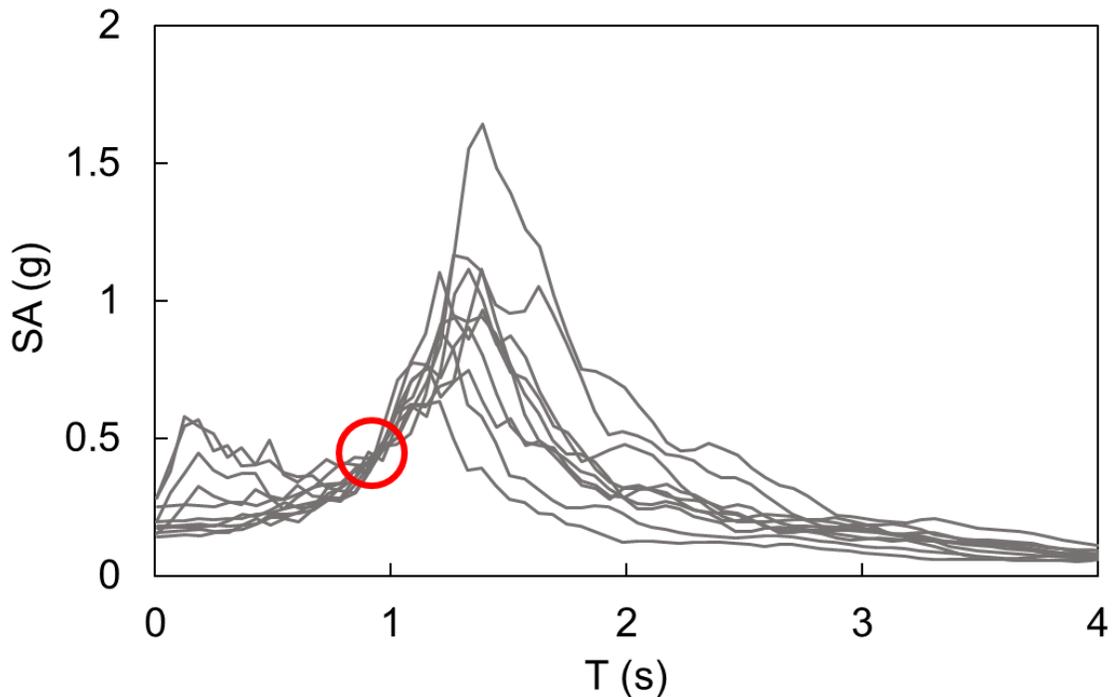


Figura 5.3.2 Espectros de respuesta de los registros de la zona GR27 escalados a una intensidad de 0.432 g en el periodo fundamental de la estructura  $T=0.93$  s.

En la figura 5.3.3 se muestran los espectros de respuesta de la estructura de 1GDL generados por los registros de la estación CH84 los cuales como se observa se encuentran escalados a una intensidad de 0.432 g, en el círculo color rojo se remarca el punto en el cual convergen los espectros de respuesta, dicho punto coincide con el periodo fundamental de vibrar de la estructura de MGDL (0.93 s) analizada en este estudio. La intensidad máxima que se obtiene con estos registros es de 1.65 g.



*Figura 5.3.3 Espectros de respuesta de los registros de la zona CH84 escalados a una intensidad de 0.432 g en el periodo fundamental de la estructura  $T=0.93$  s.*

Con la visualización de la figura 5.3.2 y 5.3.3 se presenta una base para poder comprender las curvas de fragilidad sísmica tanto del sitio GR27 como el sitio CH84 respectivamente.

Los modelos de MGDL (Original, Amortiguador viscoso y Sistema inercial rotacional) fueron analizados bajo las condiciones de los registros seleccionados y se obtuvieron su respuesta sísmica para cada uno de ellos, en la figura 5.3.4 se muestran las distorsiones de entrepiso de las estructuras de MGDL generadas por los registros escalados a una intensidad de 0.432 g del sitio GR27, en color gris podemos ver la respuesta sísmica individual para cada registro y en color rojo se muestra el promedio de la respuesta sísmica de los registros para cada modelo.

Se observa que la distorsión de entrepiso que se genera en las tres estructuras de MGDL no superan el límite último de falla de 1.5%, se muestra que la estructura rehabilitada con el sistema inercial rotacional presenta distorsiones menores a las obtenidas por la estructura rehabilitada con amortiguador viscoso y la estructura sin reforzar (original).

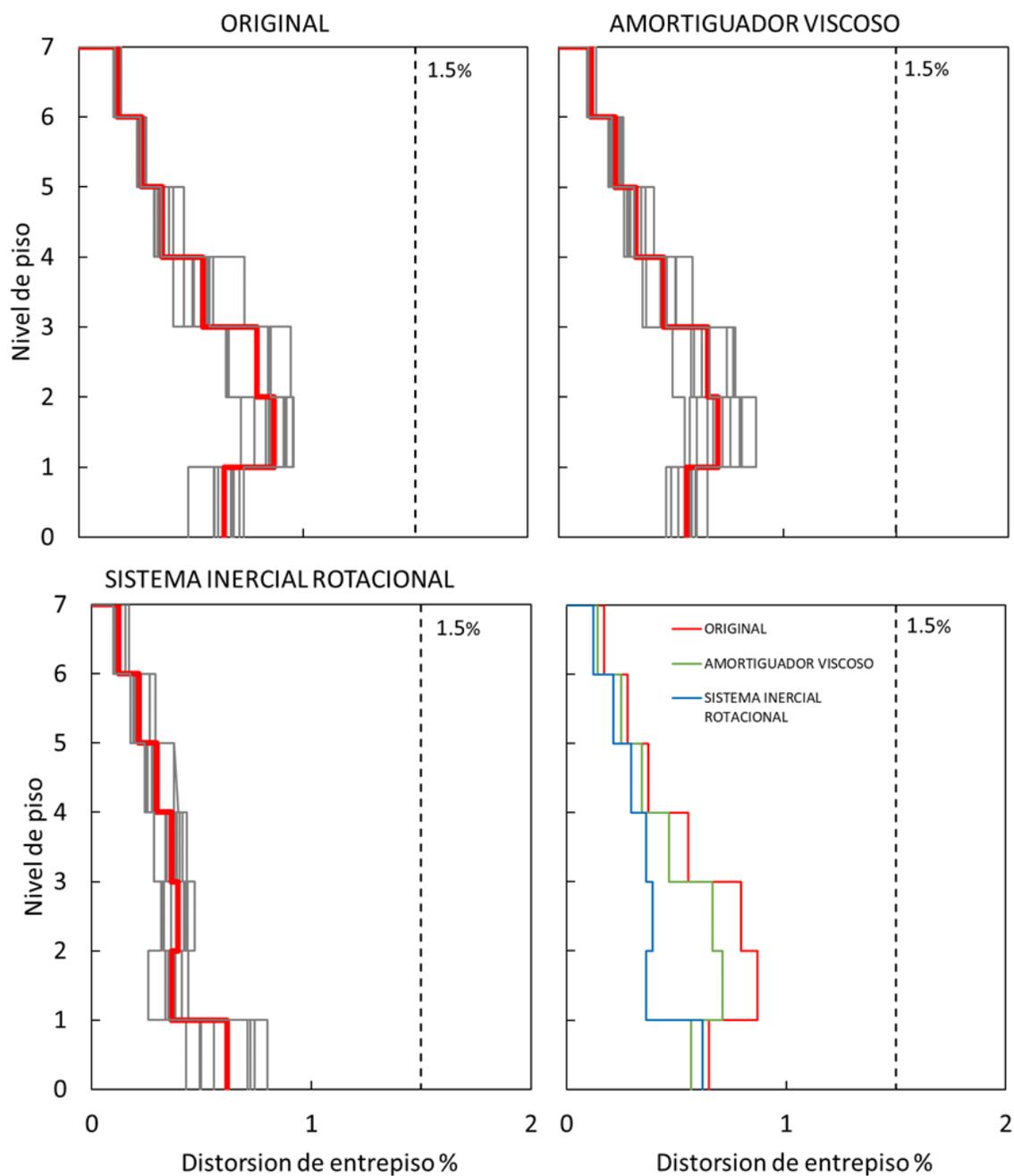


Figura 5.3.4 Graficas de las distorsiones de entrepiso máximas para cada modelo analizado de los registros de la zona GR27.

En la comparativa podemos observar que la estructura rehabilitada con el sistema inercial rotacional tiene distorsiones de entrepiso de menor magnitud en los niveles superiores comparándola con las otras estructuras analizadas, sin embargo, en el primer nivel de la estructura tiene un valor de 0.61%, mientras que el modelo rehabilitado con amortiguador viscoso tiene una mejor respuesta sísmica con un valor promedio de 0.56 %. Se observa que la estructura sin reforzar (Original) tiene un valor máximo de distorsión de entrepiso de 0.95 % mientras que el sistema inercial rotacional mejora el comportamiento con un máximo de 0.61% en el primer nivel de la estructura.

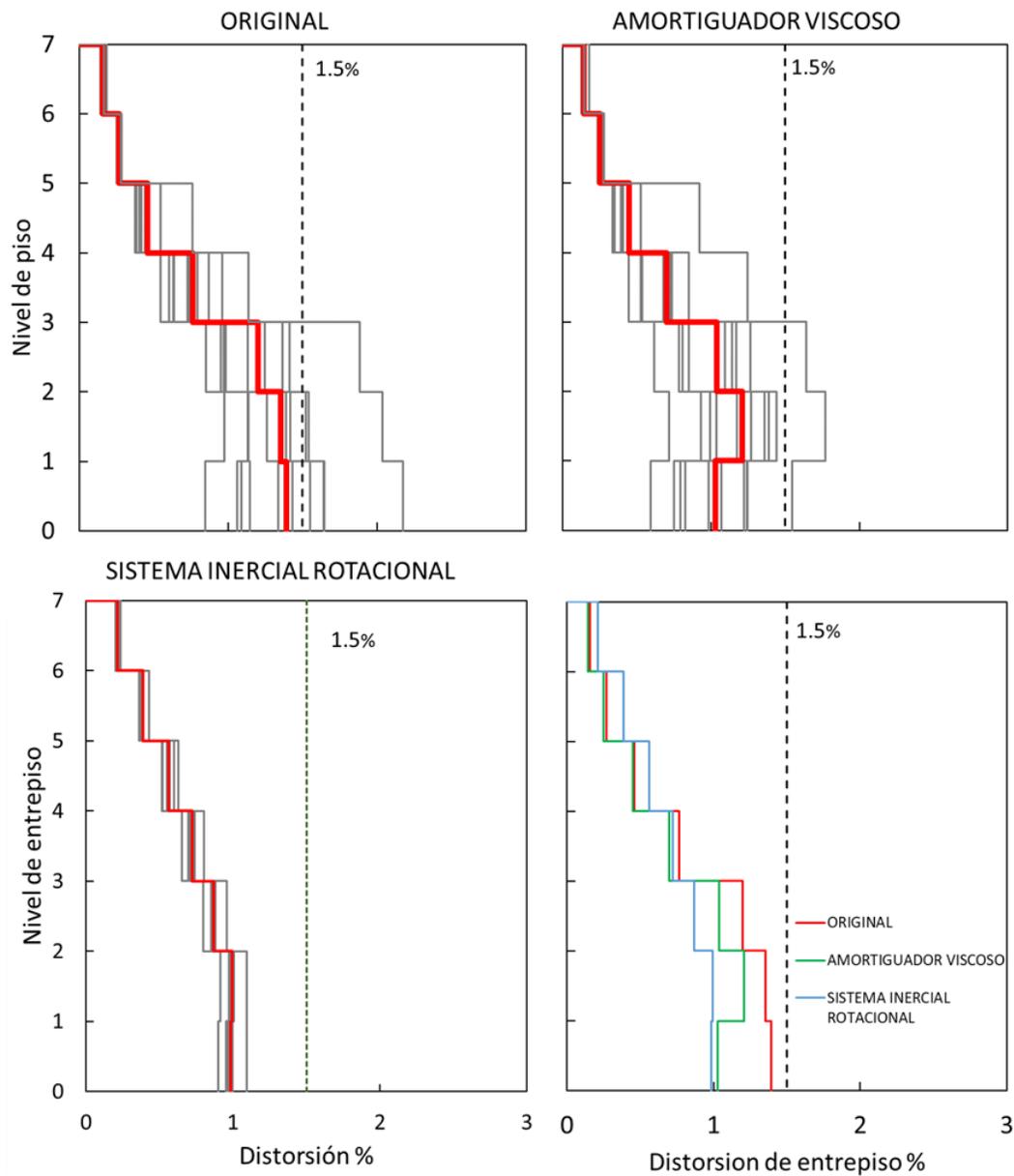


Figura 5.3.5 Graficas de las distorsiones de entrepiso máximas para cada modelo analizado de los registros de la zona CH84.

---

En la figura 5.3.5 se muestran las distorsiones de entrepiso generadas por los registros correspondientes al sitio CH84, para la estructura de MGDL rehabilitada con el sistema inercial rotacional se tienen distorsiones de entrepiso mayores en los niveles superiores al quinto nivel si se le compara con los otros dos modelos analizados, mientras que los niveles inferiores de la estructura se tiene una distorsión de entrepiso con valor promedio de 1%, observando el caso de la estructura con amortiguador viscoso se tiene un comportamiento similar en el primer nivel, sin embargo, el sistema inercial rotacional a nivel global .

En la comparativa podemos observar un comportamiento sísmico similar al obtenido en el sitio GR27, teniendo una disminución del desplazamiento en los niveles superiores y de igual manera una disminución en el desplazamiento del primer piso de la estructura, con los datos mostrados se observa que en el sitio de la estación GR27 y la estación CH84 el sistema inercial rotacional está modificando la respuesta sísmica de mejor manera en comparación con los otros modelos analizados.

En la figura 5.3.6 se muestran las gráficas de cortantes de entrepiso de las estructuras de MGDL generados por los registros correspondientes a el sitio GR27, se puede observar en color gris de igual forma los cortantes de entrepiso obtenidos para cada registro y resaltado en color rojo el promedio de las respuestas. Se observa en la comparativa de los tres modelos un como el modelo rehabilitado con el sistema inercial rotacional presenta cortantes menores en los niveles superiores, en cuanto a primer nivel se ve reducido el valor del cortante en comparación con el modelo original. El cortante del primer nivel de la estructura rehabilitada con el sistema inercial rotacional tiene un valor de 0.18, mientras que para el caso de la estructura reforzada con un amortiguador viscoso se presenta un cortante con un valor de 0.17 lo que representa un aumento del 5.5%, al ser la diferencia entre estos dos modelos un valor pequeño y al observar que reduce el cortante comparándolo con el modelo original se considera que el sistema inercial rotacional obtiene un buen comportamiento.

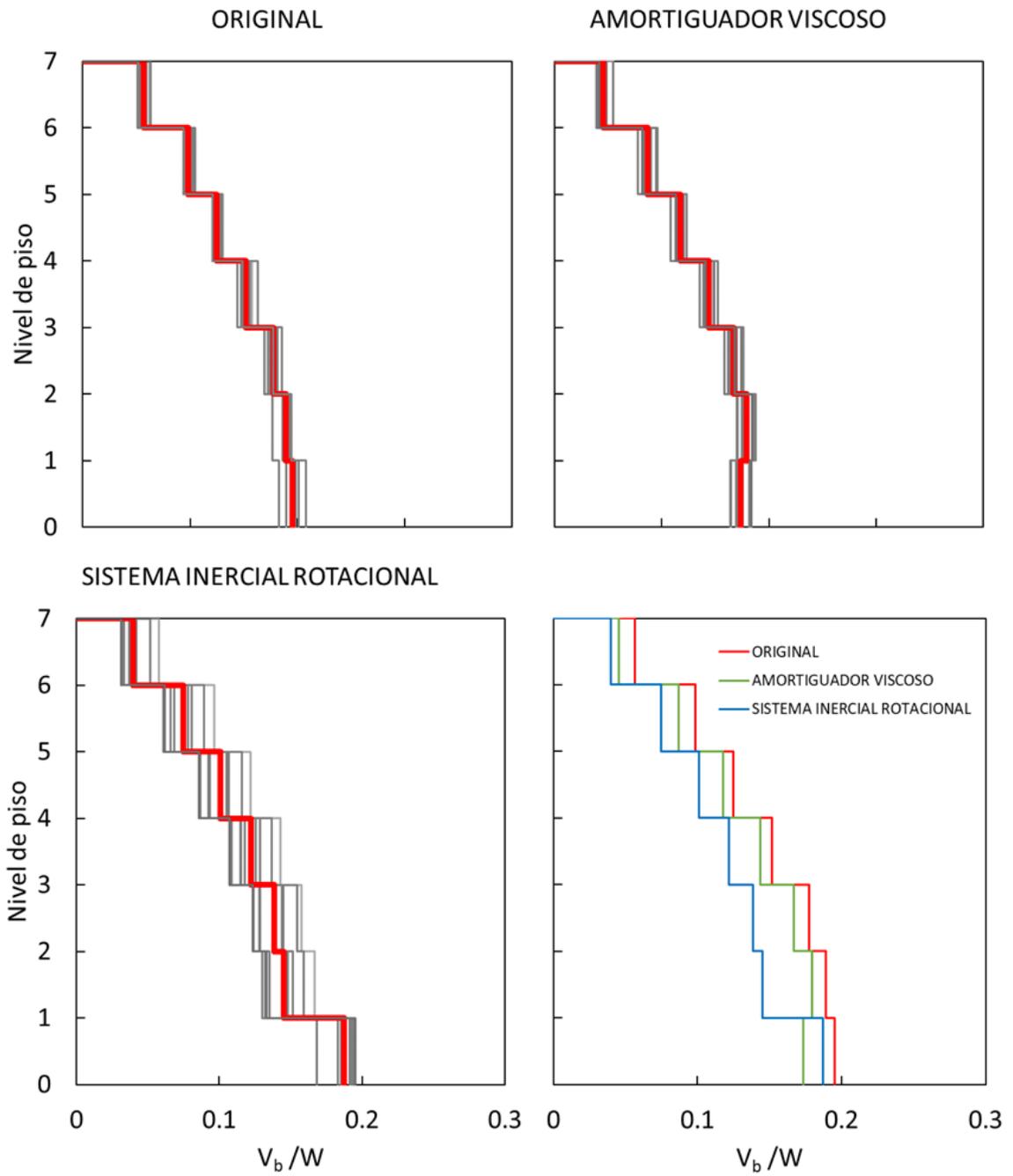


Figura 5.3.6 Graficas de los cortantes de entrepiso máximos para cada modelo analizado de los registros de la zona GR27.

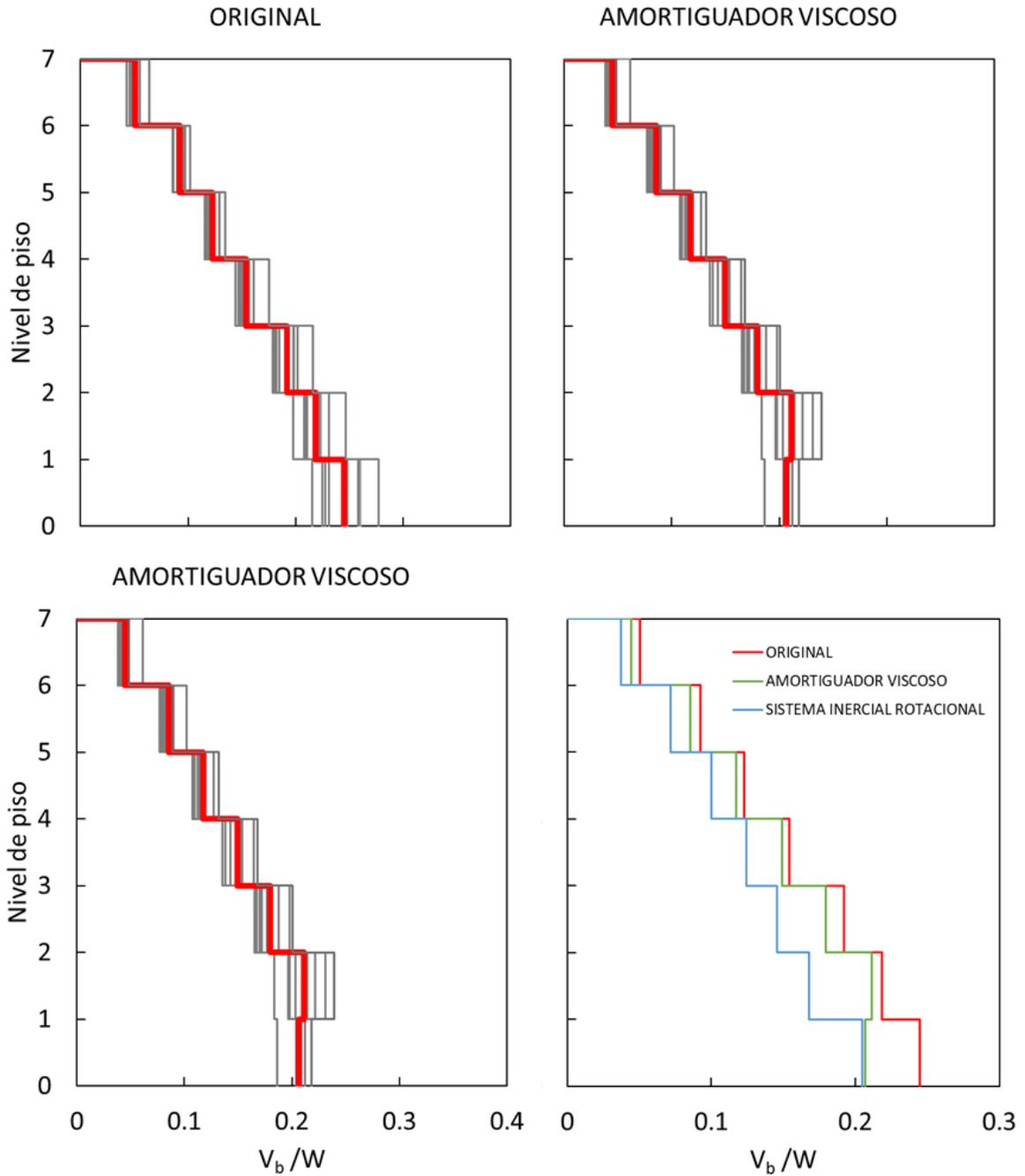


Figura 5.3.7 Graficas de los cortantes de entrepiso máximos para cada modelo analizado de los registros de la zona CH84.

En la figura 5.3.7 se muestran las gráficas de cortantes de entrepiso de las estructuras de MGDJ generados por los registros que corresponden al sitio de la estación CH84, se puede observar en color gris de igual forma los resultados

---

obtenidos para cada registro y resaltado en color rojo el promedio de las respuestas. El cortante del primer nivel de la estructura rehabilitada con el sistema inercial rotacional tiene un valor de 0.21 valor que coincide con el obtenido por el caso de la estructura reforzada con un amortiguador viscoso, comparándolo con el valor obtenido por el sistema original que presenta un valor de 0.24 se obtiene una reducción del 12.5%.

Para obtener la curva de fragilidad para cada sitio (GR27 y CH84) se consideró un límite último de falla de 1.5% de las distorsiones de entrepiso, con las respuestas sísmicas de las estructuras generadas por los registros se obtiene la intensidad en el cual la distorsión máxima de la estructura alcanza el límite último de falla (establecido por la NTC de la CDMX), los datos obtenidos se les aplica una distribución log-normal estándar para poder obtener la curva de fragilidad, en la cual se identificara la probabilidad que tiene cada estructura analizada de superar el límite último de falla variando la intensidad en términos de SA, al comparar las curvas de fragilidad de las estructuras rehabilitadas y sin rehabilitar permite a cualquier persona interesada en este tema determinar cuál alternativa de rehabilitación se desempeña de mejor manera o reduce el riesgo de llegar al límite último de falla.

Las características y comportamiento del sistema inercial rotacional varían dependiendo del sitio en el cual se realice la curva de fragilidad, debido a que el suelo de los sitios GR27 y el CH84 poseen características diferentes, y el sistema de rehabilitación mediante un sistema inercial rotacional puede desempeñarse de mejor o peor forma dependiendo de las características del suelo en el cual se quiera ocupar.

En la figura 5.3.8 se muestran las curvas de fragilidad de las estructuras de MGD (Original, Amortiguador viscoso y Sistema inercial rotacional) correspondiente al sitio GR27, se puede observar en color azul la curva de fragilidad del sistema inercial rotacional; en color rojo corresponde a la estructura sin reforzar (original); y en color verde la estructura rehabilitada con un amortiguador viscoso; el comportamiento que se muestra refleja que el sistema inercial rotacional disminuye la probabilidad de que la estructura sobrepase el límite último de colapso del 1.5% en comparación con el modelo original y el modelo con amortiguador viscoso, tomando en cuenta una intensidad de 1g para el modelo original tiene una probabilidad de superar el límite último de colapso de 57.5%, mientras que el modelo rehabilitado con el sistema inercial rotacional tiene un valor de 42.5%, lo que representa una reducción de la probabilidad de colapso de la estructura del 26%

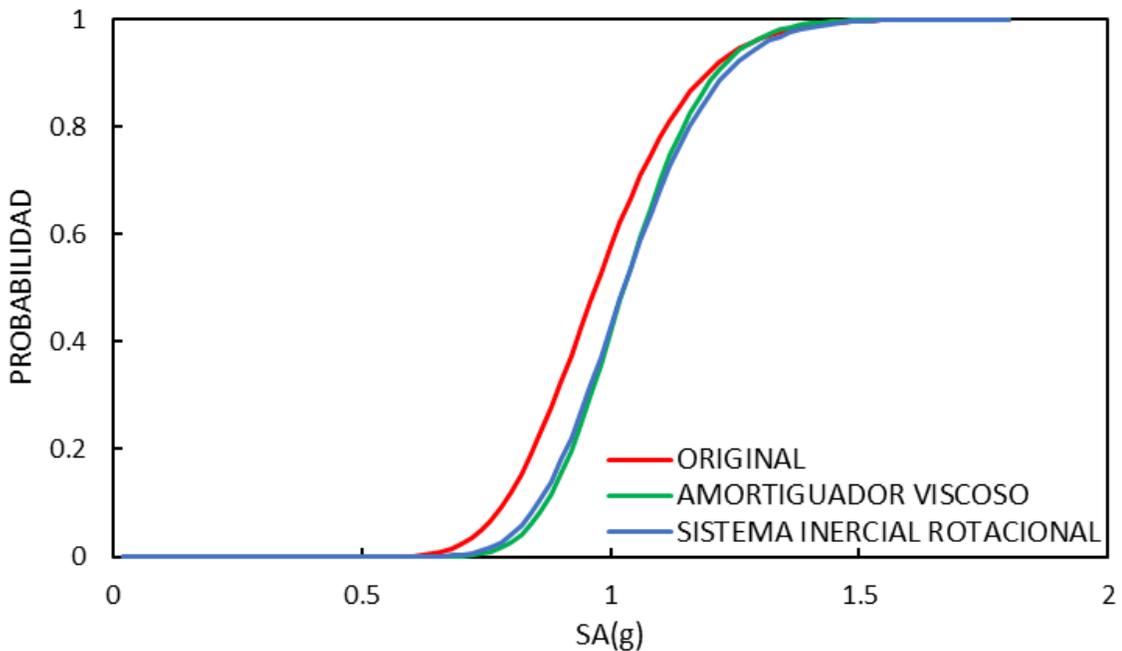
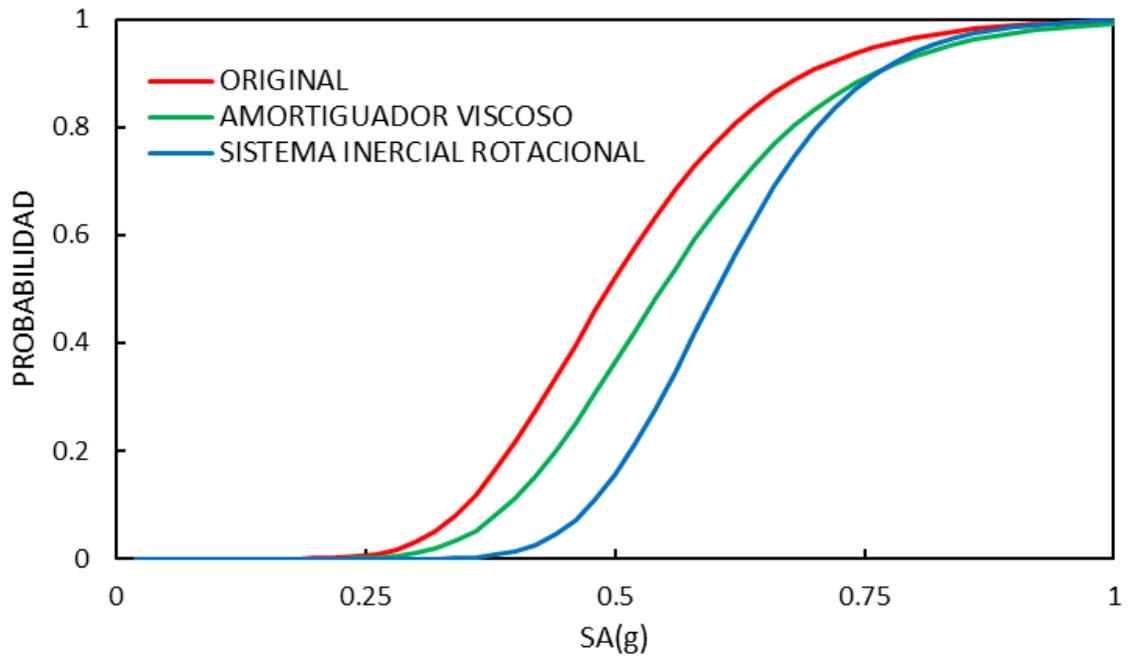


Figura 5.3.8 Curvas de fragilidad sísmica de los modelos de MGDL analizados en el sitio GR27.

En la figura 5.3.9 se muestran las curvas de fragilidad de las estructuras de MGDL correspondiente al sitio CH84, se observa que la estructura que presenta menor riesgo de colapsar es la rehabilitada con el sistema inercial rotacional, ya que presenta para las intensidades de magnitud menor a 0.75g se tiene una probabilidad de colapsar menor a la presentada por las otras dos estructuras, en el caso de la intensidad de 0.5g el modelo original obtiene un valor 52% de probabilidad de superar el estado limite ultimo de colapso (1.5% de las distorsiones) comparándolo con el modelo con el sistema inercial rotacional que para esa misma intensidad obtuvo una probabilidad de 15.6%, es notable la reducción que genera el sistema, la reducción es del 70% comparado con el original, por lo que se aprecia que en el tipo de suelo del sitio CH84 el sistema inercial rotacional funciona correctamente para el reforzamiento de las estructuras que se requieren rehabilitar.



*Figura 5.3.9 Curvas de fragilidad sísmica de los modelos de MGDL analizados en el sitio CH84.*

---

## **6. Discusiones**

Analizando los resultados obtenidos por edificio rehabilitado con el sistema inercial rotacional frente a los sismos evaluados nos dejan evaluar el comportamiento sísmico en la zona CH84 y GR27 principalmente, en la zona CH84 el comportamiento del sistema está dentro de los parámetros permitidos por las normas técnicas complementarias de la Ciudad de México, el desempeño medido frente a otras opciones de rehabilitación es mejor debido a que se presentan desplazamientos menores en el primer nivel y en algunos casos controla los desplazamientos residuales, el sistema presenta una disminución de las distorsiones de entrepiso en todos niveles de la estructura rehabilitada en prácticamente todos los registros de esta zona.

La curva de fragilidad sísmica del sitio CH84 muestra que con la implementación del sistema inercial rotacional se tiene una probabilidad menor de superar el límite máximo permisible de falla a comparación de la estructura reforzada con un amortiguador viscoso, por lo cual podemos determinar que para la zona CH84 el uso del sistema inercial rotacional tendrá los mejores resultados en cuanto a desempeño. Los diferentes registros escalados ocupados para la obtención de la curva de fragilidad muestran para una intensidad de 0.432 g que el promedio de las respuestas sísmicas del sistema inercial rotacional tiene distorsiones de entrepiso inferiores a la estructura sin reforzar (original) y la estructura reforzada con un amortiguador viscoso en su primer piso débil, en los registros del sitio CH84 el sistema reforzado con el sistema inercial rotacional genera un comportamiento sísmico que se considera mejor y que reduce de mejor forma los desplazamientos comparado con las otras dos estructuras analizadas.

El comportamiento sísmico de la estructura de MGDL rehabilitada con el sistema inercial rotacional en el sitio CH84 disminuye la probabilidad de que se supere el límite último de falla, este comportamiento se considera satisfactorio ya que se busca este efecto, en el análisis de los sistemas de 1GDL el desempeño del sistema inercial rotacional se obtuvo un comportamiento similar logrando reducir los desplazamientos generados por los movimientos sísmicos comparándolos contra los otros dos modelos de 1GDL reforzados de forma diferente.

Para el sitio GR27 en los modelos de un grado de libertad (1GDL) se puede notar como el sistema inercial rotacional tiene un desempeño bastante bueno, disminuyendo en gran medida los desplazamientos generados por los eventos

---

sísmicos, con estos resultados se esperó que en la estructura de MGDL se tuviera un comportamiento sísmico similar.

El comportamiento mostrado en la estructura de MGDL rehabilitada con el sistema inercial rotacional en el sitio GR27 en términos de distorsión de entrepiso fue satisfactoria, debido a la reducción de las distorsiones de entrepiso comparándolas con el sistema reforzado con un amortiguador viscoso y original, el sistema tuvo un comportamiento similar al obtenido en el sitio CH84.

Analizando la curva de fragilidad del sistema inercial rotacional en el sitio GR27 se muestra que para todas las intensidades el sistema inercial rotacional se desempeña de forma satisfactoria ya que presenta una probabilidad menor de exceder el límite último de falla, a diferencia de la estructura original obteniendo un comportamiento similar al generado por el modelo con amortiguador viscoso.

Para el sismo del 19 de septiembre de 2017 de la Ciudad de México de gran intensidad se aprecia que el sistema inercial rotacional tiene un desempeño satisfactorio en su comportamiento sísmico logrando disminuir los desplazamientos en la estructura de MGDL, de manera similar, para el sismo de 1985 el comportamiento se logra controlar y se logró disminuir los efectos generados por el sismo.

Con lo anterior mencionado y el comportamiento sísmico mostrado por la estructura rehabilitada con el sistema inercial rotacional se pretende aportar una nueva forma de rehabilitación para estructuras dañadas por el efecto de los sismos en la Ciudad de México, y poder demostrar que el sistema funciona correctamente bajo las condiciones en las cuales se pretende trabajara.

---

## **7. Conclusiones**

El sistema inercial rotacional reduce las respuestas sísmicas generadas por la acción del sismo del 19 de septiembre de 2017 en la zona GR27, CH84 y SCT en comparación con los modelos original y con amortiguador viscoso evaluados, en el caso de la zona CH84 el sistema inercial rotacional genera disminuciones en los desplazamientos inferiores en gran medida a los presentados por los modelos original y con amortiguador viscoso. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de las curvas de fragilidad sísmica se puede determinar que el sistema inercial rotacional en el sitio CH84 y GR27 mejora el comportamiento sísmico debido a que reduce la probabilidad de superar el límite máximo permisible de colapso.

El sistema inercial rotacional modifica el comportamiento sísmico de las estructuras de MGDL reduciendo los desplazamientos para sitios en los cuales el tipo de suelo tiene un periodo predominante de vibrar inferior al periodo natural de vibrar de la estructura rehabilitada.

El sistema inercial rotacional disminuye la probabilidad de colapso en el sitio GR27 para intensidades menores a 0.75g. El sistema de manera similar disminuye la probabilidad de colapso de la estructura en el sitio CH84, teniendo en este sitio un mejoramiento de la respuesta sísmica notable por lo visto en la gráfica de fragilidad.

---

## 8. Referencias

- Arias, A (1970). "A measure of earthquake intensity. Hansen RJ (ed) Seismic design for nuclear power plants". MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 438-483.
- Bazán, E. y Meli, R. (2004). Diseño sísmico de edificios. (1<sup>ra</sup>ed.). México: Limusa.
- Chopra, A.K. (2010). Dynamics of structures. Theory and applications to earthquake engineering. (4<sup>ta</sup>ed.). California: Pearson.
- Cruz Atienza, Víctor Manuel, Singh, Shri Krishna y Ordaz Schroeder, Mario (2017). ¿Qué ocurrió el 19 de septiembre de 2017 en México?, en Revista Digital Universitaria (RDU), vol. 18, núm. 7, septiembre-octubre. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.22201/codeic.16076079e.2017.v18n7.a10>.
- Esteva, L. (1970). "Consideraciones prácticas en la estimación bayesiana de riesgo sísmico". Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería Rep. 248.
- Gobierno de la Ciudad de México. (2020) Normas Técnicas Complementarias de la ciudad de México (NTC para diseño por sismo). [NORMA TÉCNICA COMPLEMENTARIA \(cdmx.gob.mx\)](http://www.cdmx.gob.mx/normas-tecnicas-complementarias).
- Jaimes, M. A., Reinoso, E., & Ordaz, M. (2006). "Comparison of methods to predict response spectra at instrumented sites given the magnitude and distance of an earthquake". Journal of earthquake engineering", 10(06), 887-902.
- Jaimes M. A., & Reinoso, E. (2006). "Comparación del comportamiento de edificios en el valle de México ante sismos de subducción y de falla normal". Revista de Ingeniería Sísmica, 75, 1-22.
- Jaimes, M. A., Ramirez-Gaytán, A., & Reinoso, E. (2015). "Ground-motion prediction model from intermediate-depth intraslab earthquakes at the hill and lake-bed zones of Mexico City". Journal of Earthquake Engineering, 19(8), 1260-1278.
- Jaimes, M. A., Lermo, J., & García-Soto, A. D. (2016). "Ground-motion prediction model from local earthquakes of the Mexico Basin at the hill zone of Mexico City". Bulletin of the Seismological Society of America, 106(6), 2532-2544.
- Jaimes, M. A., & García-Soto, A. D. (2021). Ground-Motion Duration Prediction Model from Recorded Mexican Interplate and Intermediate-Depth Intraslab Earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America, 111(1), 258-273.
- McGuire, R. K. (2008). "Probabilistic seismic hazard analysis: Early history". Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 37(3), 329-338.

---

Meli, R. (1986). Evaluación de los efectos de los sismos de 1985 en los edificios de la ciudad de México (3 volúmenes y 7 anexos), Informe Interno DE/EST-V2/I, Instituto de ingeniería, UNAM.

Meli, R. (2010). Diseño estructural. (2<sup>da</sup>ed.). México: Limusa.

Montalvo-Arrieta, J. C., Sánchez-Sesma, F. J., & Reinoso, E. (2002). "A virtual reference site for the Valley of Mexico". Bulletin of the Seismological Society of America, 92(5), 1847-1854.

Ordaz, M., Reinoso, E., Singh, S. K., Vera, E. and Jara, J. M. (1989). "Espectros de respuesta en diversos sitios del Valle ante temblores postulados en la brecha de Guerrero, Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica and VII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, México", A187-A198

Ordaz, M., & Krishna Singh, S. (1992). "Source spectra and spectral attenuation of seismic waves from Mexican earthquakes, and evidence of amplification in the hill zone of Mexico City". Bulletin of the Seismological Society of America, 82(1), 24-43.

Reinoso, E., & Ordaz, M. (1999). "Spectral ratios for Mexico City from free-field recordings". Earthquake Spectra, 15(2), 273-295.

Reyes, C., 1999. El estado límite de servicio en el diseño sísmico de edificios, Phd Thesis, UNAM, México (in Spanish).

Rosenblueth, E., & Arciniega, A. (1992). "Response spectral ratios". Earthquake engineering & structural dynamics, 21(6), 483-492.

Sato J. y Kumagai Y. (1996). Predicciones, Pronósticos, Alertas y Respuestas Sociales, en Revista SEMESTRAL DE LA RED DE ESTUDIOS SOCIALES EN PREVENCIÓN DE DESASTRES EN AMÉRICA LATINA, no.6, año 4, enero-junio. Recuperado de KOBE: ¿Un desastre no anunciado? (desenredando.org).

Singh, S. K. (1988a). "A study of amplification of seismic waves in the Valley of Mexico with respect to the hill zone site. Earthquake Spectra 4, 653-674.

Singh, S. K., Iglesias, A., Ordaz, M., Pérez-Campos, X., & Quintanar, L. (2011). "Estimation of ground motion in Mexico City from a repeat of the M~ 7.0 Acambay earthquake of 1912". Bulletin of the Seismological Society of America, 101(5), 2015-2028.

Servicio Geológico de los Estados Unidos. (2021). The Disaster that Helped the Nation Prepare for Future Earthquakes: Remembering San Fernando, informe de la USGS. Recuperado de The Disaster that Helped the Nation Prepare for Future Earthquakes: Remembering San Fernando (usgs.gov).

## Anexos

### Anexo A: Armado de las columnas y vigas del edificio de MGDL

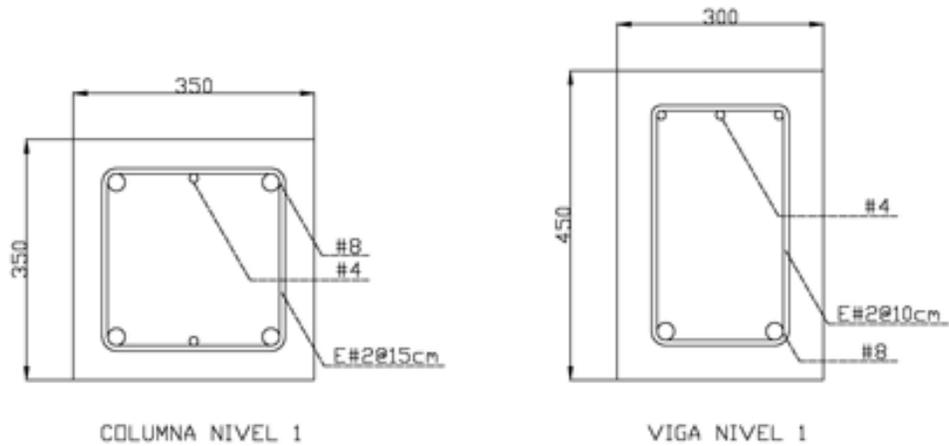


Figura 9.1 Armado de la columna y viga del nivel 1.

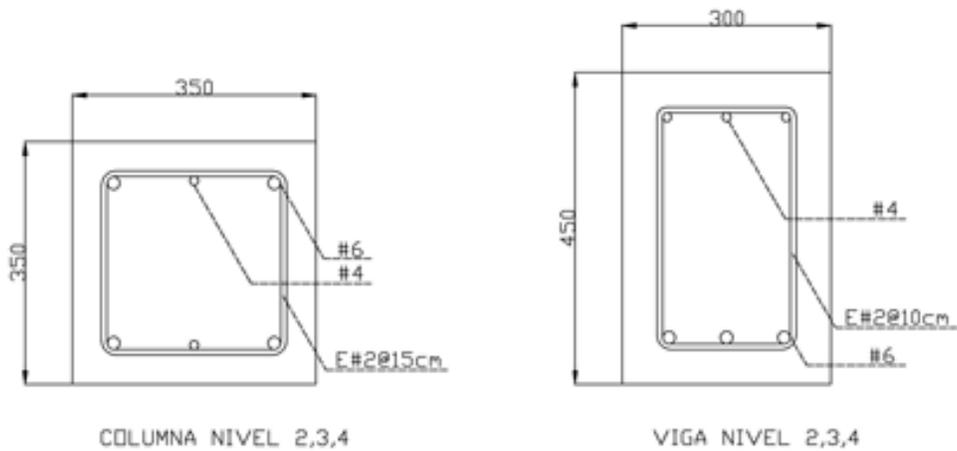


Figura 9.2 Armado de la columna y viga del nivel 2,3,4.

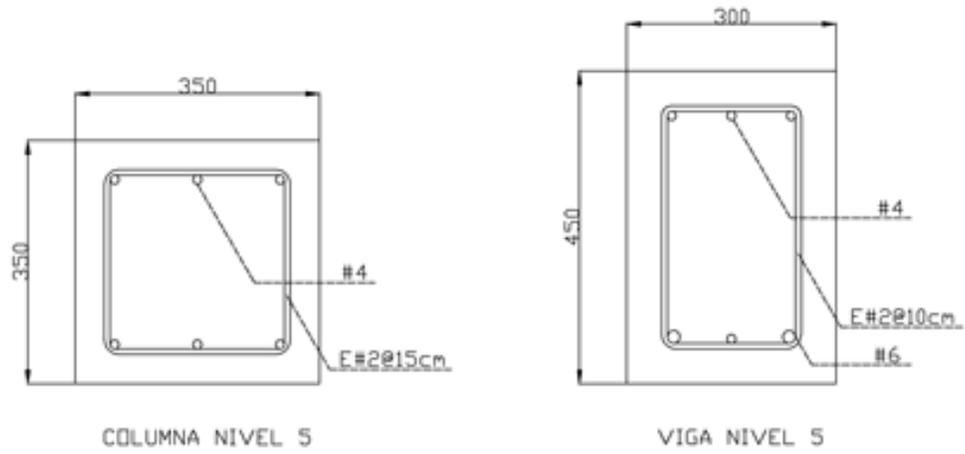


Figura 9.3 Armado de la columna y viga del nivel 5.

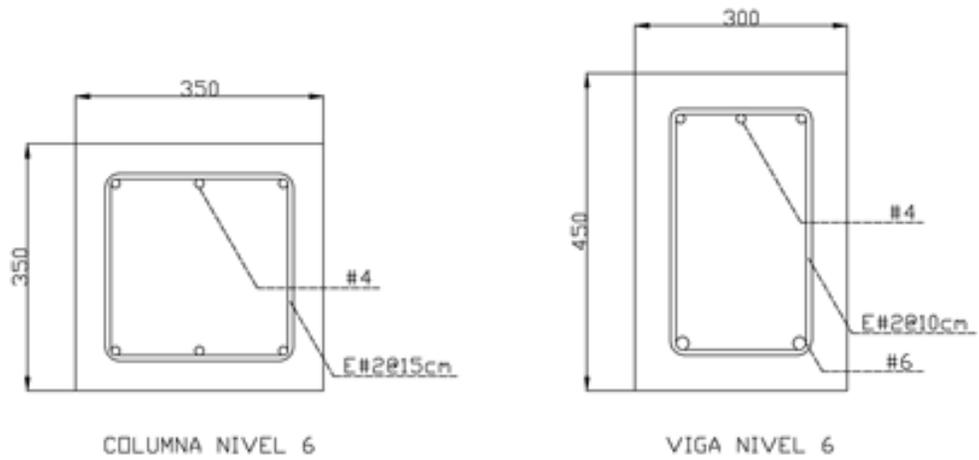


Figura 9.4 Armado de la columna y viga del nivel 6.

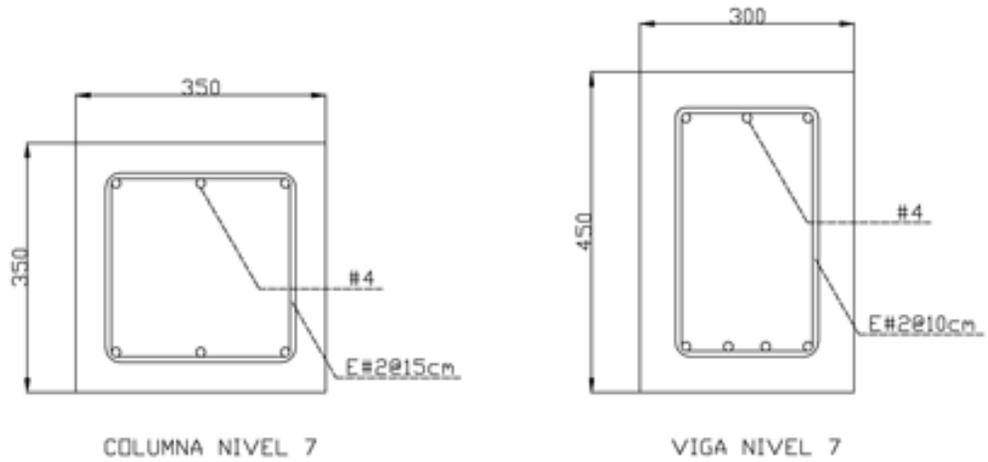


Figura 9.5 Armado de la columna y viga del nivel 7.

### Anexo B: Diagramas de interacción de las columnas

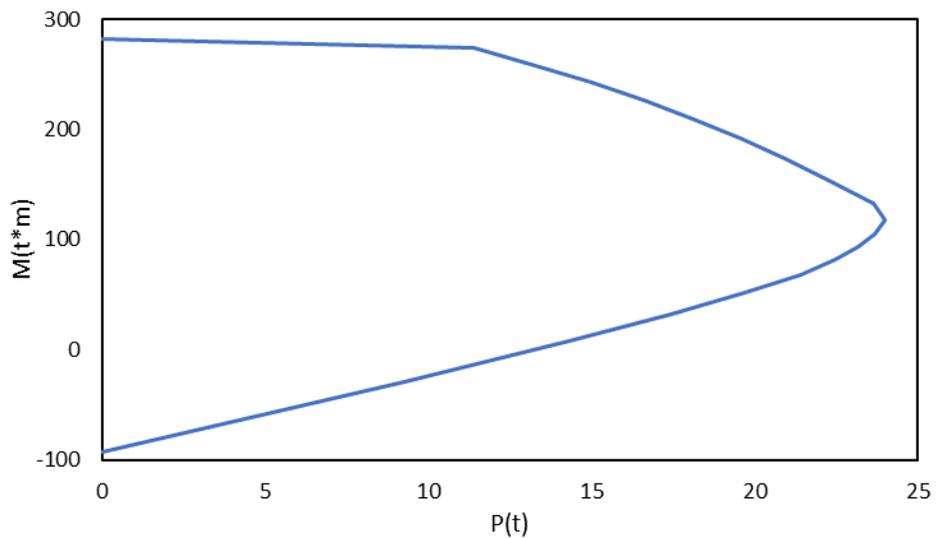


Figura 9.6 diagrama de interacción de columnas del nivel 1 de la estructura de MGDL.

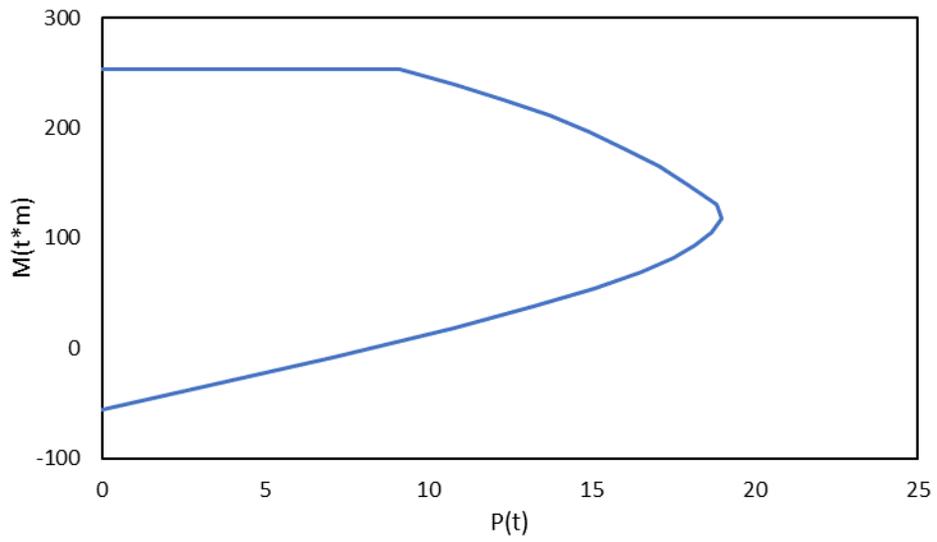


Figura 9.7 diagrama de interacción de columnas de los niveles 2,3 y 4 de la estructura de MGD.

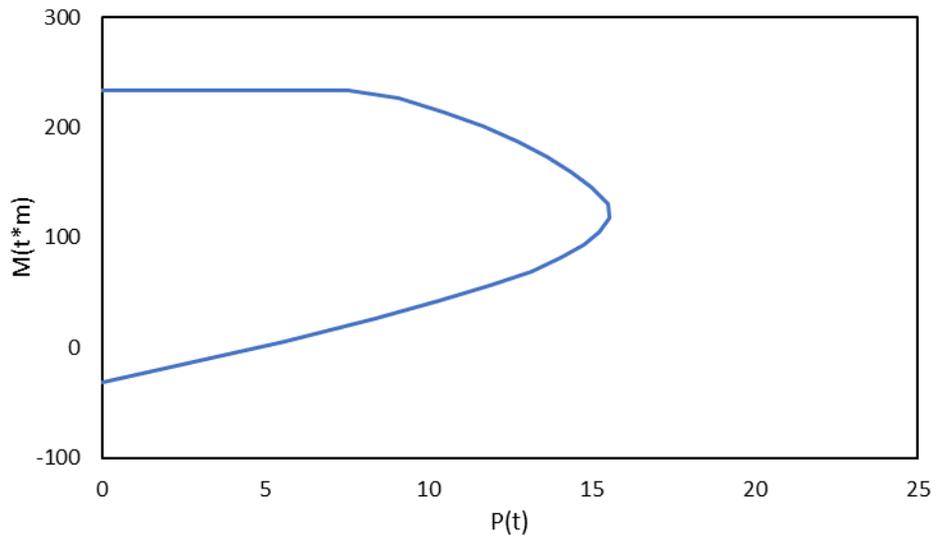


Figura 9.8 diagrama de interacción de columnas de los niveles 5,6 y 7 de la estructura de MGD.

## Anexo C: Distorsión de entrepiso de estructuras de MGDL

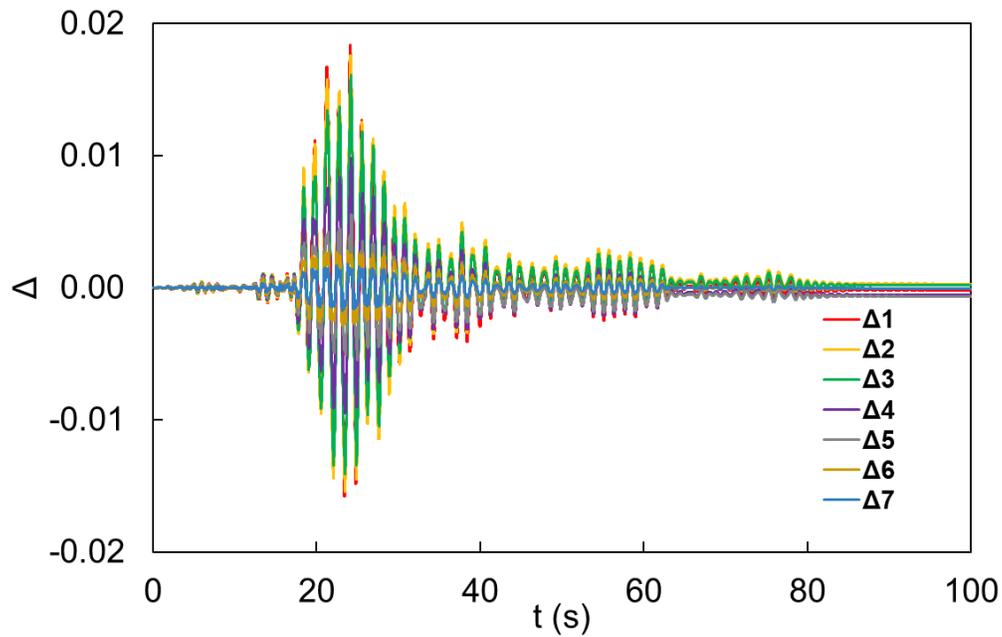


Figura 9.9 distorsión de entrepiso estructura de MGDL original para el sismo del 19 de septiembre de 2017 en zona CH84.

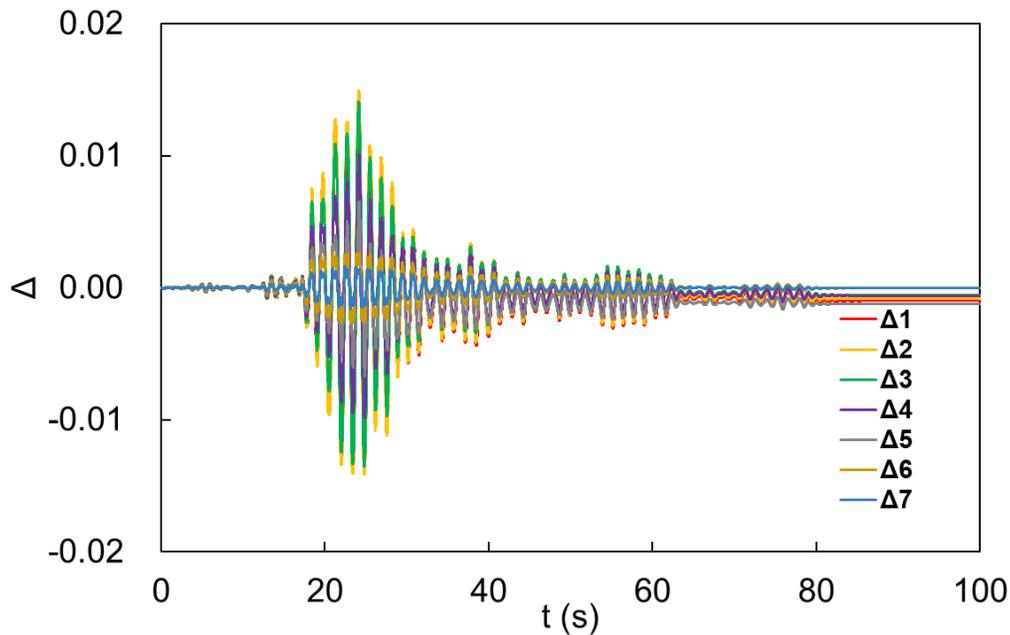


Figura 9.10 distorsión de entrepiso estructura de MGDL con amortiguador viscoso para el sismo del 19 de septiembre de 2017 en zona CH84.

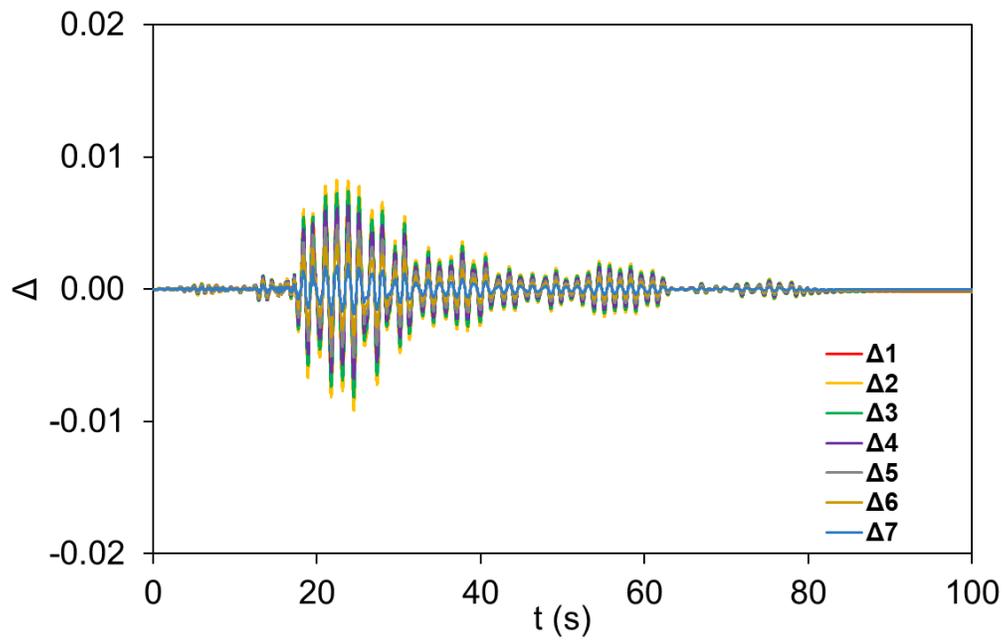


Figura 9.11 distorsión de entrepiso estructura de MGDL con sistema inercial rotacional para el sismo del 19 de septiembre de 2017 en zona CH84.

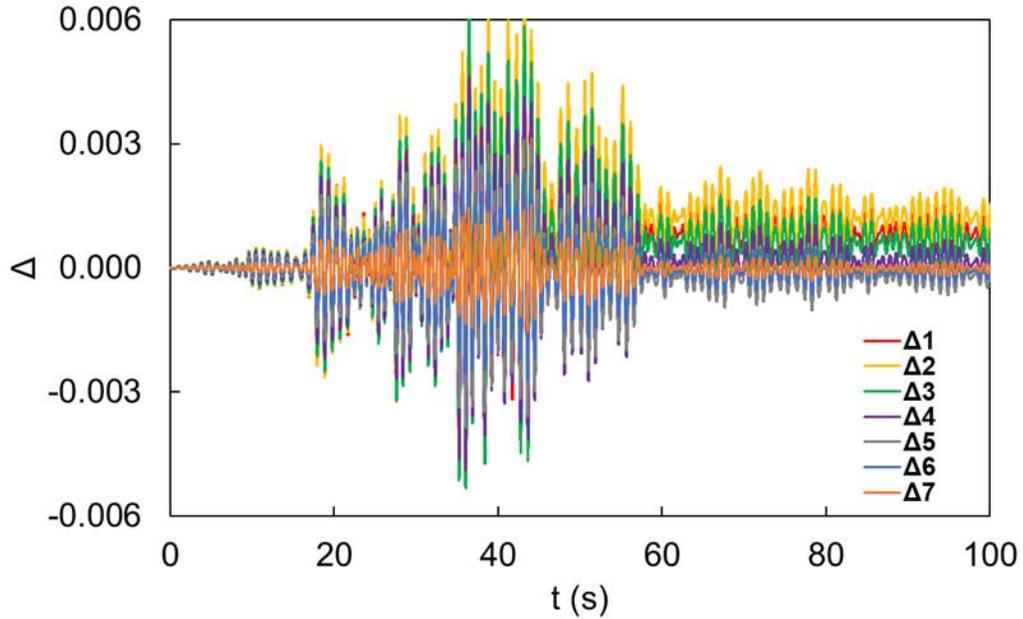


Figura 9.12 distorsión de entrepiso estructura de MGDL original para el sismo del 19 de septiembre de 2017 en zona GR27.

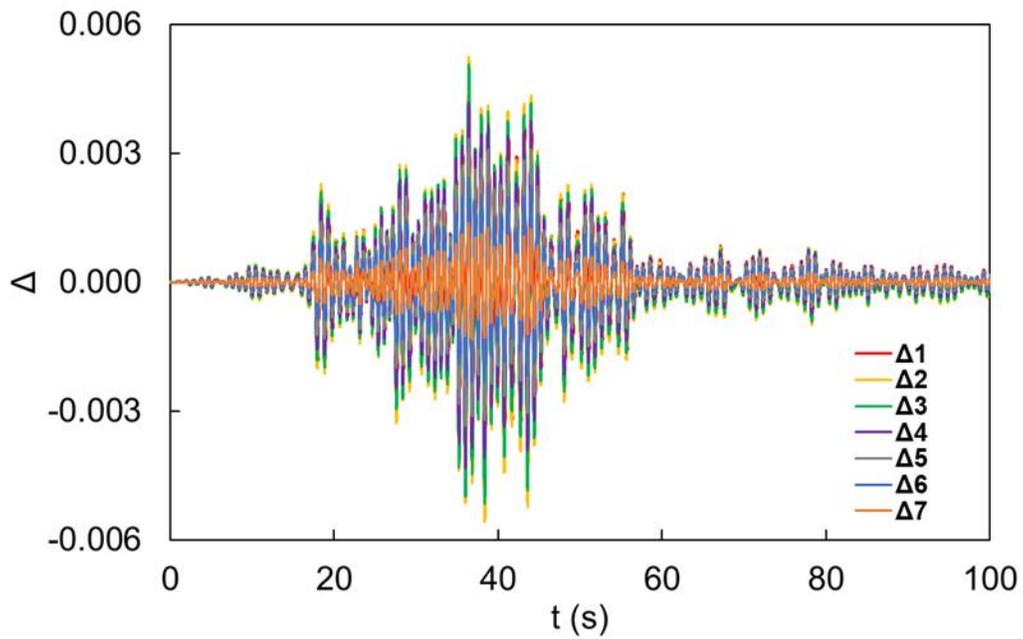


Figura 9.10 distorsión de entrepiso estructura de MGDL con amortiguador viscoso para el sismo del 19 de septiembre de 2017 en zona GR27.

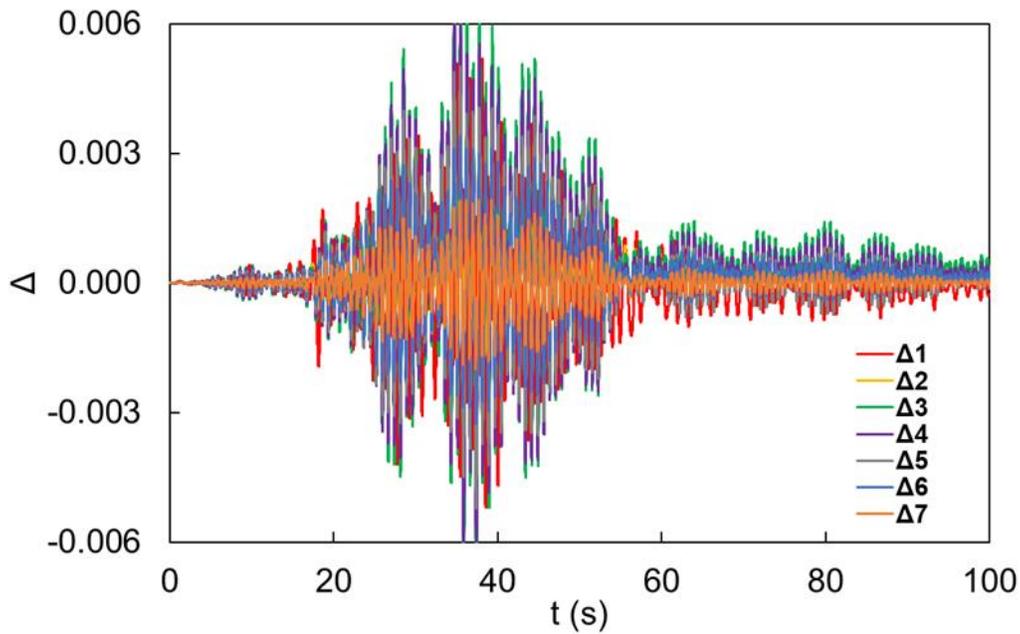


Figura 9.11 distorsión de entrepiso estructura de MGDL con sistema inercial rotacional para el sismo del 19 de septiembre de 2017 en zona GR27.

## Anexo D: Distorsión de entrepiso de estructuras de 2GDL

Realizando el cálculo de las distorsiones de entrepiso para un modelo de dos grados de libertad se llegó a los resultados mostrados en la figura 9.12, en donde se muestran las respuestas sísmicas de un modelo de 2GDL sin reforzar y uno con el sistema inercial rotacional, en color azul se muestra el modelo original y en color naranja se muestra el sistema inercial rotacional, del lado derecho se muestran los resultados generados por el registro de la zona GR27 y del lado izquierdo los resultados del registro correspondiente a la zona CH84.

A simple vista se nota que el sistema inercial rotacional genera una disminución en los desplazamientos generados, por lo que se está teniendo una modificación del comportamiento sísmico satisfactorio ya que reduce el riesgo de colapso de la estructura.

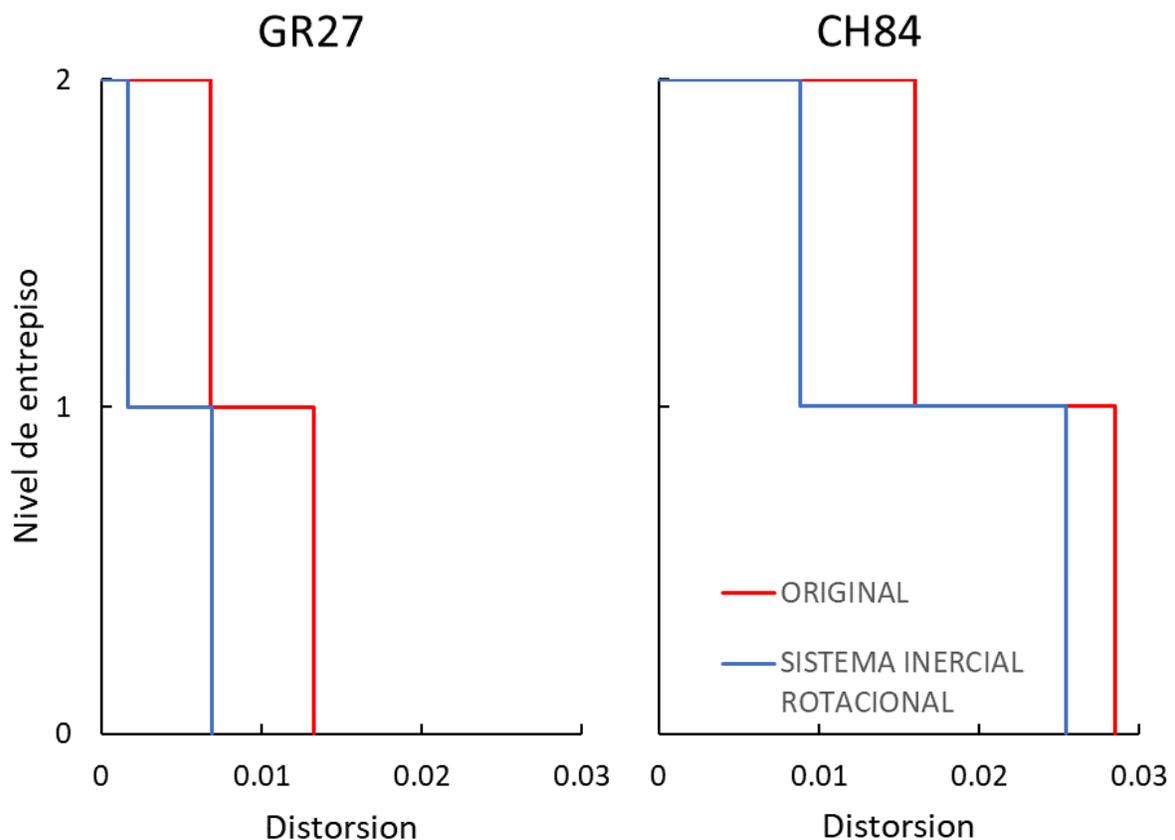
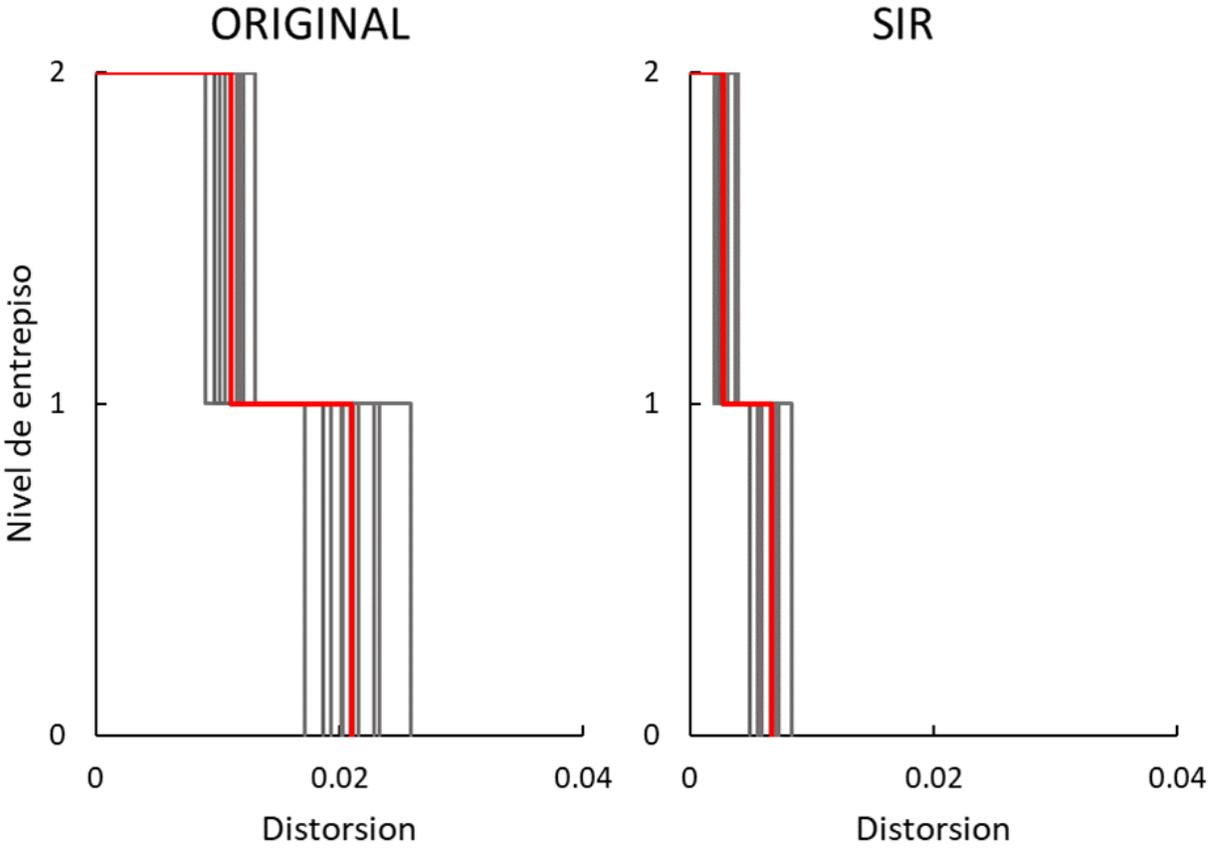


Figura 9.12 distorsión de entrepiso estructura de 2GDL con sistema inercial rotacional para el sismo del 19 de septiembre de 2017 en zona GR27 y zona CH84.

---

En la figura 9.13 se muestran las distorsiones de entrepiso generadas por los registros de la zona GR27, en color negro se muestran cada resultado obtenido de cada registro y en color rojo se muestra el promedio obtenido, como se observa el sistema inercial rotacional en este sitio y para el modelo de 2GDL reduce los desplazamientos lo que conlleva a disminuir las distorsiones de entrepiso, esta reducción es aproximadamente superior al 50%.

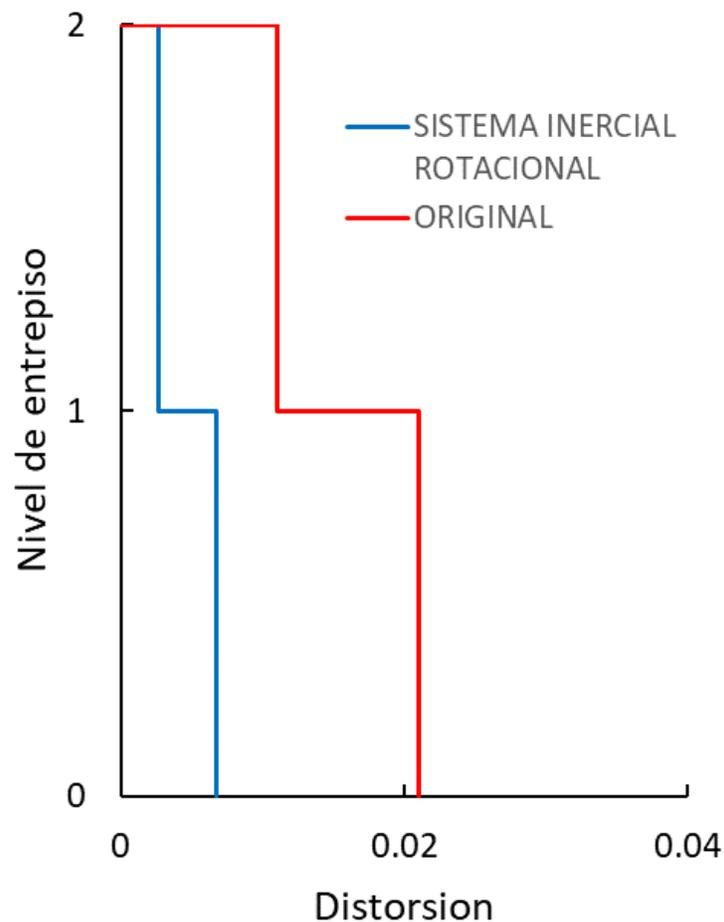


*Figura 9.13 distorsión de entrepiso estructura de 2GDL con sistema inercial rotacional de los registros escalados a una intensidad de 0.432 g en zona GR27.*

En la figura 9.14 se puede apreciar de mejor forma la comparación entre el promedio de los resultados obtenidos, en color azul se muestra el comportamiento

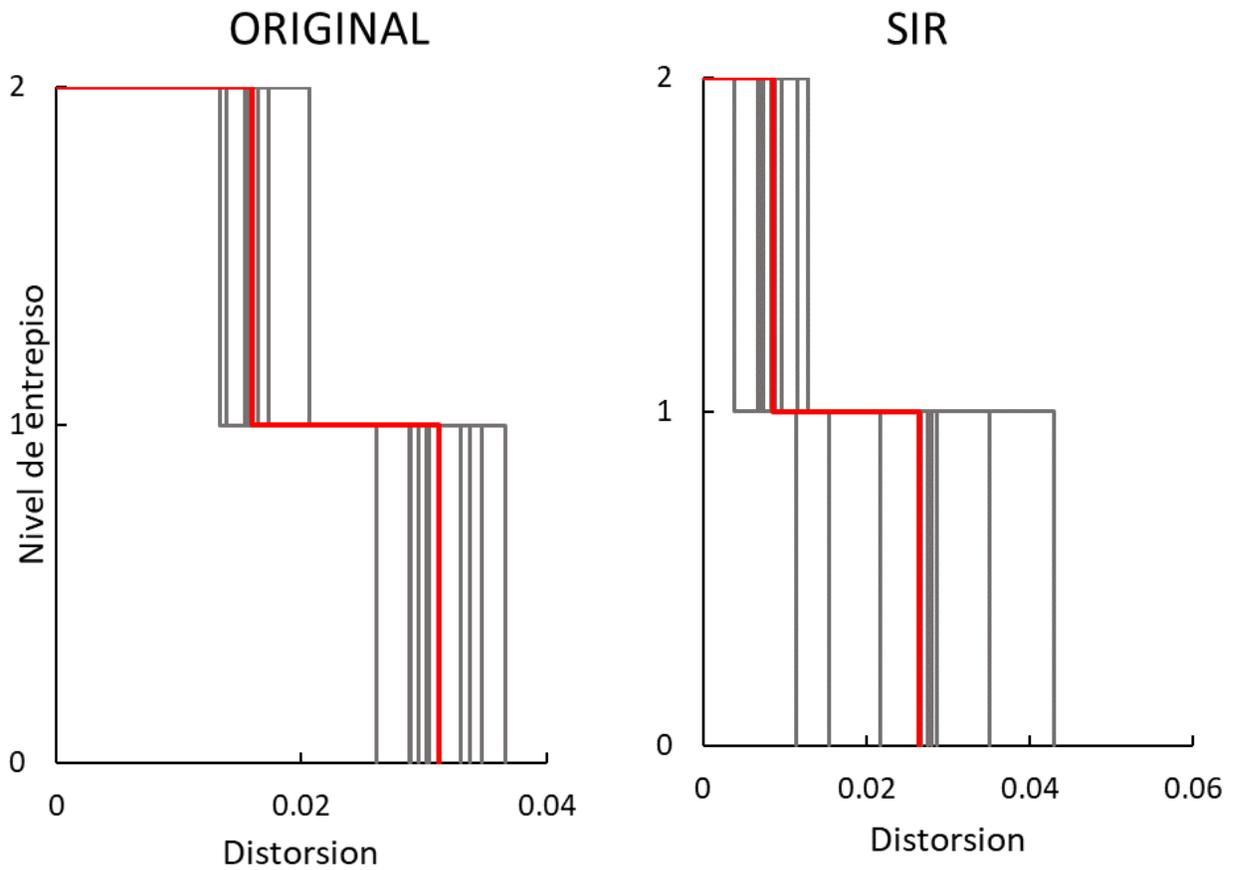
---

del sistema inercial rotacional y en color azul el comportamiento del sistema sin reforzar.



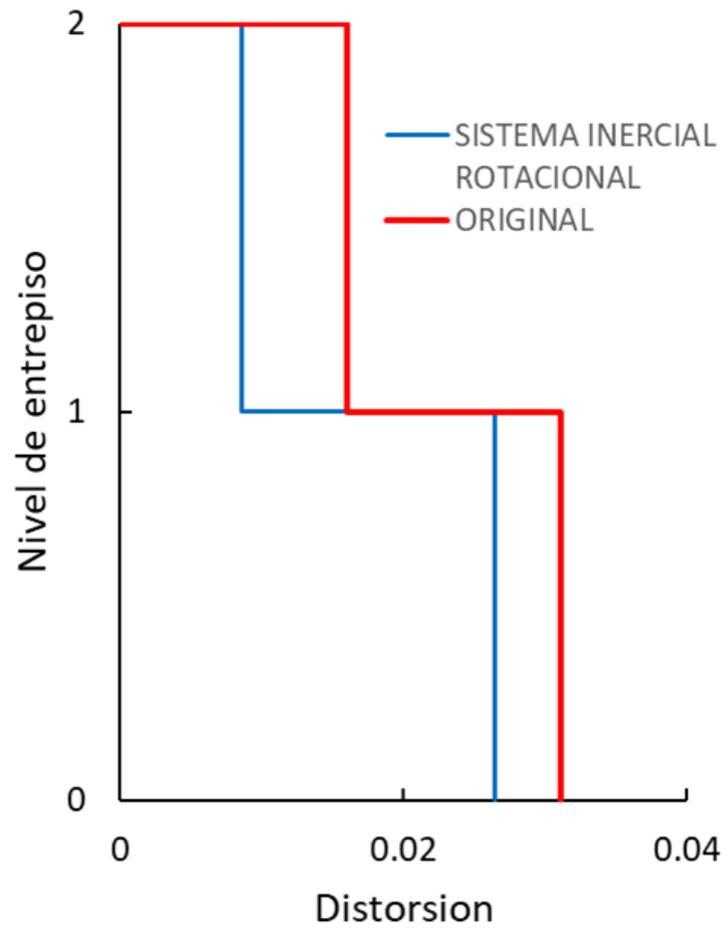
*Figura 9.14 promedio de las distorsiones de entrepiso estructura de 2GDL de los registros escalados a una intensidad de 0.432 g en zona GR27.*

En la figura 9.15 se muestran las distorsiones de entrepiso generadas por los registros de la zona CH84, en color negro se muestran cada resultado obtenido de cada registro y en color rojo se muestra el promedio obtenido, como se observa el sistema inercial rotacional en este sitio y para el modelo de 2GDL reduce los desplazamientos lo que conlleva a disminuir las distorsiones de entrepiso, la reducción en la distorsión de entrepiso es de aproximadamente 10% si se comparan los promedios obtenidos.



*Figura 9.15 distorsión de entrepiso estructura de 2GDL con sistema inercial rotacional de los registros escalados a una intensidad de 0.432 g en zona CH84.*

En la figura 9.16 se muestran los promedios obtenidos para los modelos de 2GDL en donde podemos observar que el modelo rehabilitado con un sistema inercial rotacional tiene un mejor desempeño global comparándolo con el obtenido por el modelo de 2GDL sin reforzar, en color azul se muestra el sistema inercial rotacional mientras que en color rojo el comportamiento del modelo sin reforzar.



*Figura 9.16 promedio de las distorsiones de entrepiso estructura de 2GDL de los registros escalados a una intensidad de 0.432 g en zona CH84.*