



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA
DE UN EDIFICIO AISLADO SOBRE
BLOQUES RÍGIDOS DE BALANCEO**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Christian Leonel Coronado Galvez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Miguel Ángel Jaimes Téllez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023



Jurado designado

Presidente: M. I. Agustín Demeneghi Colina

Secretario: M. I. Juan Luis Umaña Romero

Vocal: Dr. Miguel Ángel Jaimes Téllez

1er suplente: Dr. Gerardo Rodríguez Gutiérrez

2do suplente: Dr. Mauro Pompeyo Niño Lázaro

Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, Ciudad de México



Agradecimientos

A mis padres, María y Fermín, quienes siempre me han brindado su apoyo incondicional para cumplir mis objetivos personales y académicos. A mis hermanos y hermana quienes con cariño me han impulsado siempre en perseguir mis metas y objetivos. A mis amistades quienes recorrimos incontables anécdotas en nuestra formación.

Quiero expresar también mi más sincero agradecimiento al Dr. Miguel Á. Jaimes Téllez a quien le por su paciencia, por compartir sus conocimientos de manera profesional e invaluable, por su dedicación perseverancia y tolerancia.

Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme educación universitaria de calidad en la Facultad de Ingeniería, también al Instituto de Ingeniería por abrirme las puertas para la realización de esta tesis.



Reconocimientos

Esta investigación fue apoyada financieramente por el IN102021 - PAPIIT - UNAM - *Estudio de riesgo sísmico de rehabilitación de edificios existentes denominados de planta baja débil con un sistema inercial rotacional* y el apoyo adicional fue patrocinado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM a través del *Fondo de Investigación R528*.



ÍNDICE

Resumen	9
Abstract	9
INTRODUCCIÓN	10
Presentación de la problemática	12
Interés del estudio	13
Alcances y Limitaciones	16
Objetivo	16
I. MARCO TEÓRICO	17
1.1 Antecedentes generales	17
1.2 Consideraciones de los sistemas de 1 GDL	17
1.2.1 Sistema excluyendo ASO	18
1.2.2 Sistema incluyendo ASO	19
II. METODOLOGÍA	21
III. MODELO DINÁMICO DEL SISTEMAS DE 1GDL Y EDIFICIOS CON SISTEMAS ASO	22
3.1 Generalidades	22
3.2 Estructuración	22
3.3 Fundamentos de la estructuración	26
IV. EXCITACIÓN SÍSMICA DE SISTEMAS DE 1GDL Y EDIFICIOS - CON Y SIN SISTEMAS ASO	28
4.1 Generalidades	28
4.2 Excitación sísmica	28
V. PRESENTACIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS	31
5.1 Respuesta estructural de sistemas de 1GDL y edificios.	31
5.1.1 Historia tiempo desplazamiento relativo de un sistema de 1GDL y un edificio	32
5.1.2 Historia tiempo aceleración relativa de un sistema de 1GDL y un edificio	33
5.2 Respuesta estructural del edificio	35
5.2.1 Periodo de la Estructura	35
5.3 Respuesta estructural para sistemas 1GDL con sistemas ASO	36
5.3.1 Evaluación de parámetros dinámicos ASO	36
5.3.2 Respuesta historia-tiempo del edificio con y sin sistema ASO	41
5.3.3 Desplazamiento del edificio de 7 niveles	44
5.3.3.1 Historia tiempo del desplazamiento relativo por nivel	44
5.3.3.2 Historia tiempo del desplazamiento relativo del sistema	46
5.3.4 Aceleraciones de piso del edificio de 7 niveles	48
5.3.4.1 Historia de tiempo de la aceleración por nivel	48
5.3.4.2 Historia de tiempo de la aceleración relativa del edificio	50
5.3.5 Historia de desplazamientos de los bloques rígidos de balanceo	52
5.3.6 Respuesta máxima a lo largo de la altura del edificio	54
VI. CONCLUSIONES	56
Referencias	58
ANEXOS A	60

Índice de Figuras

FIGURA 1. MAPA DE SISMICIDAD ANUAL, 2022, SERVICIO SISMOLÓGICO NACIONAL (SSN), PUBLICADO EL 6 DE ENERO DEL 2023	12
FIGURA 2. TEMPLO DE APHAIA EN LA ISLA DE APHAIA, GRECIA. LAS COLUMNAS MONOLÍTICAS LIBRES SOPORTAN A LA VIGA RÍGIDA FORMANDO UN MARCO OSCILANTE	13
FIGURA 3. MONTAJE EXPERIMENTAL PARA PROBAR LAS PILAS DE PRECARGA PREFABRICADAS (PINOCHET ET AL., 2006).....	14
FIGURA 4. (A) MODELO DE UN EDIFICIO ALTO IMPLEMENTANDO EL SISTEMA DE CONTROL DE CORTANTE EQUIPADO CON SISTEMA ASO, (B) SISTEMA DE ANCLAJE DE LOS BLOQUES RÍGIDO CON EL SISTEMA DE ANCLAJE (ZHONG, 2022)	15
FIGURA 5. LA REPRESENTACIÓN DE UN SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD (1GDL) TRADICIONAL, SIN EL SISTEMA DE AISLAMIENTO SÍSMICO OSCILANTE (ASO)	18
FIGURA 6. LA REPRESENTACIÓN DE UN SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD (1GDL) CON LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO SÍSMICO OSCILANTE (ASO)	18
FIGURA 7. DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE 1GDL CON UN SISTEMA ASO.	22
FIGURA 8. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURACIÓN DEL EDIFICIO CON EL SISTEMA DE ASO, CON LA DESCRIPCIÓN GENERAL DEL BLOQUE.....	23
FIGURA 9. SISTEMA DE AISLAMIENTO SÍSMICOS OSCILANTE, VIGA RÍGIDA APOYADO SOBRE LAS COLUMNAS RÍGIDAS.....	26
FIGURA 10. REPRESENTACIÓN DEL BLOQUE OSCILANTE.....	26
FIGURA 11. COMPARATIVA DE LAS DIMENSIONES DE LOS BLOQUES CONSIDERADOS, A) PRIMER CASO, B) SEGUNDO CASO Y C) TERCER CASO.....	27
FIGURA 12. ACELEROGRAMAS \ddot{U}_g (g), DE REGISTROS CONSIDERADOS, CALE (EW), JAMI (EW), LANE (NS), SCRU (NS), NILT (NS), RABO (NS), HMTT (EW).....	29
FIGURA 13. ESPECTROS DE RESPUESTA DE ACELERACIÓN (SA) Y ESPECTROS DE RESPUESTA DE DESPLAZAMIENTO (SD) DE LOS REGISTROS CALE (EW), JAMI (EW), LANE (NS), SCRU (NS), NILT (NS), RABO (NS), HMTT (EW).	30
FIGURA 14. MODELOS DINÁMICOS DE 1GDL (IZQUIERDA) Y MGD (DERECHA).....	31
FIGURA 15. COMPARATIVA DE LOS SISTEMAS 1GDL Y UN EDIFICIO DEL DESPLAZAMIENTO RELATIVO, ESTACIONES A) CALE, B) JAMI, C) SCRU Y D) RABO, SISTEMA DE BASE RÍGIDA EN LA PRIMERA FILA DE ARRIBA A ABAJO, LOS SISTEMAS CON ASO, DEL PRIMER CASO AL TERCER CASO DESDE LA SEGUNDA FILA HASTA LA CUARTA FILA RESPECTIVAMENTE.	32
FIGURA 16. COMPARATIVA DE LOS SISTEMAS 1GDL Y UN EDIFICIO DE LA ACELERACIÓN RELATIVA, ESTACIONES A) CALE, B) JAMI, C) SCRU Y D) RABO, SISTEMA DE BASE RÍGIDA EN LA PRIMERA FILA DE ARRIBA A ABAJO, LOS SISTEMAS CON ASO, DEL PRIMER CASO AL TERCER CASO DESDE LA SEGUNDA FILA HASTA LA CUARTA FILA RESPECTIVAMENTE	34
FIGURA 17. ESPECTRO DE RESPUESTA DE UN SISTEMA DE 1GDL A) SCRU, ANALIZANDO LOS ESPECTRO DE RESPUESTA DE ACELERACIONES, SA (IZQUIERDA) Y LOS ESPECTRO DE RESPUESTA DE DESPLAZAMIENTO, SD (DERECHA) VARIANDO LOS PARÁMETROS DINÁMICOS, A CON RESPECTO DE R.	36
FIGURA 18. ESPECTRO DE RESPUESTA DE UN SISTEMA DE 1GDL, A) SCRU, Y B) RABO, ANALIZANDO LOS ESPECTRO DE RESPUESTA DE ACELERACIONES, SA (IZQUIERDA) Y LOS ESPECTRO DE RESPUESTA DE DESPLAZAMIENTO, SD (DERECHA) VARIANDO LOS PARÁMETROS DINÁMICOS, R CON RESPECTO A.	38
FIGURA 19. DISTORSIONES DE ENTREPISO DE LA BASE RÍGIDA (LÍNEA PUNTEADA NEGRA) Y BASE FLEXIBLE (LÍNEA SOLIDA AZUL), PRIMER CASO, $R = 0.76$, $\alpha = 14.03^\circ$, $b/h = 0.166$, $T = 0.971$ s, $N_c = 4$ $\eta = mt/mb = 15$, SOMETIDOS A SISMOS IMPORTANTES SITUADOS EN MÉXICO.....	41
FIGURA 20. DISTORSIONES DE ENTREPISO DE LA BASE RÍGIDA (LÍNEA PUNTEADA NEGRA) Y BASE FLEXIBLE (LÍNEA SOLIDA VERDE), SEGUNDO CASO $R = 1.0$, $\alpha = 7.125^\circ$, $b/h = 0.125$, $T = 0.995$ s, $N_c = 4$, $\eta = mt/mb = 15$, SOMETIDOS A SISMOS IMPORTANTES SITUADOS EN MÉXICO.....	42
FIGURA 21. DISTORSIONES DE ENTREPISO DE LA BASE RÍGIDA (LÍNEA PUNTEADA NEGRA) Y BASE FLEXIBLE (LÍNEA SOLIDA ROJA), TERCER CASO, $R = 2.02$, $\alpha = 7.125^\circ$, $b/h = 0.125$, $T = 0.994$ s, $N_c = 4$ $\eta = mt/mb = 15$, SOMETIDOS A SISMOS IMPORTANTES SITUADOS EN MÉXICO.....	42

FIGURA 22. DESPLAZAMIENTO RELATIVO DE CADA UNO DE LOS NIVELES, ESTACIONES a) CALE, b) JAMI, c) SCRUI, Y d)RABO SISTEMA DE BASE RIGIDA EN LA PRIMERA FILA DE ARRIBA A BAJO, LOS SISTEMAS CON ASO, DEL PRIMER CASO AL TERCER CASO DESDE LA SEGUNDA FILA HASTA LA CUARTA FILA RESPECTIVAMENTE..... 45

FIGURA 23. DESPLAZAMIENTO RELATIVO DEL EDIFICIO, ESTACIONES A) CALE, B) JAMI, C) SCRUI Y D)RABO, SISTEMA DE MGD L DE BASE RÍGIDA EN LA PRIMERA FILA DE ARRIBA A ABAJO, LOS SISTEMAS CON ASO, DEL PRIMER CASO AL TERCER CASO SE UBICAN DESDE LA SEGUNDA FILA HASTA LA CUARTA FILA RESPECTIVAMENTE..... 47

FIGURA 24. ACELERACIÓN RELATIVA DE LS NIVELES ESTACIONES A) CALE, B) JAMI, C) SCRUI, Y d)RABO, SISTEMA DE BASE RÍGIDA EN LA PRIMERA FILA DE ARRIBA A ABAJO, LOS SISTEMAS CON ASO, DEL PRIMER CASO AL TERCER CASO DESDE LA SEGUNDA FILA HASTA LA CUARTA FILA RESPECTIVAMENTE..... 49

FIGURA 25. ACELERACIÓN RELATIVA DEL EDIFICIO ESTACIONES A) CALE, B) JAMI, C) SCRUI Y d)RABO SISTEMA DE MGD L DE BASE RÍGIDA EN LA PRIMERA FILA DE ARRIBA A ABAJO, LOS SISTEMAS CON ASO, DEL PRIMER CASO AL TERCER CASO DESDE LA SEGUNDA FILA HASTA LA CUARTA FILA RESPECTIVAMENTE..... 51

FIGURA 26. REPRESENTACIÓN DE LOS PUNTOS ANALIZADOS EN LOS BLOQUES, *ubc* DESPLAZAMIENTOS DEL BLOQUE EN LA PARTE CENTRAL, *ubsup* DESPLAZAMIENTO DEL BLOQUE DE LA PARTE SUPERIOR Y *ubinf*DESPLAZAMIENTO DEL BLOQUE EN LA PARTE INFERIOR..... 52

FIGURA 27. DESPLAZAMIENTO DE LOS BLOQUES DE LAS ESTACIONES a) CALE, b) JAMI, c) SCRUI Y d)RABO, LOS SISTEMAS EQUIPADOS CON ASO, DEL PRIMER CASO AL TERCER CASO ORDENADOS DESDE FILA DE ARRIBA A ABAJO RESPECTIVAMENTE..... 53

FIGURA 28. RESPUESTA A LO LARGO DEL EDÍFICIO NORMALIZADO, DE LAS ESTACIONES A) CALE, B) JAMI, C) SCRUI Y d)RABO, LA MEDIANA DE LA RESPUESTA PICO DE DESPLAZAMIENTO (IZQUIERDA) Y DE LA RESPUESTA PICO DE LA MEDIANA DE LA ACELERACIÓN DEL PISO NORMALIZADA (DERECHA) A LO LARGO DE LA ALTURA RELATIVA (Z/H) DEL EDIFICIO..... 55

Índice de tablas

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LOS BLOQUES..... 27

TABLA 2. ACELEROGRAMAS CONSIDERADOS 28

TABLA 3. PERIODO DE C/U DE LOS CASOS..... 35

TABLA 4. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DEL U_r (DESPLAZAMIENTO RELATIVO), CON RESPECTO A LAS ESTACIONES SCRUI, CALE, JAMI EN COMPARACIÓN DEL SISTEMA DE EMPOTRAMIENTO CONVENCIONAL 46

TABLA 5. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DEL U_r (*aceleración relativa*), CON RESPECTO A LAS ESTACIONES SCRUI, CALE, JAMI EN COMPARACIÓN DEL SISTEMA DE EMPOTRAMIENTO CONVENCIONAL..... 50

Nomenclatura

\ddot{u}_g	Aceleración del suelo
\ddot{u}_t	Aceleración de la estructura
\dot{u}_t	Velocidad de la estructura
u_t	Desplazamiento de la estructura
u_{tb}	Desplazamiento relativo de la estructura
\ddot{u}_{tb}	Aceleración relativa de la estructura
m	Masa
c	Amortiguamiento
ξ	Relación de amortiguamiento viscoso
k	Rigidez
ω	Frecuencia
b	Semidistancia de la base
h	Semidistancia de la altura
m_b	Masa de la viga rígida
m_c	Masa de cada uno de los bloques
I	Momento de inercia de los bloques
$\ddot{\theta}$	Aceleración angular de los bloques
$\dot{\theta}$	Velocidad angular de los bloques
θ	Desplazamiento angular de los bloques
η	Relación de masas de la estructura primaria
γ	Relación de masas del sistema de aislamiento sísmico oscilante
r	Energía cinética disipada
p	Parámetro de frecuencia
T_t	Periodo fundamental de la estructura
T_s	Periodo fundamental del suelo.

Resumen

En esta tesis se estudia el sistema de Aislamiento Sísmico Oscilante (ASO) como un sistema de protección contra movimientos sísmicos del suelo. Las estructuras soportadas sobre el sistema ASO son consideradas capaces de reducir las demandas laterales y el daño del sistema estructural principal a través del levantamiento y balanceo de los bloques rígidos. El levantamiento y balanceo durante la actividad sísmica es proporcionado por las columnas libres independientes. El sistema se modela como un oscilador de un grado de libertad (1GDL) soportado sobre un sistema ASO es sujeto a movimientos sísmicos y esta respuesta es comparada con un sistema análogo sin ASO. La comparación se extiende a un marco de concreto reforzado (CR) con comportamiento lineal; se consideran marcos de CR de 7 niveles con tres crujiás. Se encontró que el sistema ASO reduce significativamente las demandas de aceleración y desplazamientos en los marcos estructurales principales. También se encontró que los sistemas ASO son más eficientes en la reducción de la aceleración y desplazamiento lateral de la estructura principal cuando la relación de aspecto, b/h y el tamaño, R , de las columnas independientes disminuyen, aunque la estabilidad de balanceo del sistema ASO se reduce por lo que el ingeniero debe revisar esta condición de posible inestabilidad en los bloques rígidos de balanceo.

Abstract

In this thesis studies a Rocking Seismic Isolation (RSI) system as a seismic protection measure against ground-motions generated by earthquakes. Structures supported over RSIs are considered capable of reducing the lateral demands and damage of the main structural system through lifting and rocking. This lifting and rocking during earthquake activity is provided by free-standing columns. The system is modeled as an oscillator of a single-degree-of-freedom (SDOF) supported on a RSI system is subjected to seismic motions and its response is compared to an analog system without RSI. The comparison is then extended to a reinforced concrete (RC) linear frame with and without RSI; three-bay frames of RC with 7 storey are considered. It is found that the RSI systems significantly reduce acceleration and displacement demands in the main structural frames. It is also found that the RSI system is more effective in reducing lateral accelerations and displacements of the main structure when the aspect ratio, b/h , and size, R , of the free-standing columns decrease, although the rocking stability of the RSI system is also reduced.

INTRODUCCIÓN

Los recientes eventos sísmicos han generado el creciente interés en reducir la vulnerabilidad de los edificios frente a un alto peligro sísmico. Se busca implementar nuevas formas de mitigar los efectos sísmicos transmitidos a la estructura principal. Por lo anterior, en años recientes se ha generado la implementación de los bloques rígidos de balanceo como un sistema de aislación en cual se plantea como una alternativa con el fin de reducir los efectos de carga de las demandas laterales y el daño que se pueda producir en a la estructura principal. Como ejemplo recientemente ^[1] *Zhong y Christopoulos (2022)* han implementado un sistema de aislación basado en bloques rígidos de balanceo para edificios altos y mejorar la resiliencia de estos.

Numerosos académicos e investigadores han dedicado parte de su investigación para demostrar la factibilidad de este tipo de sistema de aisladores de balanceo. Por ejemplo, desde hace poco menos de un siglo se ha estudiado el comportamiento de los bloques de balanceo, también llamados columnas libres oscilantes, columna rígida independiente, etc.; ^[2] *Milne (1885)* y ^[3] *Houser (1963)*, quienes propusieron los criterios de estimación basados en la geometría de los bloques rígidos. Ellos determinaron que: (1) el mayor de dos bloques geoméricamente similares puede sobrevivir a la excitación y se derribará el bloque más pequeño, y (2) para bloques sujetos a dos pulsos de la misma amplitud de aceleración, el más largo en duración será el más cercano a la volcadura. Siguiendo con el artículo de Houser, numerosos estudios se han presentado en los que se abordan la complejidad dinámica de una de las estructuras más simple hechas por el hombre - columna rígida independiente.

Así mismo, en la continuación de los estudios se han publicado un gran número de literatura importante referida a la investigación del comportamiento dinámico complejo de un bloque libremente apoyado, por ejemplo, ^[4] *Yim et al. (1980)* condujeron numéricamente estudios adoptando modelo probabilístico, ^[5] *Aslam et al. (1980)* confirmó con estudios experimentales la respuesta de balanceo de los bloques rígidos con la sensibilidad de los parámetros del sistema, ^[6] *Ishiyama (1983)*, ^[7] *Psycharus y Jennings (1983)*, examinaron el levantamiento de los bloques apoyados sobre base violetica, ^[8] *Koh et al. (1986)*, ^[9] *Shenton (1996)*, ^[10, 11, y 12] *Makris y Roussos (1998)*, ^[12] *Zhang y Makris (2001)*, de esta forma existe una gran cantidad de información de la descripción del movimiento de una columna rígida independiente.

Sin embargo, el primero en investigar a fondo al respecto, ^[14] *Bachmann et al. (2017)*, son quienes estudiaron la respuesta con piso inferior oscilante en su base que contienen únicamente columnas independientes con el comportamiento puro de la oscilación de los bloques, así mismo, lo definió como un sistema de aislamiento sísmico oscilante (ASO), de forma que el sistema se ha empleado y comprobado para mejorar efectivamente el comportamiento sísmico bajo acciones de cargas sísmicas. El sistema también ha sido denominado como “aislamiento cinemático” o “cojinetes cinemáticos” ^[15] *Cherepinskiy 2004*, ^[16] *Smirnov et al 2004*, ^[17] *Uzdin et al. 2009*, ^[18] *Eisenberg y Smirnov 2012*). Debido a la inercia rotacional de las columnas rígidas independientes de estos sistemas en función del

cuadrado de su tamaño, R , como lo muestra ^[3] *Houser* (1963) y ^[19 y 20] *Markis* (2014 a. b), si las columnas rígidas son independientes del sistema ASO son los suficientemente grandes, limitan los efectos de reducir las cargas sísmicas, cuando ocurre el sismo, en el cual presenta una de las principales ventajas desde el punto de vista del diseño.

La investigación al respecto de ^[14] *Bachmann et al.* 2017, es el primer estudio a fondo la respuesta sísmica de estructuras con piso inferior oscilante, como un oscilador elástico de un solo grado de libertad (1GDL). También se han desarrollado experimentos, con el fin de validar resultados del modelo analítico (^[21] *Bachmann et al.* 2016, ^[22, 23] *Vassiliou et al.* 2021 a, b). Los estudios analíticos se enfocan principalmente en investigar los parámetros de estabilidad para el movimiento de tipo pulso, pero también para movimiento sísmicos reales, informando que el modelo de impacto para un piso oscilante en la parte inferior de un edificio con varios pisos tiene un efecto pequeño en la respuesta oscilante de la estructura principal bajo acciones de carga sísmica (^[24] *Kavvaddias et al.* 2021). Del mismo modo, se encuentra en la literatura una investigación de los parámetros que afectan las demandas sísmicas de los edificios, cuando se utiliza un piso oscilante en la base como medida de aislamiento (^[25] *Bantilas et al.* 2021 a.), se encontró que la relación de esbeltez de la base oscilante juega un papel importante en la demanda sísmicas de la estructura del marco principal en términos de aceleración espectral. Incluso, si se extiende la base de las columnas oscilantes independientes con bordes curvados, se mejora la estabilidad oscilante (^[26] *Bantilas et al.* 2021b).

La evaluación de la respuesta sísmica de un sistema estructural consiste en la clasificación de su capacidad de contener y disipar la demanda sísmica ante las cargas sísmicas laterales, de forma que se permita la identificación y el diagnóstico de la situación que comprometan la funcionalidad, generando una confiabilidad ante el diseño de estos elementos. En este estudio, se plantea el caso específico de un edificio de marcos de concreto de 7 niveles. Con ello, se plantea estimar la capacidad que tiene el sistema aislado con bloques rígidos de balanceo y la participación de los bloques. Todo ello se puede modelar simplificando el análisis de la respuesta sísmica, por lo que implicaría la comparativa dentro de los parámetros de un edificio tradicional, conexión directa al sistema de la superestructura y un edificio con aisladores por bloques rígidos de balanceo simétricos, aportando con una de sus mejores ventajas, con el paso del tiempo este tipo de sistemas no pierde la capacidad del bloque para balancearse.

Conforme a ^[15] *Cherepinskiy* (2004), ^[14] *Bachmann et al.* (2017) y ^[25,26] *Bantilas* (2021 a, b), mencionan las ventajas más relevantes del uso del sistema ASO para edificio son: (1) la disminución de las demandas sísmicas de la estructura principal (incluso del orden de cuatro veces, o al menos dos veces), (2) una disminución económica de diez veces para este tipo de estructuras sísmicamente aisladas en contraste con estructuras con sistemas de aislamiento convencionales, (3) se simplifica el requisito de mantenimiento especial y (4) los efectos de carga en un marco equipado con un sistema ASO puede reducirse considerablemente en comparación con los de una estructura sin sistema ASO.

Presentación de la problemática

Dentro de la República Mexicana el tema de la sismicidad toma mucha relevancia. Gran parte del territorio se ubica dentro de una zona de constante movimiento sísmico. Considerando el mapa de sismicidad anual publicado por el ^[27] Servicio Sismológico Nacional (SSN) de la UNAM (2022), en la Figura 1 se presenta el reporte de la actividad sísmica del 2022 con 2,628 eventos sísmicos con magnitud a partir de 4 – 7.5, de los cuales 2,424 sismos se presentaron con magnitudes de 4 – 4.9, 29 de orden de 5 – 5.9 y 6 de 6 – 7.5. Las estadísticas de los sismos reportados por el SSN, dada la gran cantidad de sismos, representa la necesidad de buscar diferentes sistemas como el que se presenta en este estudio, un sistema de aislamiento sobre bloques rígidos de balanceo que presenten la innovación necesaria para representar los enfoques sociales, ambientales y económicos.

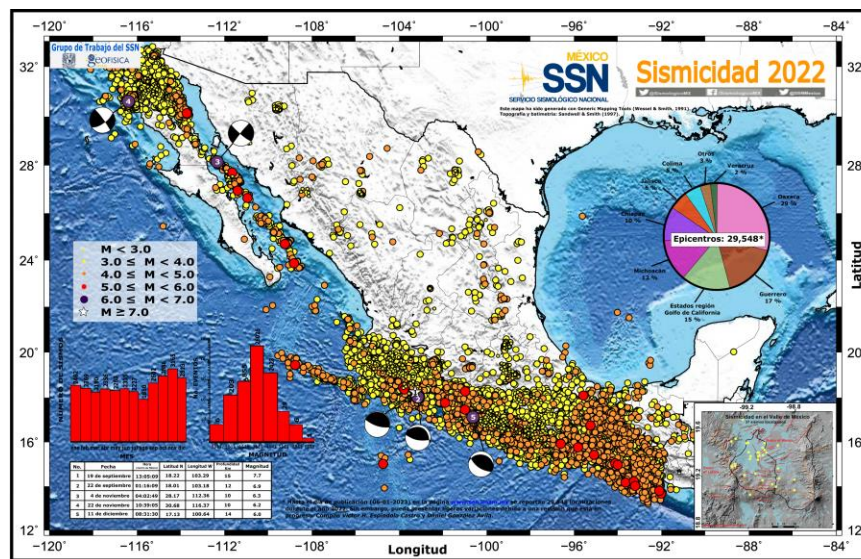


Figura 1. Mapa de sismicidad anual, 2022, Servicio Sismológico Nacional (SSN), publicado el 6 de enero del 2023

La constante actividad sísmica genera acumulaciones de problemáticas dentro de la nación en aspectos de la infraestructura civil debido al alto costo de la implementación de sistemas de aislamiento sísmico convencionales pero, al mismo tiempo, la búsqueda de métodos innovadores que logren favorecer la mitigación ante acciones sísmicas en formas más económicas, podrían favorecer a la motivación de implementación de estas acciones, el desarrollo de los proyectos innovadores tiende a incentivar en la infraestructura en México.

En la estructuración presentada en el trabajo se planteará una solución con el objetivo de mitigar las fuerzas internas que afectan a los elementos estructurales, desarrollando una evaluación de la respuesta sísmica con implementación de un sistema innovador dentro del panorama del aislamiento sísmico, como lo son los bloques rígidos de balanceo. La estructuración con sistema ASO se enfoca en desarrollar una solución mucho más económica comparada con sistemas de aislamientos sísmica tradicional, en el cual el sistema ASO han mostrado su eficacia ante grandes eventos sísmicos.

Interés del estudio

El interés de este estudio parte de la motivación de explicar cómo es que las estructuras, con sistemas similares al aquí presentado en la tesis, han prevalecido desde hace más de 2,500 años. Por ejemplo, analizando la notable estabilidad sísmica, como es el Partenón en Aphaia en Aegina cerca de Atenas, (Figura 2), de las 32 columnas monolíticas, 29 se han preservado durante 2.5 milenios, se sabe que son mecanismo precisamente articulados. De esta manera se tiene que: (a) dada sus rigideces negativas no están sujetas a ninguna resonancia, (b) el recentrado (eliminación del desplazamiento permanente) se logra incondicionalmente con la gravedad; y (c) los marcos oscilantes, si bien esbeltos y emblemáticos, son de gran tamaño en la medida en que su inercia rotacional, cuando se moviliza, es suficiente para resistir amenazas sísmicas de 2500 años, ^[11] *Makris (2014a)*,



Figura 2. Templo de Aphaia en la isla de Aphaia, Grecia. Las columnas monolíticas libres soportan a la viga rígida formando un marco oscilante

Por lo que se refiere a los sismos producen movimientos del suelo horizontales y verticales que sacuden la base de un sistema. Debido a que el movimiento al resto de la estructura es resistido por la masa del sistema (inercia), el sacudimiento del suelo crea deformaciones en la estructura y estas deformaciones producen fuerzas internas. ^[28] *Mc Cormac (2011)*, estas acciones sísmicas son las que se deben de mitigar con la implementación de sistemas de aislamientos con el fin de evitar el daño severo de las construcciones incluyendo el colapso de edificaciones, con el desacoplamiento del impacto del movimiento sísmico de la estructura con el sistema de aislación., disminuyendo la violencia del fenómeno sísmico y con ello la seguridad de la construcción, se presentaría en las óptimas condiciones.

Existen proyectos que han empleado los principios del sistema ASO que se estudia en esta tesis, refiriéndose a información reciente, tal como la construcción desarrollada ante la necesidad de desarrollar viviendas con sistema de aislamiento sísmico con presupuesto limitado. En este proyecto de desarrollar viviendas con sistema de aislamiento sísmico con

presupuesto limitado, dentro del proyecto se tenía como objetivo incluir el uso de tecnología antisísmica, en proyecto casa – habitación donde su costo sería cercano a \$9000 US por vivienda, supervisado por la Pontificia Universidad Católica de Chile y apoyada por la Universidad de Harvard, el principio del proyecto son las pilas de precarga prefabricadas (PPP), Figura 3) empleando una base de rodamiento con distintas curvaturas, actuando con el mismo principio de aislamientos sísmico oscilante pero implicando modificaciones en los parámetros dinámicos y en la ecuaciones de respuesta estructural, este proyecto se desarrolló por ^[29] *Pinochet et al.* (2006).

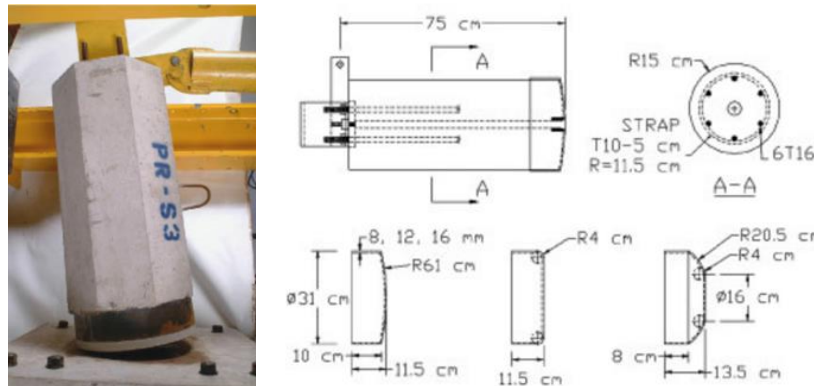


Figura 3. Montaje experimental para probar las pilas de precarga prefabricadas (*Pinochet et al.*, 2006).

Por otra parte, el gran crecimiento urbano se ha emparejado con la significativa demanda de la construcción de las edificaciones altas alrededor del mundo, pero también plantea desafíos para el desarrollo de estos edificios de manera sostenible y resistente, especialmente en regiones propensas a terremotos que tienen una alta densidad poblacional, un proyecto de la Universidad de Toronto, Canadá, presenta una estructura a partir de una edificación de gran altura implementando los principios de sistema ASO, con fines de reducir los efectos de cortante empleando y analizando el desempeño de dicho sistema, no solo involucrando la protección de la vida durante un sismo severo, sino también la reducción del daño de la estructura y sus contenidos. De esta forma, los requerimientos de diseño que se presentan en del proyecto es la combinación de ambos objetivos: protección a la vida y reducción del daño. La aislación sísmica tiene como objetivo limitar el efecto negativo de la excitación sísmica, introduciendo elementos específicos en la base de las estructuras tal que puedan disipar la acción del sismo y, al mismo tiempo, soportar el peso de las estructuras.

Dentro del principio del ASO, se considera que este no disipa dicha energía, lo que se presenta es el desacople de dicha fuerza, pero con el mismo principio de una aislación que ayuda a mitigar los efectos como la reducción de los efectos, cortantes y distorsiones, mitigando, los daños, y disminuyendo las aceleraciones del sistema sean bajas. Además, el sistema adquiere un mecanismo de restauración de la posición original del sistema mediante la fuerza de inercia (recentrado). De forma general se tiene otras cualidades de un sistema de aislamiento, tiende a flexibilizar la base, de esta forma se genera un alargamiento del periodo de la estructura, con el objetivo de apartar al sistema de la máxima aceleración. Así mismo,

se presenta una suficiente capacidad de amortiguamiento para reducir el desplazamiento concentrados en el primer nivel, ^[1] Zhong (2022). En la Figura 4(A), se representan las características generales de un edificio de gran altura con la implementación del principio del sistema de aislamiento sísmico oscilante con la incorporación de elementos como los contraventeos, apoyados sobre la base oscilante incorporada al núcleo del edificio, de la misma forma se describen en la Figura 4(B), las características del sistema de anclaje de los bloques rígidos con sus respectivos sistemas de montajes de conexión oscilante con la región de contacto de los bloques.

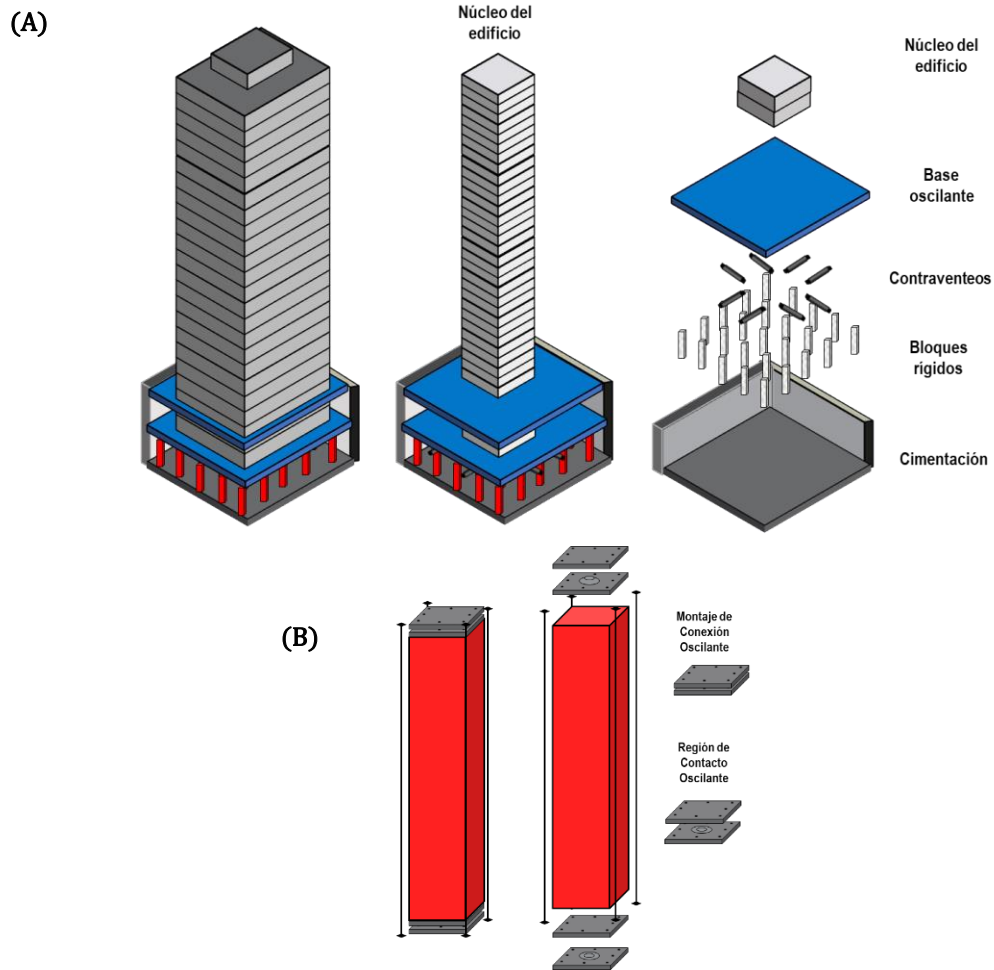


Figura 4. (A) Modelo de un edificio alto implementando el sistema de control de cortante equipado con sistema ASO, (B) Sistema de anclaje de los bloques rígido con el sistema de anclaje (Zhong, 2022)



Alcances y Limitaciones

Los alcances como las limitaciones son las siguientes: se hará uso de concreto reforzado en el sistema estructural, idealizando el comportamiento lineal del material, debido a que se considerará solamente la evaluación de la respuesta del comportamiento simple del sistema ASO. Así mismo, se tomarán en cuenta únicamente registros dentro de la República Mexicana. Las propiedades geométricas son utilizadas para el análisis del comportamiento del sistema, no se determinará características mecánicas, ni propiedades de los materiales de los bloques.

Objetivo

El objetivo de la presente tesis es evaluar la respuesta sísmica de un edificio aislado sobre bloques rígidos simétricos de balanceo sujetos a distintos movimientos sísmicos. Se estudian diferentes propiedades geométricas de estos bloques rígidos de balanceo, determinando la viabilidad de la implementación como un sistema estructural sismorresistente. Finalmente se determinan los parámetros dinámicos del sistema de aislamientos oscilante (ASO) que más influyen para contar con una mejor respuesta del sistema de aislación sobre bloques rígidos.

I. MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes generales

Los aisladores sísmicos de base para edificios sismorresistentes son una alternativa a los sistemas tradicionales para tener un mejor control de la deformación lateral y daño sísmico en estructuras civiles, otorgando así un mayor nivel de seguridad a los componentes estructurales, y no estructurales contenidos, mejorando a la operatividad de estas.

Para llevar a cabo la evaluación sísmica de las estructuras se pueden considerar idealizaciones sencillas para las simplificaciones de los cálculos, de esta manera podremos considerar la idealización de un sistema de un grado de libertad (1GDL) o, en su caso múltiples grados de libertad (MGDL), que varían su evaluación una con respecto a la otra. Para 1 GDL se tiene la expresión de una ecuación diferencial de segundo grado, (ec. 1), partiendo de la Figura 5, que nos representa la ecuación de la respuesta de una estructura.

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

Partiendo de cada una de las componentes de la ecuación, $m\ddot{u}(t)$ que nos representa la fuerza de inercia, implicando el movimiento de la masa debida a la aceleración total que percibe. Continuando con las componentes $c\dot{u}(t)$, considerado como la fuerza de amortiguamiento, enfocándose a restablecer el equilibrio de la vibración de la estructura, partiendo del porcentaje de amortiguamiento crítico, $\xi = c/2m\omega_n$, simplificando la ecuación. Por último, la componente $ku(t)$, que nos representa a la fuerza debida a la rigidez lateral por el desplazamiento del sistema con respecto al suelo, la frecuencia del sistema se define como $\omega_n = \sqrt{k/m}$, por lo que toda la ecuación tiene un común divisor, la masa, aun simplificando más el sistema de análisis, como se muestra en la expresión siguiente (ec. 1.2).

$$\ddot{u}(t) + 2\xi\omega_n\dot{u}(t) + \omega_n^2u(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (1.2)$$

1.2 Consideraciones de los sistemas de 1 GDL

La estructura empleada es la de un marco de una crujía, la cual se idealiza como un sistema de 1GDL, empleando dos tipos de marcos, el primero es aquel se remite a las condiciones de cotidianas para representar una estructura convencional, sin el sistema de ASO, (Figura 5) y por otra parte tenemos el sistema que incluye el ASO (Figura 6).

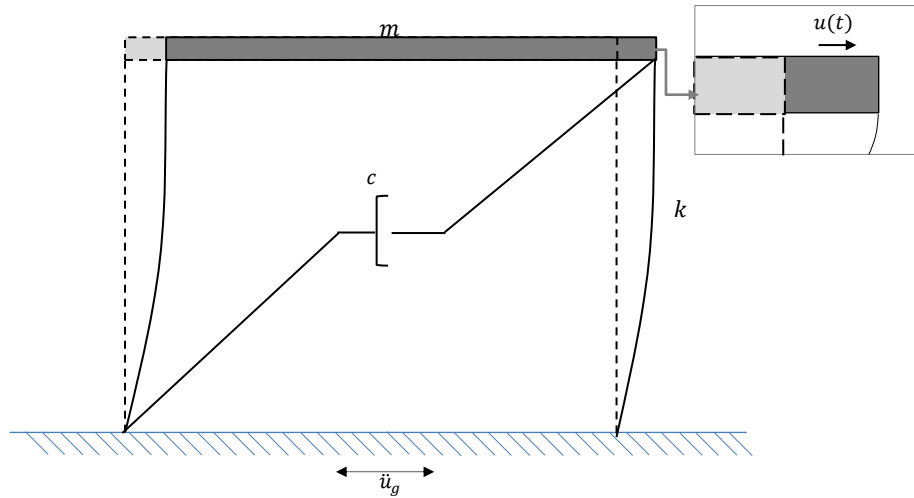


Figura 5. La representación de un sistema de un grado de libertad (1GDL) tradicional, sin el sistema de aislamiento sísmico oscilante (ASO)

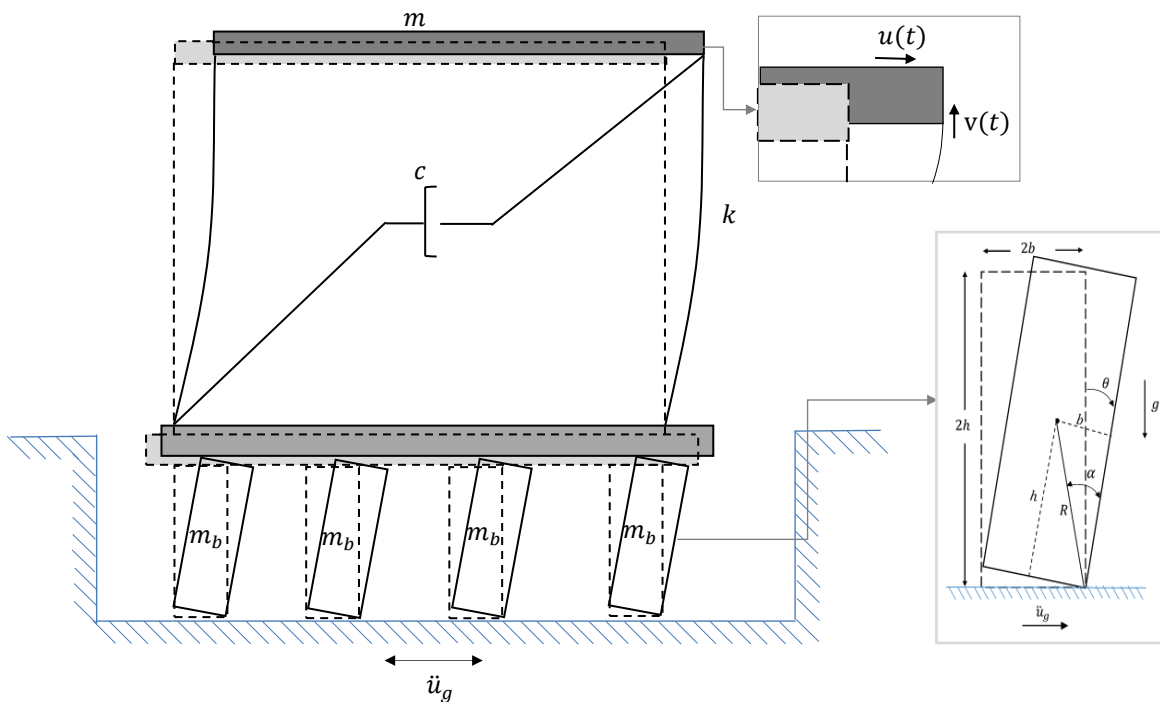


Figura 6. La representación de un sistema de un grado de libertad (1GDL) con la implementación del sistema de aislamiento sísmico oscilante (ASO)

1.2.1 Sistema excluyendo ASO

De acuerdo con la idealización del sistema 1 GDL, y omitiendo el sistema ASO, tenemos un modelo como se muestra en la Figura 5, cuya respuesta ante una excitación, puede obtenerse por la ec. 1.2.

1.2.2 Sistema incluyendo ASO

Cuando la respuesta de 1GDL proveniente de una modelación incluyendo el ASO, se determina una ecuación dada por la reformulación de la respuesta estructural, de acuerdo con ^[14]Bachman (et al. 2017).

$$\ddot{u}_t = -\ddot{u}_g - 2\xi_t \omega_t (\dot{u}_t - 2R\dot{\theta} \cos A) - \omega_t^2 (u_t - 2R(\sin B - \sin A)) \quad (\text{ec. 2.1})$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} = \frac{1}{R(1+\lambda+4\gamma+4\gamma\eta \sin^2 A)} [& 2R\gamma\eta \dot{\theta}^2 \sin(2A) - g(2\gamma + 2\gamma\eta + 1) \sin A \\ & - \ddot{u}_g (2\gamma + 1) \cos A \\ & + 2\gamma\eta \omega_s \cos A (\omega_s (u_t - 2R(\sin B - \sin A)) \\ & + 2\xi_s (\dot{u}_t - 2R\dot{\theta} \cos A))] \end{aligned} \quad (\text{ec. 2.1})$$

En el caso de la aceleración del sistema \ddot{u}_t pero antes del balanceo, \ddot{u}_g se toma como la aceleración del suelo definida después, en el caso de la frecuencia esta dado $\omega_t = \sqrt{k_t/m_t}$, donde k es la rigidez del sistema principal, y m es la masa, además de la relación del amortiguamiento viscoso que se define como, $\xi_t = c_t/2m_t\omega_t$; donde el termino R es una propiedad geométrica del bloque, representándonos la distancia del centroide a una punta del bloque, generando una semi diagonal, donde $A = \alpha \cdot \text{sign}(\theta) - \theta$ y $B = \alpha \cdot \text{sign}(\theta)$, donde $\alpha = \tan^{-1}(b/h)$, de esta manera tenemos que b/h es la relación de esbeltez, pero las distancias definidas como b y h , son semi distancias de la base y el ancho respectivamente.

El termino signo (\cdot), se le conoce como la función de signo, se determina si es positivo o negativo, a través del balanceo si encuentra derecha o izquierda de la esquina de O_2 o O_1 , respectivamente. En contraste de la (ec. 1.1) y (ec. 2.1), se toma en consideración la aceleración angular de los bloques, $\ddot{\theta}$, y respectivamente $\dot{\theta}$ y θ , la velocidad angular y la rotación del sistema ASO, los parámetros λ y γ , se definieron como $I_c/m_c R^2 = 1/3$, y m_b/Nm_c , respectivamente, en el cual m_b es la masa de sistema de base de desplante, que está por encima de los bloques, transmitiendo las cargas de la superestructura hacia los bloques, y la m_c es la masa de los bloques, donde N , es el número de bloques; finalmente tenemos la relación de entre la masa de la superestructura m_t y la masa de la base de desplante m_b , Figura 6, teniendo $\eta = \frac{m_t}{m_b}$.

Para cada uno de los bloques, el balanceo sobre la base rígida ocurre con el contacto con los puntos O_2 y O_1 de forma alterna, Figura 10; dicho impacto con el contacto de los puntos disipa la energía cinética generando la relación $r = \dot{\theta}_{despues}^2 / \dot{\theta}_{antes}^2$; antes del impacto de la velocidad angular es denominado como $\dot{\theta}_{antes}$, e inmediatamente después del impacto se presenta $\dot{\theta}_{despues}$. La velocidad inmediata después del impacto del sistema se determina como $u_{t\ despues}$ (ec. 2.3) y r (ec. 2.4) se pueden determinar a partir de las ecuaciones dadas en ^[14]Bachmann et al. (2017), basada en el principio de conservación angular del momentum y se expresa como:

$$u_{t_{after}} = \dot{u}_{t_{antes}} - 2R\cos\alpha(1 - \sqrt{r})\dot{\theta}_{before} \quad (\text{ec. 2.3})$$

$$r = \frac{\dot{\theta}_{despues}^2}{\dot{\theta}_{antes}^2} = \left[1 - 2\sin^2 \alpha \frac{1+4\gamma(1+\eta)}{1+\lambda+4\gamma(1+\eta)} \right]^2 \quad (\text{ec. 2.4})$$

La parámetros de frecuencia del ASO, p , es usado para observar la estabilidad del sistema de balanceo, se formula de siguiente manera, (ec 2.5)

$$p = \sqrt{\frac{1+2\gamma(1+\eta)}{1+\frac{4\gamma(1+\eta)}{\lambda}}} \sqrt{\frac{m_c g R}{I_c}} \quad (\text{ec 2.5})$$

El *incremento* de la relación ω_s/p implica un sistema más estable con ASO ([25] Bantilas et. al. 2021 a); ω_s se le denomina la frecuencia del sistema excitación sísmica.

Los desplazamientos relativos y las aceleraciones del sistema primario de le estructura, u_{tb} (ec. 2.6) y \ddot{u}_{tb} (ec. 2.7), con el respecto a la base de desplante rígida, (Figura 6) que se obtiene a partir de las expresiones desarrolladas por [14] Bachman et al. (2017) y [25] Bantilas et. al. (2021a.),

$$u_{tb} = u_t - u_b = u_t + 2R(\sin B - \sin A) \quad (\text{ec. 2.6})$$

$$\ddot{u}_{tb} = \ddot{u}_t - \ddot{u}_b = \ddot{u}_t + 2R(\ddot{\theta}\sin B - \dot{\theta}^2\sin A) \quad (\text{ec. 2.7})$$

El desplazamiento horizontal y la aceleración de la base desplante rígida, se les denomina como u_b y \ddot{u}_b , respectivamente. Los máximos valores $\max[u_{tb}]$ y $\max[\ddot{u}_{tb}]$ se determina como la respuesta máxima de nuestra estructura primaria con respecto a la base de desplante rígida.

Solo como comentario acerca de las ecuaciones que gobiernan esta respuesta, se nota que el sistema numérico resuelto para este formato ha sido desarrollado con el método Runge – Kutta de cuarto orden como lo da [29] Butcher (2016). El desarrollo de los pasos de integración se denomina como un Δt , es igual a 0.0001 s para integrar de forma completa la señal que considera la banda estrecha de los movimientos de la tierra.

II. METODOLOGÍA

Se hará uso de la bibliografía existente, relacionado con el tema de aislamiento sísmico oscilante, analizando las variables que involucran nuestro caso en particular, se presentará la idealización de sistemas 1GDL y MGD, considerando los bloques rígidos como el aislamiento sísmico oscilante (ASO) y otro excluyendo. Se revisará las ecuaciones de respuesta de la estructura para definir la continuación las bases teóricas, realizando la modelación de dichos sistemas con su respectiva respuesta, generando la evaluación de cada uno de los casos ante diferentes excitaciones sísmicas de forma realizar una comparativa entre las diferentes propiedades geométricas determinado las propiedades dinámicas influyentes en el comportamiento.

Se iniciará la presentación descriptiva de los modelos dinámicos del sistema de 1GDL y MGD, en los cuales se adoptarán los aspectos teóricos para la modelación de bloques simétricos, para encontrar una calibración del modelo analítico con lo numérico, mediante la comparativa de los sistemas 1GDL y MGD, esta evaluación se hará con respecto a los desplazamientos y aceleraciones relativas de los sistemas con el objetivo de obtener un modelo calibrado implementación del sistema ASO. Se utilizará un software en particular, en SAP2000 V.22, que nos facilitará el análisis de la respuesta, considerando acelerogramas importantes dentro de la República Mexicana.

Posteriormente, se presentarán los estudios analíticos considerando principalmente los parámetros de estabilidad de los bloques para movimientos sísmicos reales, empleando modelos de 1GDL, con las condiciones de sistema ASO y excluyéndolo, como lo mencionado en el marco teórico. Así mismo, se determinará los espectros de respuesta para poder analizar las condiciones que nos muestran los parámetros de estabilidad, de esta forma se comparan la respuesta de 1GDL tanto aceleraciones y desplazamiento, entre sistemas con y sin ASO de las excitaciones sísmicas consideradas.

Con respecto al sistema de MGD se desarrollará las evaluaciones mediante la modelación de la estructura con el sistema ASO y se realizará una comparativa de la estructura con el sistema convencional de empotramiento, determinando una evaluación preliminar del edificio, en un análisis tiempo historia de los desplazamientos relativos por nivel, con el objetivo de obtener las distorsiones máximas de entrepiso, para la búsqueda de una relación directa de los resultados con las características de las propiedades dinámicas de los bloques. Adicionalmente, se evaluará el desplazamiento y la aceleración relativa del sistema, y se analizará el desplazamiento de los puntos oscilación importantes de los bloques, para determinar el movimiento de oscilación de bloque, todo el fin de determinar si la estructura cumple con los enfoques de una estructura sismorresistente.

Así mismo, con el análisis de los resultados se planteará algunas recomendaciones, parámetros de dinámicos del ASO, aspectos relevantes a considerar en los aspectos de diseño geométrico de los bloques y determinando la participación de los parámetros dinámicos relevante.

III. MODELO DINÁMICO DEL SISTEMAS DE 1GDL Y EDIFICIOS CON SISTEMAS ASO

3.1 Generalidades

El modelo del edificio aislado está compuesto por siete niveles, el sistema estructural está comprendido por elementos de concreto reforzado a base de una estructuración compuesta por vigas y columnas. La representación del modelo de los aisladores de base, será visto como bloques de rígidos en el cual mediante el balanceo de dichos elementos se enfocarán en reducir los efectos de sísmicos, disminuyendo la rigidez de la estructura, y de esta forma aumentar el periodo de la estructura. Los modelos se representarán como un marco de una crujía idealizados como un sistema de 1GDL como lo mostrado en la Figura 7, y MGDL de acuerdo con la descripción de la estructuración se ilustra en la Figura 8.

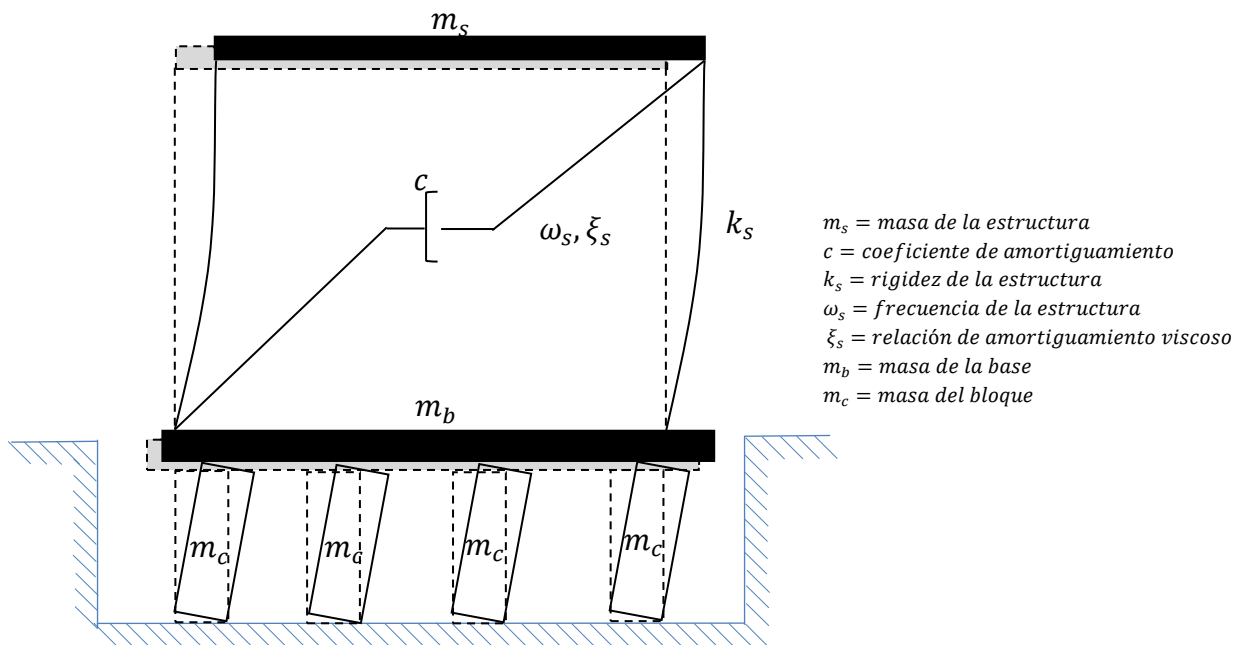


Figura 7. Definición del sistema de 1GDL con un sistema ASO.

3.2 Estructuración

Para emplear el caso de una estructura con un sistema ASO, será necesario mencionar, “En un edificio en el que todo el piso inferior oscilante tiene columnas verticales libres de oscilar bajo la acción de la carga sísmica, con el fin de reducir los efectos sísmicos transmitidos a la estructura primaria, se denomina edificio con un sistema de aislamiento sísmico oscilante (ASO)”, ([14, 21] Bachmann et al., 2016, 2017). De esta forma se planteó la estructuración del sistema aislado, utilizando la viga rígida apoyado sobre los bloques rígidos de balanceo, conservando el concepto empleado por Bachmann, así como lo mostrado en la Figura 8.

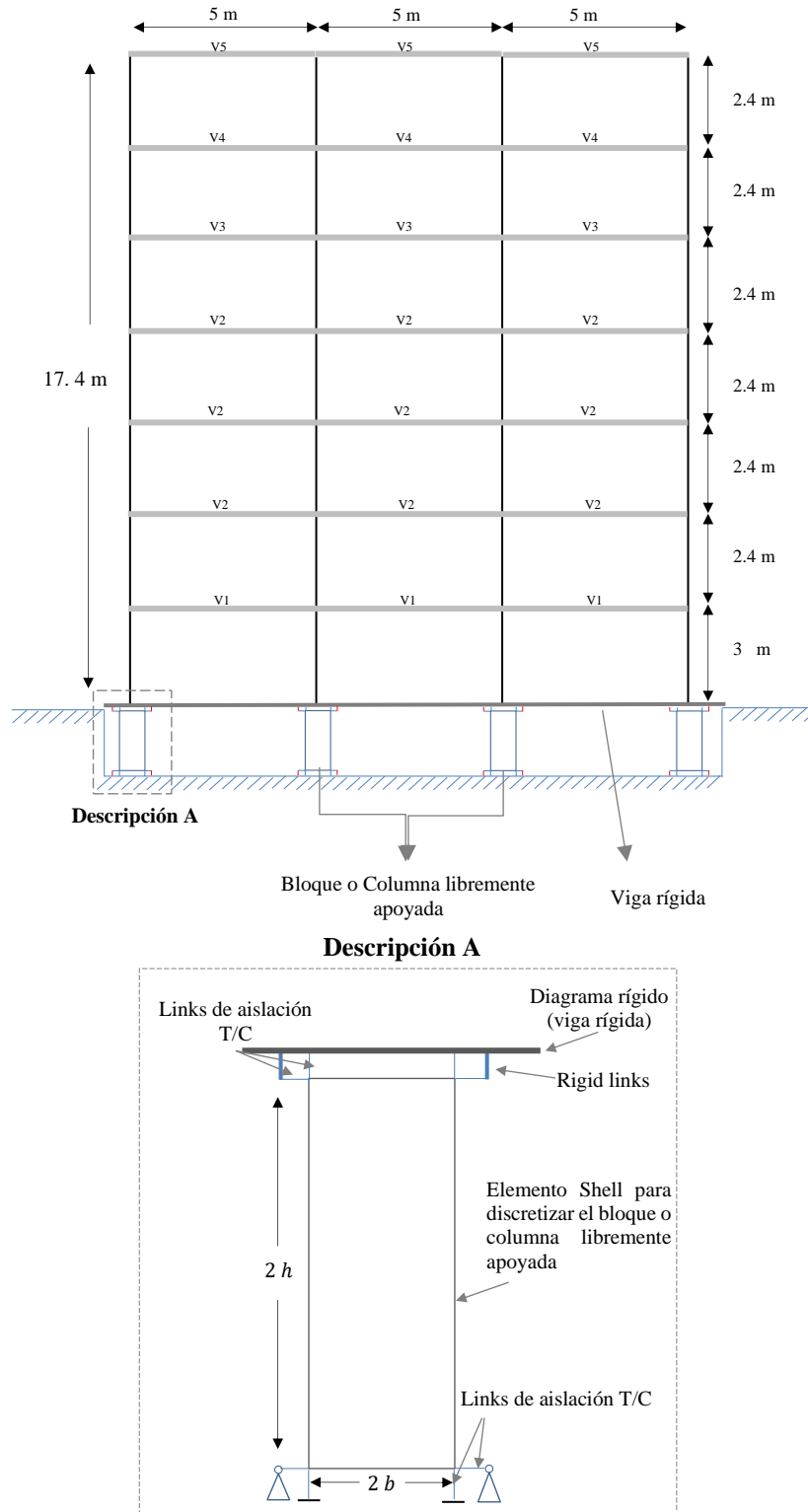


Figura 8. Descripción de la estructuración del edificio con el sistema de ASO, con la descripción general del bloque

Dentro de la estructuración se han considerado dos sistemas de análisis comparativos, el primer sistema al cual se considera un sistema empotrado en la base de nuestra superestructura, y el segundo sistema principal de análisis en el cual el sistema de bloques rígidos de concreto están acoplados con un sistema de anclaje rígido de desplantas a la superestructura sobre una base rígida en el cual permite el balanceo permisible para desarrollar su movimiento necesario para desacoplar la fuerza horizontal.

El edificio descrito se considera una estructura de tres crujeas con 7 niveles, el cual se estructuró con marcos lineales. De acuerdo con el sistema de estructuración del modelo, tenemos una distribución de masas asignadas en cada uno de los nodos de la superestructura, con una configuración dentro de cada uno de los pisos distinta en el primer piso y la azotea. La distribución de los elementos se compone de un sistema del primer nivel de una altura de 3 m, posteriormente se desplanta los entrepisos en una misma altura de 2.4 m. El sistema de estructuraciones de las columnas se comprende continuos por nivel, de esta manera que en el primer nivel se muestran que son las mismas, C1 de 35 x 35 (cm), de esta forma que segundo, tercer, y cuarto nivel conservan columnas C2, 35 x 35 (cm), así mismo el quinto, sexto y séptimo entrepisos tiene columnas C3, 35 x 35 (cm), con diferencias entre los tipos de las columnas en los armados. En cuanto a las vigas se muestran de forma semejante al sistema de columnas, se tiene claros de 5 metros, para el primer nivel se tiene un medio de vigas continuas, V1 de 45x30 (cm), el segundo, tercer, y cuarto piso se estructura de forma continua V2, 45x35 (cm), para el quinto nivel se tiene V3, 45x35 (cm), así mismo el sexto nivel V4, 45 x 35 (cm), finalmente la azotea, V5, 45 x 35 (cm), como los mostrados en la Tabla A1. Dimensiones de los elementos estructurales del edificio de 7 niveles, y la Tabla A2. Ubicación de los elementos, en el apartado de Anexos. En cuanto a los materiales se consideraron el concreto reforzado con una resistencia de $f'_c = 250 \frac{kg}{cm^2}$, un material común dentro de la industria de la construcción, y utilizado dentro nuestra estructuración. Generando un peso total de la superestructura tomando en cuenta los 7 niveles, $W_s = 1,800 kN$, y el peso para la viga del capitel rígido, $W_v = 264.6 kN$.

Finalmente se considerando el sistema ASO, las columnas independientes se colocaron de debajo de la viga rígida soportando la estructura principal considerando como, tomando en cuenta cuatro de dichas columnas debido a los marcos considerados. Así mismo con diferentes dimensiones de los casos mostrados en la Tabla 1, se toman en cuenta los valores como la m_b , considerando, W_b y η (%).

Las columnas libres del sistema ASO para modelarlas se considerando como elementos Shell para cada uno de los bloques, La masa de los bloques, m_c se concentra en el centroide de los bloques. En el presente trabajo, el término de columnas independiente y bloques rígidos, es intercambiables, ya que el sistema de columnas del sistema ASO se presentan matemáticamente como los bloques rígidos de balanceo. Para interpretar la interacción en la superficie de cada uno de los bloques y la tapa de la viga rígida, se utilizaron los enlaces tensión / compresión (T/C), (Descripción A, Figura 8). Los enlaces aislador T/C de las columnas oscilantes independientes del sistema ASO se balancean en las esquinas de la



superficie de rodamientos (es decir, ya sea en los puntos izquierdo o derecho) de la misma interacción superior o inferior y el contacto cuando el bloque impacta en cualquiera de las bases rígidas desplantadas en la interfaz inferior o en la superior. Los aisladores T/C son la modelación de la transmisión del impacto del bloque a las bases rígidas considerando no solo la gran rigidez de los enlaces, contemplando el coeficiente de amortiguamiento, c , siendo función de la masa de la columna independiente, su tamaño y su esbeltez; se calculó según la expresión dada en $c \approx \lambda \alpha 2mcg 0.5R 1.5$, donde λ es un parámetro calibrado con el calor mejor ajustado a los resultados. En cuanto a las deformaciones locales y daños causados por balanceo entre el bloque y la superficie en la misma base, estas son descartadas para el objetivo del presente trabajo. Las alternativas para la modelación del balanceo sísmico de columnas independientes están en literatura, ejemplo, ^[21,22] *Vasilou et al* (2017 a, b).

3.3 Fundamentos de la estructuración

La acción de la bajada de cargas derivada por la superestructura se canaliza a la subestructura, entendiendo como subestructura como una viga infinitamente rígida apoyada sobre los bloques rígidos de balanceo, Figura 9, considerando un diafragma rígido que transmite las cargas a la parte inferior de los bloques.

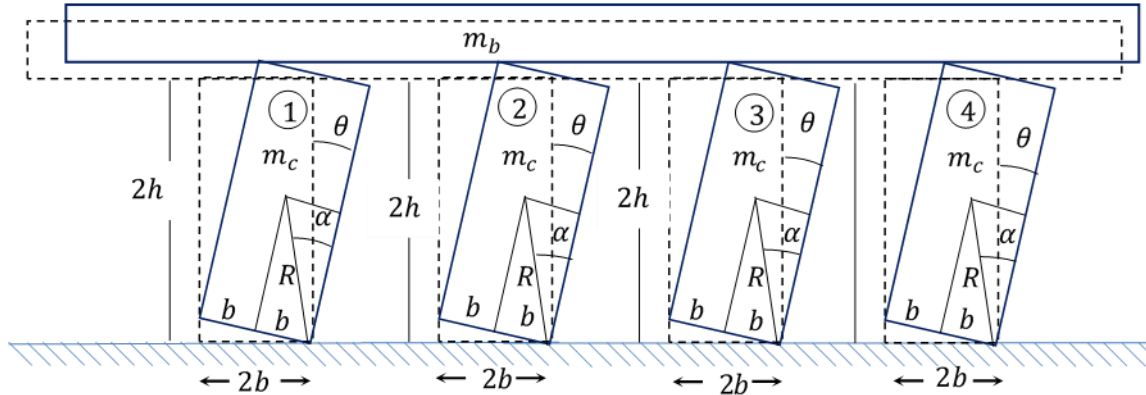


Figura 9. Sistema de aislamiento sísmico oscilante, viga rígida apoyado sobre las columnas rígidas

Con objetivo de evaluar la respuesta sísmica ante diferentes dimensiones de bloques, platearon tres casos con diferentes propiedades geométricas, con el cual se generará un criterio, operando cada uno de estos dentro de nuestra modelación, con lo que implicaría la respuesta de cada uno, y acorde con presentación de cada uno de los elementos tendremos una respuesta de los bloques de acorde a la propiedad dinámica relacionada, en la Figura 10, nos representa las características geométricas de los bloques.

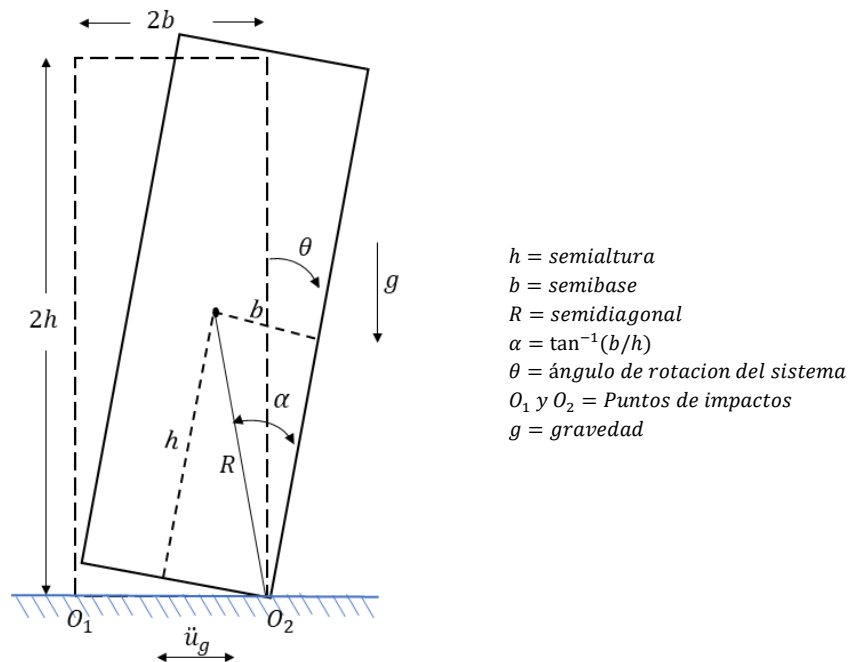


Figura 10. Representación del bloque oscilante

Las dimensiones de estos bloques están descritas en la Tabla 1, la forma ilustrativa y a escala se presentan en la Figura 11, se adecuaron la geometría de los bloques conforme a la bibliografía existente, en relación con los parámetros de estabilidad, con el objetivo definir las medidas óptimas para diferentes casos, enfocando en el determinar un criterio conforme a la participación de los parámetros de estabilidad e influencia dentro de la evaluación del sistema, considerando W_s el peso de la estructura, W_b el peso de la base (la suma del capitel rígido y la masa total de los bloques), w_T el peso total, mientras que $\eta = m_t/m_b$. De esta forma generar criterios que impliquen argumentos suficientes para determinar si este sistema de aislamiento es adecuado para su implementación, y se consideren como una estructura sismorresistente.

Tabla 1. Características geométricas de los bloques

Bloque	Altura h (m)	Base b (m)	R (m)	α (°)	b/h	W_s (kN)	W_b (kN)	W_{Total} (kN)	η (%)
Caso 1	1.5	0.25	0.76	14.03	0.166	1800	293.11	2093.41	16.22 %
Caso 2	2	0.25	1.00	7.125	0.125	1800	320.84	2121.94	17.82 %
Caso 3	4	0.5	2.02	7.125	0.125	1800	378.64	2178.94	21.03 %

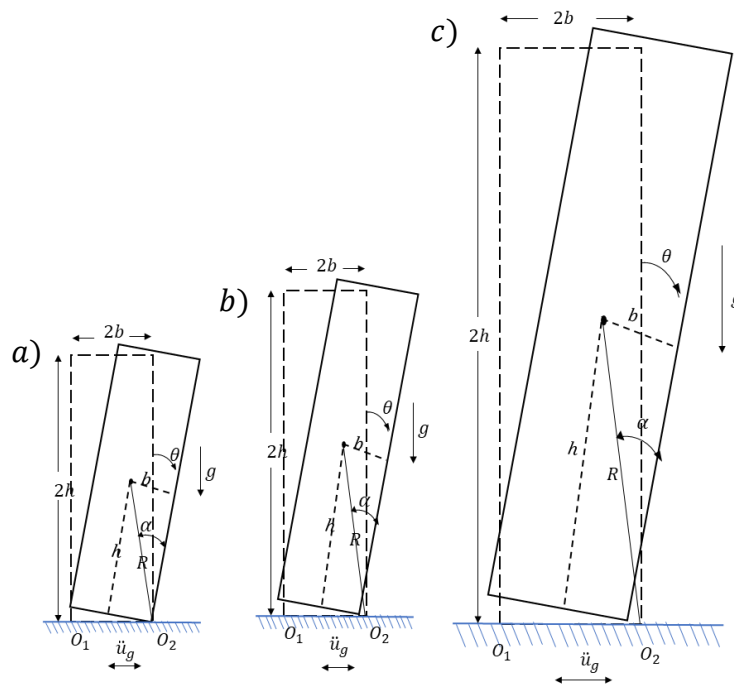


Figura 11. Comparativa de las dimensiones de los bloques considerados, a) primer caso, b) segundo caso y c) tercer caso

IV. EXCITACIÓN SÍSMICA DE SISTEMAS DE 1GDL Y EDIFICIOS - CON Y SIN SISTEMAS ASO

4.1 Generalidades

El presente trabajo se enfoca en analizar la respuesta sísmica que se tiene de un edificio aislado mediante bloques rígidos la modelación del sistema nos facilitará comprender los análisis del sistema, con una evaluación de cada uno de los niveles, para ello, es necesario someterlo ante acciones de fuerza, por lo que se estimara una evaluación de una excitación sísmica realizando un análisis tiempo historia.

4.2 Excitación sísmica

Para una evaluación sísmica, la variación en el tiempo de la aceleración del terreno es la forma más útil de definir el movimiento del terreno durante un sismo, la aceleración del terreno suele expresarse como $\ddot{u}_g(t)$, siendo fundamental en la ecuación de movimiento de un sistema lineal, rigiendo en la respuesta de la estructuras a la excitación sísmica. La respuesta estructural de sistemas de un 1GDL y del edificio de 7 niveles, cuando estos sometidos a cargas sísmicas generadas por excitaciones sísmicas como lo están registrado en un acelerograma, donde estos nos representará la aceleración con respecto al tiempo, en función de acciones dinámicas de diferentes zonas externas a la Ciudad de México, considerando los registros de aceleración máxima del suelo (PGA) más importantes que se han sucedido dentro de México, para detonar si es suficiente la demanda la estructura se sometera ante los acelerogramas definidos con la componente, la magnitud (Mw), el diferencial del tiempo (Δt), fecha del sismo y la zona en donde se registro el evento, como lo menciona en el Tabla 2.

Tabla 2. Acelerogramas considerados

Registro	Componente	Magnitud Mw	PGA (g)	Fecha	ZONA
CALE970111	EW	7.1	0.498	11/01/1997	Costa de Michoacán
JAMI990930	EW	7.4	0.404	30/09/1999	Oaxaca
LANE990330	NS	7.4	0.256	30/09/1999	Oaxaca
NILT170908	NS	8.2	0.253	08/09/2017	140 km de Suroeste de Pijijiapan, Chiapas
SCRU170908	NS	8.2	0.244	08/09/2017	140 km de Suroeste de Pijijiapan, Chiapas
RABO170919	NS	7.1	0.147	19/09/2017	9 km al Noreste de Chiautla de Tapia, Puebla
HMTT170919	EW	7.1	0.132	19/09/2017	9 km al Noreste de Chiautla de Tapia, Puebla

Cada uno de los registros, se encuentran nombrados con la designación de su estación, siendo el acronimo de su estación, los registros acelerográficos proporcionados han sido producto de las labores de instrumentación y procesamiento de la Unidad de Instrumentación Sísmica del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

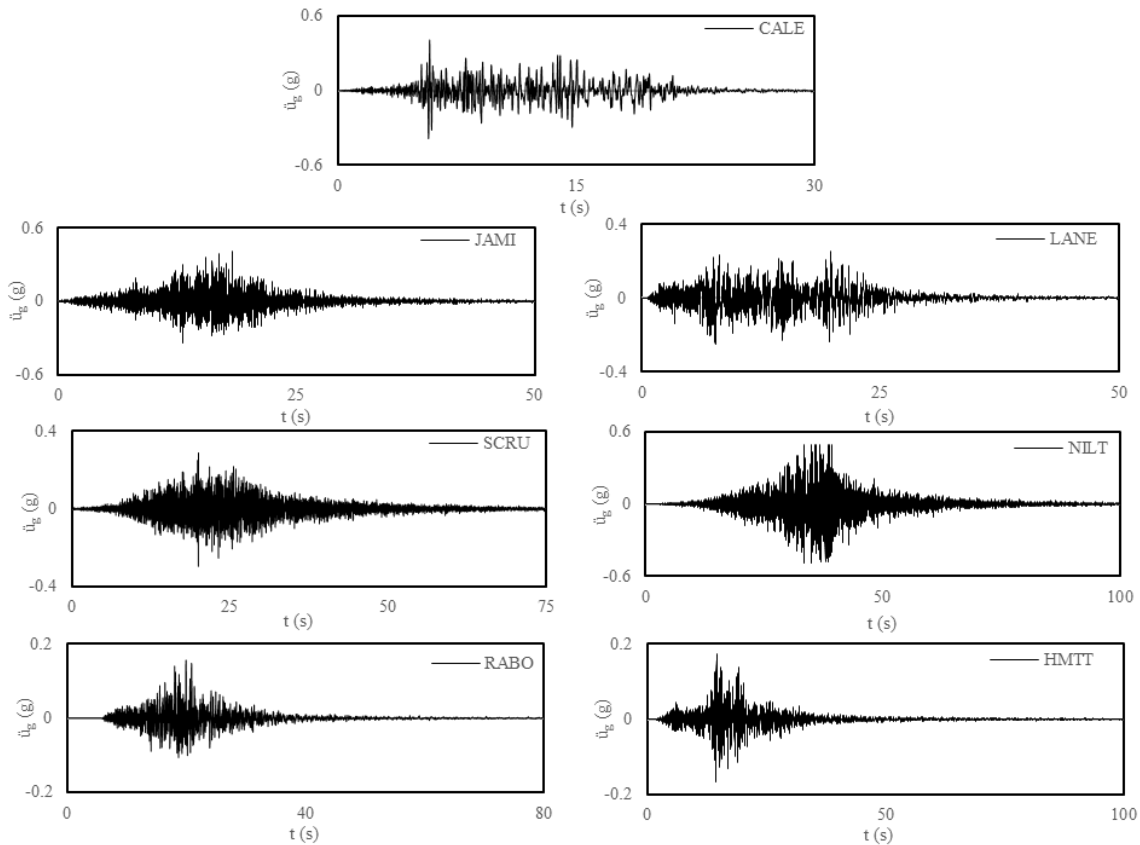


Figura 12. Acelerogramas \ddot{u}_g (g), de registros considerados, CALE (EW), JAMI (EW), LANE (NS), SCRU (NS), NILT (NS), RABO (NS), HMTT (EW).

La respuesta estructural de sistemas 1GDL y edificios implementados con sistemas ASO, cuando son sometidas a cargas sísmicas generadas por aceleraciones de suelo, depende de la aceleración espectral, el contenido de frecuencias y otras medidas de intensidades, como también la duración del movimiento del suelo. Se seleccionaron siete estaciones ubicadas en diferentes partes de la República Mexicana, con diferentes características del suelo según sus intensidades, siendo acelerogramas distintos con respecto al suelo, como los son las estaciones NILT y SCRU. Estos hechos, que ocurrieron el mismo día, el 8 de septiembre de 2017 Mw 8.1 en Chiapas. En la Figura 13 se muestran los espectros respuesta de aceleraciones (SA) y espectros de desplazamiento (SD) para ambos registros, como se puede observar en la Figura 11, el periodo dominante, T_s , es aproximadamente de 0.2 s para la estación para la estación NILT y de aproximadamente 0.1 s de la estación SCRU. Tomando como referencias las condiciones espectrales ante los registros considerados se espera una diferencia de resultados entre los acelerogramas, teniendo diferentes resultados de los sitios enfocados, como respuesta ante las mismas condiciones estructurales en los casos de los sistemas, con y sin ASO. El desarrollo de los espectros de aceleraciones y espectros de desplazamientos, se obtuvieron de forma analítica mediante el Método de Newmark, ^[31] Chopra S. (2004) considerando los variables recomendables de como $\gamma = \frac{1}{2}$ y $\beta = \frac{1}{6}$, como el método de la aceleración promedio constante, con un amortiguamiento del $\xi = 5\%$.

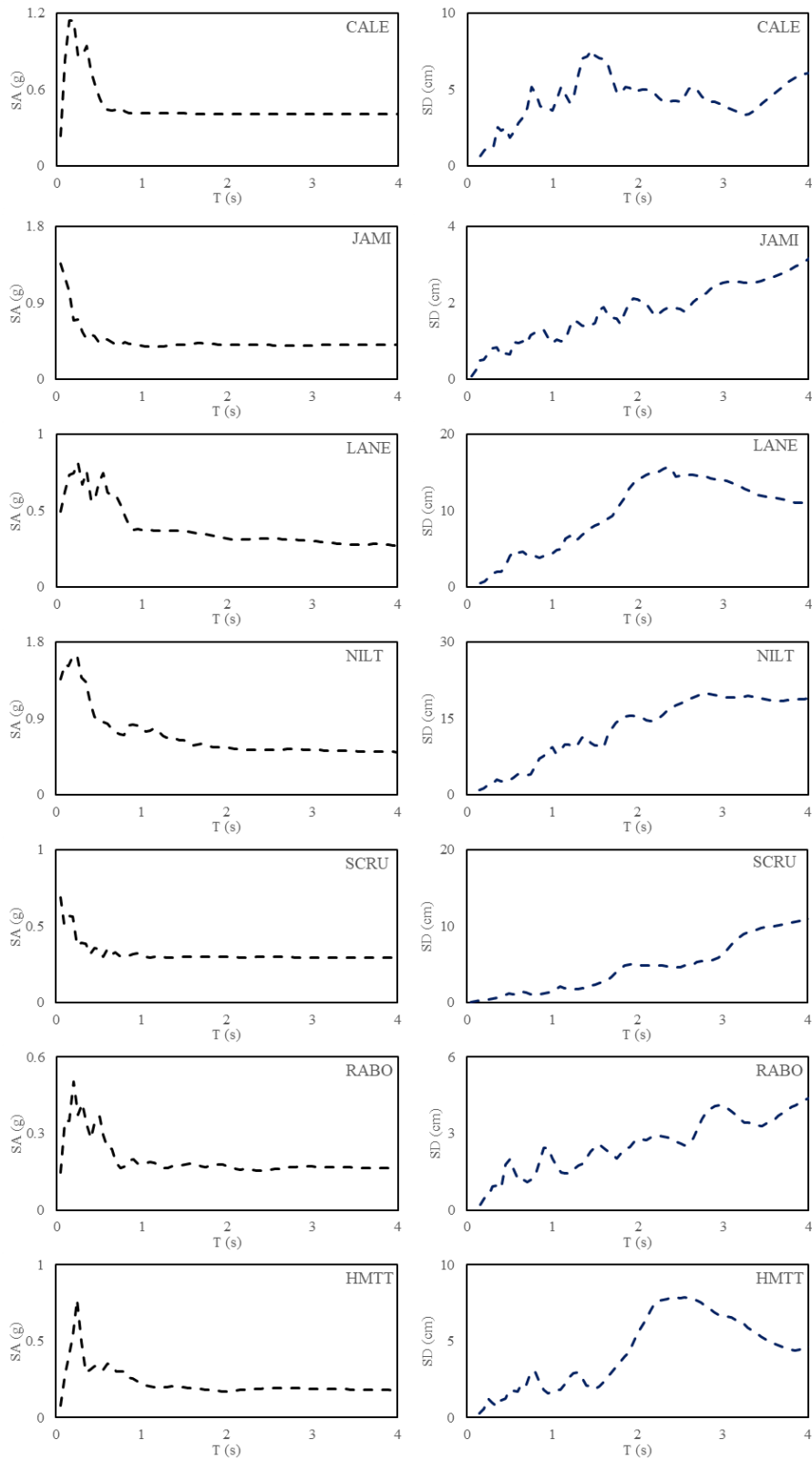


Figura 13. Espectros de respuesta de aceleración (SA) y espectros de respuesta de desplazamiento (SD) de los registros CALE (EW), JAMI (EW), LANE (NS), SCRÚ (NS), NILT (NS), RABO (NS), HMTT (EW).

V. PRESENTACIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

5.1 Respuesta estructural de sistemas de 1GDL y edificios.

El enfoque de la evaluación de repuesta estructural se presentará preliminarmente con la comprobación de los sistemas modelados, se plantea una comparativa de los sistemas asilados de 1GDL y MGD (edificio), en el cual se plantea el modelo de dinámico del edificio como lo mostrado en el cap. III, con y sin el sistema ASO de acuerdo con las propiedades dinámicas de los casos mencionada en la Tabla 1, obteniendo parámetros importantes como es el periodo y la frecuencia de la estructura, partiendo de dichos parámetros obtenidos se planteó analíticamente el sistema de 1GDL, siendo los necesarios para determinar el modelado del marco equipado del sistema de 1GDL implementando el sistema ASO del edificio en los casos correspondientes, como respuesta del proceso se obtuvo la aceleración y desplazamientos relativos, determinando la calibración del modelo y una comprobación del mismo, considerando los modelos de forma ilustrativa se puede observar la Figura 14, 1GDL (izquierda) con un marco equipado con el sistema ASO y el edificio (derecha) compuesto por marcos de tres crujiás con el sistema ASO para ello se seleccionaron registrados situados en diferentes sitios, de forma que los hechos causaron daños importantes en diferentes provincias de México ocurrieron en diferentes años, los sismos considerados son los de 1997 $M_w = 7.1$ (estación CALE), 1999 $M_w = 7.4$ (estación JAMI), 2017-09-08 $M_w = 8.2$ (estación SCRU), 2017-09-19 $M_w = 7.1$ (estación RABO).

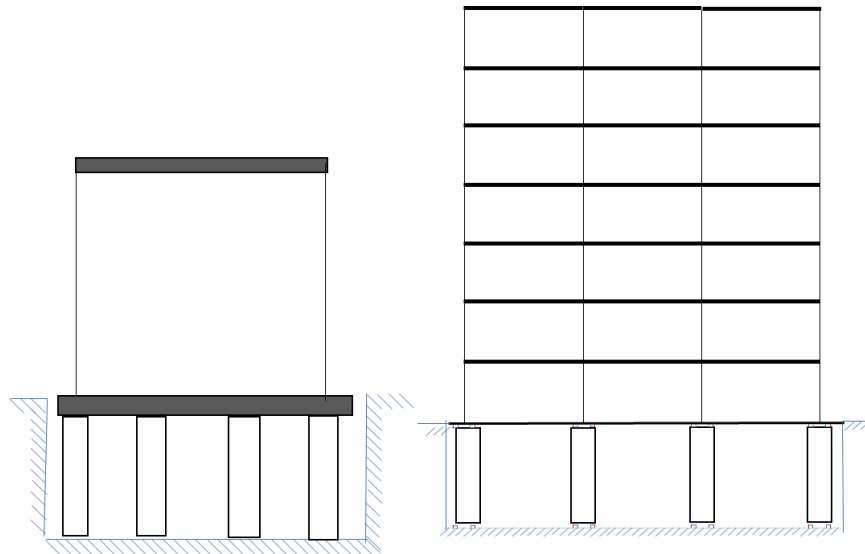


Figura 14. Modelos dinámicos de 1GDL (izquierda) y MGD (derecha).

5.1.1 Historia tiempo desplazamiento relativo de un sistema de 1GDL y un edificio

Los sistemas de MGDL (es decir el edificio de 7 niveles) se modelaron dentro de las especificaciones antes mencionadas, utilizando las propiedades dinámicas de los bloques en los casos correspondientes, en el caso de la base rígida se restringió convencionalmente. De acuerdo con la Figura 15, nos presenta los cuatro casos a desarrollar, el sistema rígido, y los tres casos con la implementación del sistema de aislamiento sísmico oscilante (ASO). Así mismo se presentaron los casos del sistema de 1GDL, considerando las propiedades estructurales del edificio, mostrando en la primera fila el caso del sistema rígido (empotrado), en las filas posteriores nos presentan los casos correspondientes, la línea negra presenta los sistemas de 1GDL mientras que la línea colorida es la respuesta del edificio. Determinado, en el cual los desplazamientos a lo largo del tiempo de los sistemas de MGDL son consistente con respecto a los 1GDL tanto en sistema rígido y flexibles, validando la respuesta de las ecuaciones gobernantes (ec. 2.1) de movimiento utilizados como herramienta para evaluar la respuesta estructural de los edificios con sistemas ASO. En consecuencia, los resultados del análisis historia tiempo del desplazamiento relativo presentado con los acelerogramas considerados (estaciones CALE, JAMI SCRU, y RABO), en cual presentaron resultados consistentes entre los sistemas de 1GDL y el edificio, de forma que la comprobación de la modelación está en lo correcto.

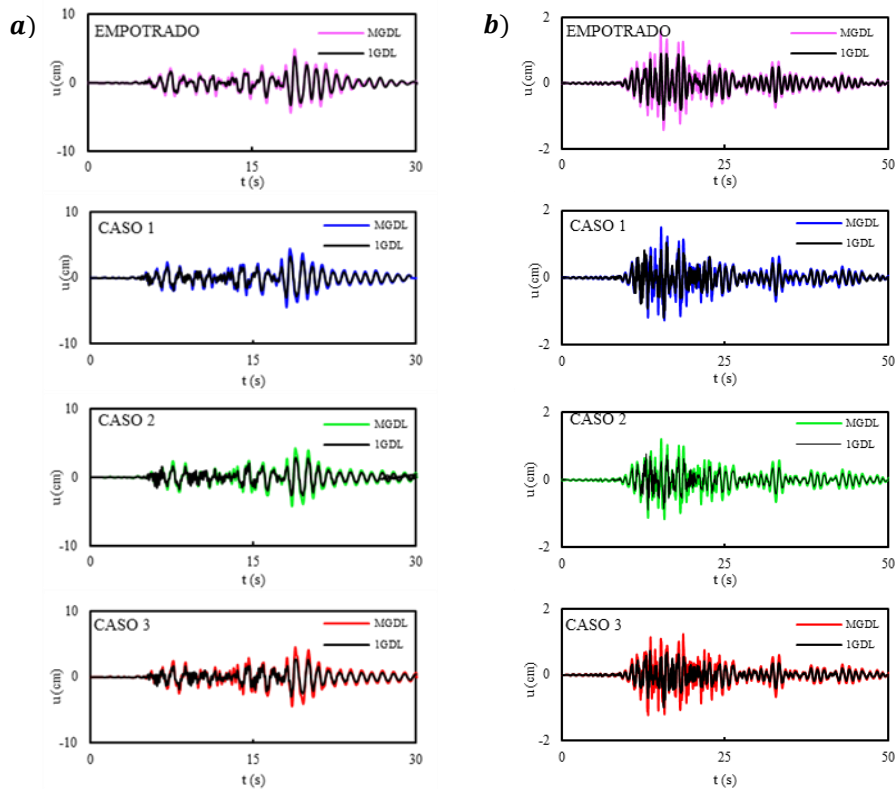


Figura 15. Comparativa de los sistemas 1GDL y un edificio del desplazamiento relativo, estaciones a) CALE, b) JAMI, c) SCRU y d) RABO, sistema de base rígida en la primera fila de arriba a abajo, los sistemas con ASO, del primer caso al tercer caso desde la segunda fila hasta la cuarta fila respectivamente.

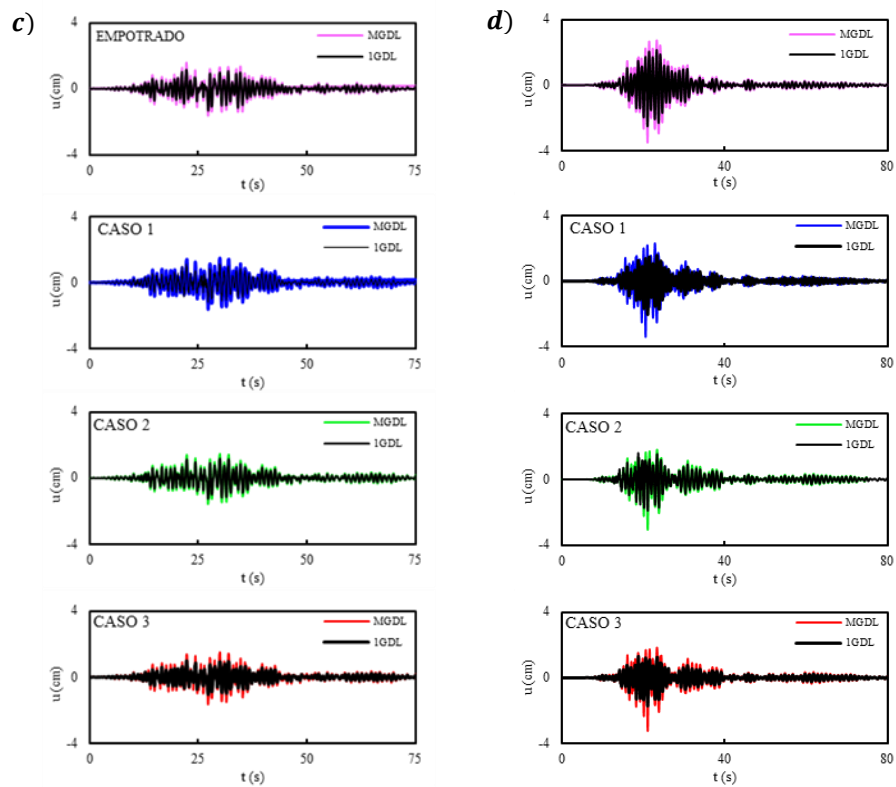


Figura 15. Continuación

5.1.2 Historia tiempo aceleración relativa de un sistema de 1GDL y un edificio

Al igual que el análisis historia tiempo de desplazamientos, se planteó la modelación de los sistemas de 1GDL y un edificio, ante las características de los casos considerados, los parámetros estructurales se determinaron las bases teoría para el modelo equivalente, refiriéndose al parámetro de evaluación como la aceleración una de las herramientas para determinar la congruencia de nuestro modelo, así mismo se utilizaron registros de las estaciones CALE, JAMI, SCRUI y RABO, determinando que la comprobación de la calibración del modelo dinámico es aplicable correctamente de acuerdo con la ecuaciones (es decir, la ec. 1.2 y 2.1) representa adecuadamente los sistemas de los marcos con y sin equipaciones del marco ASO. Al presentar pequeñas diferencias en las aceleraciones entre el sistema de 1GDL con respecto a los sistemas de MGDL, se considera que el análisis de un MGDL, toma mayores factores que pueden derivar de dichas variaciones, pero los resultados son consistentes entre ellos, así como lo muestra la Figura 16, mostrándonos la representación de los desplazamientos relativos de los sistemas 1GDL (continua negra) y MGDL (continua, colorida), presentando en la primera fila el sistema rígida, y los sistemas equipados con sistemas ASO de forma ordenadamente con los casos correspondientes, con el tiempo determinada de acuerdo al lapso del registro considerado. Ahora bien, con respecto al análisis de reducción de los efectos de aceleraciones se presenta una disminución considerable con los sistemas equipados con el sistema de aislamientos sísmico oscilante.

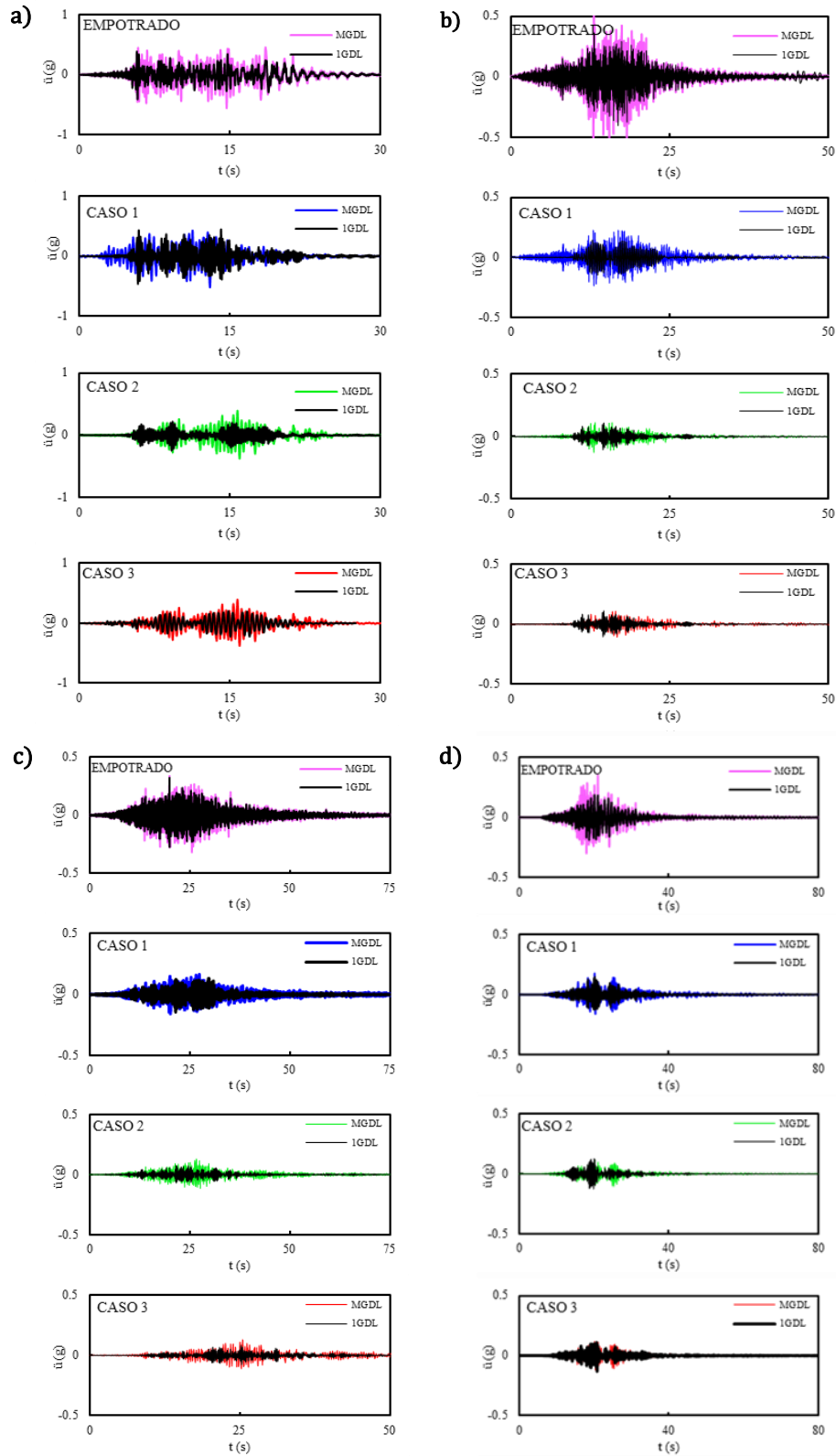


Figura 16. Comparativa de los sistemas 1GDL y un edificio de la aceleración relativa, estaciones a) CALE, b) JAMI, c) SCRU y d) RABO, sistema de base rígida en la primera fila de arriba a abajo, los sistemas con ASO, del primer caso al tercer caso desde la segunda fila hasta la cuarta fila respectivamente

5.2 Respuesta estructural del edificio

Para una mejor representación de los resultados se plantearán la definición de los estudios, como el estudio de la *base rígida*, a la que corresponde a la edificación con base restringida, tipo de apoyo empotrado, a lo que se consideran estudios tradicionales, y el estudio de la *base flexible*, a lo que define como una estructuración con base de bloques rígidos a lo apoyado a la estructura.

5.2.1 Periodo de la Estructura

El periodo de la estructura está definido como vibración de la estructura (el tiempo que toma a la estructura vibrar en sentido lateral en ambos sentidos), dependiendo de muchas de las propiedades de la estructura, tales como su masa, su rigidez y su ductilidad. Apartir de las consideraciones del capítulo 3, las características de la estructuración se emplearon en la modelación, representando al periodo de cada uno de los casos resultados diferentes entre sí, como lo mostrado en la Tabla 3, se muestra en las estructuras con base flexible que se consideran sistemas con ASO, se puede notar un aumento del periodo en la estructura. Asociando la relación de esbeltez de los bloques con el periodo de la estructura, tenemos que cuando la relación de los bloques es igual se espera un periodo semejante.

Tabla 3. Periodo de c/u de los casos.

Bloque	T [s]	b/h
Base flexible Caso 1	1.120	0.166
Base flexible Caso 2	1.440	0.125
Base flexible Caso 3	1.460	0.125
Base rígida	0.938	-

5.3 Respuesta estructural para sistemas 1GDL con sistemas ASO

De acuerdo con la metodología plateada, se utilizará movimientos externos de la Ciudad de México, los sistemas de 1GDL en Figuras 5 y 6 se utilizarán para calcular sus respuestas estructurales debido a excitaciones sísmicas, mencionadas de la Tabla 2, adoptando $\xi_t = 5\%$ para respuesta de cada uno de los sistemas 1GDL.

5.3.1 Evaluación de parámetros dinámicos ASO

Se analizaron dos parámetros dinámicos ASO, para determinar las condiciones idóneas para el control de la demanda sísmica. Se tomó en cuenta los parámetros R y α , R corresponde al tamaño de los bloques, siendo la distancia del centroide del bloque hacia una esquina oscilante, $\sqrt{b^2 + h^2}$, y α es el ángulo representado como $\tan^{-1}(b/h)$, parámetros directamente dependientes a las propiedades geométricas del bloque, b y h , la semidistancia de la base y altura respectivamente. En la Figura 17 y 18, se la respuesta del sistema de 1GDL de acuerdo a las ecuaciones de respuesta estructural excluyendo el sistema ASO (ec. 1.2) e incluyendo el sistema ASO (ec. 2.1), representadas como la línea punteada el sistema SDOF, Single Degree Of Freedom refiriéndose en 1GDL de la ec. 1.2, y las líneas coloridas pertenecen a sistemas equipados con sistemas ASO, con diferentes propiedades dinámicas rigiendo por la ec. 2.1.

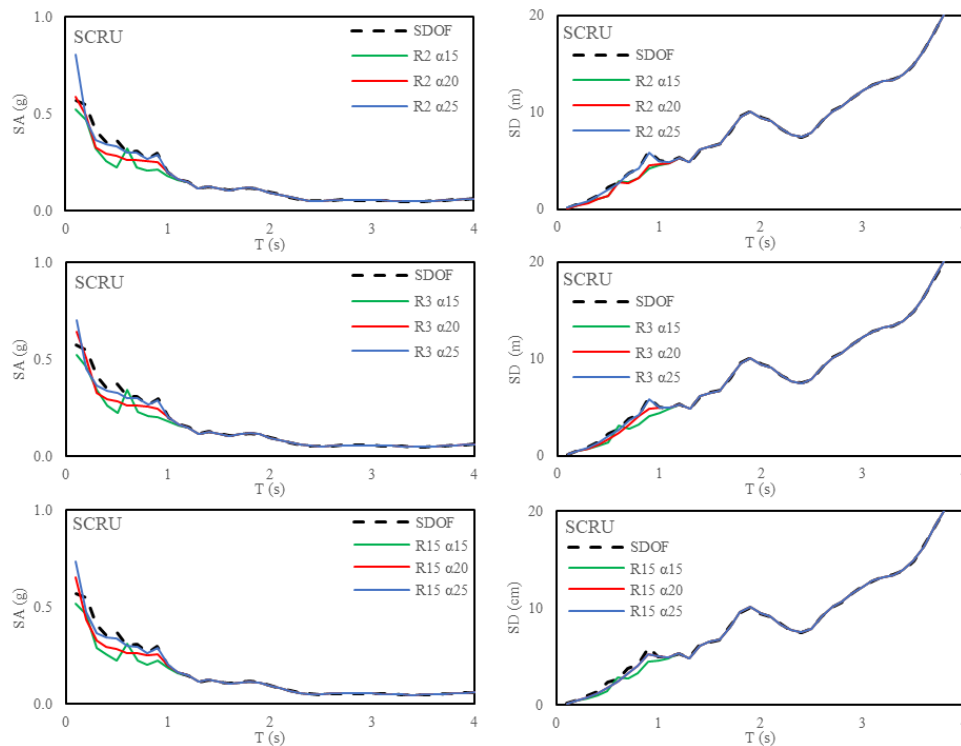


Figura 17. Espectro de respuesta de un sistema de 1GDL a) SCRUI, analizando los Espectro de respuesta de aceleraciones, SA (izquierda) y los Espectro de respuesta de desplazamiento, SD (derecha) variando los parámetros dinámicos, α con respecto de R .

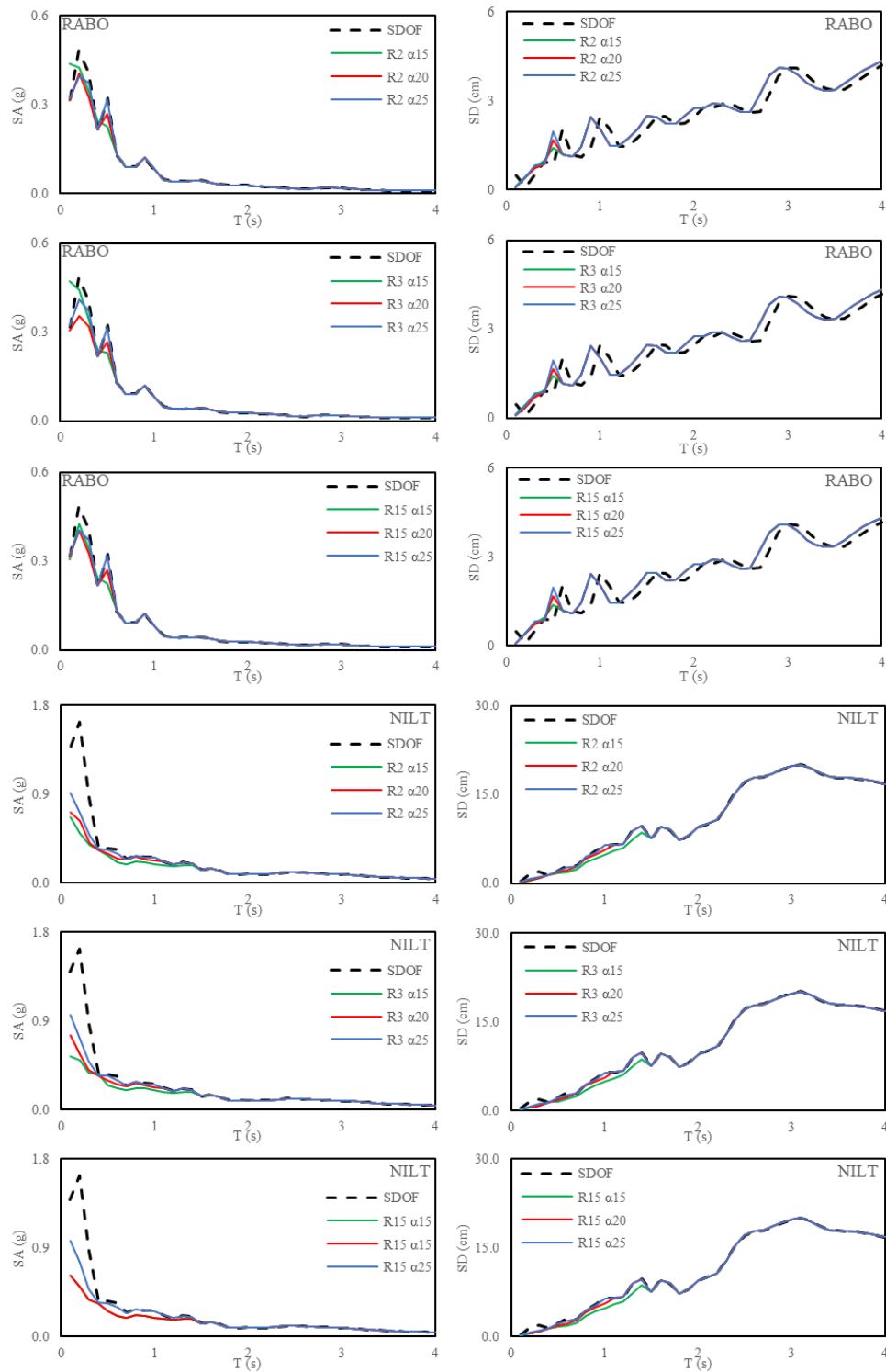


Figura 17. Continuación

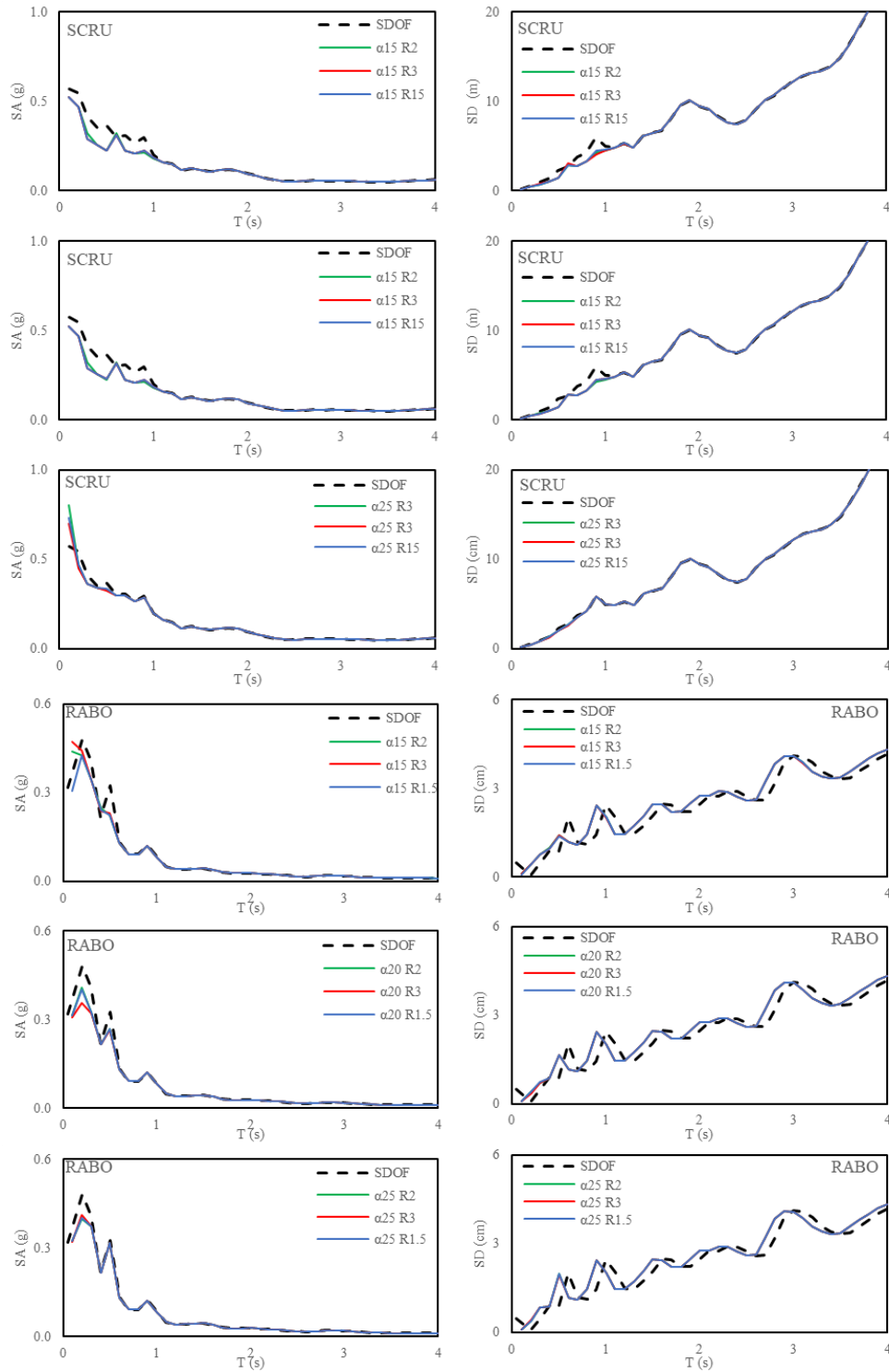


Figura 18. Espectro de respuesta de un sistema de 1GDL, a) SCRU, y b) RABO, analizando los Espectro de respuesta de aceleraciones, SA (izquierda) y los Espectro de respuesta de desplazamiento, SD (derecha) variando los parámetros dinámicos, R con respecto α .

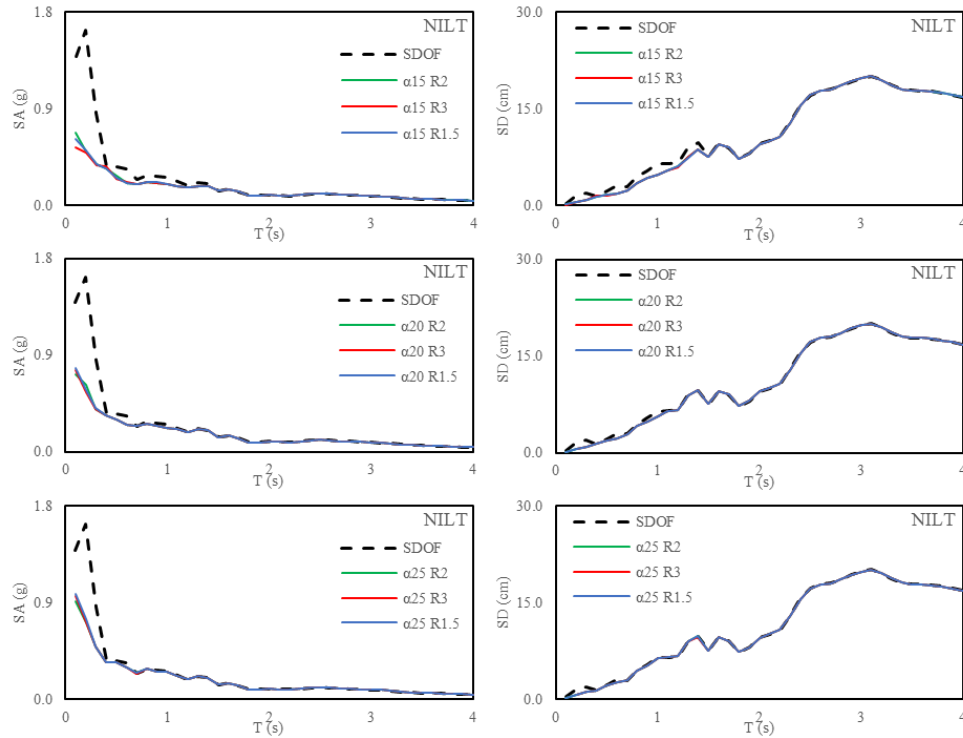


Figura 18. Continuación

Las Figuras 17 y 18, muestran los espectros de respuesta del sistema primario para diferentes valores de los parámetros antes mencionados (es decir, α y R), se trazaron en términos de desplazamiento máxima u_{tb} dado por la *ec.* 2.6 y la aceleración máxima relativa \ddot{u}_{tb} dado por la ecuación *ec.* 2.7, siendo las líneas continuas, en función de T_t . Compartiendo las medidas de intensidad relativa entra la estructura de 1GDL primaria y los sistemas de 1GDL con sistema ASO con diferentes parámetros dinámicos. En las Figura 17 y 18, se puede observar las estaciones NILT, SCRUI y RABO, registros seleccionado por las diferentes respuestas espectrales, en el cual se presentan los gráficos periodos en el cual oscilan $0.1s \leq T_s \leq 4s$ en lados izquierdo y derecho. El desplazamiento y aceleraciones (es decir, SA y SD) para los sistemas de 1GDL sin ASO se representan con líneas discontinuas en cada uno de los casos.

Continuando con las Figuras 17 y 18, se muestra cuando las condiciones de los sistemas de 1GDL son compatibles con los sistemas ASO, u_{tb} y \ddot{u}_{tb} disminuyen parcialmente, para cuando $T_s/T_t \approx 1$, los parámetros R y α (líneas solidas), indicando la forma en el que el sistema ASO previene fenómenos de resonancia. Fuera de los valores cercanos a las $T_s/T_t \approx 1$, la repuesta del sistema de 1GDL primario se asemeja a la del sistema 1GDL primario a la del sistema de 1GDL con sistema ASO.

En la Figura 17, nos representa el parámetro R como la constante, y una variación entre el parámetro α , partiendo que el parámetro por analizar es α , se puede apreciar tanto en las estaciones NILT, SCRUI y RABO, es más visible la reducción en la zona de resonancia, como la muestra la demanda relativa de máximas aceleración y desplazamiento conforme el



parámetro α y R disminuye. En la Figura 18, nos representa el parámetro α como la constante, y una variación entre el parámetro R , partiendo que el parámetro por analizar es R , se mantiene tanto en las estaciones NILT, SCRU y RABO, la variación del parámetro R con respecto a las condiciones de α parece tener menos influencia en la reducción de la respuesta estructural. En las condiciones de análisis de los parámetros dinámicos, podremos determinar que tanto R , y α disminuyen, favorecen en las demandas relativas, (u_{tb} y \ddot{u}_{tb}) en la zona de resonancia es más visible, con lo quiere decir estos parámetros, nos indican que las condiciones de geométricas de los bloques son las representativas para el desarrollo correcto de la funcionalidad de dichos bloques.

5.3.2 Respuesta historia-tiempo del edificio con y sin sistema ASO

La respuesta sísmica de los sistemas de un edificio, se presentara de mejor manera en términos de respuesta de historia-tiempo, evaluando los aspectos como la estabilidad de las columnas oscilantes dichos valores correspondiendo al primer modelo las menores dimensiones ($R = 0.76$, $\alpha = 14.03^\circ$, $b/h = 0.16$, $T = 0.97 s$, $N_c = 4$ $\eta = m_t/m_b = 15$), así mismo, para el segundo modelo ($R = 1.0$, $\alpha = 7.12^\circ$, $b/h = 0.125$, $T = 0.99 s$, $N_c = 4$, $\eta = m_t/m_b = 15$) que emplea propiedades semejantes entre tercer modelo ($R = 2.02$, $\alpha = 7.12^\circ$, $b/h = 0.125$, $T = 0.99 s$, $N_c = 4$ $\eta = m_t/m_b = 15$), pero geoméricamente distinto entre sí quedando al analizar el parámetro esbeltez (b/h) que juega el papel importante como lo considerado como ^[31]*Bantilas et al.* (2012 b).

En las Figuras 19 – 21 nos representan los gráficos de distorsiones de los tres casos, que se enfoca a un análisis preliminar para desarrollar un aspecto general del comportamiento de cada uno de los niveles, en el cual se analizará el primer piso, que denominaremos piso débil siendo aquel que posee un cambio de rigidez brusco en la altura del edificio, as mismo la presentación de cada uno de los gráficos de distorsiones se originó del análisis historia tiempo del desplazamiento relativo máximo de cada uno de los niveles entre la altura del respectivo entrepiso a lo largo de la duración del registro del acelerograma.

Primer caso

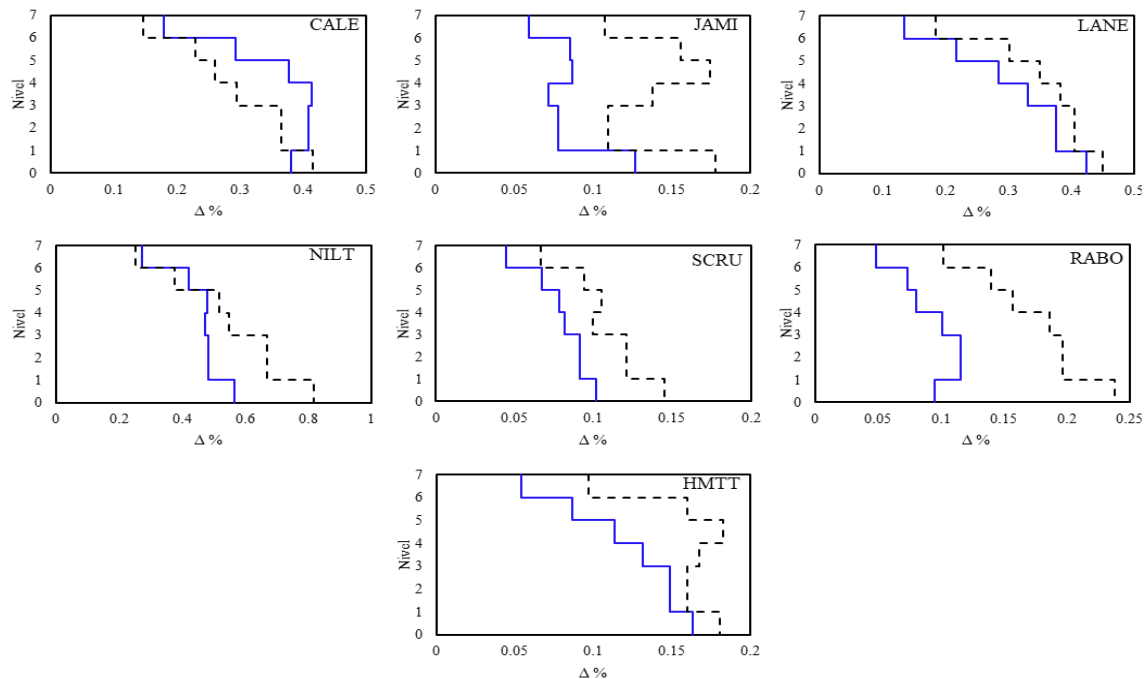


Figura 19. Distorsiones de entpiso de la base rígida (línea punteada negra) y base flexible (línea solida azul), primer caso, $R = 0.76$, $\alpha = 14.03^\circ$, $b/h = 0.166$, $T = 0.971 s$, $N_c = 4$ $\eta = m_t/m_b = 15$, sometidos a sismos importantes situados en México.

Segundo Caso

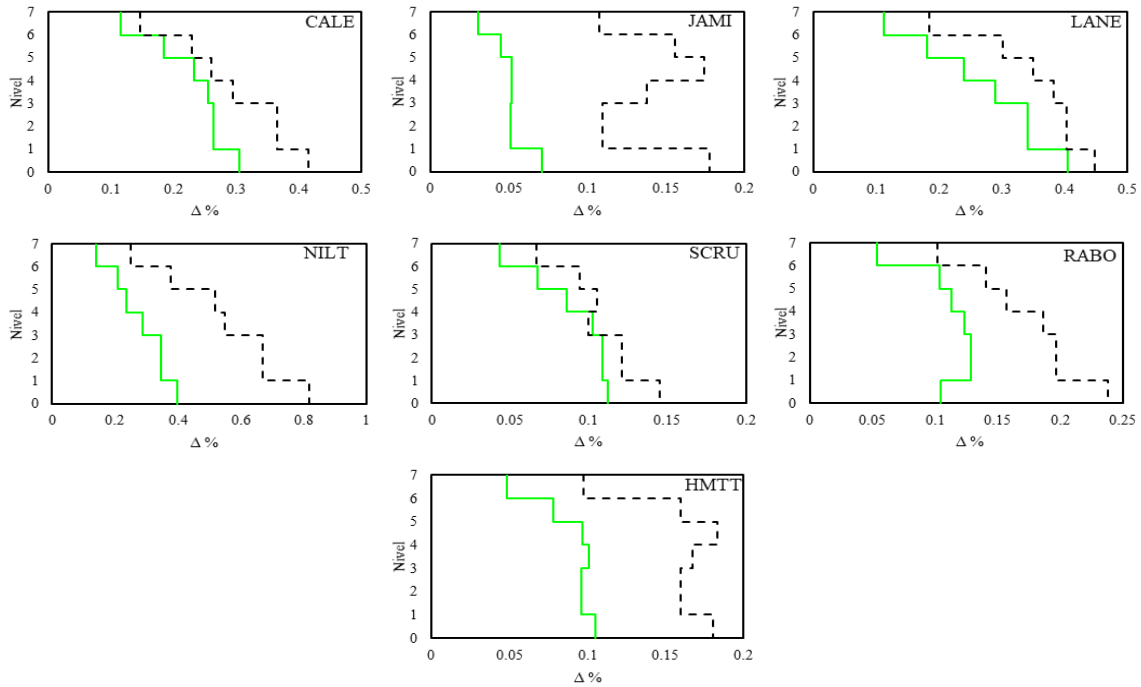


Figura 20. Distorsiones de entrepiso de la base rígida (línea punteada negra) y base flexible (línea sólida verde), segundo caso $R = 1.0$, $\alpha = 7.125^\circ$, $b/h = 0.125$, $T = 0.995$ s, $N_c = 4$, $\eta = m_t/m_b = 15$, sometidos a sismos importantes situados en México

Tercer Caso

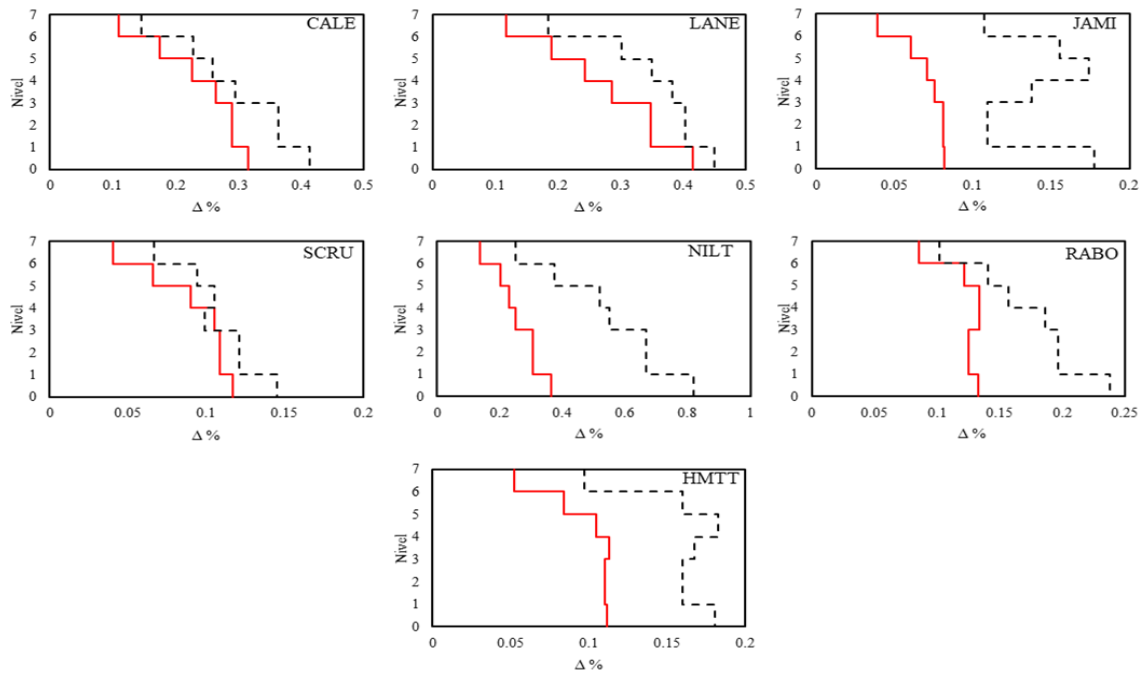


Figura 21. Distorsiones de entrepiso de la base rígida (línea punteada negra) y base flexible (línea sólida roja), tercer caso, $R = 2.02$, $\alpha = 7.125^\circ$, $b/h = 0.125$, $T = 0.994$ s, $N_c = 4$, $\eta = m_t/m_b = 15$, sometidos a sismos importantes situados en México.

De acuerdo con las Figuras 19-21, los gráficos de distorsiones presentan diferencias entre el sistema sin ASO (línea punteada) y los sistemas con ASO (línea sólida) en el edificio de 7 niveles, determinando un análisis preliminar de la estructura, la diferencia en el cual se enfocará se representará en los desplazamientos relativo del primer nivel.

En las Figuras 20 y 21, nos presenta los resultados más favorables, con una mayor reducción de los desplazamientos relativos con respecto a los 7 niveles, correspondiendo al caso segundo ($\alpha = 7.125^\circ, R = 1 m$) y tercero ($\alpha = 7.125^\circ, R = 2.02 m$), en el cual nos representa las parámetros dinámicos semejantes entre sí $\alpha = 7.125^\circ$, y $b/h = 0.125$, considerando el sistema ASO con menores dimensiones entre los dos (segundo caso), siendo el mayor efectivo en la reducción en la mayoría de los registros, como lo anteriormente mencionado en el apartado de Parámetros Dinámicos analizando 1GDL con diferentes parámetros dinámicos, en los cuales representaba los valores como R y α son dependientes a la relación de esbeltez, b/h .

Con respecto a la Figura 20, nos muestra los resultados favorables, pero con menos eficiencia con respecto a los demás casos, el primer caso ($\alpha = 14.03^\circ, R = 0.75 m$), con dimensiones más pequeñas que los casos anteriores pero no presenta una mejor respuesta, involucrando los parámetros dinámicos se tiene que α influye en el comportamientos, siendo α el mayor y con un R menor entre las tres propuestas analizadas, representado resultados de una manera consistente con los resultados de la evaluación de parámetros dinámicos ASO, que nos representa la influencia de los parámetros como α y R , expresados analíticamente con la respuesta de un 1GDL equipados con sistemas de aislamiento sísmico oscilante

Así mismo se hace notar las consideraciones de los parámetros dinámicos influyentes, la propiedad dinámica α pequeñas consideran un mejor comportamiento conforme R disminuye, así mismo el diseñador tiene que hacer caso antes proponer dichos bloques para obtener un mejor desempeño para reducir los desplazamientos y aceleraciones, con todas las adecuaciones de su funcionalidad.

5.3.3 Desplazamiento del edificio de 7 niveles

Una de las mejores representaciones para la evaluación de la respuesta sísmica son los desplazamientos de la estructura, para ello se seleccionaron registrados situados en diferentes sitios dentro del territorio mexicano, de forma que los hechos causaron daños importantes en diferentes provincias de México ocurrieron en diferentes años, los sismos de 1997 $M_w=7.1$ (estación CALE), 1999 $M_w=7.4$ (estación JAMI) y 2017 $M_w=8.2$ (estación SCRUI), considerando dichos registros se analizaron los desplazamiento por nivel (Δu) y el desplazamiento relativo del edificio (u_r), representándonos el desplazamiento desde la base rígida y/u oscilante, dependiendo el caso, la escala de las ordenadas (desplazamiento) se presentaran conforme se lo más conveniente para la interpretación de los datos, y la abscisa, es el tiempo del registro empleado efectuados en el modelo anteriormente definido, analizando cada uno de los niveles, pero para una mejor representación gráfica se realizó una selección del primer, cuarto y séptimo nivel, la escala de los ejes se presenta en la misma forma en todas las estructuras, así mismo se determinó la representación de los siguiente apartados.

5.3.3.1 Historia tiempo del desplazamiento relativo por nivel

La representación del desplazamiento relativo, se enfoca cual es el movimiento total del nivel con respecto la base oscilante. De acuerdo con la Figura 22, la ordenada se presenta con el desplazamiento relativo (Δu), y la abscisa como el tiempo (t) considerado del registros (de las estaciones CALE, JAMI, SCRUI y RABO), esta forma la primera fila se consideró la estructuración de la base rígida, los sistemas con base flexibles, del primer caso al tercer caso se presentaron de arriba hacia abajo respectivamente, enfocando caso por caso nos podremos percatar que tendencia de los colores en el cual la menos predominante es referida a la del primer nivel, representando al piso débil con respecto a la base oscilante en el caso con sistema ASO. En particular existe un gran desplazamiento mayor en el séptimo nivel en comparativa con los pisos inferiores.

En comparativa general de los sistemas el segundo sistema con ASO ($\alpha = 7.125^\circ$, $R = 1 m$), presenta la mayor eficacia en la reducción de los desplazamientos. Sin embargo, el tercer sistema ($\alpha = 7.125^\circ$ y $R = 2.02 m$) con ASO percibe una tendencia más cercana al segundo sistema, relacionando las propiedades dinámicas, la relación de esbeltez y el ángulo α , son iguales, comparativamente con respecto con el primer caso ($\alpha = 14.03^\circ$, $R = 0.76 m$) son mejores resultados, donde los parámetros dinámicos son menores la capacidad de reducir los desplazamientos beneficia. De acuerdo con los graficas de las estaciones se tiene una reducción entre del 10% – 18% con respecto al sistema de la base convencional, efectuando diferentes resultados por las diversas capacidad de respuesta ante los registros, efectuando análisis semejantes como la evaluación de las propiedades dinámicas que presento diferentes contenido de frecuencias con respecto a los detalles de la respuesta estructural ante distintas propiedades dinámicas, enfocando en resultados desiguales entre si.

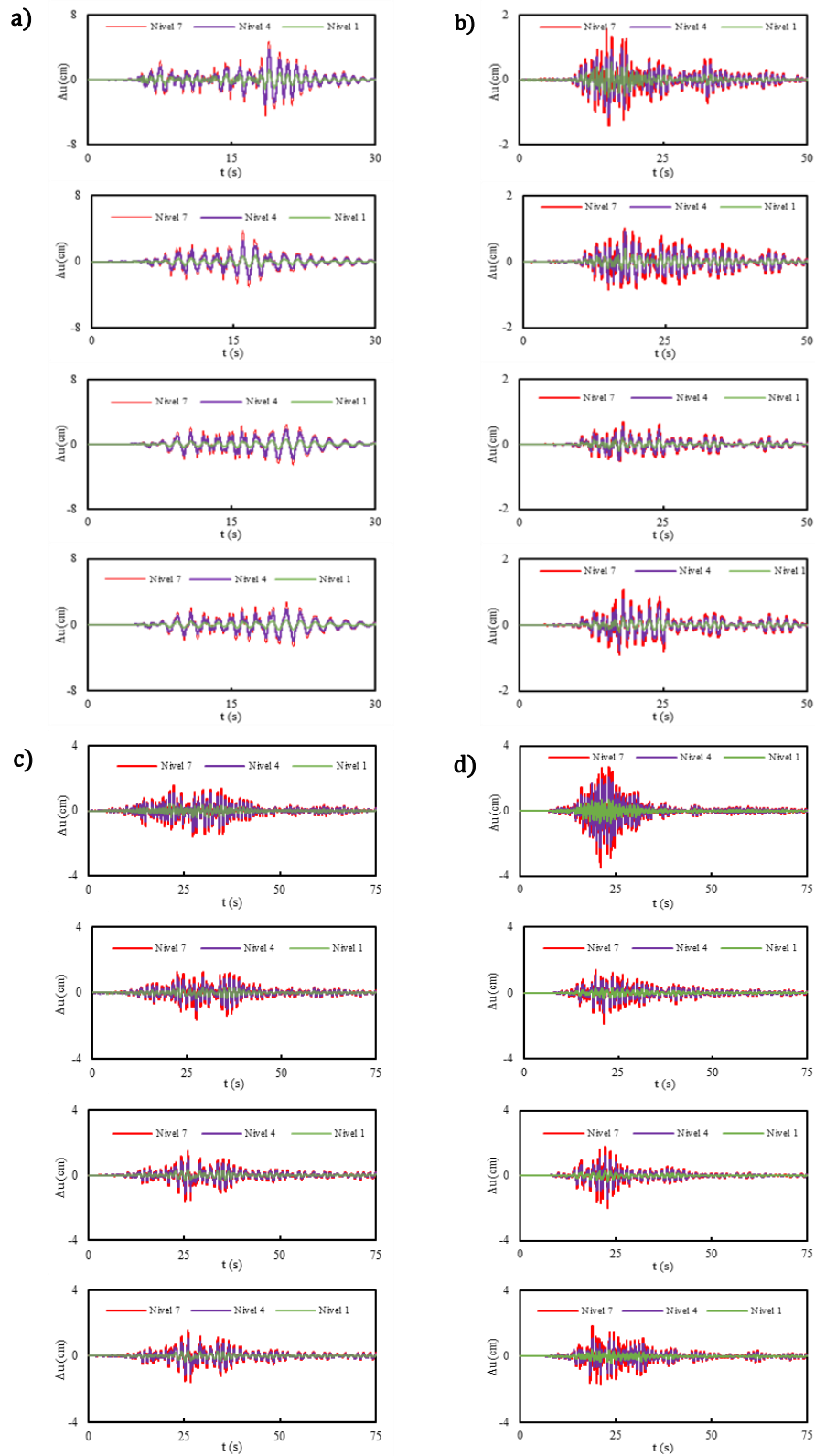


Figura 22. Desplazamiento relativo de cada uno de los niveles, estaciones a) CALE, b) JAMI, c) SCRU, y d) RABO sistema de base rigida en la primera fila de arriba a bajo, los sistemas con ASO, del primer caso al tercer caso desde la segunda fila hasta la cuarta fila respectivamente.

5.3.3.2 Historia tiempo del desplazamiento relativo del sistema

El desplazamiento relativo del edificio se considera un desplazamiento total de la estructura desde la base oscilante o en su base rígida hacia ultimo nivel, en contraste a los anteriores gráficos considera solo el movimiento de total sistema. En la Figura 21, la ordenada se presenta con el desplazamiento relativo (u_r), y la abscisa como el tiempo (t) considerado del registros, de esta forma la primera fila se consideró la estructuración de la base rígida, los sistemas con base flexibles, del primer caso al tercer caso se presentaron de arriba hacia abajo, en la primera columna, la estación CALE se presenta con movimientos dispersos a la de la base oscilante, pero con menores efectos, en las columnas de las estaciones JAMI, SCRU, y RABO presentan resultados más cercanos a movimiento de la base oscilante, apreciando que los efectos de reducción de los desplazamientos se pueden visualizar mejor con las propiedades dinámicas del caso 2, una constante visualización de los favorables resultados para dicho caso, y los resultados que muestras los parámetros dinámicos, α y R , como lo mencionan ^[1] Houser (1963) y ^[18,19] Markis (2014 a. b.), determinando las columnas independientes más pequeñas tiene una mejor facilidad de oscilar, favoreciendo la reducción de la demanda de las cargas sísmicas.

La descripción de cada uno de los efectos de la reducción de los desplazamientos dependió de ciertas características como la aceleración del suelo (\ddot{u}_g) y las propiedades dinámicas de los elementos (α y R), los efectos de reducción del primer caso ($\alpha = 14.03^\circ$ y $R = 0.75 m$) son del 8% – 14%, en el segundo caso ($\alpha = 7.125^\circ$ y $R = 1.0 m$) la reducción están el orden del 10% - 18%, para el tercer caso ($\alpha = 7.125^\circ$ y $R = 2.02 m$) se presentan con una reducción del 10- 17%, la estación que presento diferentes condiciones de reducción es CALE, presentando los menores efectos de reducción, caso contrario de SCRU y RABO, presentando estaciones con las mayores porcentajes de reducción de efectos, la repuesta se presenta de mejor manera ante las adecuaciones del equipamientos del sistema ASO, representadas con las ecuaciones 2.1, de forma que ante una implementación de un ángulo α de menor escala, será mayor la capacidad de reducción de efectos.

Tabla 4. Porcentaje de reducción del u_r (desplazamiento relativo), con respecto a las estaciones SCRU, CALE, JAMI en comparación del sistema de empotramiento convencional

Caso	Porcentaje de reducción del
	u_r
Primer	8 % – 14%
Segundo	10% – 18%
Tercer	10 – 17%

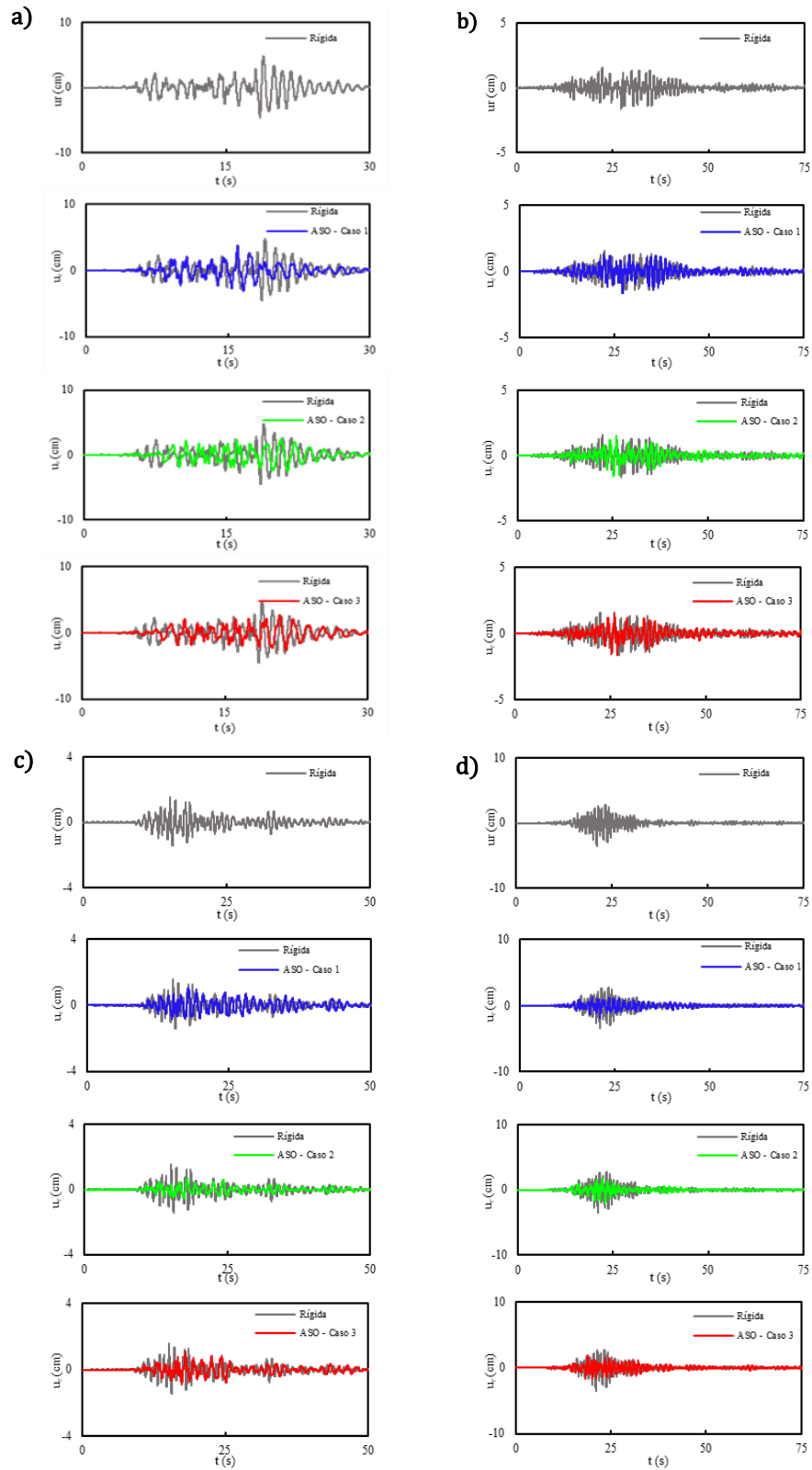


Figura 23. Desplazamiento relativo del edificio, estaciones a) CALE, b) JAMI, c) SCRU y d) RABO, sistema de MGD de base rígida en la primera fila de arriba a abajo, los sistemas con ASO, del primer caso al tercer caso se ubican desde la segunda fila hasta la cuarta fila respectivamente.

5.3.4 Aceleraciones de piso del edificio de 7 niveles

La respuesta sísmica del edificio con y sin sistemas ASO se inspecciona aún más al obtener respuesta historia tiempo en término de intensidades considerados en la sección anterior, desplazamiento relativo por nivel, desplazamiento relativo del edificio, de forma que están sujetas a registros originados de las estaciones CALE, JAMI, SCRÚ y RABO. Ahora bien, se evaluará la aceleración (\ddot{u}), en términos de aceleración por nivel, aceleración relativa de por nivel ($\Delta\ddot{u}$), y la aceleración relativa del sistema (\ddot{u}_r). En términos de control de aceleración, es conveniente estudiar la respuesta dinámica de sistemas aislados a la acción de sismos intensos, para determinar la viabilidad que implica el implementar sistemas de columnas oscilantes, las características geométricas y dinámicas de los marcos elásticos se definieron anteriormente.

5.3.4.1 Historia de tiempo de la aceleración por nivel

Ahora bien, la aceleración relativa que se produce en cada uno de los niveles se representa en la Figura 22, de forma que se analiza la intensidad de las aceleraciones (g) con respecto al tiempo en segundos (s), considera desde la influencia del piso inferior y/o la base oscilante sobre el piso superior, por lo que cada una de las representaciones se toma con un línea sólida colorida, que corresponde a la aceleración relativa de los sistemas con y sin ASO, de forma que la primera fila nos representa la estructura con sistema de base rígida, y los casos de sistemas con ASO se presentan en orden de arriba hacia abajo.

De acuerdo con la repuesta de la aceleración relativa de cada uno de los niveles se presenta similitud entre los niveles, destacando la aceleración relativa del primer nivel de forma general en los casos presentados. De acuerdo con la implementación del sistema de aislamiento, se observa que los efectos de la reducción de la aceleración son notorios, pero favoreciendo los caso 2 y 3 (tercera y cuarta fila) con propiedades dinámicas semejantes entre sí, como b/h y α . Disminuyendo en gran parte con respecto a la estación SCRÚ en comparación a las otras estaciones, determinando que la aceleración de los niveles mayor con respecto a la aceleración relativa en los casos de los sistemas con la implementación del sistema ASO.

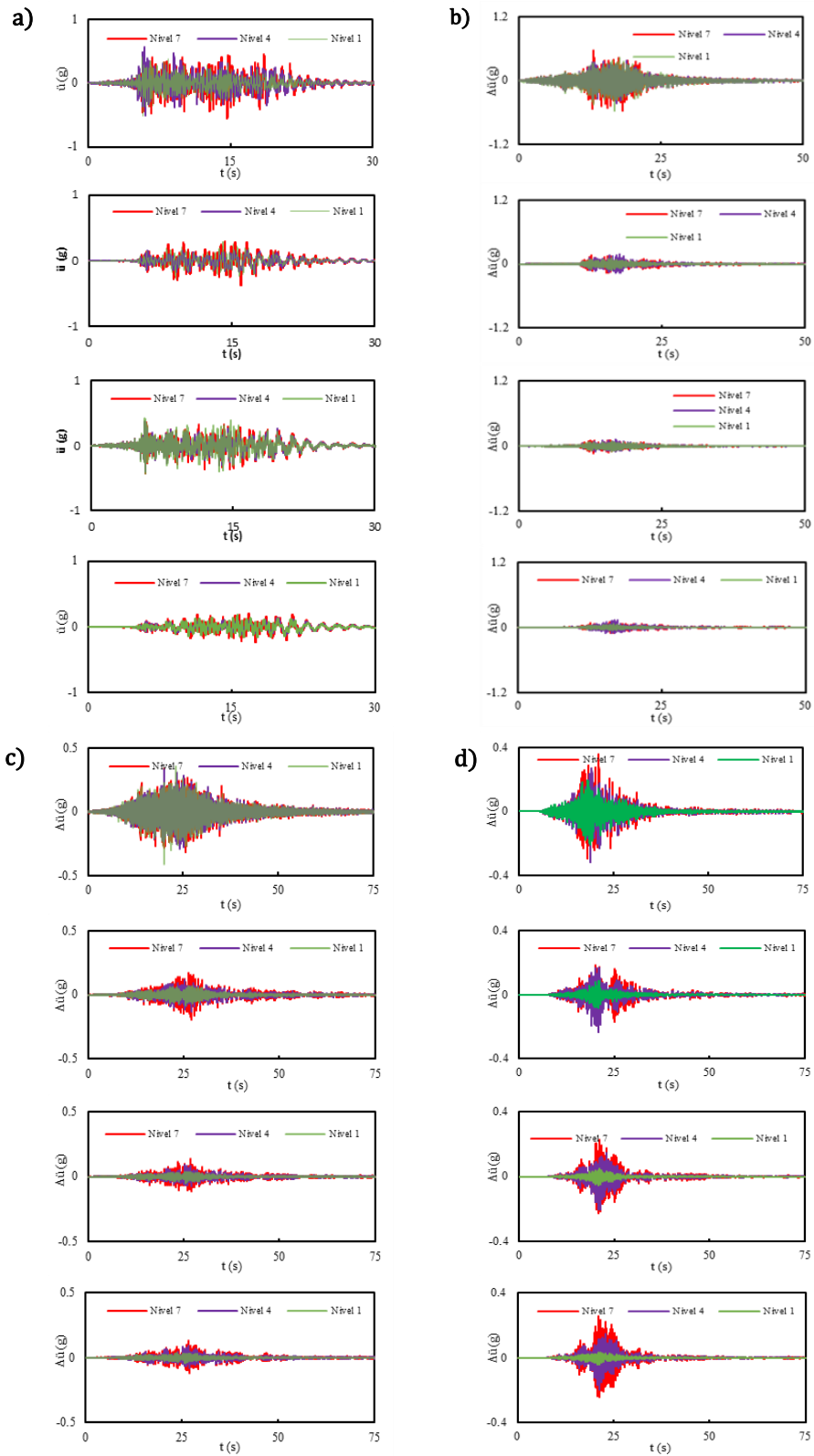


Figura 24. Aceleración relativa de los niveles estaciones a) CALE, b) JAMI, c) SCRU, y d) RABO, sistema de base rígida en la primera fila de arriba a abajo, los sistemas con ASO, del primer caso al tercer caso desde la segunda fila hasta la cuarta fila respectivamente

5.3.4.2 Historia de tiempo de la aceleración relativa del edificio

De acuerdo con los parámetros de evaluación antes mencionados, se tiene la aceleración relativa del edificio del edificio, de forma que el sistema se considera desde la base oscilante o rígida hasta la marco superior del último nivel, de esta forma en la Figura 22, la ordenada se presenta con el desplazamiento relativo (\ddot{u}_r), y la abscisa como el tiempo (t) considerado del registros, de esta forma la primera fila se consideró la estructuración de la base rígida, los sistemas con base flexibles, del primer caso al tercer caso se presentaron de arriba hacia abajo. Así mismo, la estación CALE, presenta aceleraciones relativas menores pero muy desfasadas del sistema de base rígida, esto aplica para los tres casos presentados con sistemas ASO. Ahora bien, las estaciones como JAMI y SCRU, presentan todo lo contrario, representando aceleraciones mucho menores a las de la base rígida, en los sistemas con ASO se presentan aceleraciones consistentes conforme al sistema de base rígida. Considerando las estaciones antes mencionadas, se observa que el sistema ASO que reduce más los efectos de las aceleraciones corresponden al segundo caso, que presenta un parámetro dinámico, α y la relación de aspecto menor entre los sistemas con implementación ASO.

La descripción de cada uno de los efectos de la reducción de las aceleraciones dependió de ciertas características como la aceleración del suelo (\ddot{u}_g) y las propiedades dinámicas de los elementos (α y R), los efectos de reducción del primer caso ($\alpha = 14.03^\circ$ y $R = 0.75\text{ m}$) son del 9% – 15%, en el segundo caso ($\alpha = 7.125^\circ$ y $R = 1.0\text{ m}$) la reducción están el orden del 12% - 21%, para el tercer caso ($\alpha = 7.125^\circ$ y $R = 2.02\text{ m}$) se presentan con una reducción del 12 - 20%, la estación que presento diferentes condiciones de reducción es CALE, presentando los menores efectos de reducción, caso contrario de SCRU y RABO, presentando estaciones con las mayores porcentajes de reducción de efectos, la repuesta se presenta de mejor manera ante las adecuaciones del equipamientos del sistema ASO, representadas con las ecuaciones 2.1, de forma que ante una implementación de un ángulo α de menor escala, será mayor la capacidad de reducción de efectos.

Tabla 5. Porcentaje de reducción del \ddot{u}_r (*aceleración relativa*), con respecto a las estaciones SCRU, CALE, JAMI en comparación del sistema de empotramiento convencional

Caso	Porcentaje de reducción del \ddot{u}_r
Primer	9 % – 15%
Segundo	12% – 21%
Tercer	12– 2017%

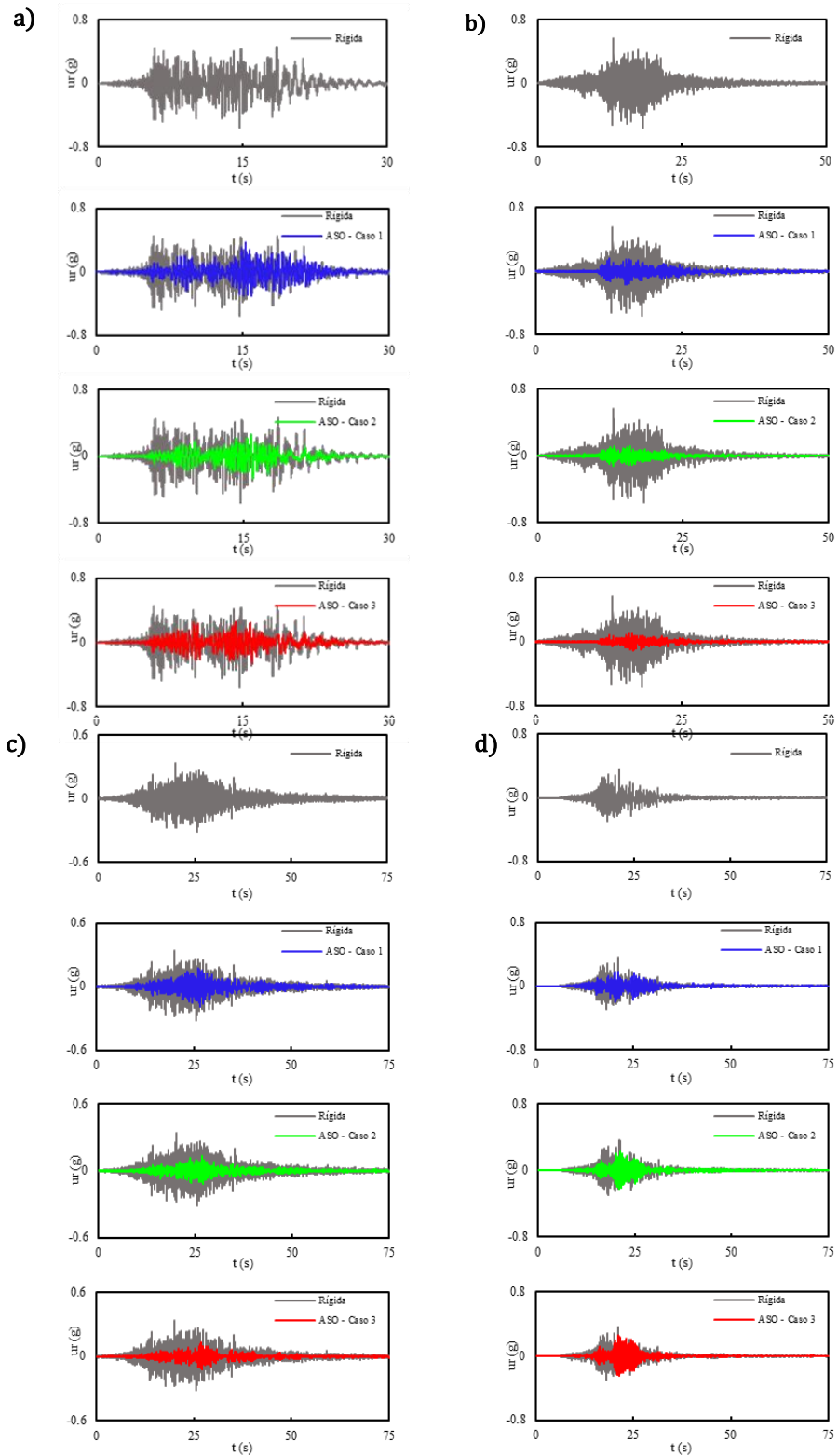


Figura 25. Aceleración relativa del edificio estaciones a) CALE, b) JAMI, c) SCRU y d) RABO sistema de MGDL de base rígida en la primera fila de arriba a abajo, los sistemas con ASO, del primer caso al tercer caso desde la segunda fila hasta la cuarta fila respectivamente.

5.3.5 Historia de desplazamientos de los bloques rígidos de balanceo

La respuesta del sistema ASO, también es vinculada con que tanto se desplaza el bloque, con la capacidad aproximada de desplazamiento del bloque nos permitiría determinar el espacio lateral necesario para desplazarse de la mejor manera, para la evaluación se pudiera considerar las dos componentes de análisis, pero con el fin de obtener una distancia determinada de diseño, se consideró solamente la componente u_{b_x} , el desplazamiento de la componente x , para ellos se utilizaron el modelo de 7 pisos con el cual se consideró el primer caso ($\alpha = 14.03^\circ$ y $R = 0.75 \text{ m}$), el segundo caso y el tercer caso ($\alpha = 7.125^\circ$ y $R = 1.0 \text{ m}$), para los cuatro registros de las estaciones antes mencionadas, para ello se determinaron los puntos en la Figura 26, representación de los puntos analizados en los bloques, u_{bc} desplazamientos del bloque en la parte central, u_{bsup} desplazamiento del bloque de la parte superior y u_{binf} desplazamiento del bloque en la parte inferior.

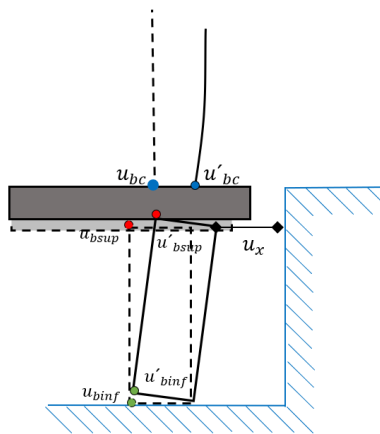


Figura 26. Representación de los puntos analizados en los bloques, u_{bc} desplazamientos del bloque en la parte central, u_{bsup} desplazamiento del bloque de la parte superior y u_{binf} desplazamiento del bloque en la parte inferior.

Así mismo se desarrollaron los gráficos de la Figura 27, que nos muestra la historia tiempo del desplazamiento de los bloques, con puntos anteriormente mencionados con la representación de los tres casos de ordenada de arriba hacia abajo respectivamente, organizadas por registro. Ahora bien, la respuesta del sistema ASO dependerá de la cantidad de movimiento de los bloques, debido a una mayor cantidad de movimiento del bloque mayor será la capacidad de desacoplar la fuerza horizontal, como lo mostrado en los gráficos de movimiento de los bloques para el primer caso que presenta las menores efectos de reducción de efectos nos presenta una menor cantidad de movimiento del bloque, para ello todo lo contrario con el segundo y tercer caso que presenta mayor capacidad de reducción de efectos por parte sistema ASO y con una mayor cantidad de movimiento de los bloques. Por lo que la respuesta del edificio equipado con el sistema de aislamiento sísmico oscilante (ASO) está directamente relacionada con el movimiento de los bloques rígidos de balanceo, de forma que entre mayor el movimiento de los bloques mayor será la capacidad de eficiencia del sistema ASO, con la consideración que se debe tomar en cuenta las condiciones de volteo, por lo que excederse del movimiento será contraproducente para la eficiencia del sistema.

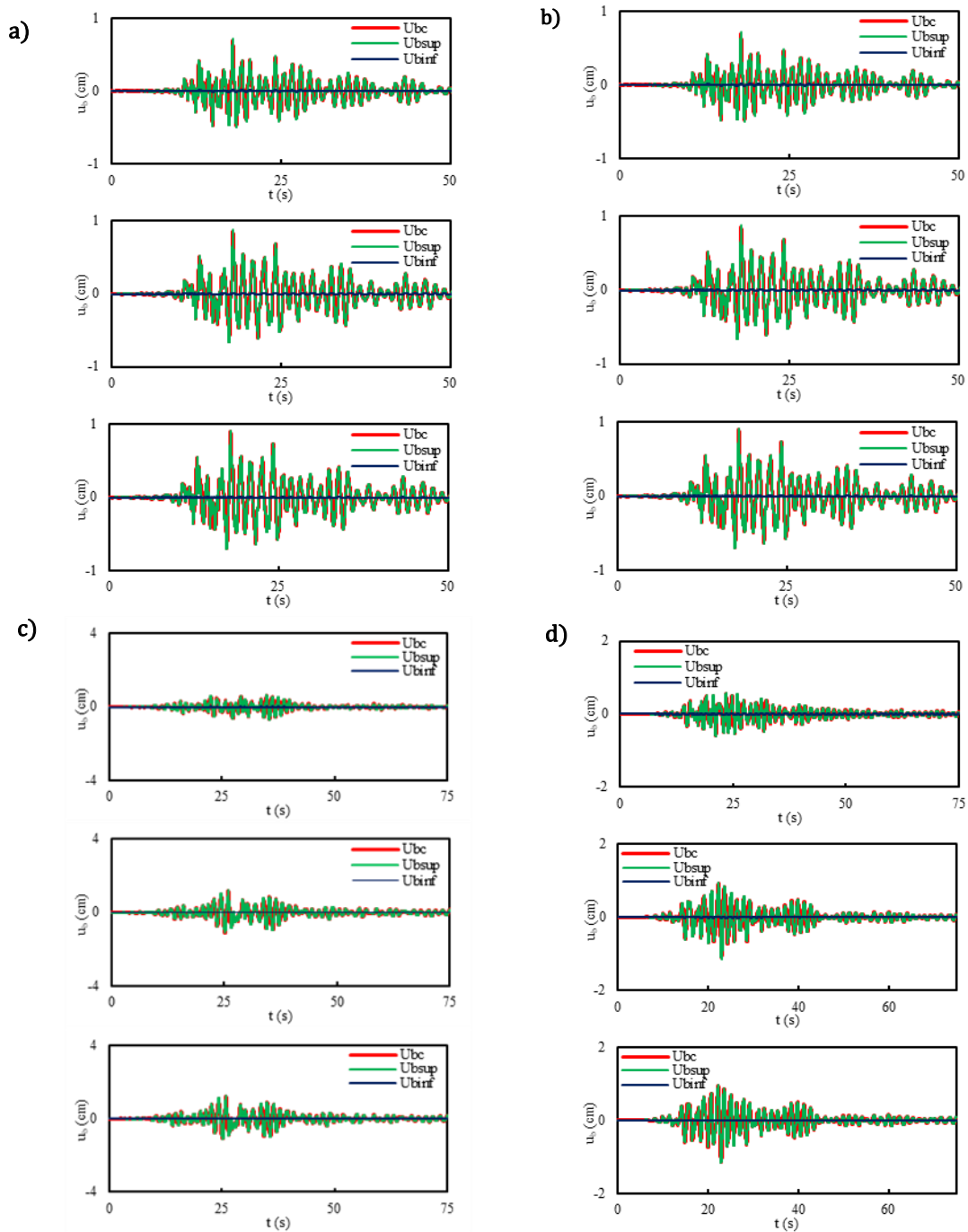


Figura 27. Desplazamiento de los bloques de las estaciones a) CALE, b) JAMI, c) SCRU y d) RABO, los sistemas equipados con ASO, del primer caso al tercer caso ordenados desde fila de arriba a abajo respectivamente

5.3.6 Respuesta máxima a lo largo de la altura del edificio

Los resultados de la evaluación estructural del edificio de 7 niveles mencionado anteriormente se pueden observar directamente en la Figura 28, se evaluaron la mediana de la respuesta a lo largo de la altura del edificio para los registros de las estaciones CALE, JAMI, SCRÚ y RABO. La Figura 28, en la cual nos muestra la respuesta a partir de la normalización de la altura del edificio. con respecto desplazamientos relativo pico y aceleraciones pico, de forma que los desplazamientos se tomó de referencia el piso (con respecto a la viga de cabeza rígida) hasta el marco ultimo nivel, mientras que la aceleración pico se normalizo con respecto a la media aceleración desde la base oscilante con respecto a la media de la aceleración del nivel correspondiente hasta el marco del último nivel, cuando el edificio está provistos de sistemas ASO (líneas coloridas sólidas) versus el caso sin sistema ASO (línea negra punteada).

La representación de dichos gráficos es evidente la eficiencia en la incorporación de los sistemas ASO, la diferencia en la propiedades dinámicas también claro, enfocando a la respuesta de los cuatro registro la eficiencia del sistema del segundo caso ($\alpha = 7.125^\circ$ y $R = 1.0\text{ m}$) presenta una mayor reducción, percatándonos en casos particulares como SCRÚ y NILT (Anexos, Figura A 3) presentan respuesta muy semejantes entre el segundo y tercer caso ($\alpha = 7.125^\circ$ y $R = 2.02\text{ m}$), de acuerdo con lo evaluado con respecto a la Figura 28, mostrándonos los espectros de respuesta de desplazamiento y aceleraciones, donde el para α es constante y la variación de R nos representa resultados idénticos entre estos cambios de parámetro R , confirmando con la respuesta a lo largo del edificio en los anteriores registros. Ahora bien con la respuesta a lo largo del edificio del tercer caso ($\alpha = 14.03^\circ$ y $R = 0.75\text{ m}$) nos presenta una reducción de los efectos sísmicos pero no una gran diferencia o mejora con respecto a sistemas como con menor α (es decir, $\tan(b/h)$), de forma directa que las propiedades de la relación de esbeltez (b/h) es una de las propiedades más eficientes para determinar la viabilidad de la implementación del sistema ASO, se aprecian tanto como los desplazamientos y aceleraciones se aprecian una reducción considerables a lo largo del mismo edificio.

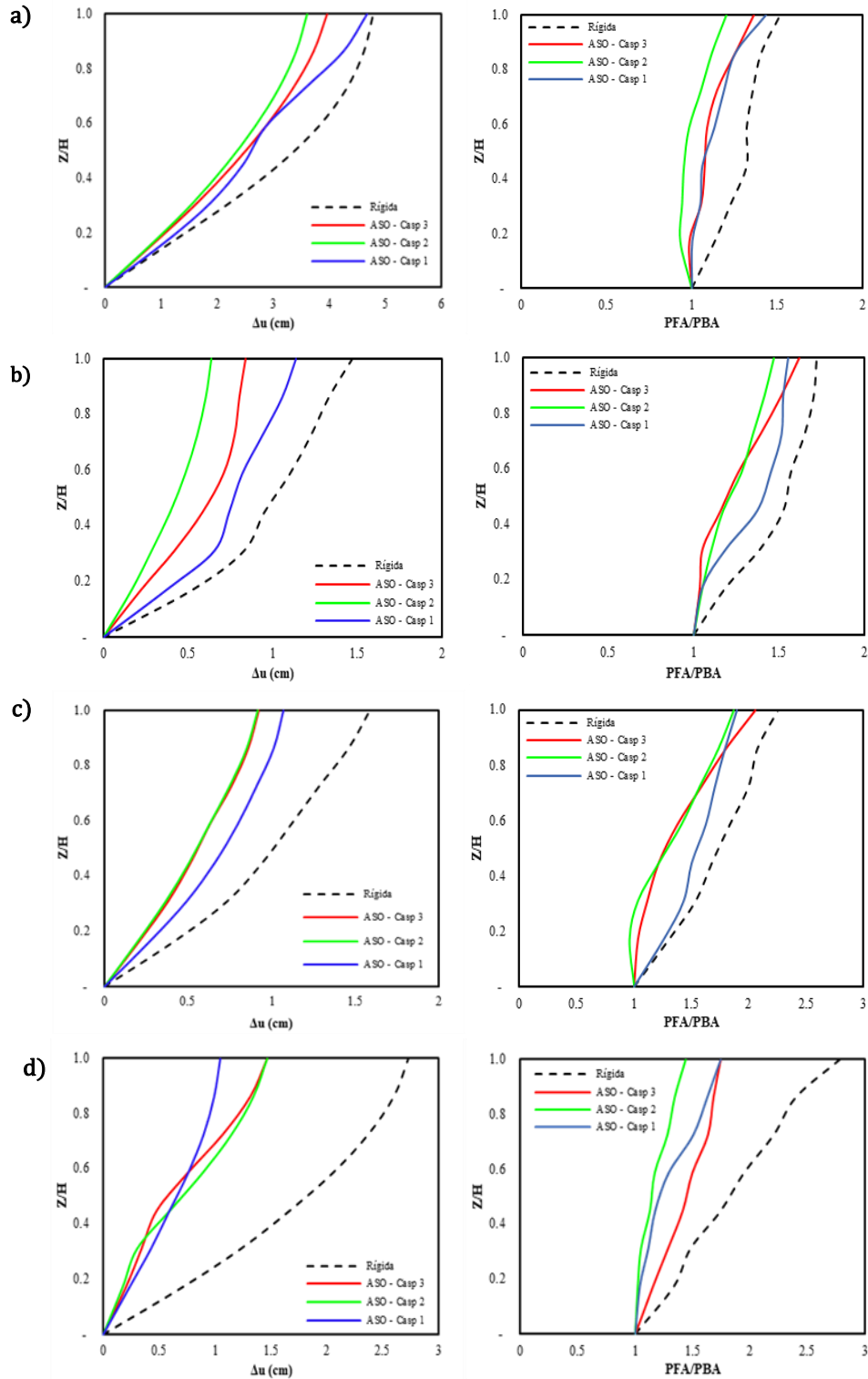


Figura 28. Respuesta a lo largo del edificio normalizado, de las estaciones a) CALE, b) JAMI, c) SCRU y d) RABO, la mediana de la respuesta pico de desplazamiento (izquierda) y de la respuesta pico de la mediana de la aceleración del piso normalizada (derecha) a lo largo de la altura relativa (z/H) del edificio.

VI. CONCLUSIONES

En esta tesis se presentó el estudio del sistema de Aislamiento Sísmico Oscilante (ASO) como un sistema de protección contra movimientos sísmicos del suelo.

- Se observó que las estructuras soportadas sobre este sistema ASO eran capaces de reducir las demandas laterales y el evitar del sistema estructural principal a través del levantamiento y balanceo.
- La comparación se extiende a un marco lineal de concreto reforzado (CR); se consideran marcos de CR de 7 niveles con tres crujías.
- Se encontró que el sistema ASO reduce significativamente las demandas de aceleración y desplazamientos en los marcos estructurales principales, en un 9% hasta 20 % de los desplazamientos y aceleraciones, de acuerdo al caso y a la excitación sísmica.
- También se encontró que los sistemas ASO son más eficientes en la reducción de la aceleración y desplazamiento lateral de la estructura principal cuando la relación de aspecto, b/h y el tamaño, R , de las columnas independientes disminuyen, aunque la estabilidad de balanceo del sistema ASO se reduce por lo que el ingeniero debe revisar esta condición

Este sistema de aislamiento sísmico oscilante (ASO) permite reducir los efectos de las fuerzas internas, y sus efectos, como las aceleraciones sísmicas, y los desplazamientos de estructuras sujetas a diferentes cargas sísmicas. Esto se logra analizando sistemas de un grado de libertad (1GDL) y múltiples grados de libertad (MGDL). En ambos casos se plantea el uso de sistemas ASO y el caso de sistemas de 1GDL y edificios sin sistemas ASO.

Partiendo de los parámetros geométricos del sistema ASO, como son los analizados en el presente trabajo, los bloques rígidos de balanceo se caracterizan por el parámetro α y el tamaño (R), en las cuales las columnas independientes con el mismo parámetro α pero dimensiones geométricas distintas tiene resultados semejantes entre sí, al mismo tiempo las propiedades geométricas como el tamaño (R) y la relación de aspecto (b/h) con de dimensiones menores presentará mejores resultados. Así mismo, las columnas independientes en cuales la propiedad dinámica α sea de menores dimensiones presentará una mayor capacidad de reducir los efectos tanto aceleraciones laterales y desplazamientos de la estructura principal, siendo una responsabilidad como proyectista definir estos bloques, debido a que la relación de aspecto (b/h) influye en la condición de volcamiento, siendo lo más convenientes un equilibrio entre dichas propiedades geométricas.

Ahora bien, los resultados de los sistemas de MGDL (es decir el edificio de 7 niveles), desplantado sobre el sistema ASO, son consistentes con respecto a los 1GDL sobre sistemas ASO, validando la respuesta de las ecuaciones gobernantes de movimiento utilizadas como herramienta para evaluar la respuesta estructural de los edificios con sistemas ASO.

Por lo que se considera al modelo empleado para evaluar la adecuación o implementación de sistemas ASO como una alternativa prometedora para definirla como una estructura sismorresistente.



Sin embargo, el diseñador o proyectista tiene que considerar que existe un compromiso con la estabilidad y la reducción de la demanda sísmica, al seleccionar los parámetros dinámicos de las columnas independientes del sistema ASO, debido a que si considera parámetros considerablemente pequeños de la relación de aspecto y tamaño podría concluir una inestabilidad oscilante.

Los resultados del presente trabajo de tesis podrían ser útiles para los aquellos ingenieros que les interese seguir explorando el uso de los sistemas de aislamiento sísmico oscilante (ASO) como una innovación en la estructura sismorresistente. Por los altos daños en edificaciones de vivienda en el país, la inversión necesaria para reducir el riesgo sísmico y la alta sismicidad en nuestro país, debemos seguir explorando en nuevos sistemas como el estudiado, que permita reducir el riesgo sísmico de las edificaciones mexicanas y que sean económicamente factibles a la realidad económica de la sociedad mexicana.

Referencias

- [1] Zhong C, Christopoulos C. (2022), “**Shear-controlling rocking-isolation podium system for enhanced resilience of high-rise buildings**”, *Earthquake Engng Struct Dyn.* 2022; 51:1363–1382.
- [2] Milne, J. (1885), “**Seismic experiments**”, *Transactions of the Seismological Society of Japan*, (8), pp. 1-82
- [3] Housner, G. W. (1963), “**The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes**”, *Bulletin of the seismological society of America*, 53(2), pp. 403-417.
- [4] Yim, C. S., Chopra, A., & Penzien, J. (1980), “**Rocking response of rigid bodies to earthquakes**”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 8, pp. 565-587.
- [5] Aslam, M., Godden, W. and Scalise, T. (1980), “**Earthquake rocking response of rigid bodies**”, *Journal of the Structural Division ASCE*, 106, pp. 377-392.
- [6] Ishiyama, Y. (1982), “**Motions of rigid bodies and criteria for overturning by earthquake excitations**”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 10(5), pp. 635-650.
- [7] Psycharis, I. N., & Jennings, P. C. (1983), “**Rocking of slender rigid bodies allowed to uplift**”, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 11(1), pp. 57-76.
- [8] Koh, A. S., Spanos, P. D., & Roesset, J. M. (1986), “**Harmonic rocking of rigid block on flexible foundation. Journal of engineering mechanics**”, 112(11), pp. 1165-1180.
- [9] Shenton, H. W. (1996), “**Criteria for initiation of slide, rock, and slide-rock rigid-body modes**”, *Journal of Engineering Mechanics*, 122(7).
- [10] Makris, N. and Roussos, Y. (1998), “**Rocking response and overturning of equipment under horizontal pulse-type motions**”, Report PEER-1998/05, College of Engineering, University of California, October.
- [11] Makris, N. (2014a), “**A half-century of rocking isolation**”, *Earthquakes and Structures*, 7(6), pp. 1187-1221.
- [12] Makris, N. (2014b), “**The role of the rotational inertia on the seismic resistance of free-standing rocking columns and articulated frames**”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(5), pp. 2226-2239.
- [13] Zhang, J., & Makris, N. (2001), “**Rocking response of free-standing blocks under cycloidal pulses**”, *Journal of Engineering Mechanics*, 127(5), pp. 473-483.
- [14] Bachmann, J. A., Vassiliou, M. F., & Stojadinović, B. (2017), “**Dynamics of rocking podium structures**”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 46(14), pp. 2499-2517.
- [15] Cherepinskiy, Y. (2004, August), “**Seismic isolation of buildings with application of the kinematics bases**”, In 13th world conference on earthquake engineering.
- [16] Smirnov, V., Eisenberg, J., & Vasileva, A. (2004, August), “**Seismic isolation of buildings and historical monuments**”, Recent developments in Russia. In Proceedings of the 13th world conference on earthquake engineering, Vancouver.
- [17] Uzdin, A. M., Doronin, F. A., Davydova, G. V., Avidon, G. E., & Karlina, E. A. (2009), “**Performance analysis of seismic-insulating kinematic foundations on support elements with negative stiffness**”, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 46(3), pp. 99-107.
- [18] Eisenberg, J. M., & Smirnov, V. I. (2012), “**Building seismic isolation in Russia without rubber and with rubber**”, In ISET golden jubilee symposium.
- [19] Makris, N. (2014a), “**A half-century of rocking isolation**”, *Earthquakes and Structures*, 7(6), pp. 1187-1221.

- [20] Makris, N. (2014b), “**The role of the rotational inertia on the seismic resistance of free-standing rocking columns and articulated frames**”, Bulletin of the Seismological Society of America, 104(5),
- [21] Bachmann, J. A., Jost, C., Studemann, Q., Vassiliou, M. F., & Stojadinović, B. (2016), “**An analytical model for the dynamic response of an elastic 1GDL system fixed on top of a rocking single-storey frame structure: experimental validation**”, In Proceedings of the 7th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (Vol. 3, pp. 5023-5062).
- [22] Vassiliou, M. F., Cengiz, C., Dietz, M., Dihoru, L., Broccardo, M., Mylonakis, G., & Stojadinovic, B. (2021a), “**Dataset from the shake table tests of a rocking podium structure**”, Earthquake Spectra, 37(3), pp. 2107-2125.
- [23] Vassiliou, M. F., Broccardo, M., Cengiz, C., Dietz, M., Dihoru, L., Gunay, S., ... & Stojadinovic, B. (2021b), “**Shake table testing of a rocking podium: Results of a blind prediction contest**”, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 50(4), pp. 1043-1062.
- [24] Kavvadias, I. E., Bantilas, K. E., Vasiliadis, L., & Elenas, A. (2021), “**The effect of impact modeling on the seismic response of multi-storey podium structures**”, 8th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. Streamed from Athens, Greece, 27–30 June.
- [25] Bantilas, K. E., Kavvadias, I. E., & Vasiliadis, L. K. (2021a), “**Analytical investigation of the seismic response of elastic oscillators placed on the top of rocking storey**”, Bulletin of Earthquake Engineering, 19(2), pp. 1249-1270.
- [26] Bantilas, K. E., Kavvadias, I. E., Vasiliadis, L. K., & Elenas, A. (2021a), “**Seismic fragility and intensity measure investigation for rocking podium structures under synthetic pulse-like excitations**”, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 50(13), pp. 3441-3459.
- [27] Servicio Sismológico Nacional (2022),” **Mapa de sismicidad anual**”, Instituto de Geofísica de la UNAM
- [28] Mc Cormac y H. Brown, (2011) Reinforced concrete design, 8va Ed., Grup Afámela, pp.264.
- [29] Pinochet J., C. de la Llera, (2006), “**Analysis of a kinematic self-centring seismic isolator**”, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, pp. 1534.
- [30] Bantilas, K. E., Kavvadias, I. E., & Vasiliadis, L. K. (2021b), “**Analytical investigation of the seismic response of elastic oscillators placed on the top of rocking storey**”, Bulletin of Earthquake Engineering, 19(2), pp. 1249-1270.
- [31] Chopra, S. and Meindl, P. (2004),”**Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation**”. Second Edition, Person and Prentice Hall, New Jersey pp. 256-257.

ANEXOS A

Figura A 1. Desplazamiento relativo de cada uno de los niveles, estaciones a) LANE, b)NILT, c)HMTT, sistema de base rígida en la primera fila de arriba a bajo, los sistemas con ASO, del primer caso al tercer caso desde la segunda fila hasta la cuarta fila respectivamente.	63
Figura A 2.Desplazamiento relativo total de cada uno de los entrepiso, estaciones a) LANE, b)NILT, c) HMTT, sistema de base rígida en la primera fila de arriba a bajo, los sistemas con ASO, del primer caso al tercer caso desde la segunda fila hasta la cuarta fila respectivamente.	64
Figura A 3. Respuesta a lo largo del edificio normalizado, de las estaciones a) LANE, b)NILT, c)HMTT, la mediana de la respuesta pico de desplazamiento (izquierda) y de la respuesta pico de aceleración del piso mediana normalizada (derecha) a lo largo de la altura relativa (z/H) del edificio.	65
Figura A 4. Aceleración relativa de cada uno de los niveles, estaciones a) LANE, b)NILT y c)HMTT, sistema de base rígida en la primera fila de arriba a bajo, los sistemas con ASO, del primer caso al tercer caso desde la segunda fila hasta la cuarta fila respectivamente.	66
Figura A 5. Aceleración relativa del sistema, estaciones a) LANE, b)NILT y c)HMTT, sistema de base rígida en la primera fila de arriba a bajo, los sistemas con ASO, del primer caso al tercer caso desde la segunda fila hasta la cuarta fila respectivamente.	67
Figura A 6. Comparativa del sistema 1GDL y un edificio del desplazamiento relativo, estaciones a) LANE, b)NILT, d)HMTT,, sistema de base rígida en la primera fila de arriba a abajo, los sistemas con ASO, del primer caso al tercer caso desde la segunda fila hasta la cuarta fila respectivamente.....	68
Figura A 7. Comparativa del sistemas 1GDL y un edificio de la aceleración relativa, estaciones a) LANE, b)NILT, y c)HMTT, sistema de base rígida en la primera fila de arriba a abajo, los sistemas con ASO, del primer caso al tercer caso desde la segunda fila hasta la cuarta fila respectivamente	69
Figura A 8. Desplazamiento de los bloques de las estaciones a) LANE, b) NILT y c) HMTT, los sistemas equipados con ASO, del primer caso al tercer caso ordenados desde fila de arriba a abajo respectivamente	70



Tabla A. 1 Dimensiones de los elementos estructurales del edificio de 7 niveles.

Propiedades	Dimensiones	Armado
C1	35 x 35	4#8+2#4 E#2@15
C2	35 x 35	4#6+2#4 E#2@15
C3	35 x 35	6#4 E#2@15
V1	45 x 30	2#8-3#4 E#2@10
V2	45 x 30	3#6-3#4 E#2@10
V3	45 x 30	2#6+1#4-3#4 E#2@10
V4	45 x 30	2#6/3#4 E#2@10
V5	45 x 30	4#4/3#4 E#2@10



Tabla A. 2 Ubicación por nivel de las columnas

Elemento	Ubicación
C1	Nivel
C2	Nivel 2 - 4
C3	Nivel 5 - 7

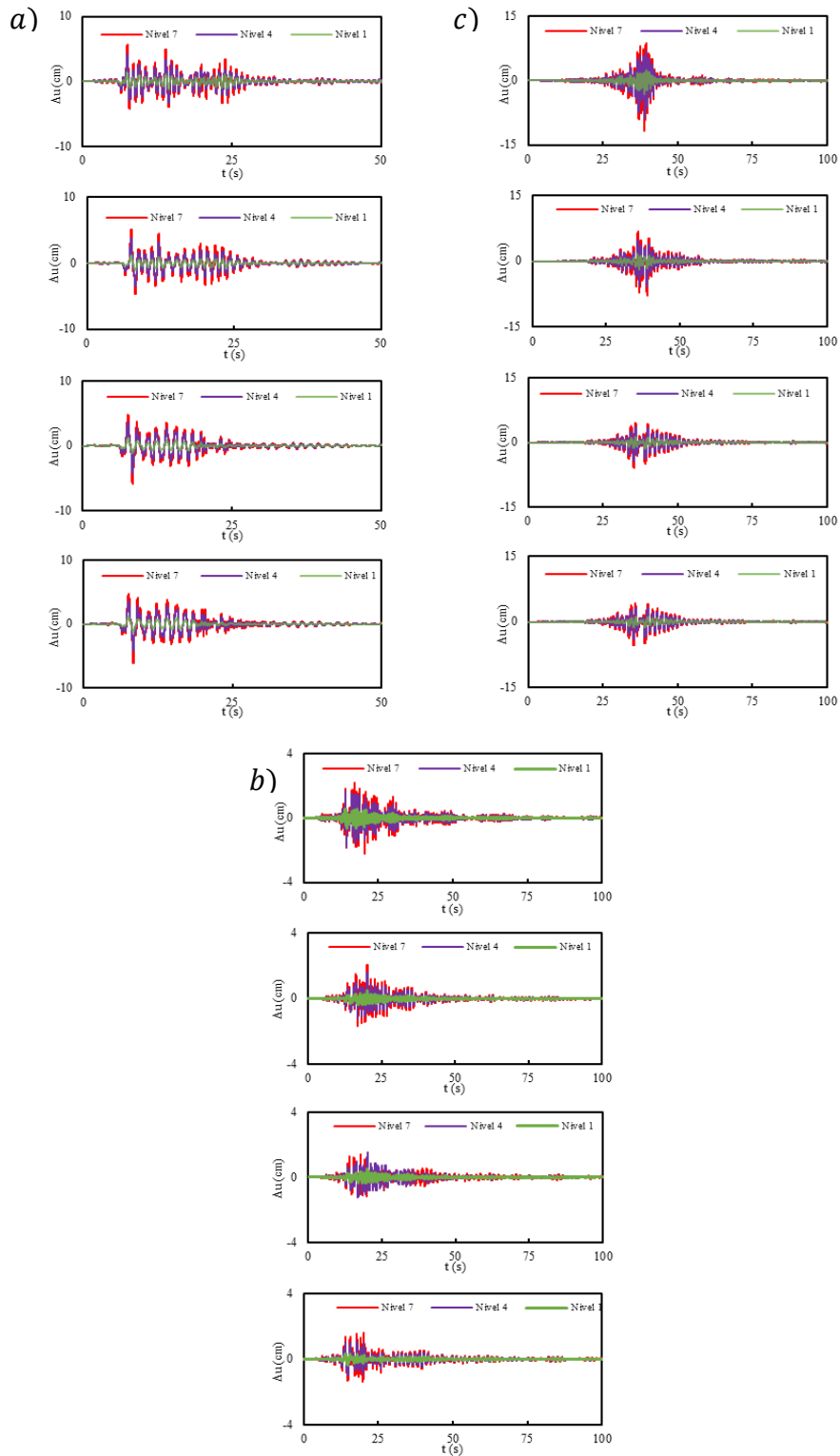


Figura A 1. Desplazamiento relativo de cada uno de los niveles, estaciones a) *LANE*, b) *NILT*, c) *HMTT*, sistema de base rígida en la primera fila de arriba a bajo, los sistemas con ASO, del primer caso al tercer caso desde la segunda fila hasta la cuarta fila respectivamente.

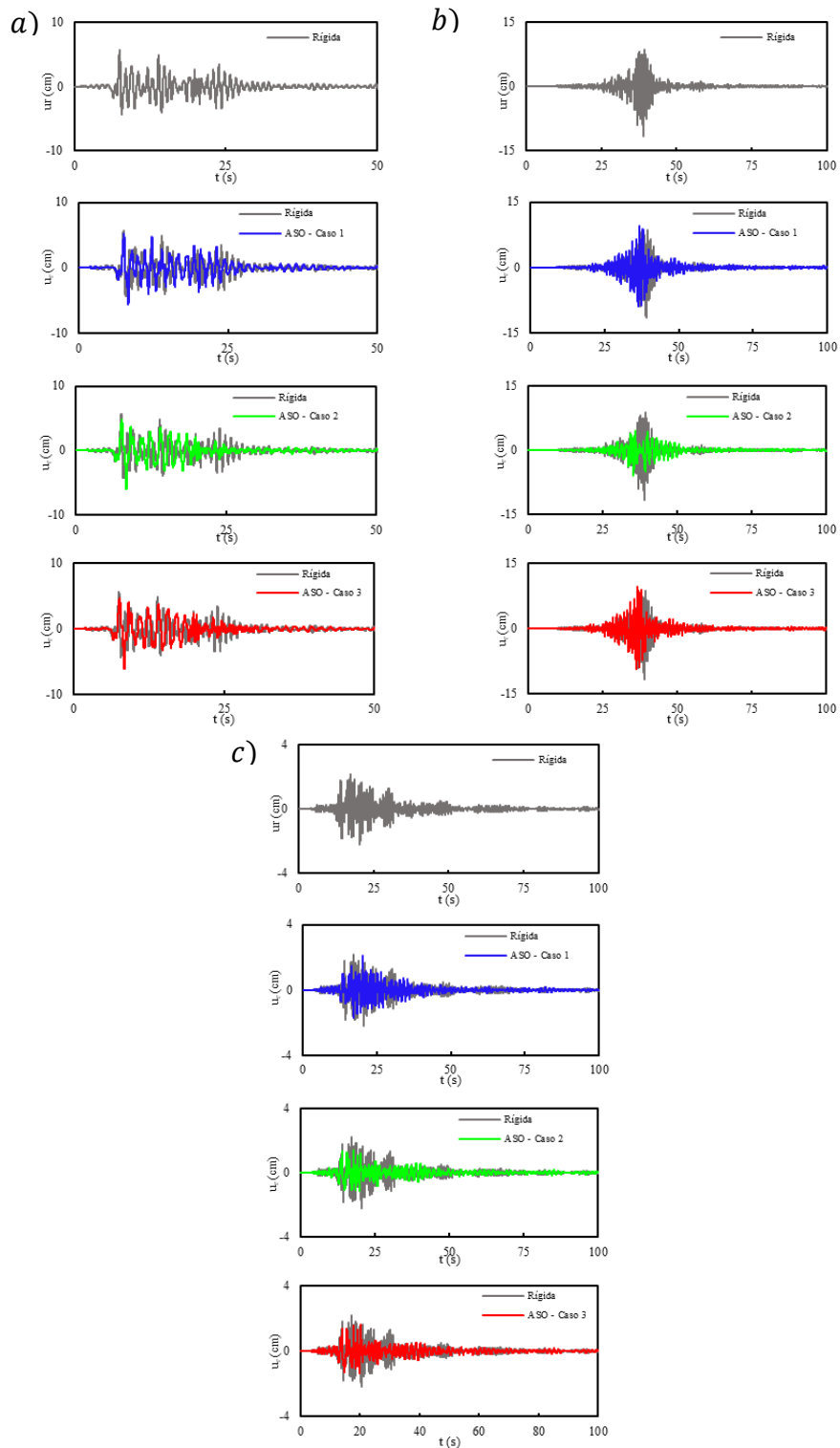


Figura A.2. Desplazamiento relativo total de cada uno de los entrespiso, estaciones a) *LANE*, b) *NILT*, c) *HMTT*, sistema de base rígida en la primera fila de arriba a bajo, los sistemas con ASO, del primer caso al tercer caso desde la segunda fila hasta la cuarta fila respectivamente.

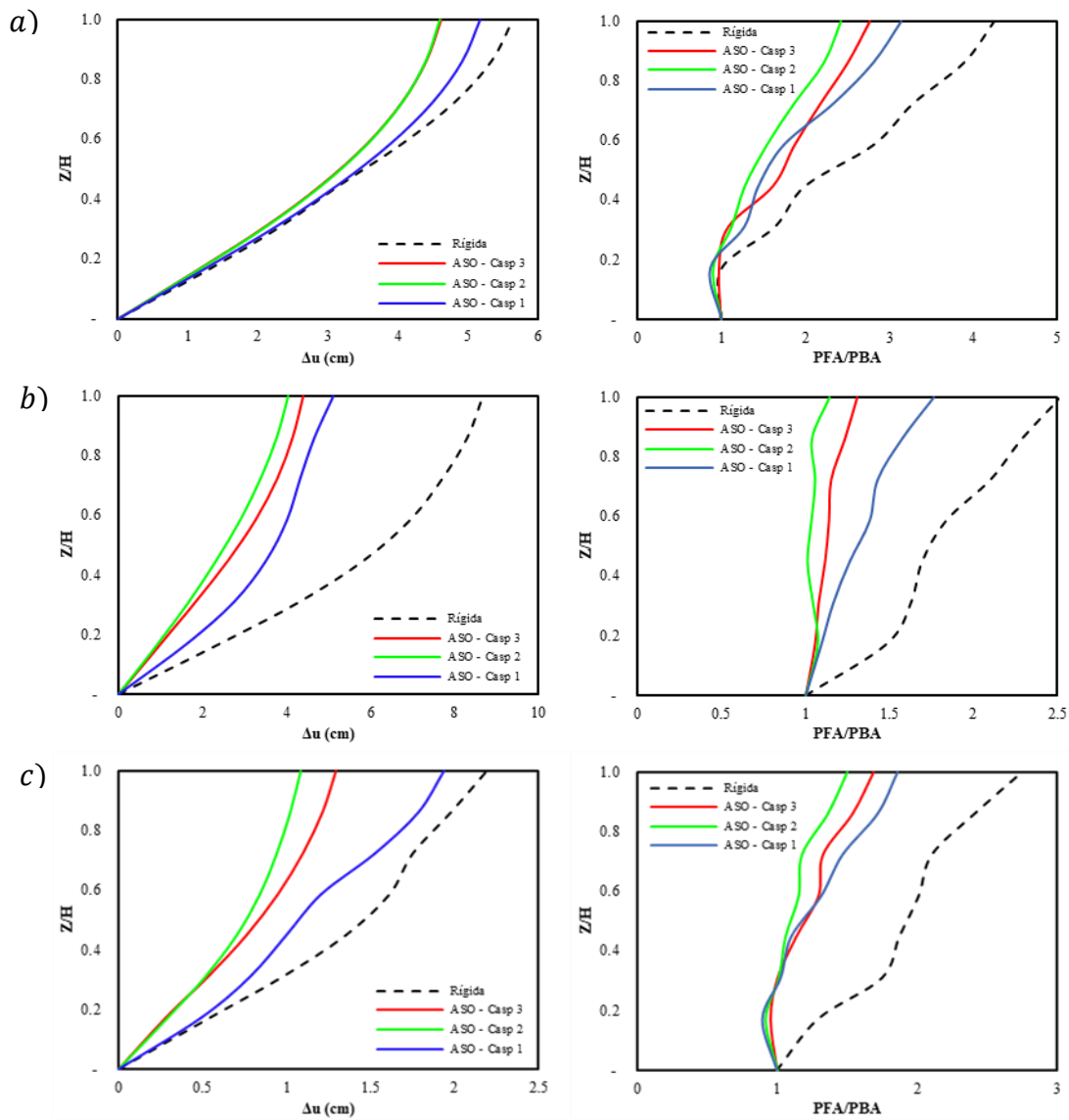


Figura A.3. Respuesta a lo largo del edificio normalizado, de las estaciones *a)* LANE, *b)* NILT, *c)* HMTT, la mediana de la respuesta pico de desplazamiento (izquierda) y de la respuesta pico de aceleración del piso mediana normalizada (derecha) a lo largo de la altura relativa (z/H) del edificio.

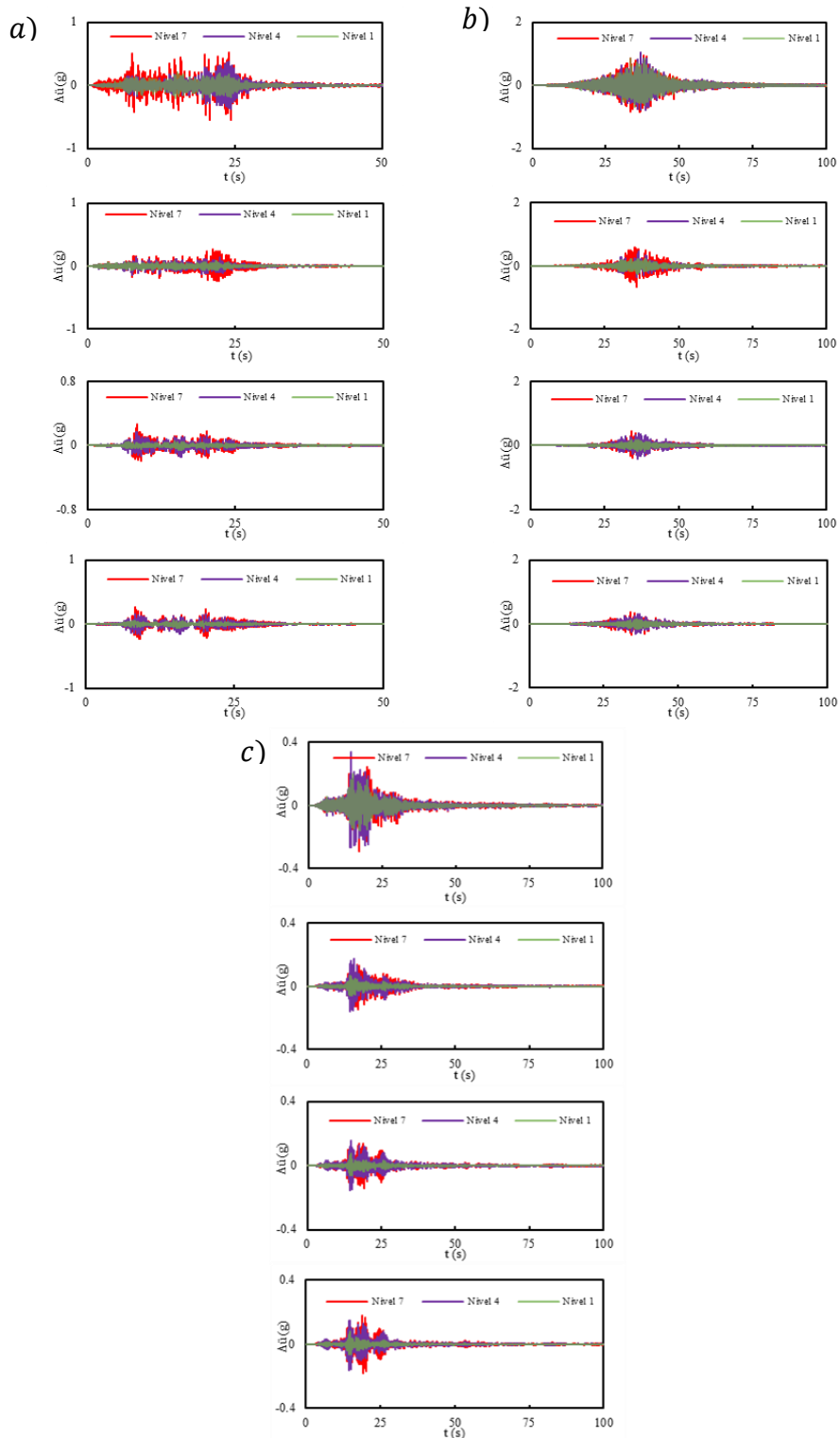


Figura A 4. Aceleración relativa de cada uno de los niveles, estaciones a) LANE, b) NILT y c) HMTT, sistema de base rígida en la primera fila de arriba a bajo, los sistemas con ASO, del primer caso al tercer caso desde la segunda fila hasta la cuarta fila respectivamente.

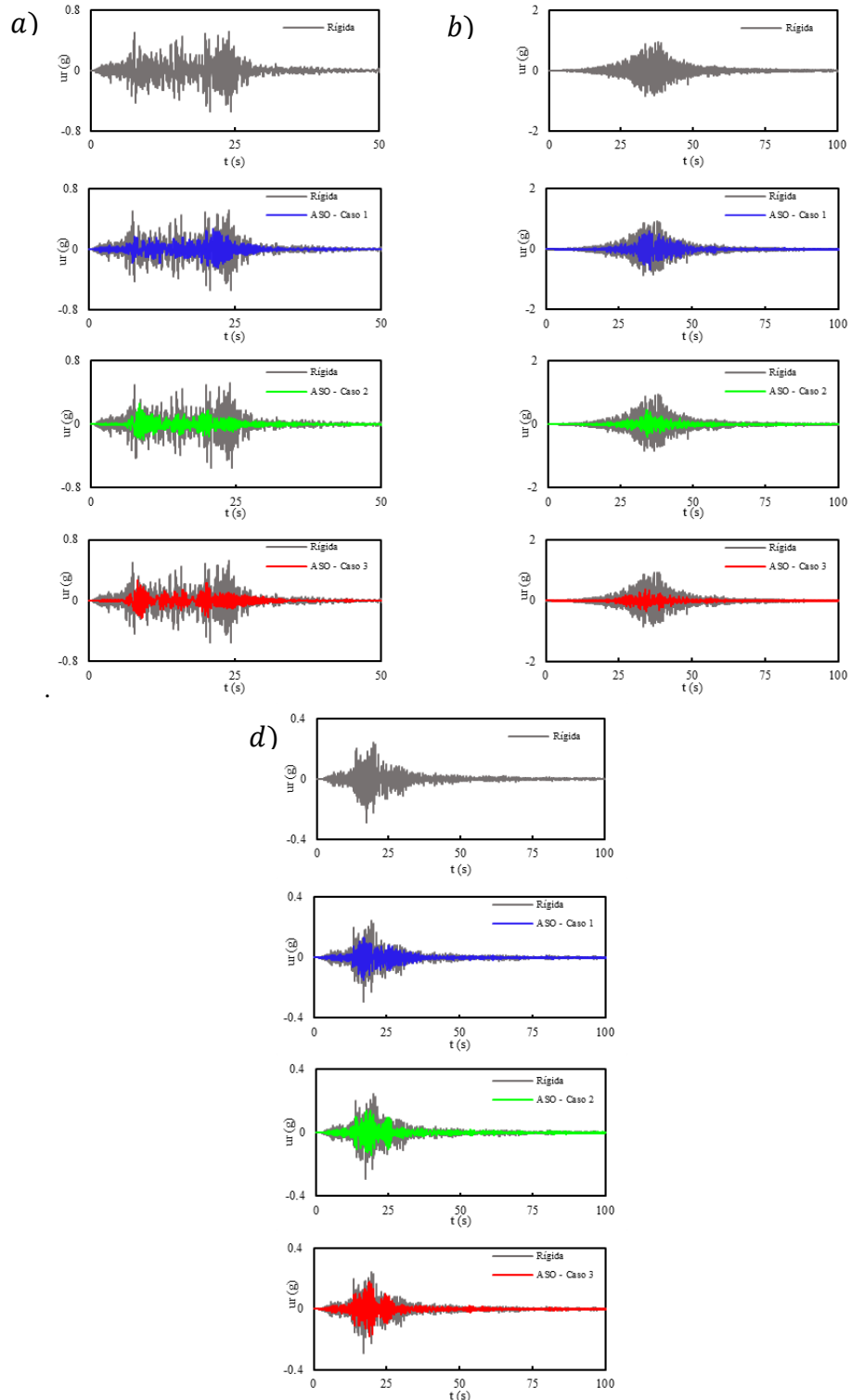


Figura A 5. Aceleración relativa del sistema, estaciones *a) LANE*, *b) NILT* y *c) HMTT*, sistema de base rígida en la primera fila de arriba a bajo, los sistemas con ASO, del primer caso al tercer caso desde la segunda fila hasta la cuarta fila respectivamente.

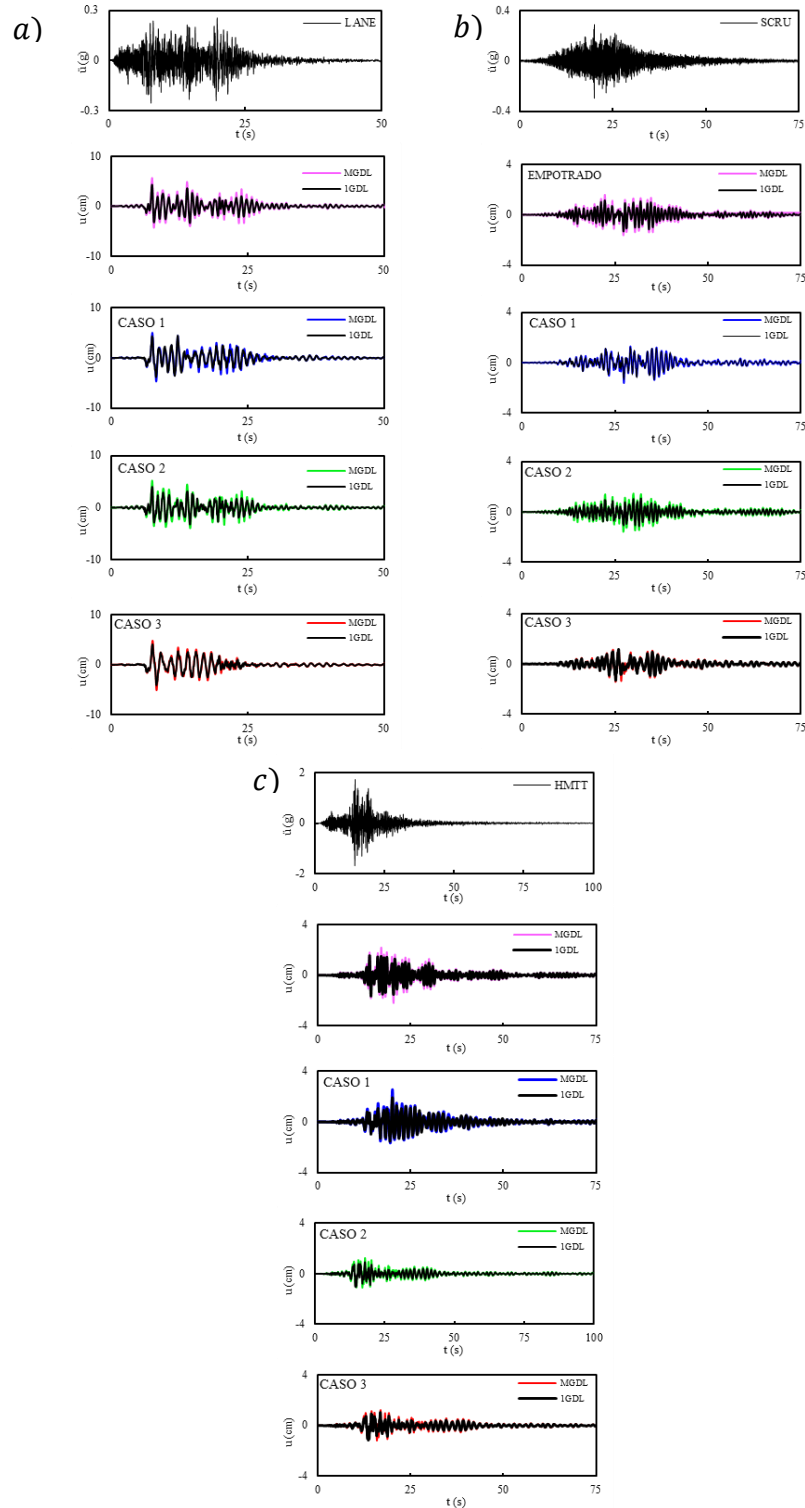


Figura A.6. Comparativa del sistema 1GDL y un edificio del desplazamiento relativo, estaciones a) *LANE*, b) *NILT*, d) *HMTT*., sistema de base rígida en la primera fila de arriba a abajo, los sistemas con ASO, del primer caso al tercer caso desde la segunda fila hasta la cuarta fila respectivamente

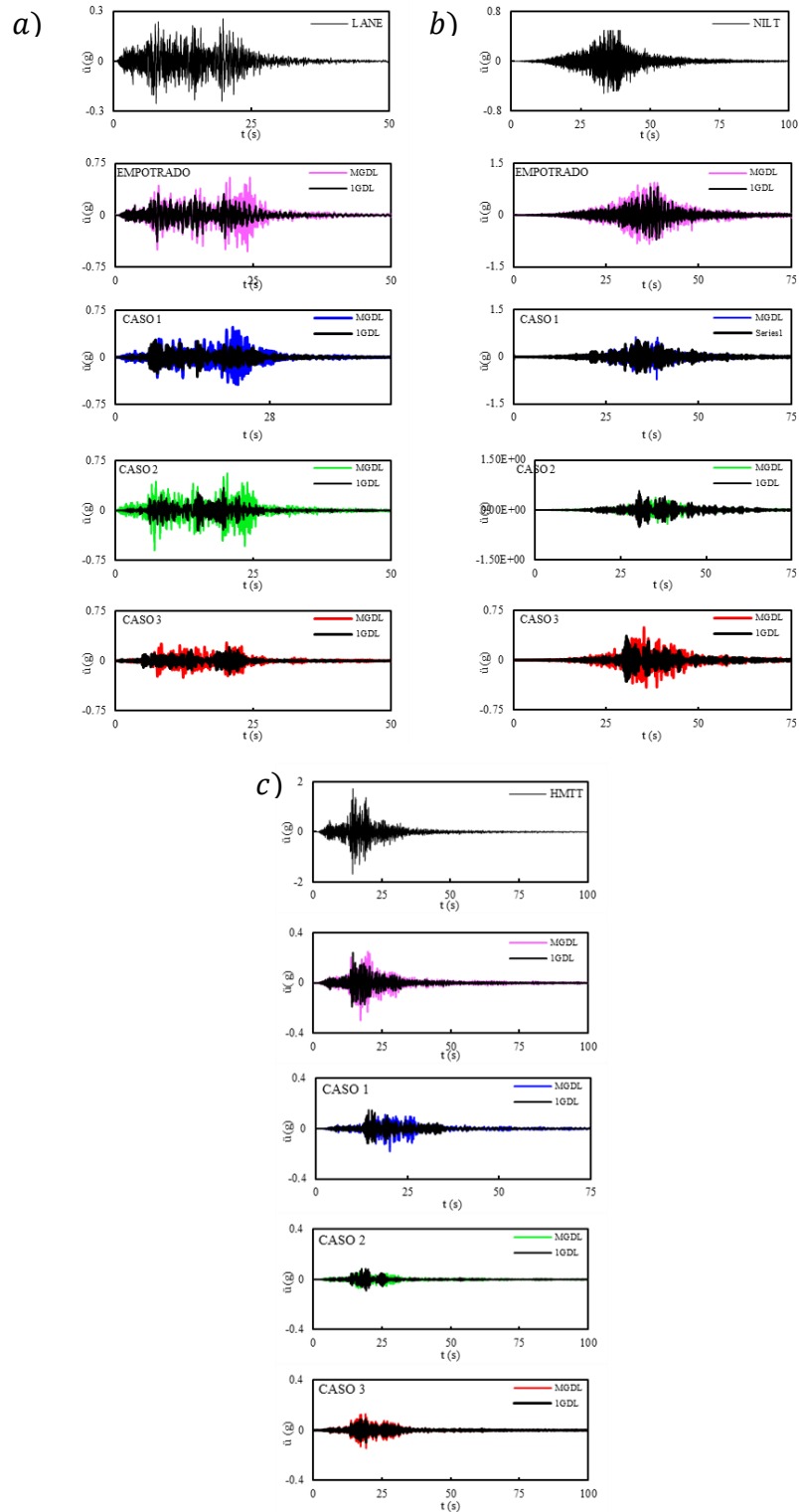


Figura A 7. Comparativa del sistemas 1GDL y un edificio de la aceleración relativa, estaciones a) *LANE*, b) *NILT*, y c) *HMTT*, sistema de base rígida en la primera fila de arriba a abajo, los sistemas con ASO, del primer caso al tercer caso desde la segunda fila hasta la cuarta fila respectivamente

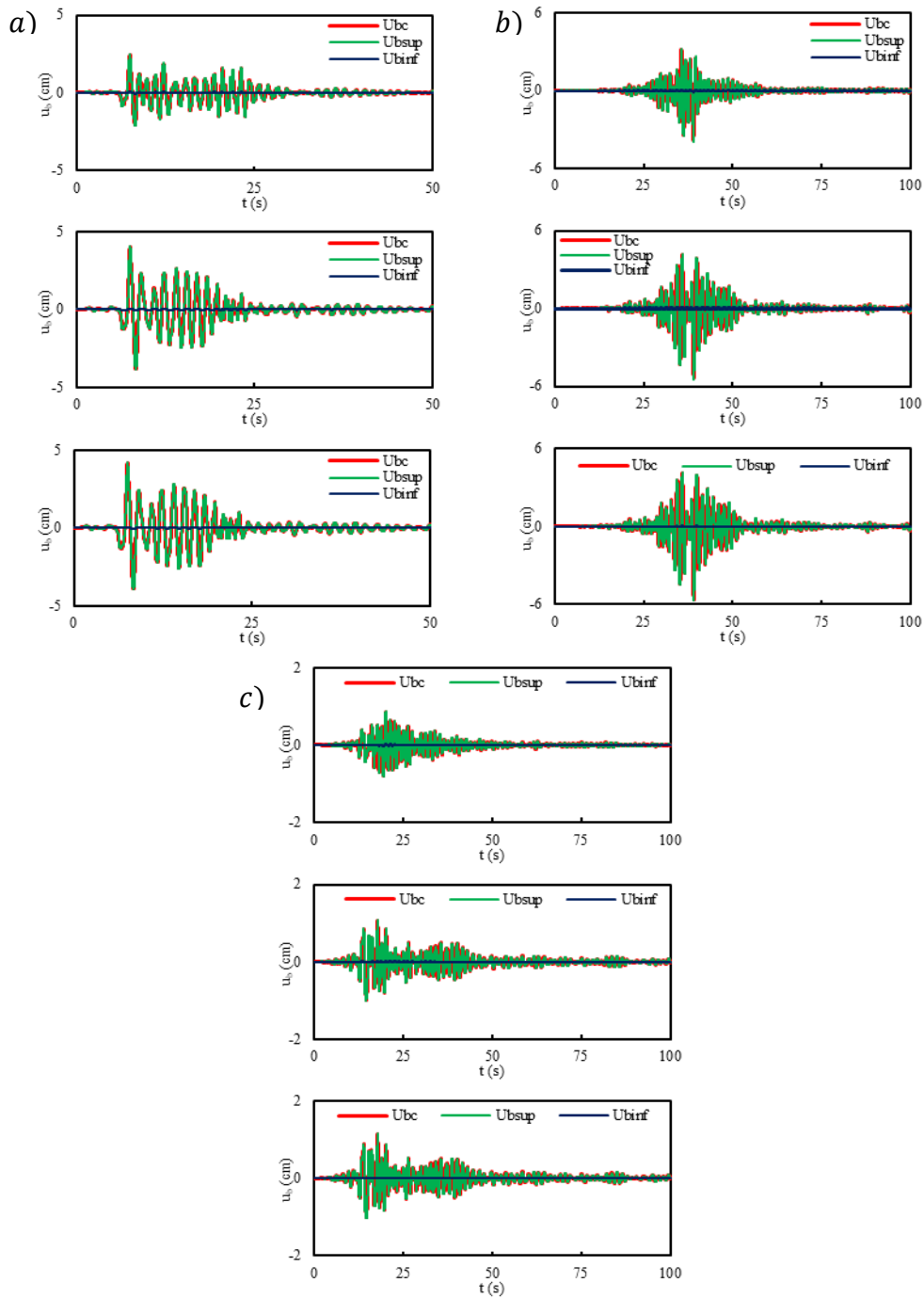


Figura A 8. Desplazamiento de los bloques de las estaciones a) *LANE*, b) *NILT* y c) *HMTT*, los sistemas equipados con ASO, del primer caso al tercer caso ordenados desde fila de arriba a abajo respectivamente