



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE CAMPANARIOS
APOYADOS EN SISTEMAS DE
AISLAMIENTO SÍSMICO**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Luis Enrique Baltazar Mora

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Miguel Ángel Jaimes Téllez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023



DEDICATORIA

A mis padres, por ser mi fuente de inspiración, motivación y confianza. Gracias por enseñarme el valor de la educación y brindarme todo su apoyo para alcanzar mis metas. Esta tesis es una forma de agradecerles por su constante apoyo y por creer en mí, incluso en los momentos más difíciles.

A mis profesores y mentores, por su dedicación y pasión por la enseñanza y por guiarme en mi camino.

A todos los que han creído en mi como ejemplo a seguir.



AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento más sincero al Dr. Miguel Ángel Jaimes Téllez por el tiempo, la paciencia, a su arduo trabajo en la revisión, por compartir sus conocimientos de manera profesional e invaluable y proporcionarme críticas constructivas.

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

Agradezco la participación del M.I. Alejandro Sánchez Huerta, al Ing. Jesús Gallegos Silva, al Dr. Gerardo Rodríguez Gutiérrez y al Dr. Armando Rafael Hermosillo Arteaga por conformar el grupo de sinodales para esta tesis.

A mis amistades y profesores, pues sus consejos, me ayudaron a forjar mi camino por la Facultad de Ingeniería.



RECONOCIMIENTOS

Esta investigación fue financieramente soportada por el Proyecto IG100623–PAPIIT-UNAM denominado “Evaluación del daño acumulado por efectos sísmicos y corrosivos durante el ciclo de vida en edificios de concreto reforzado”. Apoyo adicional fue auspiciado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM a través del Fondo de Investigación R528.



ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	11
I.1. PRESENTACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	12
I.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS AISLADORES SÍSMICOS	17
I.3. OBJETIVO.....	18
I.4. ALCANCES Y LIMITACIONES	18
II. MARCO TEÓRICO.....	19
II.1. CONSIDERACIONES DE LOS SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD.....	20
II.2. CAMPANARIO ADOSADO A LOS MUROS DE LA FACHADA.....	22
II.3. CAMPANARIO APOYADO SOBRE UN SISTEMA DE AISLAMIENTO LINEAL.....	23
II.4. CAMPANARIO APOYADO SOBRE UN SISTEMA DE AISLAMIENTO BILINEAL.....	23
III. PARÁMETROS DINÁMICOS CONSIDERADOS	25
III.1. PERIODO DE LA ESTRUCTURA	26
III.2. RIGIDEZ LATERAL DE LA ESTRUCTURA.....	26
III.3. COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO DEL AISLADOR.....	26
III.4. RIGIDEZ DEL AISLADOR	27
IV. MODELO DINÁMICO DE CAMPANARIO CON Y SIN AISLADORES SÍSMICOS. 29	
IV.1. CONFIGURACIONES DE LA ESTRUCTURA	30
IV.2. DIMENSIONES DEL CAMPANARIO	31
IV.3. MODOS DE VIBRAR DE LA ESTRUCTURA.....	31
IV.4. MODELO DINÁMICO DEL SISTEMA ESTRUCTURAL.....	32
V. EXCITACIÓN SÍSMICA PARA EL SISTEMA ESTRUCTURAL.....	33
V.1. REGISTROS SÍSMICOS UTILIZADOS	34
V.2. ESPECTROS DE RESPUESTA DE ACELERACIÓN.....	36
V.3. ESPECTROS DE RESPUESTA DE DESPLAZAMIENTO	37
VI. RESULTADOS.....	38
VI.1. CASO RABO 19/09/2017 $M_w = 7.1$	39
VII. INSTALACIÓN DE AISLADORES SÍSMICOS	45
VIII. CONCLUSIONES.....	47
REFERENCIAS	49



APÉNDICES	51
APÉNDICE A. REGISTROS DE DAÑOS A CAMPANARIOS EN MÉXICO POR SISMOS.	51
APÉNDICE B. RESULTADOS DE DESPLAZAMIENTOS, ACELERACIONES RELATIVAS Y DESPLAZAMIENTOS DEL AISLADOR	56
CASO SCRU 07/09/2017 <i>M_w</i> = 8.2	56
CASO CALE 11/01/1997 <i>M_w</i> = 6.9	59
CASO HMTT 19/09/2017 <i>M_w</i> = 7.1	62
CASO JAMI 30/09/1999 <i>M_w</i> = 7.6	65
CASO LANE 30/09/1999 <i>M_w</i> = 7.6	68
CASO NILT 08/09/2017 <i>M_w</i> = 8.2	71



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA I-1. SISMICIDAD, 2022. FIGURA OBTENIDA EN HTTP://WWW.SSN.UNAM.MX/SISMICIDAD/MAPAS-DE-SISMICIDAD-ANUAL/	12
FIGURA I-2. CAMPANARIOS DAÑADOS EN TEMPLOS EN SISMO 2017. A) SANTUARIO DEL SEÑOR DE LA MISERICORDIA Y B) EXCONVENTO DE LA NATIVIDAD. FIGURA OBTENIDA EN: A) LA JORNADA, 2017, EN HTTPS://WWW.JORNADA.COM.MX/2017/09/26/FOTOS/036N1EST-1.JPG Y B) EL SOL DE CUAUTLA, 2018, EN HTTPS://WWW.ELSOLDECUAUTLA.COM.MX/LOCAL/CALLARON-LAS-CAMPANAS-EN-TEPOZTLAN-TRAS-EL-19S-2016567.HTML	13
FIGURA I-3. ELEMENTOS DEL AISLADOR SÍSMICO ELASTOMÉRICO.....	17
FIGURA II-1. SISTEMA SIN AISLADORES (A) Y SISTEMA CON AISLADORES (B).....	20
FIGURA II-2. SISTEMA SIN AISLACIÓN Y MECANISMO DE DISIPACIÓN (A) Y SISTEMA CON AISLADORES Y MECANISMO DE DISIPACIÓN (B).....	20
FIGURA II-3. MOVIMIENTOS DE LA ESTRUCTURA SIN AISLADORES. A) ESTRUCTURA, B) DESPLAZAMIENTO ABSOLUTO Y C) DESPLAZAMIENTO RELATIVO.....	21
FIGURA II-4. A) SISTEMA DE 1 GDL SOBRE AISLADORES, B) DESPLAZAMIENTOS ABSOLUTOS Y C) DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS.....	22
FIGURA III-1. DETERMINACIÓN DE PERIODOS DE VIBRAR. ESPECTRO DE RESPUESTA DE LANE.....	26
FIGURA IV-1. SISTEMA DE 2GDL.....	30
FIGURA IV-2. SISTEMA DE 3GDL.....	30
FIGURA IV-3. DIMENSIONES DEL SISTEMA, ACOTACIONES EN M.....	31
FIGURA IV-4. MODO DE VIBRAR DEL SISTEMA SIN AISLACIÓN.....	31
FIGURA IV-5. MODO DE VIBRAR DEL SISTEMA CON AISLACIÓN DEL CAMPANARIO.....	32
FIGURA IV-6. A) SISTEMA DE 2GDL Y B) SISTEMA DE 3GDL. HECHO EN ETABS.....	32
FIGURA V-1. MOVIMIENTOS SÍSMICOS UTILIZADOS. A) RABO, B) SCRUI, C) CALE, D) HMTT, E) JAMI, F) LANE, G) NILT.....	34
FIGURA VI-1. ESPECTROS DE RESPUESTA DE ACELERACIÓN. A) RABO, B) SCRUI, C) CALE, D) HMTT, E) JAMI, F) LANE, G) NILT.....	36
FIGURA VI-2. ESPECTROS DE RESPUESTA DE DESPLAZAMIENTO. A) RABO, B) SCRUI, C) CALE, D) HMTT, E) JAMI, F) LANE, G) NILT.....	37



FIGURA VII-1. HISTORIAS DE ACELERACIÓN RELATIVA DEL NIVEL 1 (A), ACELERACIÓN RELATIVA NIVEL 2 (B), ACELERACIÓN DEL AISLADOR (C). HISTORIAS DE DESPLAZAMIENTO RELATIVO DEL NIVEL 1 (D), DESPLAZAMIENTO RELATIVO DEL NIVEL 2 (E) Y DESPLAZAMIENTO DEL AISLADOR (F). RABO; $T_b = 1 s$. SISTEMAS DE 2GDL (LÍNEA GRIS) Y 3GDL (LÍNEA NEGRA). ÉSTE ÚLTIMO INCLUYE UN SISTEMA DE AISLACIÓN A MEDIA ALTURA. 39

FIGURA VII-2. HISTORIAS DE ACELERACIÓN RELATIVA DEL NIVEL 1 (A), ACELERACIÓN RELATIVA NIVEL 2 (B), ACELERACIÓN DEL AISLADOR (C). HISTORIAS DE DESPLAZAMIENTO RELATIVO DEL NIVEL 1 (D), DESPLAZAMIENTO RELATIVO DEL NIVEL 2 (E) Y DESPLAZAMIENTO DEL AISLADOR (F). RABO; $T_b = 2 s$. SISTEMAS DE 2GDL (LÍNEA GRIS) Y 3GDL (LÍNEA NEGRA). ÉSTE ÚLTIMO INCLUYE UN SISTEMA DE AISLACIÓN A MEDIA ALTURA. 40

FIGURA VII-3. HISTORIAS DE ACELERACIÓN RELATIVA DEL NIVEL 1 (A), ACELERACIÓN RELATIVA NIVEL 2 (B), ACELERACIÓN DEL AISLADOR (C). HISTORIAS DE DESPLAZAMIENTO RELATIVO DEL NIVEL 1 (D), DESPLAZAMIENTO RELATIVO DEL NIVEL 2 (E) Y DESPLAZAMIENTO DEL AISLADOR (F). RABO; $T_b = 3 s$. SISTEMAS DE 2GDL (LÍNEA GRIS) Y 3GDL (LÍNEA NEGRA). ÉSTE ÚLTIMO INCLUYE UN SISTEMA DE AISLACIÓN A MEDIA ALTURA. 41

FIGURA VII-4. COMPARACIÓN DE HISTORIAS DE RESPUESTA DE DESPLAZAMIENTO (A) Y ACELERACIÓN RELATIVA PARA EL NIVEL 2 (B) Y DESPLAZAMIENTO DEL AISLADOR (C). PARA RABO, SCRU, CALE, HMTT, JAMI, LANE, NILT. I) LÍNEA NEGRA CORRESPONDE A UN SISTEMA SIN AISLACIÓN DE $T = 0.75 s$, II) CASO 1, CORRESPONDE LÍNEA AZUL. III) CASO 2, CORRESPONDE LÍNEA NARANJA, IV) CASO 3, CORRESPONDE LÍNEA VERDE..... 43

FIGURA VIII-1. INSTALACIÓN DE CAMPANARIO..... 46



RESUMEN

En esta tesis se analiza el comportamiento de las estructuras de campanarios de las iglesias y/o conventos sobre un sistema de aislamiento sísmico. La respuesta estructural es examinada mediante las siguientes configuraciones: 1) Campanario adosado a los muros de la fachada y 2) Campanario apoyado sobre un sistema de aislamiento sísmico con periodos establecidos de $T_b = 1, 2$ y 3 s. Se utiliza un conjunto de movimientos sísmicos de moderadas y grandes intensidades para la simulación del sistema propuesto. Dichos sistemas de aislación reducen las aceleraciones y desplazamientos de los campanarios. Finalmente se determinó la instalación de los dispositivos de aislación sísmica a fin de que el comportamiento dinámico sea uniforme en todos los elementos. Se compara la respuesta estructural para los casos anteriormente mencionados para determinar los beneficios que genera la implementación de los aisladores. Este trabajo también está destinado a ser un apoyo para los diseñadores, restauradores y responsables en la toma de decisiones relacionadas con configuraciones apropiadas y medidas de mitigación de riesgo en torres de campanarios ubicadas en regiones propensas a sismos de moderadas y grandes intensidades en el país.



ABSTRACT

In this thesis, the behavior of church belfries supported on seismic isolation systems, for seismic protection during earthquakes, are analyzed. The structural response is studied using the two following configurations: 1) Belfry supported on the façade wall and 2) Belfry supported on a seismic isolation system with set periods of $T_b = 1, 2$ y 3 s. A set of seismic motions, from moderate and large to study the behavior of church belfries intensities, is used. The results show that the isolation systems reduce the accelerations and displacements of church belfries. The structural response for the aforementioned cases is compared to determine the benefits of reduction of accelerations and displacements generated by the implementation of the isolator systems. This study is also intended to support designers, restorers and decision-makers for appropriate configurations and risk mitigation measures of church belfries located in regions prone to moderate and strong earthquakes in the country.



I. INTRODUCCIÓN

1.1. Presentación de la problemática

Esta tesis estudia el comportamiento estructural de campanarios ante sismos ocurridos en la República Mexicana. Debido a ciertas características de los campanarios, han sido vulnerables debido al desprendimiento del muro principal y, en consecuencia, el derrumbe, provocado por la masa superior de las campanas y a su aumento en la inercia en la fachada. En México, los sismos no se desarrollan de manera homogénea debido a las características del suelo, sin embargo, existen regiones como Guerrero, Oaxaca y Chiapas en la que ocurren el 80% de los sismos registrados en el país. Es importante mencionar que, en el año 2022, el Servicio Sismológico Nacional (SSN) reportó 28,488 sismos con una magnitud igual o superior en la escala de magnitud a 3 como se observa en la Figura I-1. Se puede concluir que en este país hubo más de 70 sismos por día dentro de ese rango de magnitud.

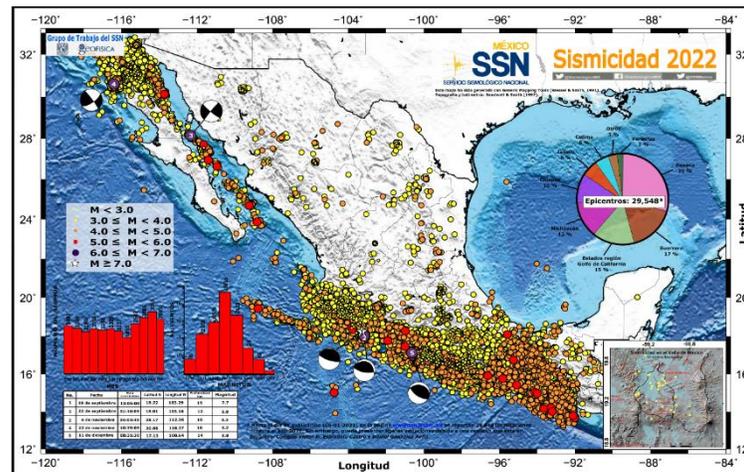


Figura I-1. Sismicidad, 2022. Figura obtenida en <http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/mapas-de-sismicidad-anual/>

El último sismo de escala moderada en el país, ocurrido el día 19 de septiembre de 2022, con una magnitud de 7.7 y sus réplicas, afectó solamente en el estado de Jalisco 18 templos religiosos en la cual presentaron grietas, cuarteaduras, desprendimiento de cantera, caída de copón, daños en cúpulas y afectaciones en torres de campanas o campanarios.

Estas afectaciones a los campanarios han sido un grave problema durante muchos años, y la sociedad no les ha dado la importancia de preservar dichas estructuras y así evitar que los templos terminen dañándose por la caída de los mismos.

En la Figura I-2, se observan dos ejemplos de campanarios afectados por los sismos. La Figura 2.a) muestra los campanarios damnificados del Santuario del Señor de la Misericordia en el estado de Puebla y la Figura 2.b) muestra los trabajos de restauración en el Templo y Exconvento de la Natividad en Tepoztlán, Morelos.



a)

b)

Figura I-2. Campanarios dañados en templos en sismo 2017. a) Santuario del Señor de la Misericordia y b) Exconvento de la Natividad. Figura obtenida en: a) *La Jornada*, 2017, en <https://www.jornada.com.mx/2017/09/26/fotos/036n1est-1.jpg> y b) *El Sol De Cuautla*, 2018, en <https://www.elsoldecuautla.com.mx/local/callaron-las-campanas-en-tepoztlan-tras-el-19s-2016567.html>.

Debido a estos fenómenos naturales, fue necesario establecer un sistema que permitiera que los movimientos sísmicos no impactaran en gran medida a las estructuras, por lo tanto, se implementaron medidas de diseño estructural, con el fin de mitigar los efectos de futuros eventos sísmicos. Por consiguiente, se desarrollaron dispositivos que se encargarían de desacoplar las fuerzas sísmicas de la superestructura, denominados “Aisladores Sísmicos”.

Las torres de campanas o comúnmente denominados “campanarios”, han sido una de las principales construcciones afectadas estructuralmente por los sismos en los templos e iglesias de culto religioso, debido a esto, el estudio de dichas estructuras se ha adquirido una mayor importancia.

En la república mexicana se han presentado numerosos sismos que han afectado a la población. Se cuentan con registros sísmicos desde aproximadamente el año 1455 hasta la fecha. De acuerdo con el libro (*García, V., & Suárez, G., 1996*), en la historia, los sismos han sido clasificados por periodo de la siguiente manera.

- Época prehispánica y colonial. Los sismos como actos de Dios.
- Primera mitad del Siglo XIX (1823 – 1850). El desarrollo de la interpretación científica.
- Segunda mitad del Siglo XIX (1851 – 1899). Los sismos si son fenómenos naturales.
- Los inicios del Siglo XX (1900 – 1912). De la sismología cualitativa a la instrumental.

Contamos con antecedentes cualitativos y cuantitativos a partir Siglo XX, con la implementación de escalas de sismos, las cuales, se definirán a continuación.

- *Escala de intensidad o Mercalli*. Propuesta por Giuseppe Mercalli, en el año 1902 y modificada en el año 1931. Es una medición cualitativa. Consta de 12 grados de intensidad donde se muestran las características de cada grado, denotado por números romanos.
- *Escala de Richter*. Propuesta por Charles Francis Richter, en el año 1935. Es una medición cuantitativa. Mide la energía sísmica liberada en cada sismo independientemente de la intensidad.



- *Escala de Magnitud.* Es un número que busca caracterizar el tamaño de un sismo y la energía sísmica liberada. Se mide en una escala logarítmica, de tal forma que cada unidad de magnitud corresponde a un incremento de raíz cuadrada de 1000, o bien, de aproximadamente 32 veces la energía liberada.

A continuación, en la Tabla 1 se presenta una compilación de algunos registros de los sismos que han afectado específicamente a campanarios desglosado por fecha, ubicación, momento histórico y referencia.

Tabla 1. Registro de daños a campanarios en México por sismos.

<i>Fecha/Año</i>	<i>Ubicación</i>	<i>Momento Histórico</i>	<i>Referencia</i>
1582.	República Mexicana; Valle de México	En el año de “1582 fue el temblor de Arequipa que asoló casi toda aquella ciudad. Este mismo año [...] otro tan recio en esta Nueva España, en especial en esta comarca de México que pensaron los moradores y vecinos ser tragados de la tierra; a lo menos yo diré que morando en esta sazón en el convento de Tlacopan, que es una legua de México, y comenzando a temblar la tierra nos salimos el guardián y yo huyendo de la huerta, temiendo el peligro de caerse la casa y vimos el campanario y torre donde están las campanas que es muy grande y bueno, hacer muy grandes movimientos y con ellos se tañeron las campanas mayores que son muy grandes y a cada vaivén que daba la torre, parecía inclinarse más de dos varas, que nos puso grandísimo espanto a los dos y a otros muchos que de fuera lo vieron.”	(García & Suárez, 1996, pág. 83)



Tabla 1. Continuación

<i>Fecha/Año</i>	<i>Ubicación</i>	<i>Momento Histórico</i>	<i>Referencia</i>
14/marzo/1591	Chiapa, Chis	<p><i>“El jueves 14 de marzo de 1591 fue nuestro señor servido de que sucediese un terremoto y temblor tan grandes en este pueblo, que destruyó y arruinó los edificios principales [...] derribó la torre de la iglesia y asimismo gran parte de las casas y la iglesia quedó tan atormentada y abierta por muchas partes que no se puede aderezar y asimismo derribó las casas reales [...] muy abiertas y rendidas por muchas partes [...] y casas particulares lo cual tiene mucha necesidad de remedio [...] se cayó todo un corredor con sus arcos a tierra [...] y entré a la casa de la morada de los religiosos y vio cómo habíase venido al suelo un corredor que estaba a la puerta de la sacristía del monasterio, porque se habían quebrado todas las vigas sobre que está armada, tan asimismo vio que las celdas y todos los demás servicios de la casa del monasterio, todo atormentado con grandísima necesidad de reparo, asimismo vio a estas casas reales todos los arcos (caídos) también en el patio donde las del gobernador y alcaldes hacen audiencia caídos en el suelo y todas las casas se hallan abiertas y resquebrajadas las paredes y todos la teja hecha pedazos [...] estando en su casa sintió un gran ruido y vio cómo estando templando la tierra de deshizo un pedazo de la torre de la iglesia.”</i></p>	(García & Suárez, 1996, pág. 84)
1652	Ciudad Real, Chis.	<p><i>“Temblor. El campanario de la catedral queda arruinado. Reventazón del Huitepec e inundación generalizada con grandes daños en toda la zona que se extendieron a Tabasco y Guatemala.”</i></p>	(García & Suárez, 1996, pág. 92)
	San Cristóbal de las Casas, Chis.	<p><i>“De la torre de las campanas nada podemos decir, ignoramos cómo era; porque derruida por el sismo en 1652 que coincidió con la más grande inundación y un terremoto horroroso, no ha sido posible reconstruir, queda sólo la base, en donde malamente se alojan las campanas.”</i></p>	(García & Suárez, 1996, pág. 92)



Tabla 1. Continuación

Fecha/Año	Ubicación	Momento Histórico	Referencia
1711	México, D.F; Tonalá, Huajuapán, Región Mixteca, Oax.	“[...] donde fueron mayores [los estragos del terremoto] es la región mixteca: allí la mayor parte de las torres y bóvedas de los templos cayeron al suelo, y entre éstos las del pueblo de Tonalá en Huajuapán, cuyo convento y casas se desplomaron. Esta catástrofe motivó la decadencia de la población y que Huajuapán no prosperara desde entonces. En México fue fuerte este terremoto que las campanas se tocaban solas. Se conoce por temblor de S. Roque.”	(García & Suárez, 1996, pág. 109)
	Puebla, Pue.	“La torre que se le puso en los principios a esta iglesia [del convento de San Francisco] era pequeña y no sufría el peso de las campanas, sin embargo de no ser muy grandes, y así en el terremoto del día [...] quedó muy maltratada y aunque el señor don Juan Veitia la reedificó a su costo, como también los demás daños que hizo en la iglesia y convento, siempre quedó con poca seguridad para sostener el peso de las campanas, por lo que pensaron los religiosos labrar otra [torre] al lado de la portada de la iglesia, pero separada de ella, cargando sobre su propia base y cimientos, para cuyo efecto se hizo cargo de recoger limosnas el padre Fr. Diego de Tapia, religioso sacerdote de este convento y comenzó a ello el año de 1730, habiendo ya algún dinero ser puso en manos a la obra.”	(García & Suárez, 1996, pág. 109)
19/septiembre/ 2017	Guadalajara, Jalisco.	Templo de Nuestra Señora de la Merced. El templo de la Merced tiene daño estructural en la torre del campanario. “Si hay un daño en el campanario del templo de la Merced, este campanario es la base del campanario, el campanario cayó en el sismo del 74 y tenemos que determinar si se tiene que hacer una intervención mayor o se tiene que hacer un reforzamiento para su restauración.” Dijo Sergio Ramírez, director de Protección Civil y Bomberos de Guadalajara.	(Barajas, 2022)

La información complementaria a la Tabla 1. Registro de daños a campanarios en México por sismos., se encuentra en el apartado de Apéndice A.

1.2. Características de los aisladores sísmicos

Es importante conocer los elementos de un aislador sísmico elastomérico, en virtud de las propiedades técnicas (diámetro, altura, número de capas de caucho, diámetro del plomo, etc.) están relacionadas con las propiedades mecánicas (rigidez, desplazamiento máximo, capacidad de carga axial, etc.).

En la Figura I-3 se pueden observar los elementos por la cual está conformado el aislador elastomérico, siendo descrita a continuación: 1) Capa de protección de caucho. 2) Capas de caucho y acero. 3) Núcleo de plomo y 4) Pernos de anclaje.

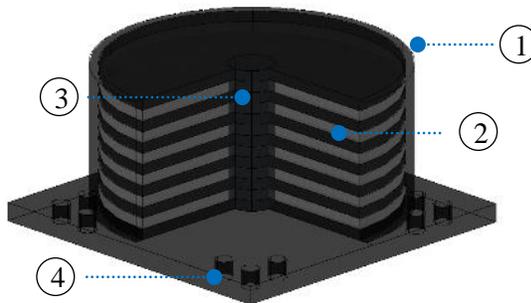


Figura I-3. Elementos del aislador sísmico elastomérico.

Ventajas y desventajas de los aisladores sísmicos

Los sistemas de aislamiento sísmico presentan un conjunto de ventajas:

- La operatividad de las estructuras puede recuperarse inmediatamente después de la ocurrencia de un sismo.
- Los procedimientos de análisis son simplificados, debido a la incorporación de elementos flexibles de aislamiento, al tener un periodo de vibración más alto que la estructura, permite desacoplar la respuesta sísmica, en consecuencia, la estructura pasa a comportarse como un cuerpo rígido.
- El incremento del periodo fundamental de la estructura genera disminuciones en las aceleraciones espectrales, por lo tanto, reduce las fuerzas a las cuales está sometido el conjunto estructura – aisladores. Reduciendo así, las aceleraciones en la base de la estructura y en los pisos de la edificación.
- La incorporación de aisladores en la base y el cuerpo rígido en la parte superior, generan menores desplazamientos entre pisos, en consecuencia, disminuyen las sollicitaciones sobre elementos no estructurales, permitiendo de esta manera, una reducción importante de los daños en elementos estructurales y no – estructurales.
- La presencia de aisladores sísmicos permite la reducción de daños en la estructura. La zona de mayor daño queda concentrada en los aisladores, por lo tanto, resulta más fácil la inspección y/o reparación de la estructura, incluso, puede lograrse con la sustitución o reparación de los aisladores.



- Los aisladores sísmicos permiten reducir los efectos de la torsión en la respuesta sísmica.

Por otra parte, los aisladores también presentan desventajas que deben ser tomadas en cuenta para el diseño, construcción o habilitación de la edificación.

- Los grandes desplazamientos pueden afectar a las estructuras vecinas. Debido a la interacción entre ambas estructuras, pueden producir residuos que podrían introducirse en los espacios necesarios para que la estructura aislada pueda moverse libremente, en consecuencia, puede perder capacidad de aislamiento.
- Los grandes desplazamientos requieren flexibilidad de juntas de instalaciones como lo son agua potable, drenaje, gas, electricidad, telecomunicaciones, entre otros.
- En el sistema de aislación sísmica se debe considerar un plan de mantenimiento para la estructura.
- Deben tomarse en consideración los elementos arquitectónicos como los son escaleras, rampas de acceso, ascensores, escaleras mecánicas, entre otros, deben ser diseñadas de tal manera que se adapten a los movimientos en la zona de interfase y a las distancias que quedan al dejarse los espacios alrededor de la edificación para permitir su movimiento.

1.3. Objetivo

El objetivo de la tesis es analizar el comportamiento simple de las torres de campanas adosadas al muro de la fachada y apoyadas en sistemas de aislamiento sísmico, así como, determinar la factibilidad de un sistema de aislamiento sísmico de acuerdo a las condiciones propuestas.

1.4. Alcances y limitaciones

El sistema únicamente se está evaluando con registros sísmicos dentro de la República Mexicana. Al evaluar el sistema con registros sísmicos de moderadas y grandes intensidades, podrá emplearse para cualquier zona de menor actividad sísmica, asimismo, las propiedades dinámicas son utilizadas solamente para el análisis del comportamiento del sistema, no para el diseño del sistema cumpliendo las normas correspondientes.



II. MARCO TEÓRICO

II.1. Consideraciones de los sistemas de un grado de libertad

Una estructura puede ser representada por un sistema de un grado de libertad (1GDL) sin la presencia de aisladores sísmicos, se definen sus parámetros mecánicos: se denomina rigidez lateral k a la capacidad que puede tener la estructura de generar un conjunto de fuerzas laterales para oponerse a un desplazamiento lateral inducido por el sismo. La masa de la estructura se representa como m . Asimismo, la capacidad de disipación de energía de la estructura es representada por una variable c , la cual es definida como amortiguamiento y se relaciona con la cantidad de energía disipada en función de la velocidad con la que se mueve la estructura.

La Figura II-1 a) muestra un modelo de una estructura de 1GDL sin aisladores sísmicos, mientras que la Figura II-1 b) incluye la presencia de un aislador sísmico.

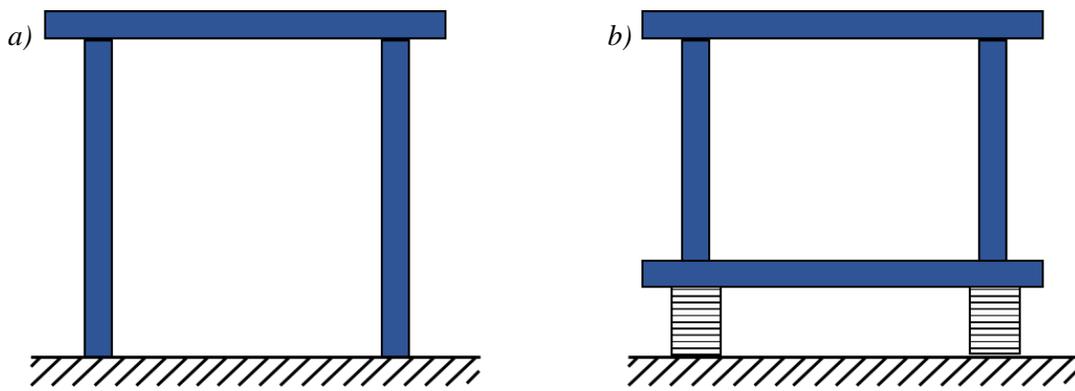


Figura II-1. Sistema sin aisladores (a) y Sistema con aisladores (b).

Los esquemas simplificados de los sistemas, incluyendo el movimiento sísmico en la base y los mecanismos de disipación de energía por aislación, se muestran en la Figura II-2. Asimismo, en la Figura II-2 se representan: m_s, k_s y c_s , masa, rigidez lateral y coeficiente de amortiguamiento del sistema estructural; m_b, k_b y c_b , masa, rigidez lateral y coeficiente de amortiguamiento del sistema de aislación y finalmente \ddot{u}_g , aceleración producida por el sismo.

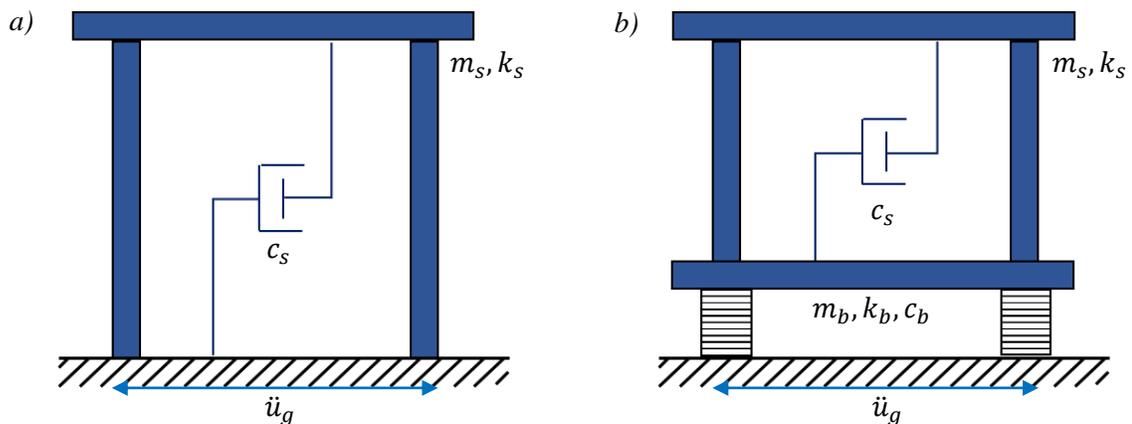


Figura II-2. Sistema sin aislación y mecanismo de disipación (a) y Sistema con aisladores y mecanismo de disipación (b).

En la Figura II-3 se muestra la aceleración inducida por el sismo y las variables de desplazamiento del sistema sin aislación. Para el análisis del sistema es necesario considerar el siguiente conjunto de variables de movimiento: $x_s(t)$, $\dot{x}_s(t)$ y $\ddot{x}_s(t)$, desplazamiento, velocidad y aceleración absoluta del sistema con base fija; $u_s(t)$, $\dot{u}_s(t)$ y $\ddot{u}_s(t)$, desplazamiento, velocidad y aceleración relativa del sistema con base fija.

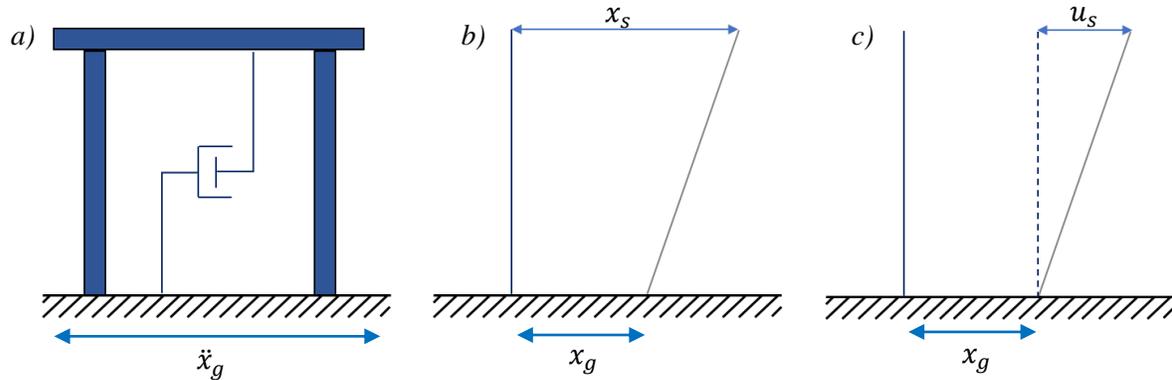


Figura II-3. Movimientos de la estructura sin aisladores. a) estructura, b) desplazamiento absoluto y c) desplazamiento relativo.

Para el análisis se determinan las fuerzas que intervienen en el sistema.

- Fuerza de inercia, F_I .
- Fuerza de amortiguamiento, F_A .
- Fuerza por su rigidez lateral, F_R .

Dando como resultado la ecuación (1).

$$F_I + F_A + F_R = 0 \quad (1)$$

Sin embargo, cuando ocurre un sismo, la ecuación de equilibrio (2) es:

$$m_s \cdot \ddot{x}_s + c_s \cdot (\dot{x}_s - \dot{x}_g) + k_s \cdot (x_s - x_g) = 0 \quad (2)$$

Al expresar la ecuación en términos de movimiento relativo, se llega a la siguiente ecuación (3).

$$m_s \cdot \ddot{u}_s + c \cdot \dot{u}_s + k \cdot u_s = -m \ddot{u}_g \quad (3)$$

Para el sistema con aisladores sísmicos (Figura II-4), las características del sistema son m_s , k_s y c_s ; las de la base con el sistema de aislación son m_b , k_b y c_b . Las variables del movimiento del sistema son $x_s(t)$, $\dot{x}_s(t)$ y $\ddot{x}_s(t)$. Los movimientos del sistema expresados como movimientos relativos son $u_s(t)$, $\dot{u}_s(t)$ y $\ddot{u}_s(t)$ y de la base son $u_b(t)$, $\dot{u}_b(t)$ y $\ddot{u}_b(t)$.

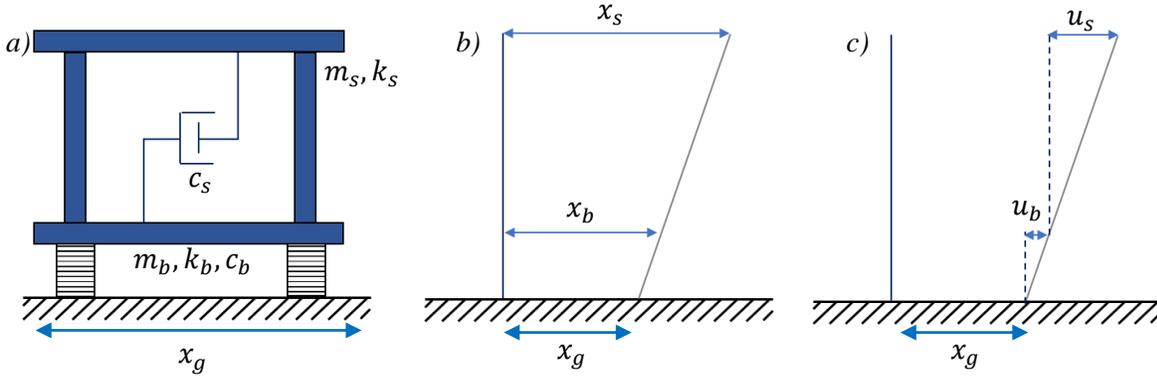


Figura II-4. a) Sistema de 1 GDL sobre aisladores, b) desplazamientos absolutos y c) desplazamientos relativos.

Las ecuaciones de equilibrio al llevarlas a movimientos relativos son:

$$(m_s \cdot \ddot{u}_s + m_s \cdot \ddot{u}_b) + c_s \cdot \dot{u}_s + k_s \cdot u_s = -m_s \ddot{u}_g \quad (4)$$

$$(m_s \cdot \ddot{u}_s + m_s \cdot \ddot{u}_b + m_b \cdot \ddot{u}_b) + c_b \cdot \dot{u}_b + k_b \cdot u_b = -(m_s + m_b) \ddot{u}_g \quad (5)$$

Simplificando la expresión (4) y (5), resulta la ecuación (6).

$$m \cdot \ddot{u} + c \cdot \dot{u} + k \cdot u = -m \cdot \ddot{u}_g \quad (6)$$

Para los sistemas de varios grados de libertad, la ecuación de equilibrio toma la misma forma que en un sistema de 1GDL, aunque ahora se trata de una ecuación matricial.

$$M \cdot \ddot{u} + C \cdot \dot{u} + K \cdot u = -M \cdot \ddot{u}_g \quad (7)$$

II.2. Campanario adosado a los muros de la fachada

Se presentan las ecuaciones que describen la respuesta sísmica del campanario simple adosado a los muros de la fachada. En este modelo, el sistema se idealiza como un sistema de dos grados de libertad (2GDL). Entonces, la aceleración relativa \ddot{u} del campanario se describe como ecuaciones diferenciales de primer orden dadas por:

$$\ddot{u}_1 = -\ddot{u}_g + \frac{1}{1-r_0} [-2 \xi_1 \omega_1 \dot{u}_1 + r_0 2 \xi_2 \omega_2 \dot{u}_2 - \omega_1^2 u_1 + r_0 \omega_2^2 u_2] \quad (8)$$

$$\ddot{u}_2 = \frac{1}{1-r_0} [-2 \xi_1 \omega_1 \dot{u}_1 - 2 \xi_2 \omega_2 \dot{u}_2 + \omega_1^2 u_1 - \omega_2^2 u_2] \quad (9)$$



En las ecuaciones (8) y (9), \ddot{u}_1 y \ddot{u}_2 denotan la aceleración relativa del sistema de 2DOF para el primer y segundo piso, \ddot{u}_g denota la aceleración del suelo de entrada, ω_1 y ω_2 son las frecuencias no amortiguadas, éstas se expresan de la siguiente forma: $\omega_1 = \sqrt{k_1/(m_1 + m_2)}$ y $\omega_2 = \sqrt{k_2/m_2}$, donde m_1 y m_2 son las masas y k_1 y k_2 son las rigideces, $\xi_1 = (c_1 + c_2)/(2 m_1 \omega_1)$ y $\xi_2 = c_2/(2 m_2 \omega_2)$ son las relaciones de amortiguamiento nominales de la estructura de 2DOF. Además de $r_0 = m_2/(m_1 + m_2)$.

II.3. Campanario apoyado sobre un sistema de aislamiento lineal

El conjunto de ecuaciones que rigen para el campanario apoyado con un sistema de aislamiento lineal es:

$$\ddot{u}_1 = -\ddot{u}_g + \frac{1}{1-r_1} [-2 \xi_1 \omega_1 \dot{u}_1 + 2 \xi_b \omega_b \dot{u}_b - \omega_1^2 u_1 + r_1 \omega_b^2 u_b] \quad (10)$$

$$\ddot{u}_b = \frac{1}{1-r_1} [-2 \xi_1 \omega_1 \dot{u}_1 + \omega_1^2 u_1] + \frac{1-r_1 r_b}{(1-r_1)(1-r_b)} [-2 \xi_b \omega_b \dot{u}_b - \omega_b^2 u_b] \quad (11)$$

$$+ \frac{r_b}{1-r_b} [-2 \xi_2 \omega_2 \dot{u}_2 + \omega_2^2 u_2]$$

$$\ddot{u}_2 = \frac{1}{1-r_b} [-2 \xi_b \omega_b \dot{u}_b - 2 \xi_2 \omega_2 \dot{u}_2 + \omega_b^2 u_b - \omega_2^2 u_2] \quad (12)$$

Donde \ddot{u}_b denota la aceleración relativa del aislador, $\omega_1 = \sqrt{k_1/(m_1 + m_b + m_2)}$, $\omega_b = \sqrt{k_b/(m_b + m_2)}$ y $\omega_2 = \sqrt{k_2/m_2}$ son las frecuencias no amortiguadas (donde m_b es la masa y k_b es la rigidez del sistema de aislamiento), y $\xi_1 = c_1/[2\omega_1(m_1 + m_b + m_2)]$, $\xi_b = c_b/[2\omega_b(m_b + m_2)]$ y $\xi_2 = c_2/(2\omega_2 m_2)$ son las relaciones de amortiguamiento nominales de la estructura de 3DOF. Por otra parte, en las ecuaciones (9) y (10), $r_1 = (m_b + m_2)/(m_1 + m_b + m_2)$ y $r_b = m_2/(m_b + m_2)$.

II.4. Campanario apoyado sobre un sistema de aislamiento bilineal

La ecuación de movimiento del campanario sobre una base bilineal aislada, que es una idealización del comportamiento de los apoyos esféricos deslizantes, con resistencia del sistema de aislamiento $Q_b = \mu_b (m_b + m_2) g$ y el desplazamiento de fluencia del comportamiento bilineal u_{yb} se puede escribir como:

$$\ddot{u}_1 = -\ddot{u}_g + \frac{1}{1-r_1} [-2 \xi_1 \omega_1 \dot{u}_1 + \mu_b g z - \omega_1^2 u_1 + r_1 \omega_b^2 u_b] \quad (13)$$

$$\ddot{u}_b = \frac{1}{1-r_1} [-2 \xi_1 \omega_1 \dot{u}_1 + \omega_1^2 u_1] + \frac{1-r_1 r_b}{(1-r_1)(1-r_b)} [-\mu_b g z - \omega_b^2 u_b] \quad (14)$$

$$+ \frac{r_b}{1-r_b} [-2 \xi_2 \omega_2 \dot{u}_2 + \omega_2^2 u_2]$$

$$\ddot{u}_2 = \frac{1}{1-r_b} [\mu_b g z - 2 \xi_2 \omega_2 \dot{u}_2 + \omega_b^2 u_b - \omega_2^2 u_2] \quad (15)$$

$$\dot{z} = \frac{1}{u_y} (u_b - \beta u_b |z|^n - \gamma |u_b| |z| |z|^{n-1}) \quad (16)$$



Donde μ_b es el coeficiente de fricción del cojinete deslizante esférico. En las ecuaciones (13, 14 y 15), el parámetro histérico adimensional z explica el comportamiento bilineal del sistema de aislamiento, y la forma del ciclo histérico viene dada nuevamente por un modelo de Bouc – Wen con parámetros β , γ y n (Bouc 1971; Wen 1976). En la ecuación (16), el parámetro \dot{z} denota la derivada del tiempo. Considerando u_y un valor muy pequeño, es decir, $u_y = 0.25 \text{ mm}$.

Por otro lado, en el caso de que la base se encuentre aislada sobre un cojinete de caucho de plomo que tenga una resistencia del sistema de aislamiento Q_b , el término $\mu_b g$ en las ecuaciones (13), (14) y (15) se deben remplazar con $Q_b/(m_b + m_2)$.



III. PARÁMETROS DINÁMICOS CONSIDERADOS

III.1. Periodo de la estructura

El periodo de una estructura se define como el tiempo requerido para dar una oscilación en la dirección que se está considerando. Las propiedades dinámicas han sido determinadas al establecer un periodo asociado al primer modo de vibrar donde existe una mayor excitación sísmica fijado con un $T_1 = 0.75$ s y trasladado a los periodos de 1 s, 2 s y 3 s, (SA_2, SA_3 y SA_4) respectivamente, como puede visualizarse en el espectro de respuesta del registro sísmico denominado “LANE” en la Figura III-1.

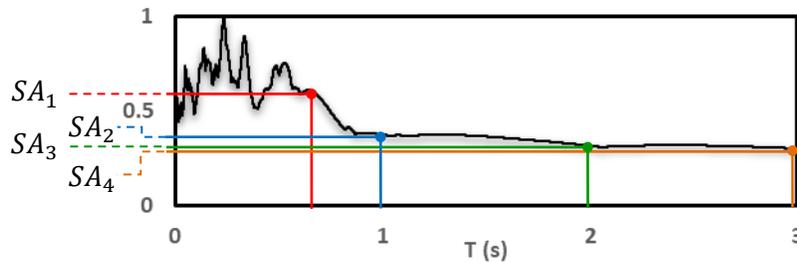


Figura III-1. Determinación de periodos de vibrar. Espectro de respuesta de LANE.

III.2. Rigidez lateral de la estructura

Para cumplir con los periodos establecidos anteriormente, se utiliza la ecuación (17) donde K es la rigidez lateral, E es el módulo de elasticidad, I es el momento de inercia y L es la longitud del elemento estructural.

$$K = \frac{12 (E I)}{L^3} \quad (17)$$

En la Tabla 2, se puede observar la rigidez lateral asociada a cada periodo mencionado anteriormente.

Tabla 2. Rigidez lateral asociado a cada periodo.

Periodo T [s]	Rigidez K $\left[\frac{\text{Ton}_f}{\text{m}} \right]$
0.75	1,141.3
0.3	143.1

III.3. Coeficiente de amortiguamiento del aislador

Para la estimación del coeficiente de amortiguamiento del aislador, se hace uso de la ecuación (18), mostrada a continuación.

$$c_b = 2 (m_b + m_s) \omega_b \xi_b \quad (18)$$



Se ha establecido una masa del aislador con una relación del 10% de la masa del nivel superior para este análisis, sin embargo, este valor no es constante debido a la estructuración de cada campanario, dicho lo anterior, consideramos las siguientes condiciones: 1) Una masa del aislador de $m_b = 32.62 [kg s^2/m]$, 2) una masa del nivel superior de $m_s = 326.2 [kg s^2/m]$ y 3) los periodos establecidos del aislador de $T_b = 1 \dots 3 s$, con un amortiguamiento de $\xi_b = 15\%$ para todos los casos y la frecuencia correspondiente al primer periodo de $T_b = 1 s$ es de $\omega_{b_1} = 6.2832 [rad/s]$ obtenida con la expresión (19) donde T es el periodo del aislador.

$$\omega = \frac{2 \pi}{T} \quad (19)$$

Realizando la evaluación de los datos, resulta los siguiente:

$$c_{b_1} = 671.52 \frac{kg_f s}{m} \quad (20)$$

En la Tabla 3, se pueden observar los resultados de coeficiente de amortiguamiento correspondientes para los periodos de 1, 2 y 3 s.

Tabla 3. Resumen de resultados de coeficiente de amortiguamiento.

Periodo $T_b [s]$	Coeficiente de amortiguamiento $c_b \left[\frac{kg_f s}{m} \right]$
1	671.52
2	340.31
3	112.49

III.4. Rigidez del aislador

El cálculo de la rigidez del aislador se determina con la ecuación (21).

$$K_b = \frac{\omega_b^2 (m_b + m_s)}{2} \quad (21)$$

Considerando las siguientes condiciones, el periodo del aislador establecido de $T_b = 1 s$, una frecuencia del aislador de $\omega_b = 6.2832 [rad/s]$, una masa del aislador de $m_b = 32.62 [kg s^2/m]$ y una masa del nivel superior de $m_s = 326.2 [kg s^2/m]$, se realiza la evaluación de los datos y resulta los siguiente:

$$K_{b_{T=1s}} = 7082.823 \frac{kg_f}{m} \quad (22)$$



Realizando el mismo procedimiento para los periodos restantes, se pueden resumir los datos en la Tabla 4, mostrando para cada periodo establecido, las frecuencias correspondientes ω_b , la masa del aislador m_b , considerada constante para los 3 casos, de igual modo, la masa del nivel 2 m_s y finalmente la rigidez del aislador K_b .

Tabla 4. Resumen de resultados de rigidez.

<i>Periodo</i> $T_b [s]$	<i>Frecuencia</i> $\omega_b \left[\frac{rad}{s} \right]$	<i>Masa de aislador</i> $m_b \left[\frac{kg s^2}{m} \right]$	<i>Masa</i> $m_s \left[\frac{kg s^2}{m} \right]$	<i>Rigidez</i> $K_b \left[\frac{kgf}{m} \right]$
1	6.28			7082.82
2	3.14	32.62	326.2	1948.36
3	2.09			786.98



IV. MODELO DINÁMICO DE CAMPANARIO CON Y SIN AISLADORES SÍSMICOS

IV.1. Configuraciones de la estructura

En el sistema se consideran los casos: 1) Sistema de dos grados de libertad (2GDL) y 2) Sistema de tres grados de libertad (3GDL). La Figura IV-1 a), representa el modelo de una estructura de 2GDL, en la cual se simbolizan m_2, ξ_2 y k_2 : masa, amortiguamiento y rigidez del nivel 2 y m_1, ξ_1 y k_1 : masa, amortiguamiento y rigidez del nivel 1, asimismo en la Figura IV-1 b) representa el sistema simple constituido por una masa, una rigidez y un amortiguador de 2GDL. De igual manera, en la Figura IV-2 a) se muestra el modelo de una estructura de 3GDL donde m_b, ξ_b y k_b : masa, amortiguamiento y rigidez del sistema de aislación y en la Figura IV-2 b) representa el sistema simple constituido por una masa, una rigidez y un amortiguador de 3GDL.

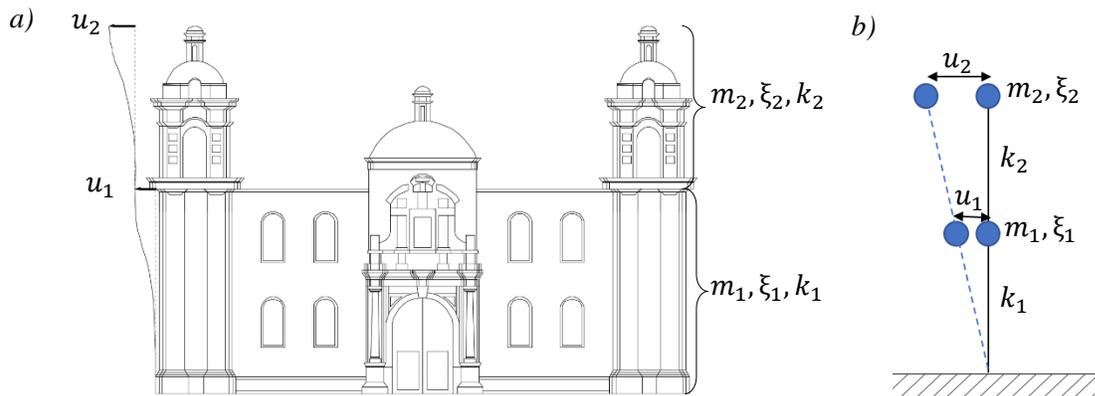


Figura IV-1. Sistema de 2GDL.

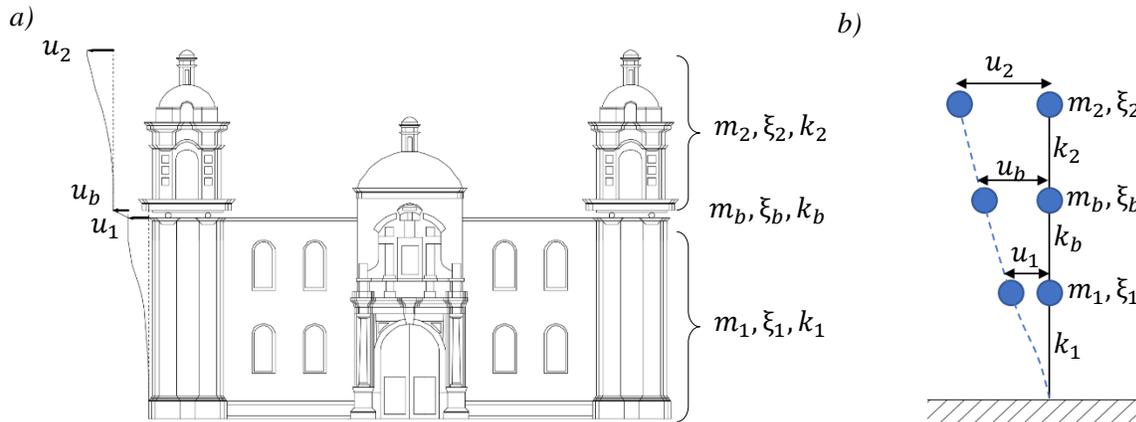


Figura IV-2. Sistema de 3GDL.

IV.2. Dimensiones del campanario

En la Figura IV-3 se podrán visualizar las dimensiones del campanario propuesto, con una altura total de 25 m, la altura del nivel 1 es de 16.5 m, la altura del nivel 2 es de 8.5 m, el ancho de la estructura es de 5 m.

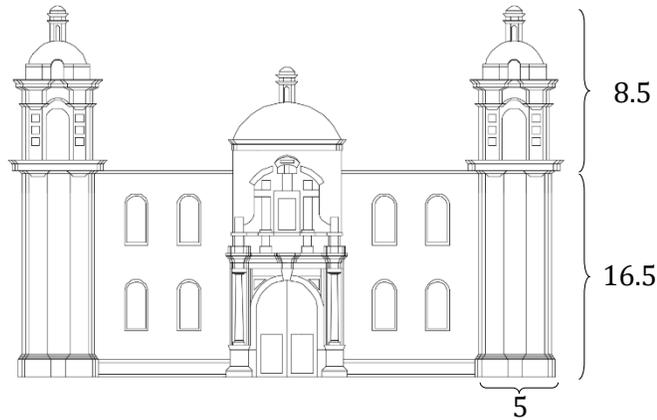


Figura IV-3. Dimensiones del sistema, acotaciones en m.

IV.3. Modos de vibrar de la estructura

Un modo de vibrar es un patrón o forma característica en el que vibrará un sistema. La estructura hipotética de la iglesia cuenta con un periodo fundamental establecido de 0.75 s asociado al primer modo de vibrar y 0.3 s asociado al segundo modo de vibrar, además, cuenta con la rigidez lateral mostrada en el Capítulo III.2 satisfaciendo los periodos requeridos. Se asumió un coeficiente de amortiguamiento del 5 % del crítico.

La Figura IV-4 muestra un sistema de 2GDL. A cada modo de vibrar de la estructura corresponden los periodos propuestos de 0.75 s y 0.3 s. La Figura IV-5 muestra el sistema de 3GDL con el sistema de aislación a media altura con los periodos propuestos de 1, 2 y 3 s para el primer modo de vibrar y 0.3 s para el segundo modo de vibrar.

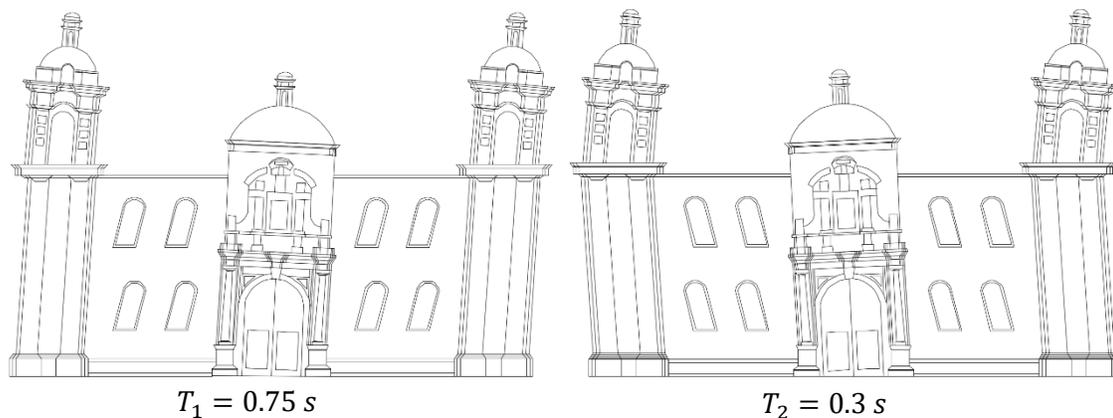


Figura IV-4. Modo de vibrar del sistema sin aislación.

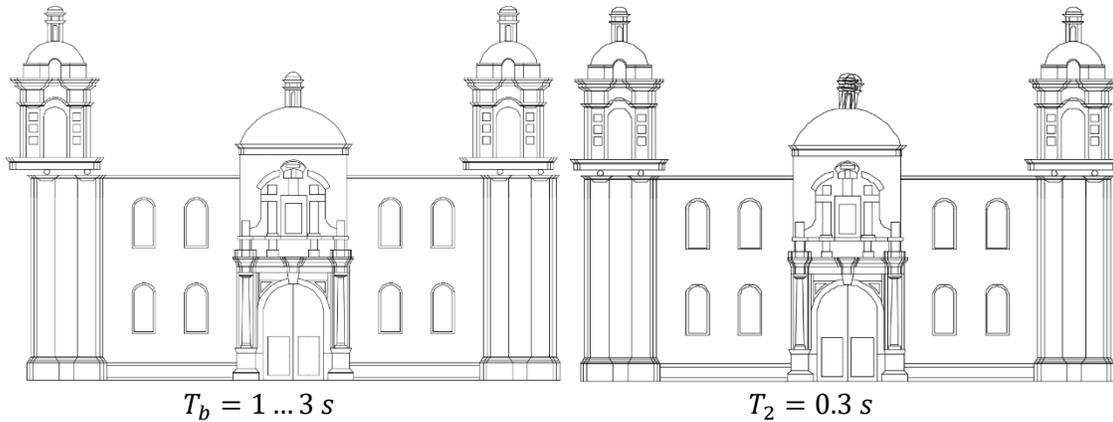


Figura IV-5. Modo de vibrar del sistema con aislamiento del campanario.

IV.4. Modelo dinámico del sistema estructural

Se consideran dos sistemas de análisis, el primer modelo se conforma por un sistema de 2GDL, constituido por dos crujeías con una distancia de 5 m, una altura total 25 m y con la base empotrada. El segundo modelo considerado como un sistema de 3GDL con un sistema de aislamiento sísmico a media altura con un aislador de 20 cm de altura. Ambos modelos cuentan con las propiedades dinámicas descritas en el Capítulo III. Asimismo, los sistemas estructurales se modelan en ETABS, como puede observarse en la Figura IV-6.

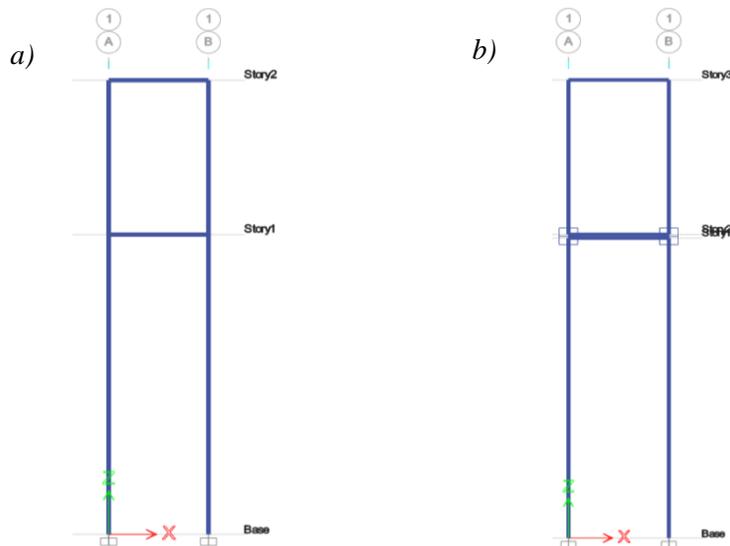


Figura IV-6. a) Sistema de 2GDL y b) Sistema de 3GDL. Hecho en ETABS.



V. EXCITACIÓN SÍSMICA PARA EL SISTEMA ESTRUCTURAL



V.1. Registros sísmicos utilizados

En el sistema propuesto se utilizan siete registros sísmicos, con magnitudes de al menos 7 grados en la escala de magnitud. A continuación, se muestran los acelerogramas utilizados. La influencia del contenido de frecuencias del movimiento del suelo en la respuesta de la estructura de 2GDL y 3GDL se explica en este estudio con el uso de siete registros sísmicos, representativos de movimientos de alta intensidad obtenidos en las estaciones acelerométricas RABO, SCRU, CALE, HMTT, JAMI, LANE y NILT que se instalan sobre sitios de roca. Estos sitios son de particular importancia debido a que ya se han registrado los movimientos sísmicos más intensos y destructivos. En la Tabla 5 se muestran las magnitudes máximas de cada registro sísmico, la fecha y la región en la que se localizó, asimismo, en la Figura V-1, se muestran los acelerogramas correspondientes en unidades en [g].

Tabla 5. Registros sísmicos empleados.

<i>Registro</i>	<i>Magnitud $[M_w]$</i>	<i>PGA [g]</i>	<i>Fecha</i>	<i>Estado</i>
CALE970111	7.1	0.498	11/01/1997	Michoacán
JAMI990930	7.4	0.404	30/09/1999	Oaxaca
LANE990330	7.4	0.256	30/09/1999	Oaxaca
NILT170908	8.2	0.498	08/09/2017	Chiapas
SCRU170908	8.2	0.244	08/09/2017	Chiapas
RABO170919	7.1	0.164	19/09/2017	Puebla
HMTT170919	7.1	0.178	19/09/2017	Puebla

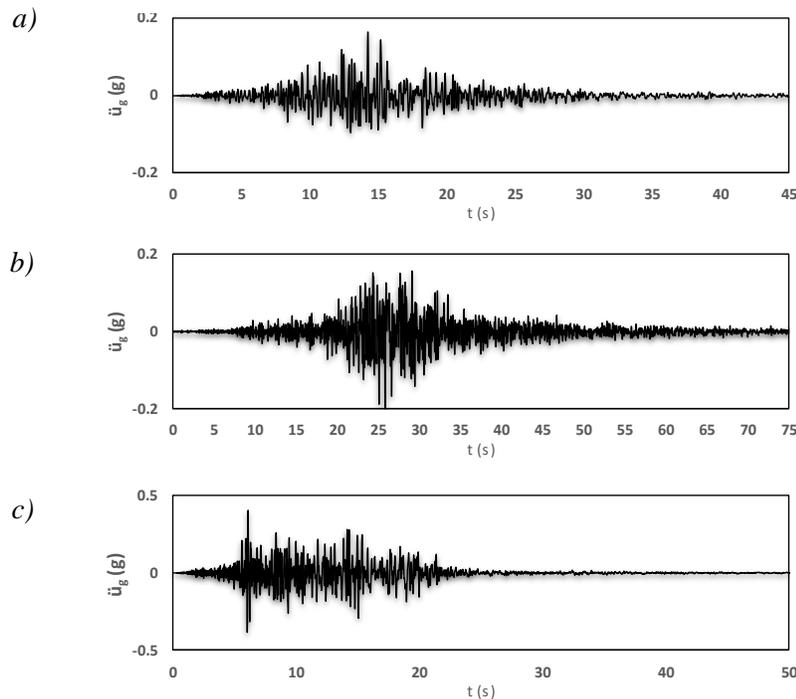


Figura V-1. Movimientos sísmicos utilizados. a) RABO, b) SCRU, c) CALE, d) HMTT, e) JAMI, f) LANE y g) NILT.

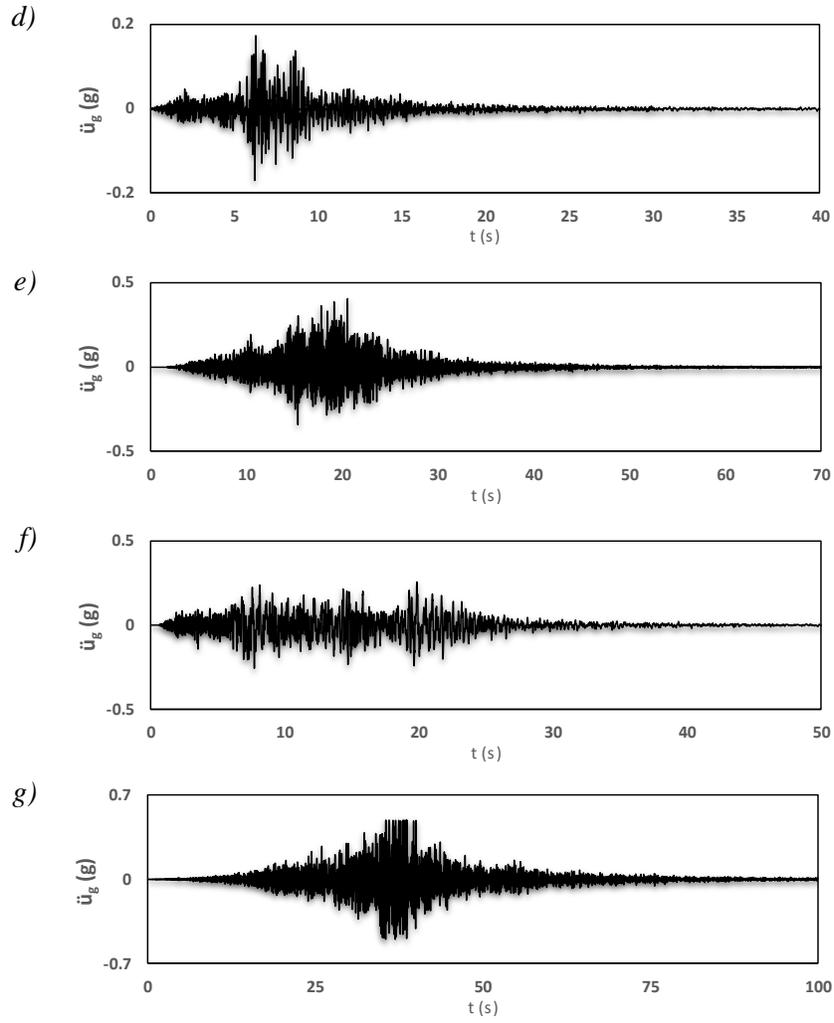


Figura V-1. Continuación.



V.2. Espectros de respuesta de aceleración

El espectro de respuesta muestra la respuesta máxima (expresada en términos de desplazamiento, velocidad o aceleración) que produce una acción dinámica determinada en varios osciladores de 1GDL. Se han seleccionado siete registros sísmicos dentro de la República Mexicana, con diferentes características del suelo según sus intensidades, siendo distintos con respecto al suelo como se puede observar con las estaciones JAMI y LANE, siendo los periodos predominantes 0.15 s y 0.27 s, respectivamente. Tomando como antecedente las condiciones espectrales de los registros sísmicos considerados, se espera una diferencia de resultados entre los acelerogramas, teniendo diferentes resultados de los sitios examinados para un sistema de 1GDL. En la Figura V-2, se muestran los espectros de aceleración para los registros sísmicos de RABO, SCRU, CALE, HMTT, JAMI, LANE y NILT hasta un periodo de 3 s. Unidades en [g].

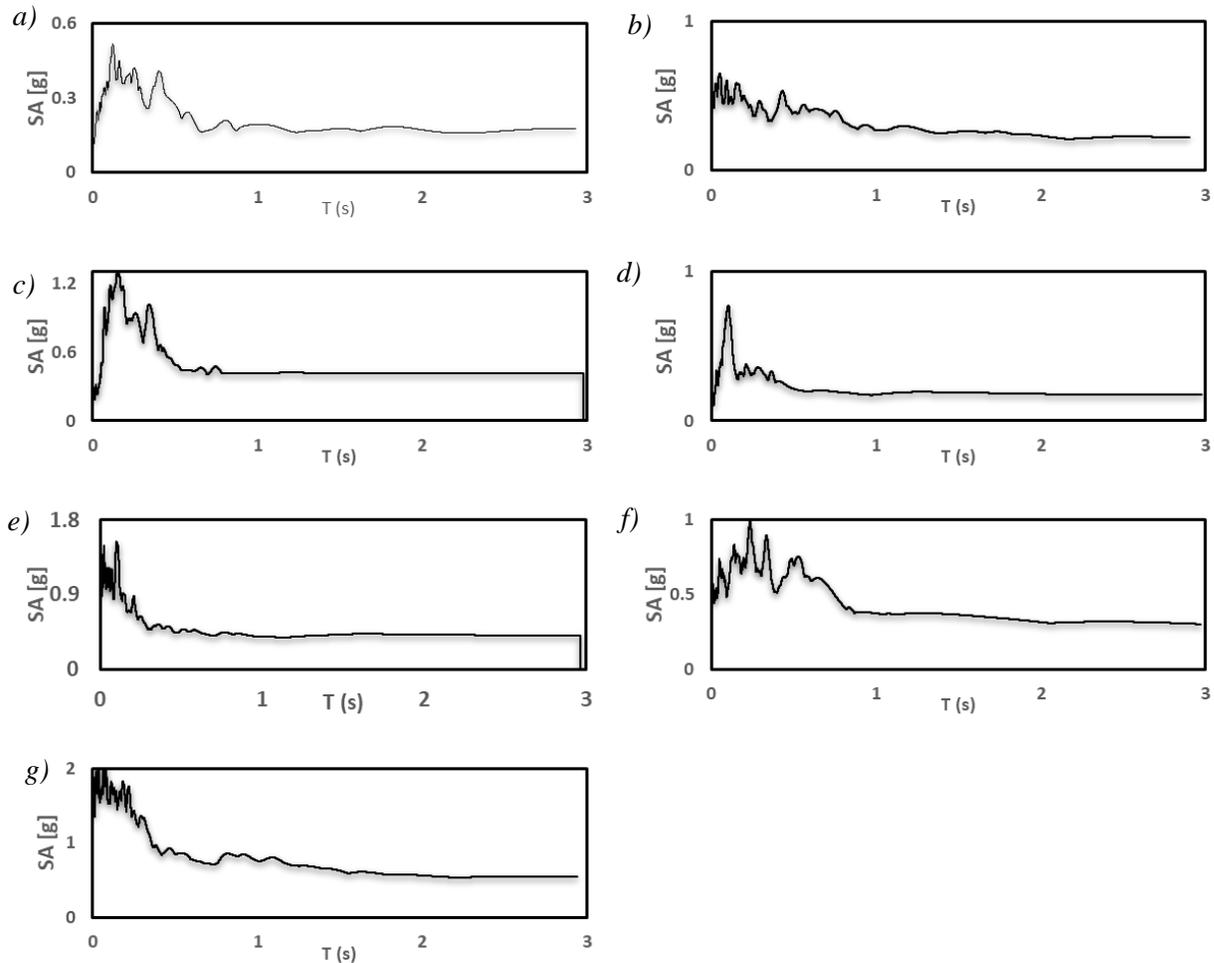


Figura V-2. Espectros de respuesta de aceleración. a) RABO, b) SCRU, c) CALE, d) HMTT, e) JAMI, f) LANE y g) NILT.

V.3. Espectros de respuesta de desplazamiento

Los espectros de respuesta de desplazamiento, de igual manera que el espectro de respuesta de aceleraciones, representan la respuesta estructural máxima para los sistemas de varios osciladores de 1GDL. De acuerdo a los periodos considerados en el Capítulo III.1, se puede observar en la Figura V-3 que los desplazamientos aumentan con relación al aumento del periodo, estos desplazamientos serán absorbidos por el aislador. Asimismo, se muestran los espectros de desplazamiento para los registros sísmicos de RABO, SCRU, CALE, HMTT, JAMI, LANE y NILT hasta un periodo de 3 s. Unidades en [cm].

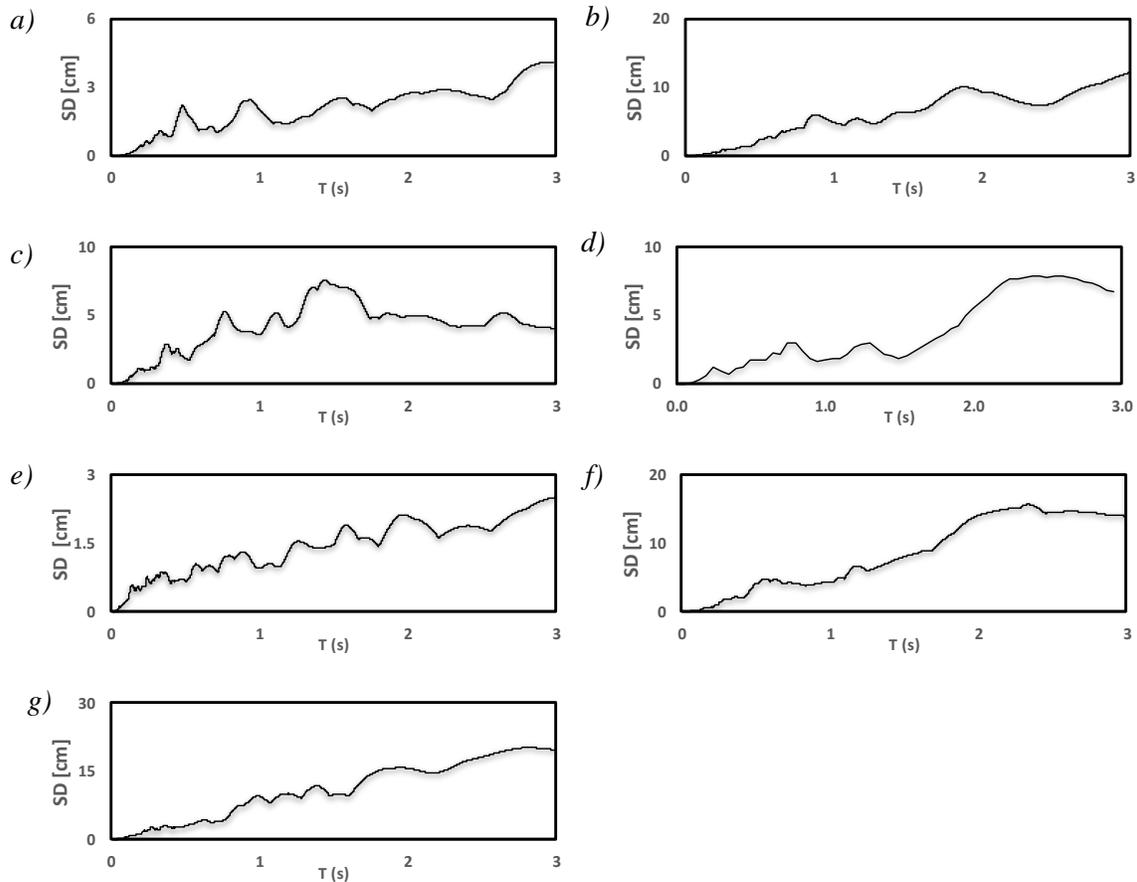


Figura V-3. Espectros de respuesta de desplazamiento. a) RABO, b) SCRU, c) CALE, d) HMTT, e) JAMI, f) LANE y g) NILT.



VI. RESULTADOS

Para la expresión de los resultados de la respuesta estructural obtenidos mediante la modelación del sistema en ETABS, se extrajeron los resultados siguientes: 1) desplazamientos y aceleraciones relativas del nivel dos y 2) desplazamientos y aceleraciones relativas del sistema de aislación, sin embargo, se presentan los resultados para RABO para los periodos del aislador de $T_b = 1 \dots 3$ s en las Figura VI-1, VI-2 y VI-3. Los resultados correspondientes para el análisis de los acelerogramas restantes, SCRU, CALE, HMTT, JAMI, LANE y NILT se encuentran en el Apéndice B. Asimismo, se podrá visualizar la diferencia de la respuesta estructural del sistema sin aislación o tradicional con el sistema aislado a media altura para los periodos del aislador de $T_b = 1 \dots 3$ s.

VI.1. Caso RABO 19/09/2017 $M_w = 7.1$

Periodo $T_b = 1$ s. Historias de desplazamiento y aceleración relativa

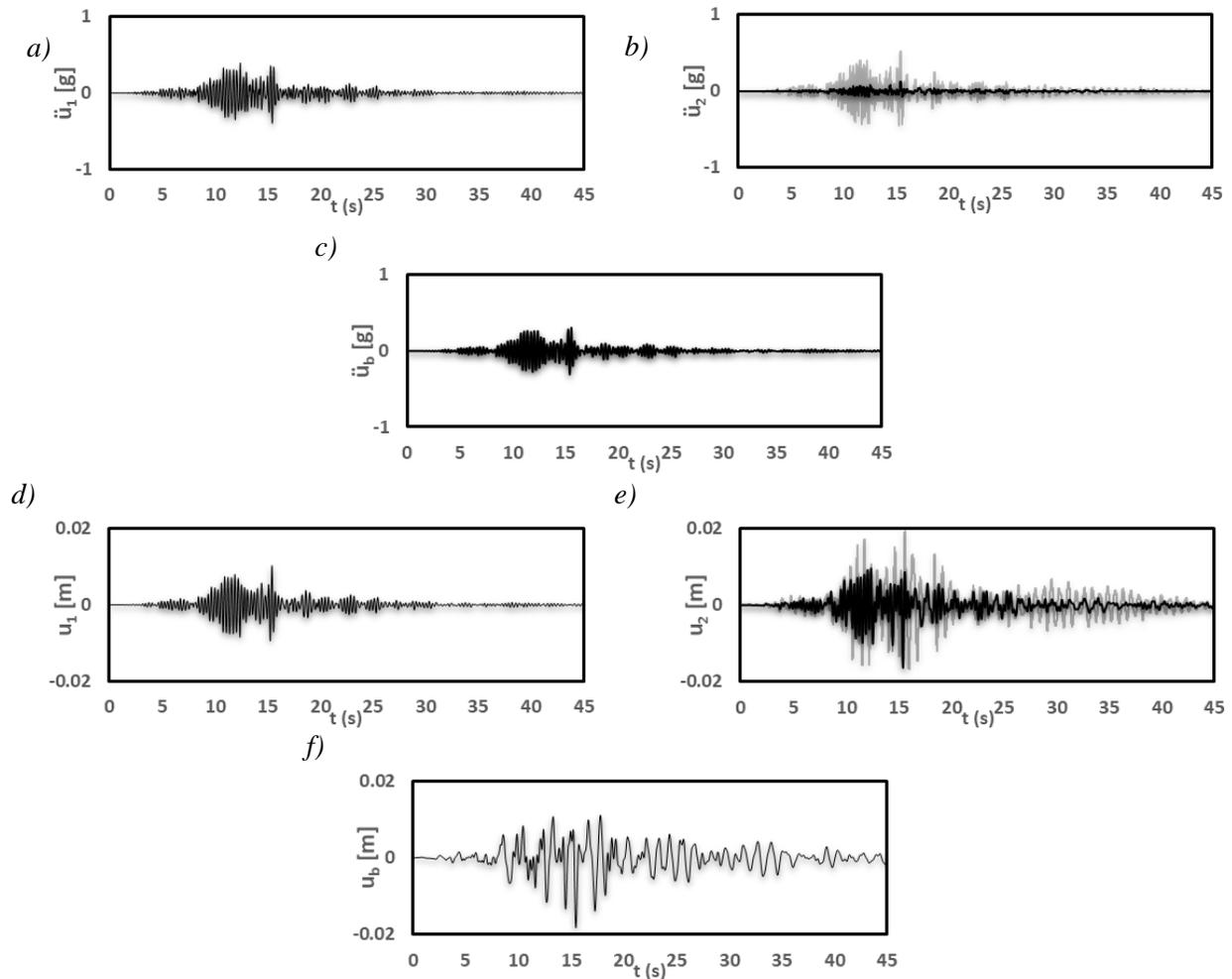


Figura VI-1. Historias de aceleración relativa del nivel 1 (a), aceleración relativa nivel 2 (b), aceleración del aislador (c), historias de desplazamiento relativo del nivel 1 (d), desplazamiento relativo del nivel 2 (e) y desplazamiento del aislador (f). RABO; $T_b = 1$ s. Sistemas de 2GDL (Línea gris) y 3GDL (Línea negra). Éste último incluye un sistema de aislación a media altura.



Periodo $T_b = 2$ s. Historias de desplazamiento y aceleración relativa

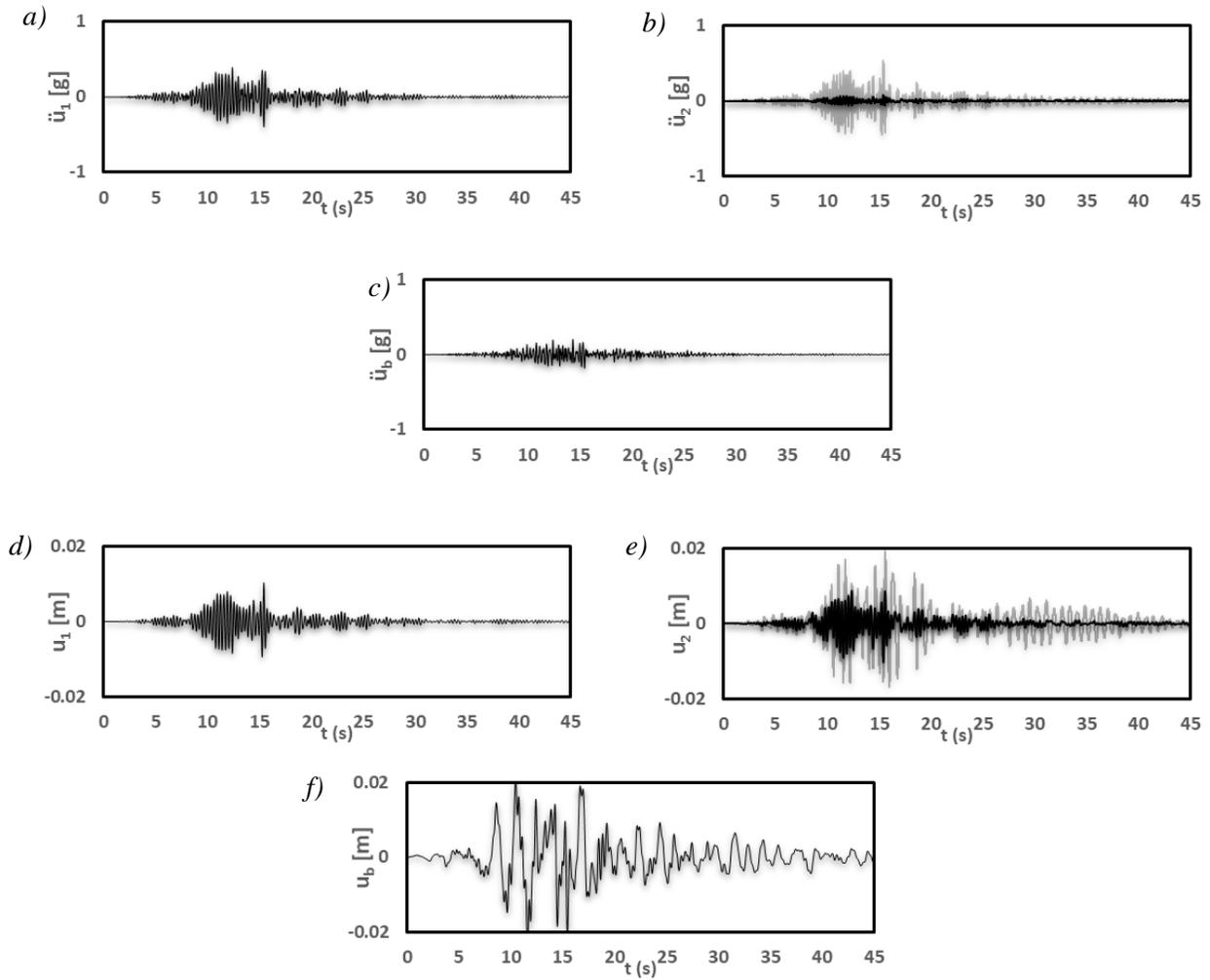


Figura VI-2. Historias de aceleración relativa del nivel 1 (a), aceleración relativa nivel 2 (b), aceleración del aislador (c), historias de desplazamiento relativo del nivel 1 (d), desplazamiento relativo del nivel 2 (e) y desplazamiento del aislador (f). RABO; $T_b = 2$ s. Sistemas de 2GDL (Línea gris) y 3GDL (Línea negra). Éste último incluye un sistema de aislación a media altura.



Periodo $T_b = 3$ s. Historias de desplazamiento y aceleración relativa

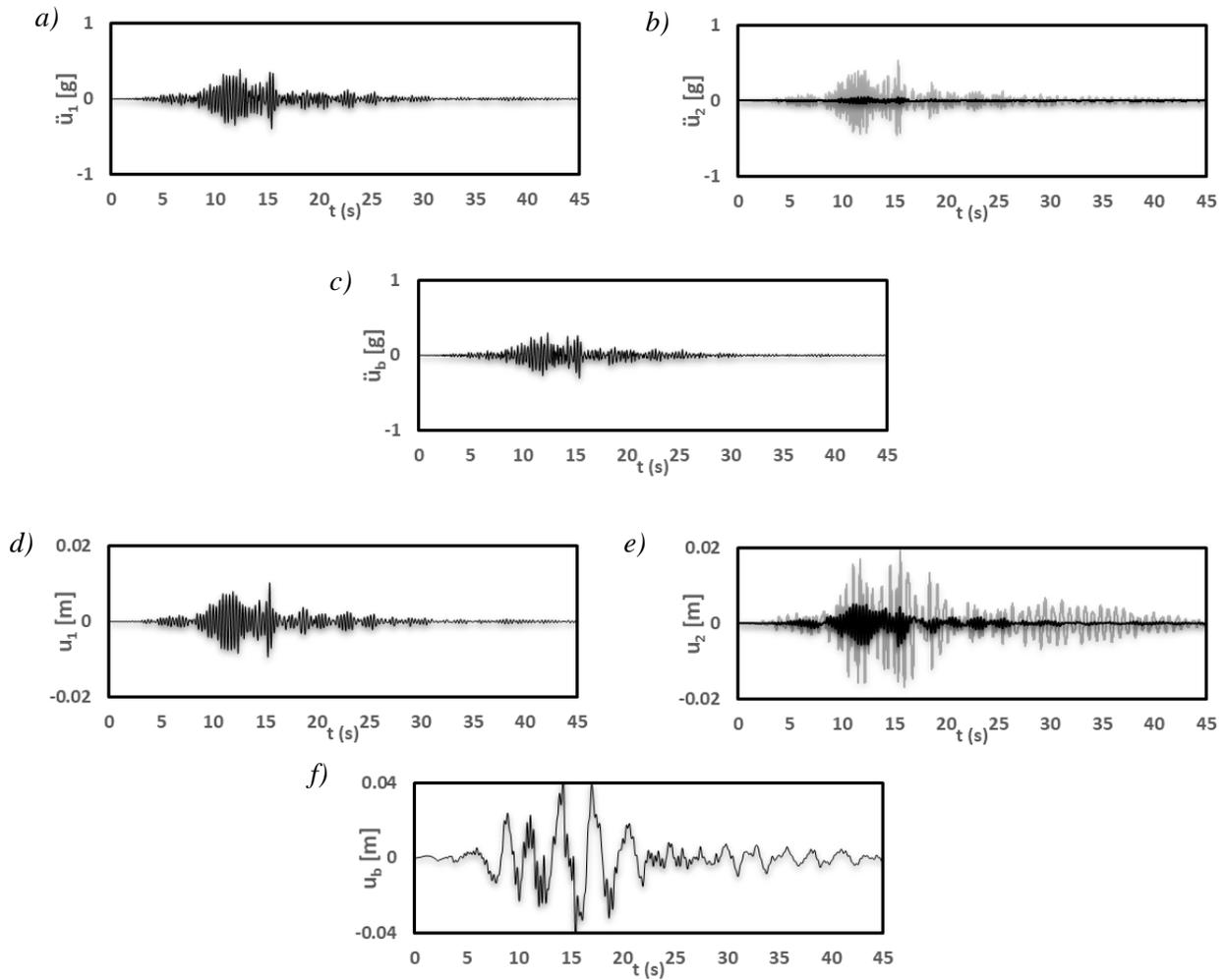


Figura VI-3. Historias de aceleración relativa del nivel 1 (a), aceleración relativa nivel 2 (b), aceleración del aislador (c), historias de desplazamiento relativo del nivel 1 (d), desplazamiento relativo del nivel 2 (e) y desplazamiento del aislador (f). RABO; $T_b = 3$ s. Sistemas de 2GDL (Línea gris) y 3GDL (Línea negra). Éste último incluye un sistema de aislamiento a media altura.



A continuación, se presentan los resultados comparando los desplazamientos y las aceleraciones relativas del nivel dos, así como también, el desplazamiento del aislador para los registros sísmicos mencionados en la Tabla 5 para los tres casos propuestos de periodos para el aislador sísmico. En la Figura VI-4 se muestran la comparación de: a) desplazamiento relativo del nivel dos, b) aceleración relativa del nivel dos y c) desplazamiento del aislador, para cada registro sísmico desglosado por periodo propuesto.

Se comparan los resultados del comportamiento de la estructura adosada al muro de la fachada con la respuesta de la estructura con la implementación de los aisladores sísmicos para los periodos de $T_b = 1 \dots 3$ s para el nivel dos. La implementación de los dispositivos de aislamiento sísmico disminuye considerablemente la respuesta estructural para los casos con un periodo establecido de 3 s. Los resultados para los periodos establecidos de 1 s y 2 s, se comportan de manera similar con respecto al periodo de 3 s. A continuación, en la Tabla 6 se presentan los porcentajes de reducción de aceleraciones y desplazamientos relativos para los registros sísmicos RABO, LANE, y NILT del nivel dos para una mejor visualización de los resultados.

Tabla 6. Porcentaje de reducción de desplazamientos relativos (Dr) y aceleraciones relativas (Ar) para el nivel dos. Datos en porcentaje.

<i>Periodo T_b [s]</i>	RABO		LANE		NILT	
	Dr (%)	Ar (%)	Dr (%)	Ar (%)	Dr (%)	Ar (%)
1	56	77	82	81	51	81
2	61	85	97	87	69	88
3	87	92	95	95	85	94

Se puede determinar que la implementación de los aisladores sísmicos con un periodo de 3 s reduce significativamente los desplazamientos y las aceleraciones relativas, sin embargo, se puede visualizar para el registro sísmico de LANE, comparando un aislador con un periodo de 2 s tiene mayor impacto en la reducción de los desplazamientos relativos, no obstante, la aceleración relativa sigue siendo mayor en comparación con un aislador con un periodo de 3 s.

Finalmente, las aceleraciones de los aisladores sísmicos ante la excitación sísmica para los casos estudiados son muy semejantes, por lo tanto, el aislador absorbe la mayor cantidad de energía producida por los sismos.

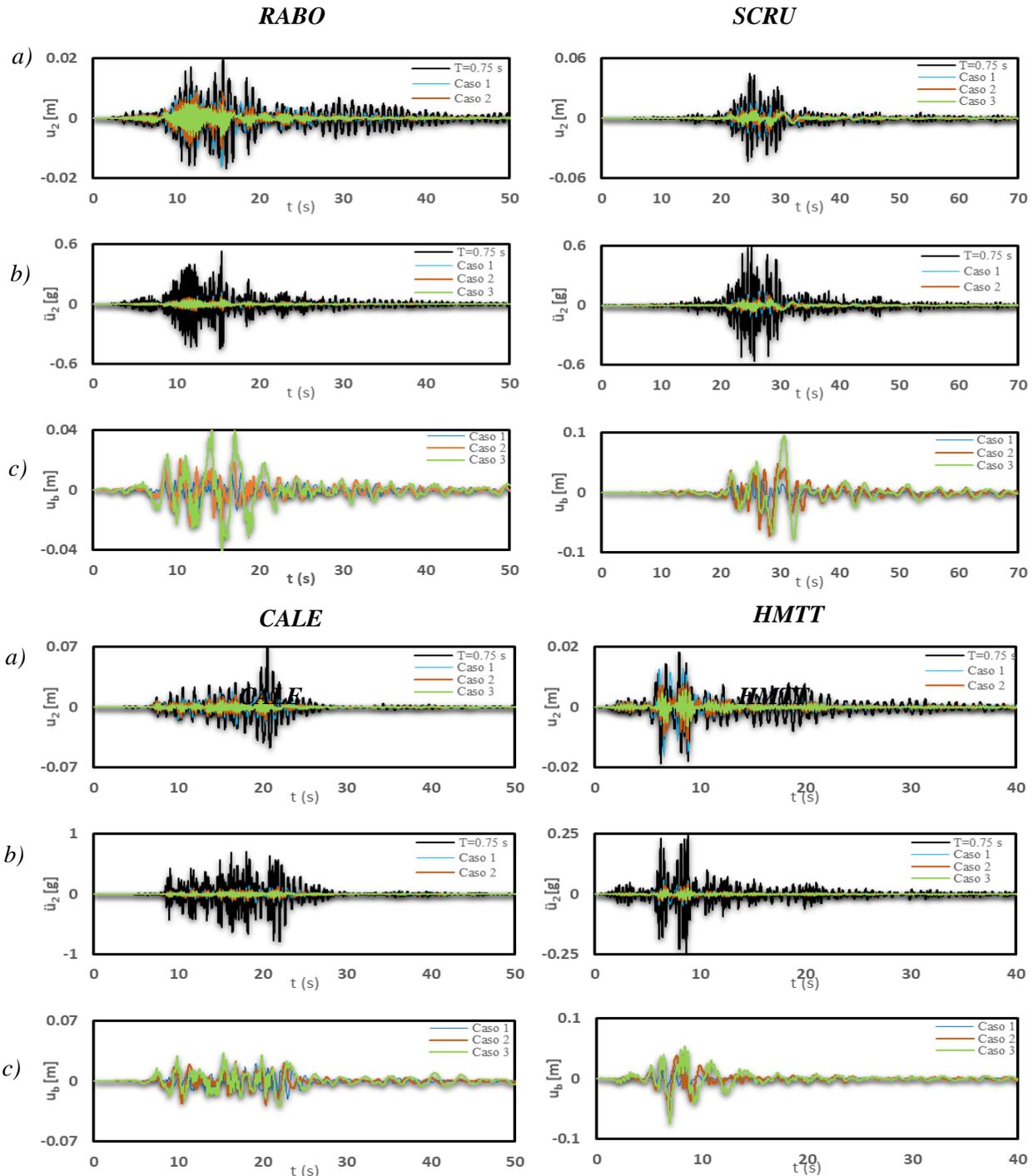


Figura VI-4. Comparación de historias de respuesta de desplazamiento (a) y aceleración relativa para el nivel 2 (b) y desplazamiento del aislador (c). Para RABO, SCRU, CALE, HMTT, JAMI, LANE, NILT. I) Línea negra corresponde a un sistema sin aislación de $T = 0.75$ s, II) Caso 1, corresponde línea azul, III) Caso 2, corresponde línea naranja, IV) Caso 3, corresponde línea verde.

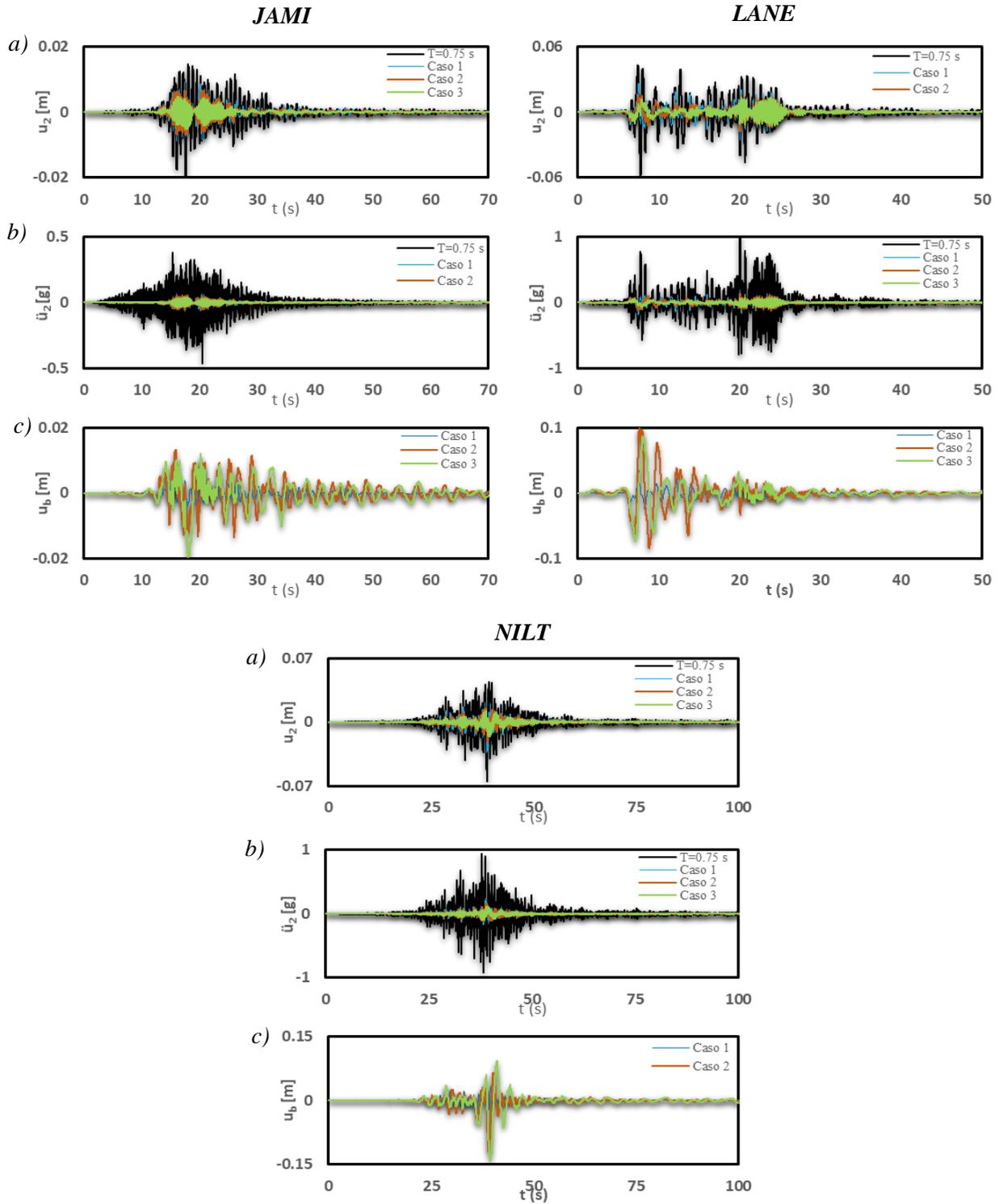


Figura VI-4. Continuación.



VII. INSTALACIÓN DE AISLADORES SÍSMICOS

Para realizar la instalación de los aisladores sísmicos, se propone una estructuración que debe ser conformada con los elementos necesarios para poder cumplir con su funcionamiento óptimo, para esto es indispensable contar con los siguientes elementos que pueden observarse en la Figura VII-1. 1) *Superestructura*. En este punto se encuentran instalados los elementos como campanas, representaciones religiosas, entre otros. Se encuentra sobre el sistema de aislamiento, 2) *Estructura base*. Elemento estructural requerido para proporcionar rigidez y estabilidad al sistema, dando la seguridad de que el movimiento en los aisladores sea exactamente el mismo en todos los casos. 3) *Aisladores sísmicos*. Elementos estructurales encargados de desacoplar el campanario del edificio de la estructura inferior y así proteger la integridad del mismo. Se encuentran entre la superestructura y la subestructura, y 4) *Subestructura*. Base de la estructura que brinda apoyo y soporte al campanario.

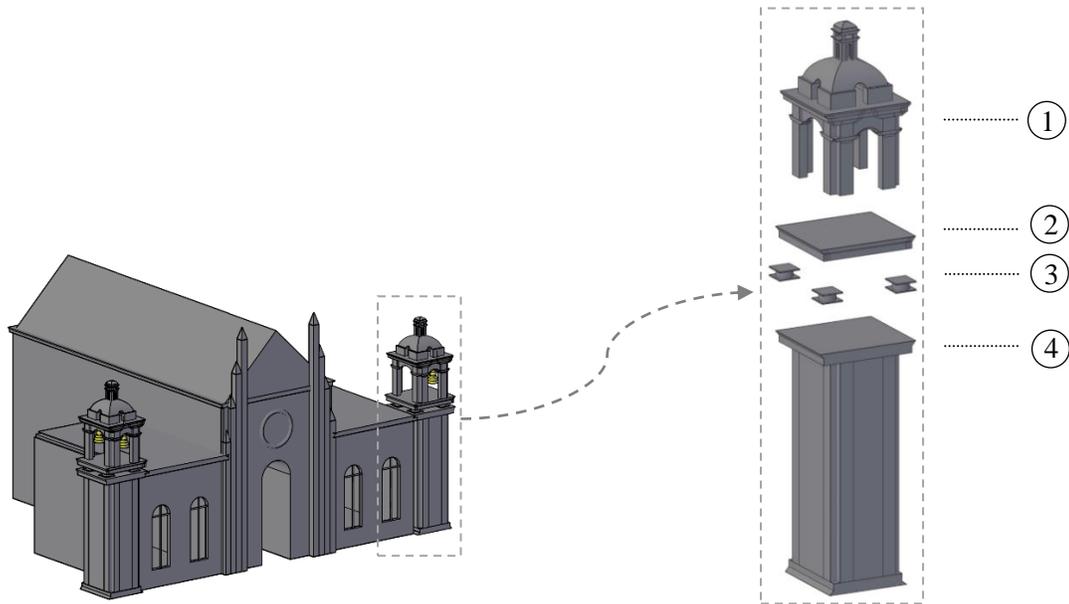


Figura VII-1. Instalación de campanario.



VIII. CONCLUSIONES



En este estudio se evaluó la factibilidad de la implementación de los sistemas de aislación sísmica en estructuras de campanarios. Se analizaron dos casos, 1) Estructura convencional o sin sistema de aislación y 2) Estructura con sistema de aislación con un periodo establecido de $T_b = 1, 2$ y 3 s. Para cada caso se han determinado las aceleraciones y desplazamientos relativos del sistema con propiedades dinámicas. Debido a esto, se incluyen algunas recomendaciones para la selección de la configuración del sistema con aislación.

- Los aisladores que poseen mejores propiedades técnicas (desplazamiento máximo, capacidades de carga axial, diámetro, etc.) económicamente son más costosos, por consiguiente, no es necesario contar con aisladores que cumplan con periodos mayores a 3 s, es idóneo que reduzcan la aceleración y debido al comportamiento similar de los 3 periodos analizados, se concluye que los aisladores son factibles para la colocación en el sistema.
- Para la estructura en condiciones convencionales, se ha observado que las aceleraciones y desplazamientos relativos son significativos, de modo que, esto resulta ser susceptible a daños en la estructura por acción sísmica. Por lo tanto, es necesario contar con un sistema de aislación.
- Los aisladores sísmicos son factibles, debido a que brindan un soporte para preservar las estructuras de campanarios, debido a la disminución significativa en las aceleraciones y desplazamientos relativos, éstos serán diseñados dependiendo la estructuración de las torres de campanas y el cuerpo de la iglesia.
- El proceso constructivo será determinado por el diseñador del proyecto.
- Para instalar un sistema de aislación sísmica y modificar un campanario en templos construidos en los siglos XVI al XIX, se deberán respetar las normas del Instituto Nacional de Antropología e Historia, por medio de la Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas.

Finalmente, podemos concluir que, al separar el campanario de la estructura principal de la iglesia, disminuye la interacción peligrosa, en consecuencia, mejora la seguridad sísmica del cuerpo principal de la misma.



REFERENCIAS

Barajas, D. (2022, 20 septiembre). *Templo de la Merced con daños estructurales en la torre del campanario tras sismo. Milenio*. Recuperado 18 de octubre de 2022, de <https://www.milenio.com/politica/comunidad/sismo-jalisco-templo-merced-danos-estructurales>

Staff. (2022, 6 julio). *Templo de San Juan Bautista en Cuauhtinchan fue restaurado por INAH*. Poblannerías. Recuperado 18 de octubre de 2022, de <https://www.poblannerias.com/2022/07/templo-de-san-juan-bautista-puebla/>

Sin Autor. (2022, 5 julio). *Entregan a la comunidad Templo de Cuauhtinchan, tras primera etapa de intervención. Crónica*. Recuperado 18 de octubre de 2022, de <https://www.cronica.com.mx/cultura/entregan-comunidad-templo-cuauhtinchan-primera-etapa-intervencion.html>

Martínez, J. F. (2022, 3 febrero). *Especialistas recuperan campanario de Iglesia de la Santa Veracruz dañada por sismo*. Once Noticias Digital. Recuperado 18 de octubre de 2022, de <https://oncenoticias.digital/cultura/especialistas-recuperan-torre-campanario-de-iglesia-de-la-santa-veracruz-danada-por-sismo-del-2017/>

Rodríguez, M. (2022, 21 septiembre). *Especialistas analizan la Catedral de Colima, presentó varias afectaciones tras el sismo de 7.7*. Estación Pacífico. Recuperado 18 de octubre de 2022, de <https://estacionpacifico.com/2022/09/21/especialistas-analizan-la-catedral-de-colima-presento-varias-afectaciones-tras-el-sismo-de-7-7/>

Levantamiento de un edificio. (1990). *fernandomuza slabad*. Recuperado 24 de abril de 2023, de https://www.fernandomuza slabad.com/4_archivos/Arti008.pdf

Stevenson, M. y Blackwell, R. (2020, 20 octubre). *México sigue restaurando iglesias dañadas en temblor de 2017*. AP News. Recuperado 18 de mayo de 2023, de <https://apnews.com/article/noticias-35f46a37ef1b96aba87b09b01986dcc9>

Velazco, J. (2022, 26 septiembre). *Registran daños 18 iglesias de Jalisco por sismos*. El Informador. Recuperado 18 de mayo de 2023, de <https://www.informador.mx/jalisco/Temblor-hoy-Registran-danos-18-iglesias-de-Jalisco-por-sismos-20220925-0066.html>

Servicio Sismológico Nacional. (s. f.). *Resumen mensual de sismicidad*. Servicio Sismológico Nacional. <http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/resumen-mensual/>



Romano, B., & Meli, R. (s. f.). *Recuperación del Patrimonio Inmobiliario de la Ciudad De México*. Casona del S XX. Archivo BAQ. Recuperado 18 de mayo de 2023, de <https://arquitecturapanamericana.com/recuperacion-del-patrimonio-inmobiliario-de-la-ciudad-de-mexico-casona-del-sxx/>

Magnitud de un sismo. (s. f.). *Servicio Sismológico Nacional*. Recuperado 18 de mayo de 2023, de <http://www.ssn.unam.mx/jsp/reportesEspeciales/Magnitud-de-un-sismo.pdf>

Servicio Geológico Mexicano. (2017, 15 enero). *Escalas de los sismos*. Recuperado 18 de mayo de 2023, de https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Informacion_complementaria/Escalas-sismos.html

García, V., & Suárez, G. (1996). *Los sismos en la historia de México*. México. Universidad Nacional Autónoma de México.

Ley Federal Sobre Monumentos Y Zonas Arqueológicas, Artísticas E Históricas, Reformada, Diario Oficial de la Federación, [D.O.F.], 6 de mayo de 1972, México.

Aguiar, R., et al. (2016). *Aisladores de Base Elastoméricos y FPS*. Universidad de las Fuerzas Armadas. Recuperado el 12 de mayo de 2023 de <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/11675/1/Aisladores%20de%20base%20elastomericos%20y%20fps.pdf>

Genatios, C., & Lafuente, M. (2016). *Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras*. Recuperado el 18 de junio de 2023, de <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/1213>



APÉNDICES

Apéndice A. Registros de daños a campanarios en México por sismos.

Se presenta el complemento de Tabla 1. Registro de daños a campanarios en México por sismos.

Tabla A. Complemento de Registro de daños a campanarios en México por sismos.

<i>Fecha/Año</i>	<i>Ubicación</i>	<i>Momento Histórico</i>	<i>Referencia</i>
1714	Oaxaca, Oax.	“... <i>El tercer cuerpo de la portada desencajado, vencido y desplomado, partido en dos mitades que la una declina para adentro y la otra para afuera. Las dos torres en sus macizos partidas de alto a bajo, y los segundos y terceros cuerpos en que asientan las campanas, hasta sus remates o linternillas desgajados, vencidos y para caerse y actualmente derribándose.</i> ”	(García & Suárez, 1996, pág. 113)
1745	México, D.F.	“... <i>La Iglesia de la casa profesa “padeció desplome de su longitud por la gravedad de sus torres y portada, cuarteando una de sus paredes laterales, pero éstas se mantuvieron y mantienen perpendiculares porque como con sus naves son el cuerpo mayor y las torres el cuerpo menor, el mayor contuvo al menor y también tiene muchos arrimos que le hacen contrapeso, lo que no acontece en la fábrica de dicho Hospital Real” que amenaza riesgo “sobreviniendo temblores y más si el movimiento de éstos fuese de norte a sur, por ser el rumbo de la inclinación de ambas dos sus paredes laterales...</i> ”	(García & Suárez, 1996, pág. 121)
1749	Sayula, Jal.	“... <i>Alonso Becerra, vecino y mercader en Sayula, síndico del convento de San Francisco, que era la iglesia parroquial en dicho pueblo presentó testigos con información “del estado en que se hallaba dicha iglesia y convento antes del día 22 y 23 de octubre del año próximo pasado en que se experimentó el horroroso terremoto y temblores que arruinaron dicha iglesia, conventos, capillas y las casas de los vecinos de todo este pueblo [...]” La torre de dicha iglesia se abrió y sus campanas cayeron de alto a bajo, siendo el mayor prodigio que ha celebrado la fe piadosa, de los moradores de este pueblo ...</i> ”	(García & Suárez, 1996, pág. 125)



Tabla A. Continuación

Fecha/Año	Ubicación	Momento Histórico	Referencia
1768	México, D.F.; Atlixco, San Cristóbal, Pue.; Estado de México	<p><i>“El día 4 del corriente poco antes de las 6 y media de la mañana se padeció en esta capital y mayor parte del reino un movimiento de tierra que hizo perecer dos mujeres por la repentina caída de un techo, dejando resentidos mayor número de sus edificios, cuyo reparo costará algún dinero, singularmente el de puentes que en esta ciudad dan paso sobre las acequias y le cruzan, este palacio ha manifestado también de repararse en varias reuniones principales de sus paredes que he mandado proceder con posible brevedad para evitar mayores gastos en lo sucesivo en las otras ciudades del reino; han padecido también igual suerte sus fábricas, habiéndose desplomado las casas reales del pueblo de San Cristóbal distante 4 leguas de esta capital y en villa de Atlixco que está inmediata a Puebla, parece que derribada la torre de un tempo sobre la parte superior de las bóvedas, había causado la muerte a 30 personas. Inmediatamente suspendí en esta ciudad el uso de los coches, que al tránsito hacen trepidar los edificios hasta que reconocidos los daños tuvieron su franqueza ni haber advertido necesidad de otra providencia por la quietud con que sorprendidas las gentes se mantuvieron sin el menor alboroto. Me ha parecido dar cuenta a V. e. de esta novedad para noticia de S.M. por si acaso otras plumas pintaren este suceso con diferentes colores.”</i></p>	(García & Suarez, 1996, pág. 135)
1771	Guadalajara, Jal.	<p><i>“Por acuerdo del Consejo del 12 de noviembre del año último ha pasado a la Contaduría General una representación de la Audiencia de Guadalajara su fecha 17 de julio del mismo año, dando cuenta con testimonio de la solicitud que hizo el Real Obispo y Deán y Cabildo de aquella Santa Iglesia acerca de que prestase su consentimiento para el derrumbe de los segundos cuerpos de las torres de la propia catedral, por la ruina que amenazaban y en que se veían de resultas de los temblores que allí se experimentaron a finales del año de 1771 [...] y se hallará embarazada la Audiencia en su elección en el caso de hacerse preciso el derrumbe y reedificación de las torres, pudiendo acaso parecer bastante la subsistencia de una de ellas, como lo están las catedrales de España.”</i></p>	(García & Suárez, 1996, pág. 139)



Tabla A. Continuación

<i>Fecha/Año</i>	<i>Ubicación</i>	<i>Momento Histórico</i>	<i>Referencia</i>
1800	México, D.F.	<i>“Parte general comprensivo y substancial de los que han pasado los ocho jueces de policía de sus respectivos cuarteles en que se expresan las ruinas que causó en esa capital el temblor de tierra acaecido el día ocho del corriente a las nueve y minutos de la mañana, con que esta Junta de Policía da cuenta al virrey Miguel José de Aranza y es por el orden siguiente: Cuartel 1, juez sr. Caamaño, Antonio Velásquez. En la torre de la iglesia de la Profesa se advirtió la veleta tuerta, se mandó a quitar para que no causara desgracia alguna...”</i>	(García & Suárez, 1996, pág. 178)
1845	México, D.F.	<i>“Cuartel número 4. Se desmoronó una sección de la cerca que daba a la calzada de Santa María, a la altura de la plazuela de la Concepción. [...] El mayor daño que se presentó en la calle de San Lorenzo, tocó a la torre de la iglesia conventual del mismo nombre; que se desplomó hacia el sur y quedó cuarteada de arriba abajo en sus tres lados: meridional, septentrional y occidental...”</i>	(García & Suárez, 1996, pág. 245)
16/abril 1845	México, D.F.	<i>“[El sismo del 7 de abril de 1845] [...] hizo temer que fuese a haber una erupción del Ajusco, tanto más que el día 10 de abril, o sea tres días después, tembló en dos ocasiones cerca de las siete de la noche. Lo hoy muy postergada Virgen de los Remedios fue traída a la ciudad, como en otras calamitosas ocasiones, y se le hicieron grandes rogativas desde el día 10, y el 11, la Virgen que se había aposentado en la Santa Veracruz y la víspera, fue trasladada a la catedral al día siguiente, sin vuelo de campanas, ya que el repique de las mismas había sido también prohibido, por los daños que se había habido en muchos campanarios ...”</i>	(García & Suárez, 1996, pág. 282)
1902	Chilapa, Tixtla, Chilpancingo, Iguala, Ahuelican, Dos Caminos, Tlamalacatlolco, Gro.	<i>“El día [...] a las 4 y 15 minutos de la tarde, hubo en el estado de Guerrero un temblor que hizo surgir en la prensa de la capital numerosos rumores sobre su fuerza y destrucción de ciudades y poblaciones, pérdidas de vidas y de propiedad, etc. [...] En las iglesias sufrieron principalmente las torres (Chilapa) y las bóvedas (Chilpancingo); la bóveda de Chilpancingo se derribó completamente a consecuencia de su mala construcción, mientras que las paredes sólidas casi quedaron intactas...”</i>	(García & Suárez, 1996, pág. 543)



Tabla A. Continuación

<i>Fecha/Año</i>	<i>Ubicación</i>	<i>Momento Histórico</i>	<i>Referencia</i>
1902	Chilpancingo, Tixla, Chilapa, Mochitlán, Quechultenango, Atliaca, Atlixnac, Ayutla, Coatepec Costales, Cocula, Coyuca de Benítez, Coyuca de Catalán, Cuetzala, Huexitlán, Huitzuco, Iguala, San Miguel Totolapan, Tecpan, Teloloapan, Tlaco, Otitlán, Tlaquetzalapa, Tlapa, Zapotitlán Tablas, Zumpango del Río, Acapulco, Guerrero.	“ <i>Fortísimo temblor que afectó la zona central del estado de Guerrero: Catastrófico en: Chilpancingo, Tixtla, Chilapa, Mochitlán y Quechultenango. Fuerte y largo temblor a las 5:25 p.m. en Acapulco. [...] Tixtla: muy fuerte y largo; graves daños y pérdidas. Saldo de 1 muerto y 4 lesionados graves. Fuerte con ruidos subterráneos a las 5:20 p.m. Daño dos escuelas oficiales y muchas casas. [...] Huamuxtitlán: por el temblor se cayó la torre del templo. Tlapa: Fuerte y largo a las 5:25 p.m. con graves daños materiales. Zapotitlán Tablas: derrumbó el Ayuntamiento y la torre del templo. Zumpango del Río: destruyó el Ayuntamiento, la Escuela de Niños y algunas casas; saldo de 4 lesionados graves. Daños estimados en \$2 000.00.</i> ”	(García & Suárez, 1996, pág. 545)
1911	Colima, Agua Hedionda, Villa de Álvarez, Col.	“ <i>En Colima, las víctimas del sismo fueron pocas, a juzgar por los datos oficiales: un muerto en el rancho del Agua Hedionda, un herido en Colima, dos heridos graves y uno leve en Villa de Álvarez, y nada más. El templo de la Merced fue casi destruido. Para evitar desgracias personales, quedó clausurado, pues amenaza derrumbarse. Las torres del templo de San José cayeron sobre la cúpula de la misma iglesia, derrumbándola. También este templo fue clausurado. La catedral de Colima sufrió enormes cuarteaduras, lo mismo que el Palacio de Gobierno. La carátula del reloj del mismo cayó por efecto del sismo.</i> ”	
19/sep 2017	Templo de San Juan Bautista. Cuahtinchán, Puebla	“ <i>Posteriormente del sismo ocurrido en el año 2017 el templo fue restaurado en primera etapa por parte del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH). Las intervenciones contemplaron labores de consolidación en las torres del campanario sur y norte, esta última incluyó su reconstrucción.</i> ”	(Staff, 2022)



Tabla A. Continuación

Fecha/Año	Ubicación	Momento Histórico	Referencia
19/sep 2017	Iglesia de la Santa Veracruz. 2 de Abril 6, Centro Histórico de la Cdad. de México, Cuauhtémoc, C.P. 06300 Ciudad de México	“Debido a su excelente manufactura, al uso de materiales y técnicas constructivas tradicionales y sólidas, así como a la pericia de los especialistas del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), la torre campanario sur de la Iglesia de la Santa Veracruz, en el Centro Histórico de Ciudad de México, ha sido recuperada. El inmueble se vio afectado por el sismo de 2017 y un incendio ocurrido en agosto de 2020.”	(Martínez, J. F, 2022)
19/sep 2022	Catedral de Colima. Reforma 21, Centro, C.P. 28000 Colima, Col.	. “Desde el día del terremoto comenzamos a visitar algunos lugares, de estos destaca la Catedral de Colima que está sujeta al análisis estructural de un especialista en monumentos históricos. La torre norte de Catedral, aparentemente, se movió un poquito, se observa una lastimadura y se cayó la campana también, no sabemos todavía con precisión si esto es de alto riesgo o no”. informó Julio Ignacio Martínez de la Rosa, director del Centro estatal del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH).	(Rodríguez, 2022)

Apéndice B. Resultados de desplazamientos, aceleraciones relativas y desplazamientos del aislador

Se muestra el complemento de resultados de desplazamientos relativos, desplazamientos del aislador y aceleraciones relativas para los acelerogramas de SCRU, CALE, HMTT, JAMI, LANE y NILT.

Caso SCRU 07/09/2017 $M_w = 8.2$

Periodo $T_b = 1$ s. Historias de desplazamiento y aceleración relativa

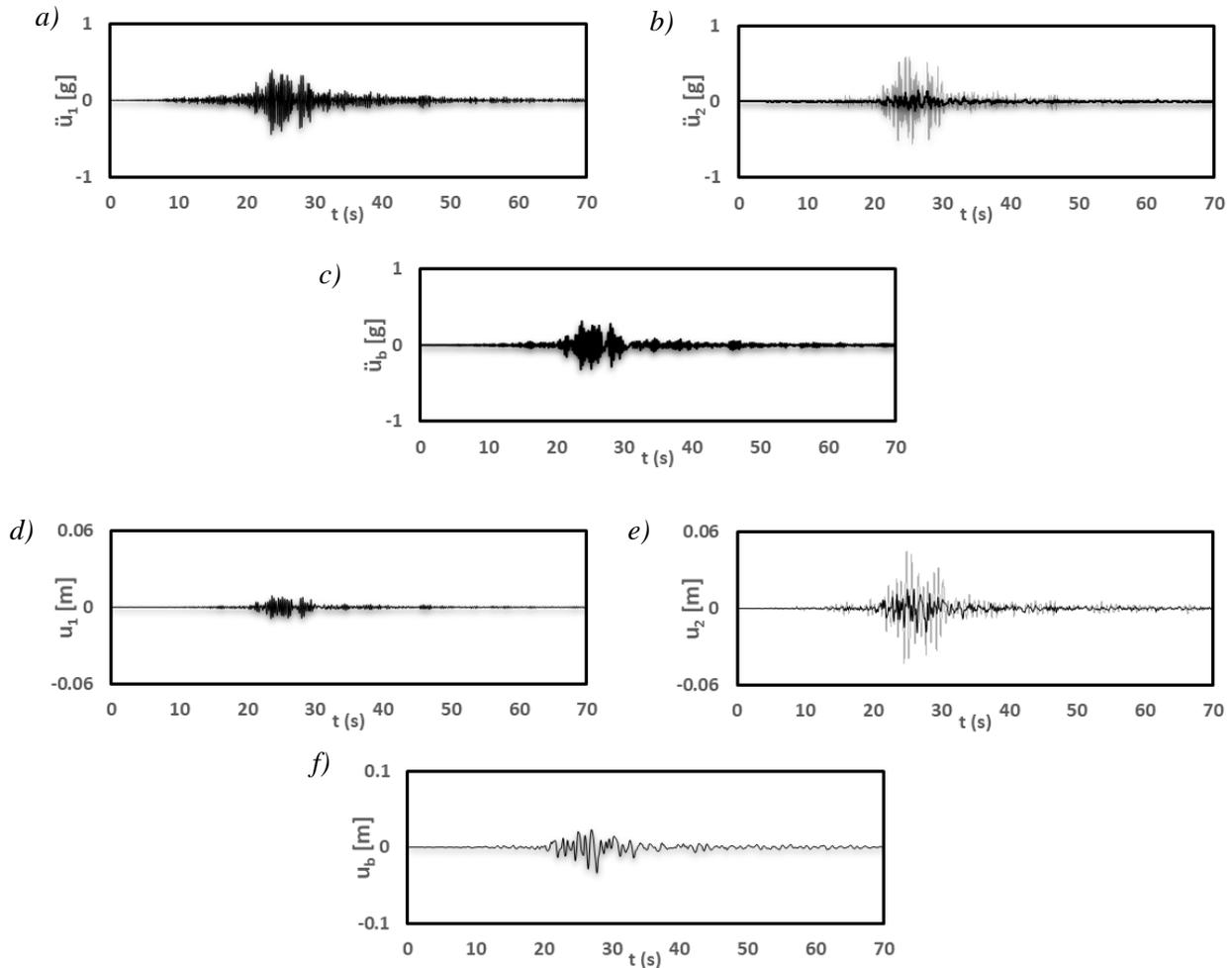


Figura B.1. Historias de aceleración relativa del nivel 1 (a), aceleración relativa nivel 2 (b), aceleración del aislador (c), historias de desplazamiento relativo del nivel 1 (d), desplazamiento relativo del nivel 2 (e) y desplazamiento del aislador (f). SCRU. Sistemas de 2GDL (Línea gris) y 3GDL (Línea negra). Éste último incluye un sistema de aislación a media altura.



Periodo $T_b = 2$ s. Historias de desplazamiento y aceleración relativa

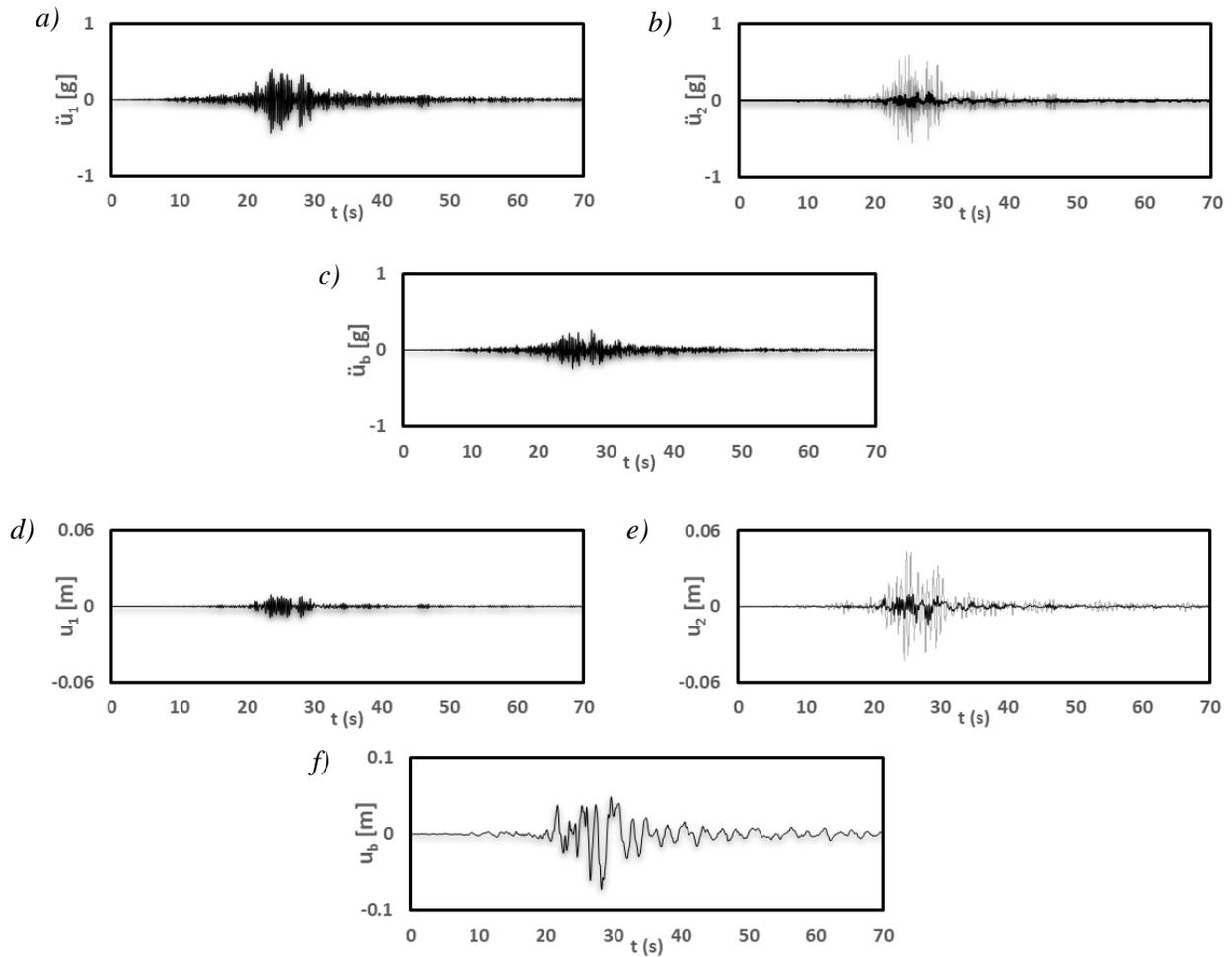


Figura B.2. Historias de aceleración relativa del nivel 1 (a), aceleración relativa nivel 2 (b), aceleración del aislador (c), historias de desplazamiento relativo del nivel 1 (d), desplazamiento relativo del nivel 2 (e) y desplazamiento del aislador (f). SCRU. Sistemas de 2GDL (Línea gris) y 3GDL (Línea negra). Éste último incluye un sistema de aislación a media altura.

Periodo $T_b = 3$ s. Historias de desplazamiento y aceleración relativa

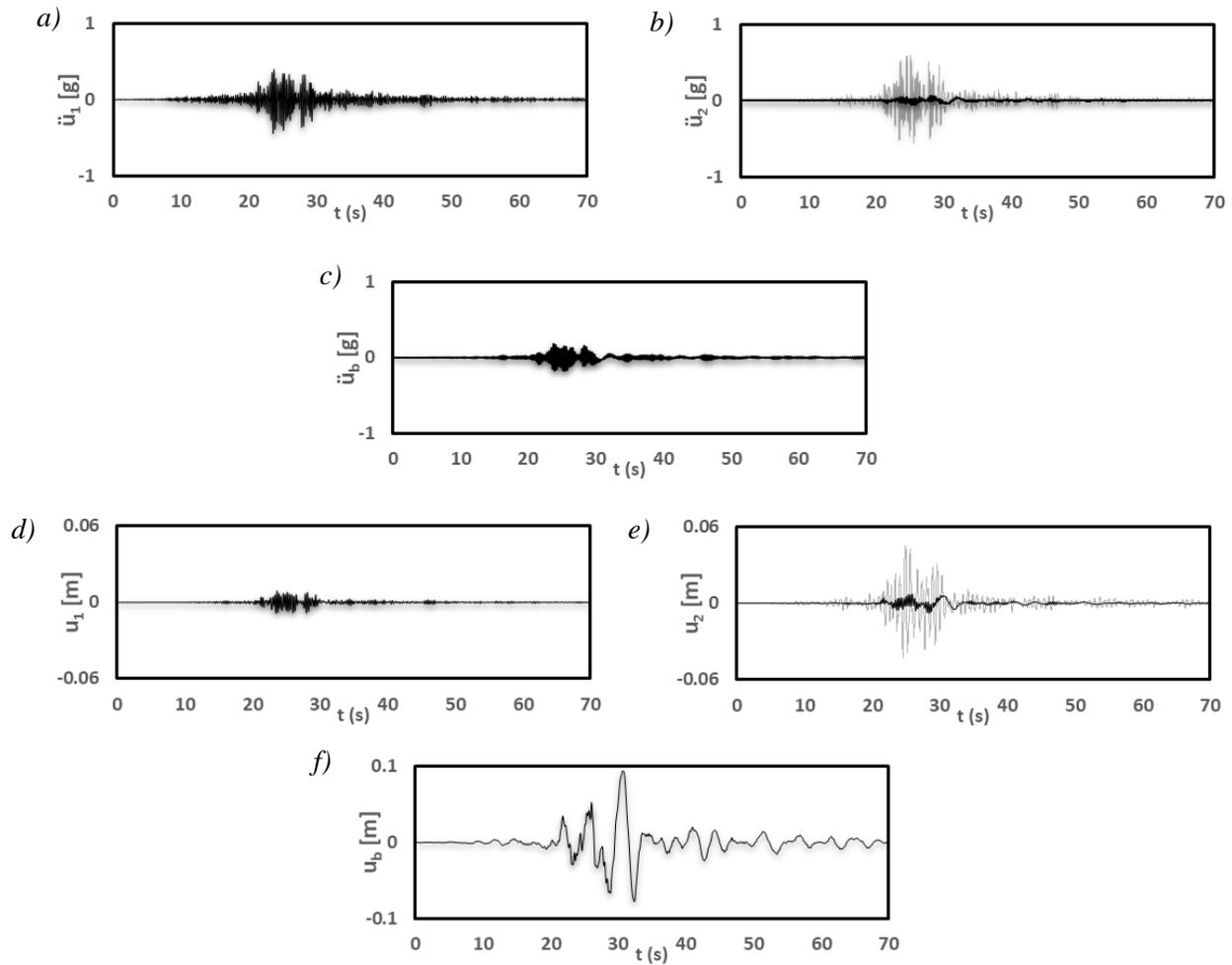


Figura B.3. Historias de aceleración relativa del nivel 1 (a), aceleración relativa nivel 2 (b), aceleración del aislador (c), historias de desplazamiento relativo del nivel 1 (d), desplazamiento relativo del nivel 2 (e) y desplazamiento del aislador (f). SCRU. Sistemas de 2GDL (Línea gris) y 3GDL (Línea negra). Éste último incluye un sistema de aislación a media altura.

Caso CALE 11/01/1997 $M_w = 6.9$

Periodo $T_b = 1$ s. Historias de desplazamiento y aceleración relativa

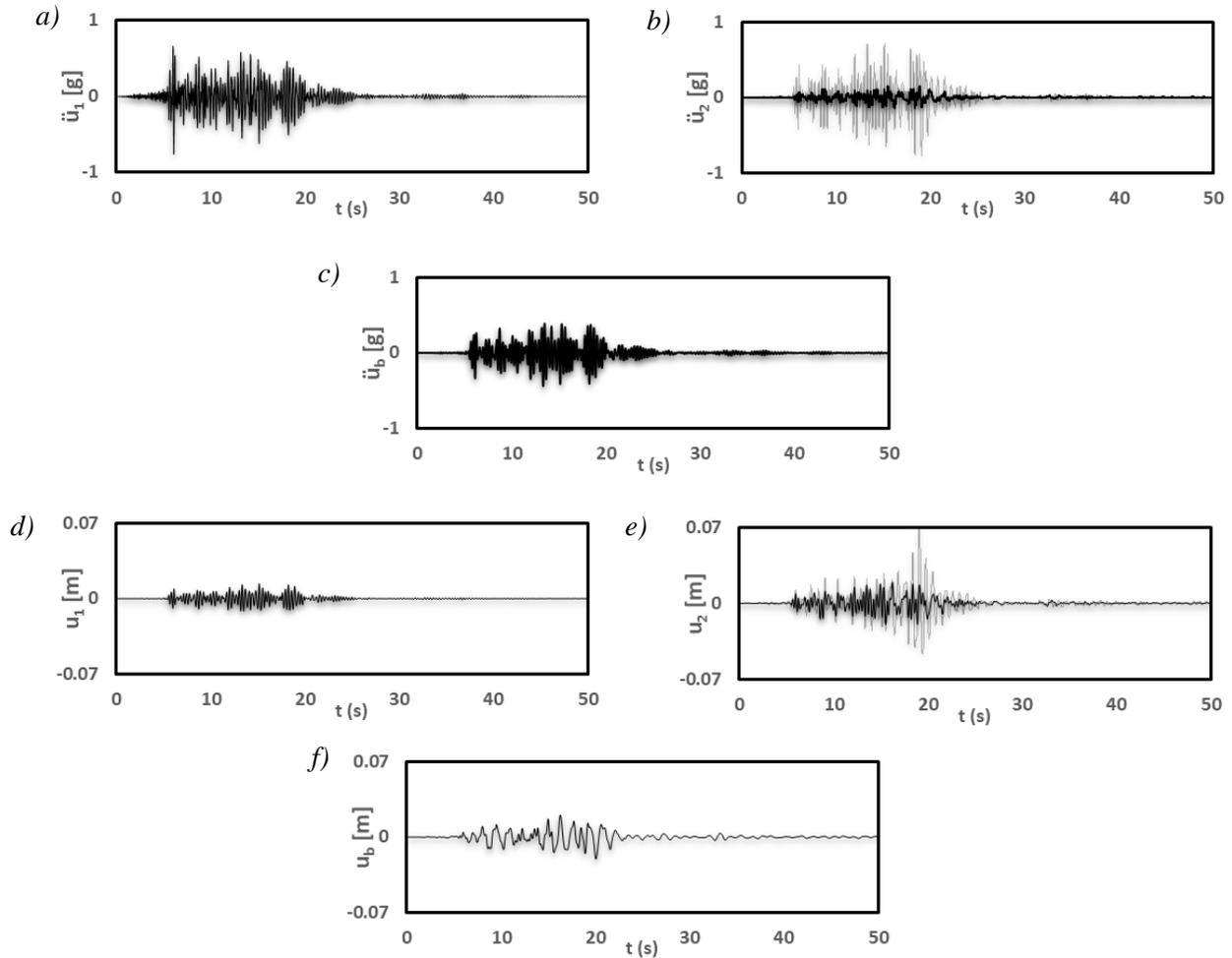


Figura B.4. Historias de aceleración relativa del nivel 1 (a), aceleración relativa nivel 2 (b), aceleración del aislador (c), historias de desplazamiento relativo del nivel 1 (d), desplazamiento relativo del nivel 2 (e) y desplazamiento del aislador (f). CALE. Sistemas de 2GDL (Línea gris) y 3GDL (Línea negra). Éste último incluye un sistema de aislación a media altura.



Periodo $T_b = 2$ s. Historias de desplazamiento y aceleración relativa

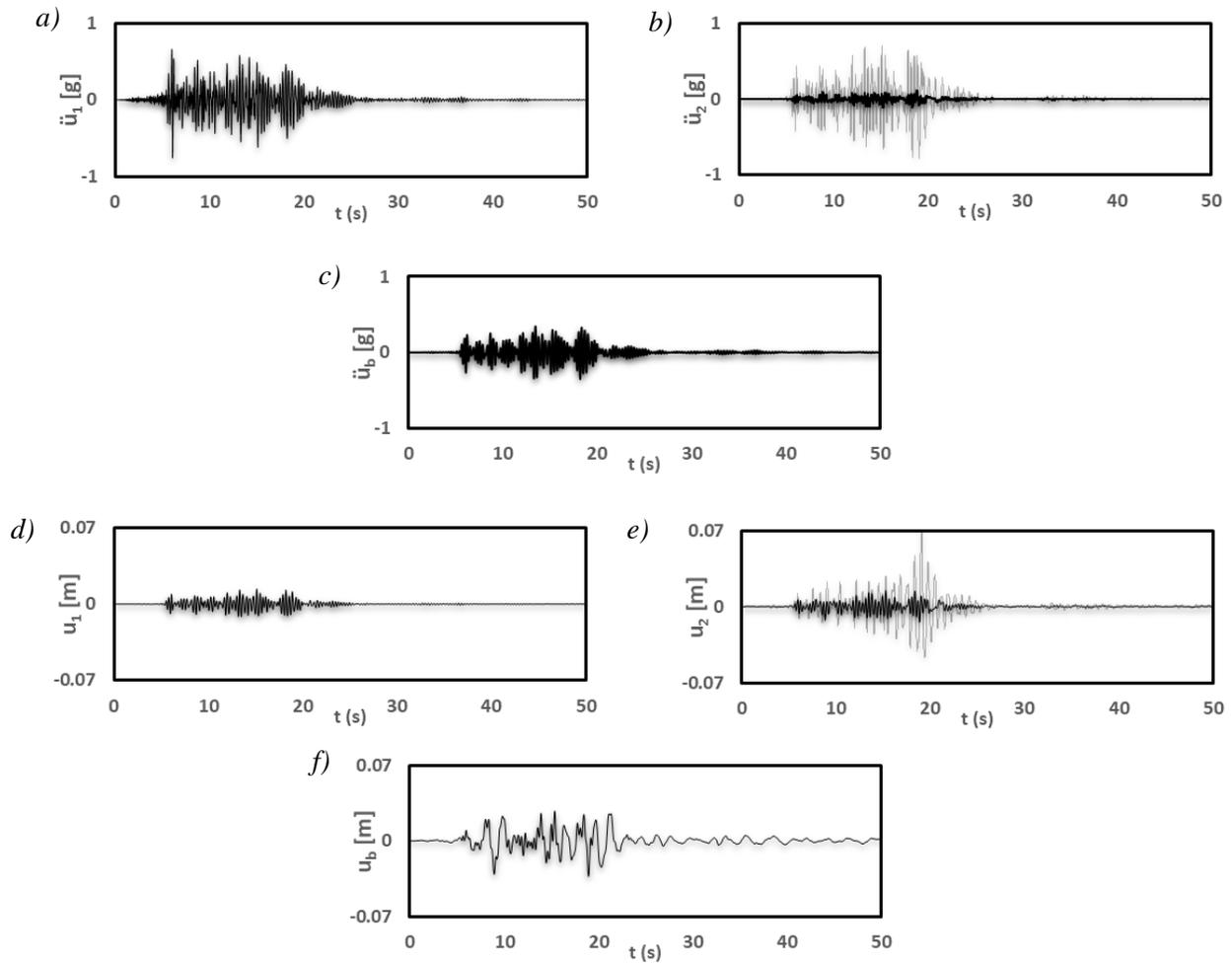


Figura B.5. Historias de aceleración relativa del nivel 1 (a), aceleración relativa nivel 2 (b), aceleración del aislador (c), historias de desplazamiento relativo del nivel 1 (d), desplazamiento relativo del nivel 2 (e) y desplazamiento del aislador (f). CALE. Sistemas de 2GDL (Línea gris) y 3GDL (Línea negra). Éste último incluye un sistema de aislación a media altura.

Periodo $T_b = 3$ s. Historias de desplazamiento y aceleración relativa

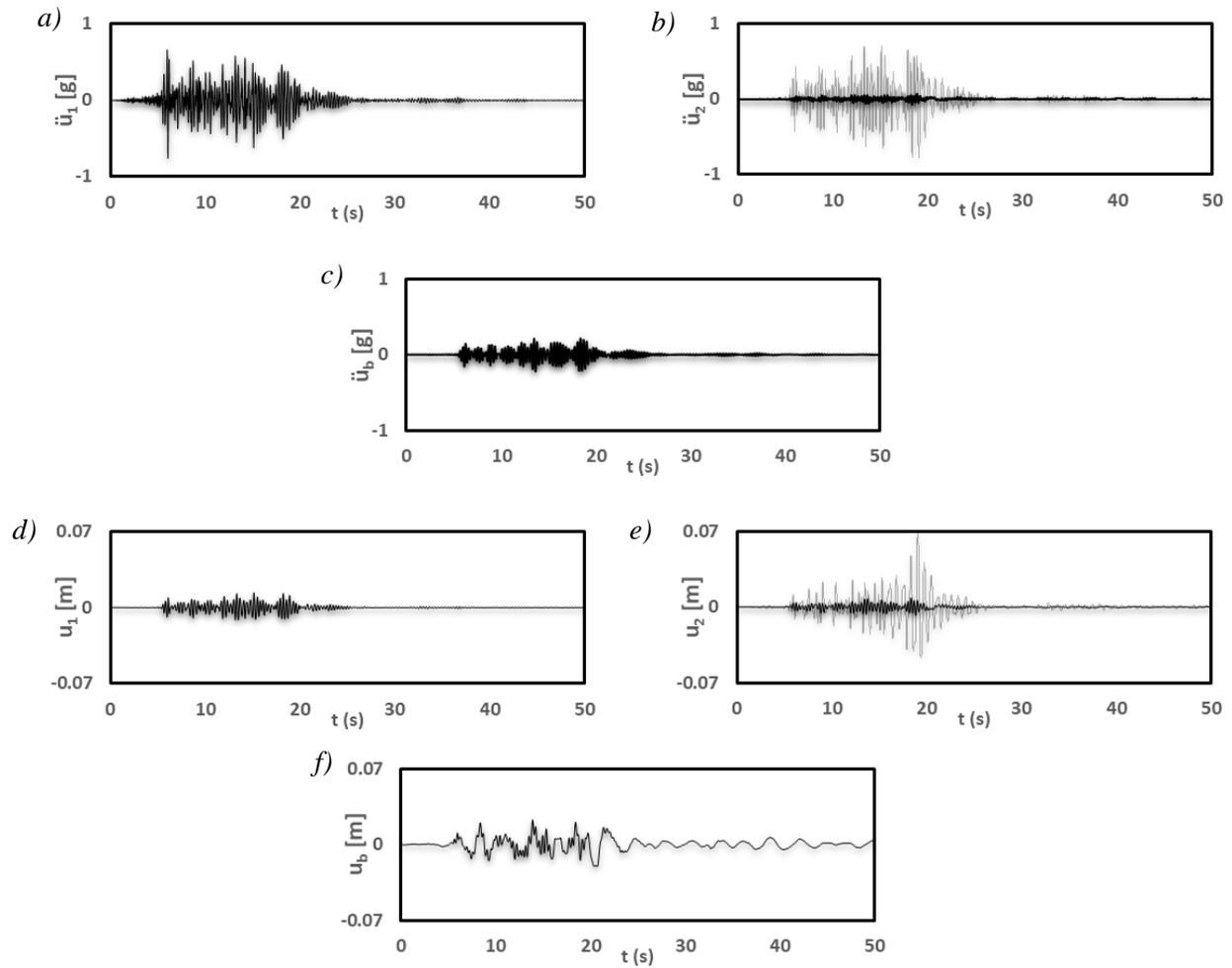


Figura B.6. Historias de aceleración relativa del nivel 1 (a), aceleración relativa nivel 2 (b), aceleración del aislador (c), historias de desplazamiento relativo del nivel 1 (d), desplazamiento relativo del nivel 2 (e) y desplazamiento del aislador (f). CALE. Sistemas de 2GDL (Línea gris) y 3GDL (Línea negra). Éste último incluye un sistema de aislación a media altura.

Caso HMTT 19/09/2017 $M_w = 7.1$

Periodo $T_b = 1$ s. Historias de desplazamiento y aceleración relativa

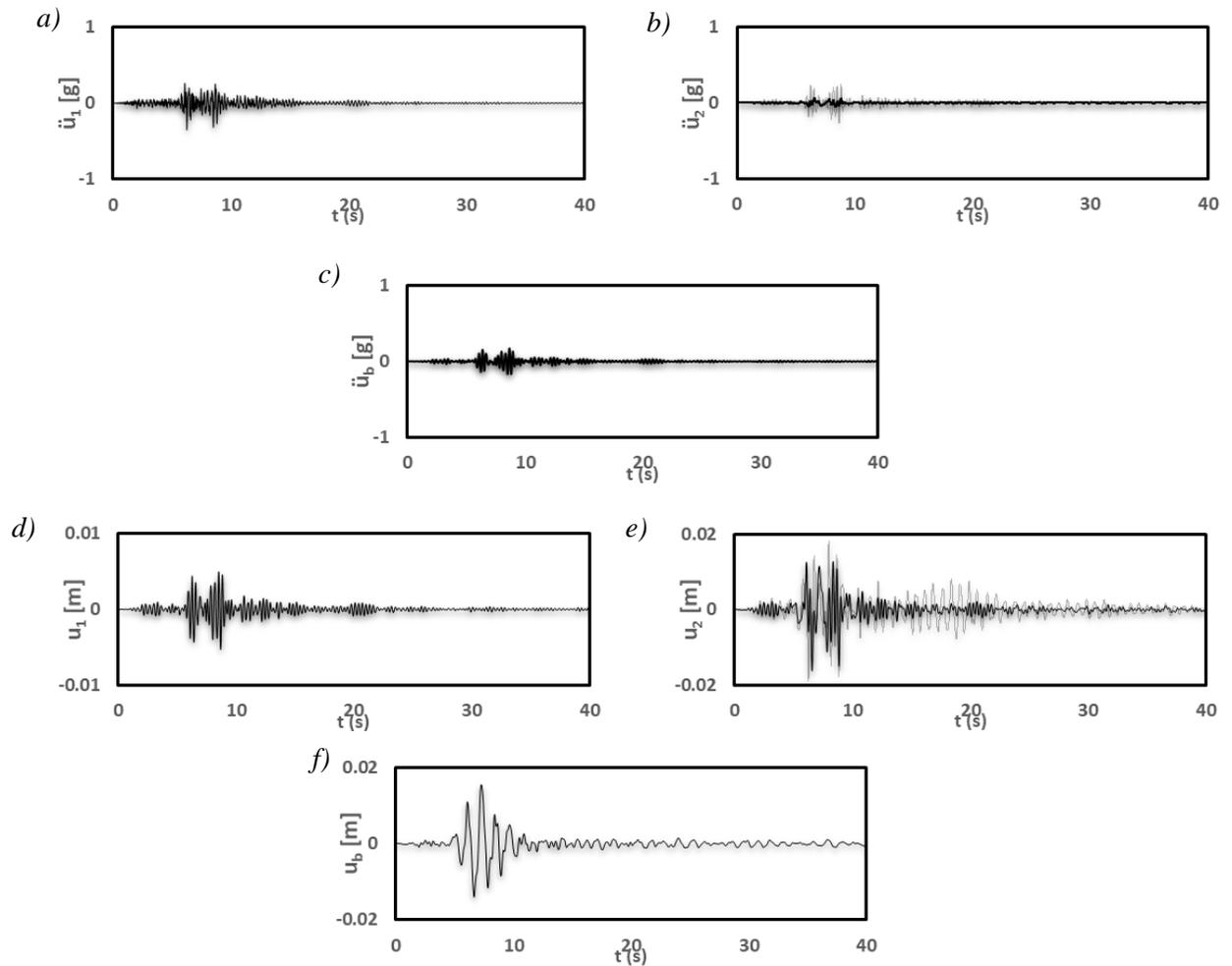


Figura B.7. Historias de aceleración relativa del nivel 1 (a), aceleración relativa nivel 2 (b), aceleración del aislador (c), historias de desplazamiento relativo del nivel 1 (d), desplazamiento relativo del nivel 2 (e) y desplazamiento del aislador (f). HMTT. Sistemas de 2GDL (Línea gris) y 3GDL (Línea negra). Éste último incluye un sistema de aislación a media altura.

Periodo $T_b = 2$ s. Historias de desplazamiento y aceleración relativa

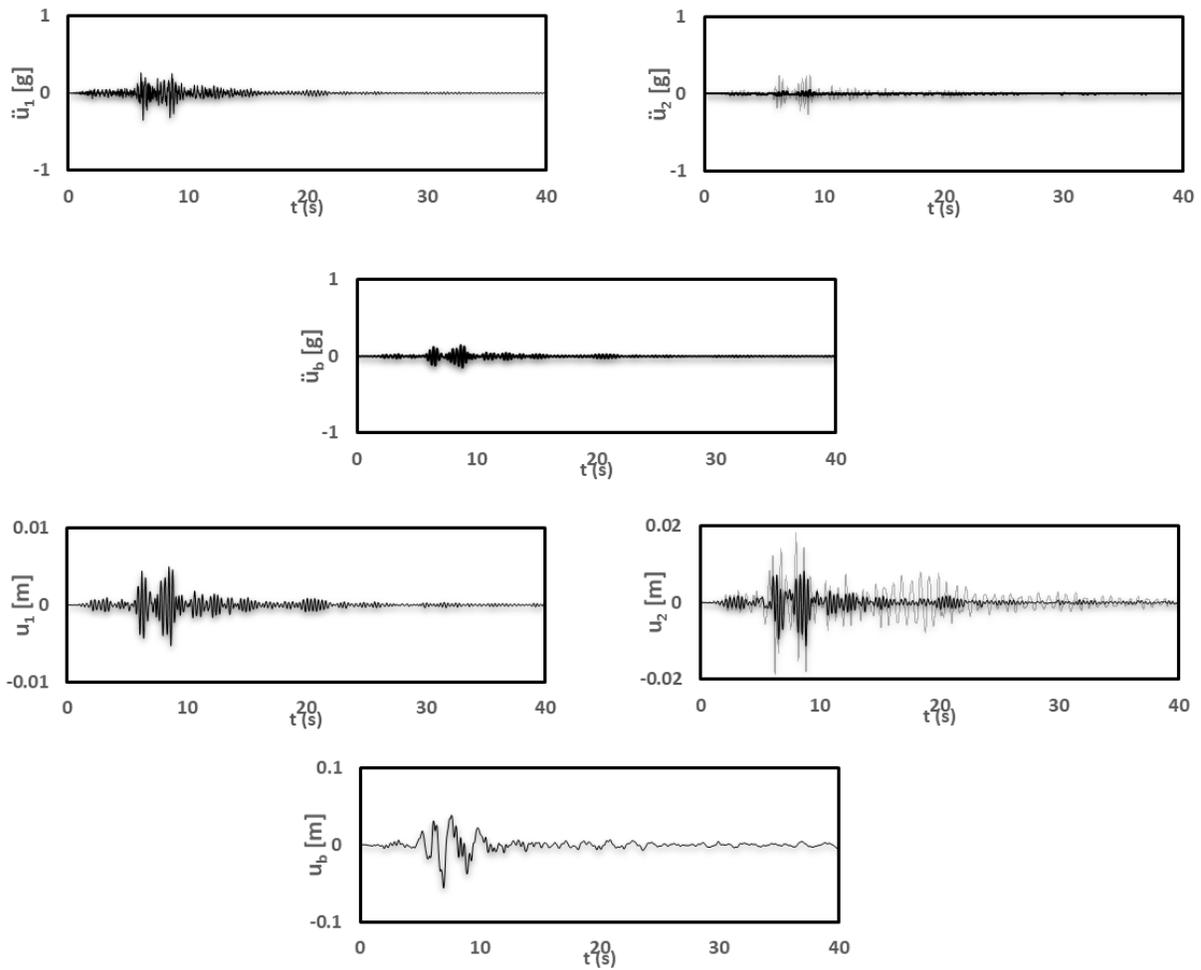


Figura B.8. Historias de aceleración relativa del nivel 1 (a), aceleración relativa nivel 2 (b), aceleración del aislador (c), historias de desplazamiento relativo del nivel 1 (d), desplazamiento relativo del nivel 2 (e) y desplazamiento del aislador (f). HMTT. Sistemas de 2GDL (Línea gris) y 3GDL (Línea negra). Éste último incluye un sistema de aislación a media altura.

Periodo $T_b = 3$ s. Historias de desplazamiento y aceleración relativa

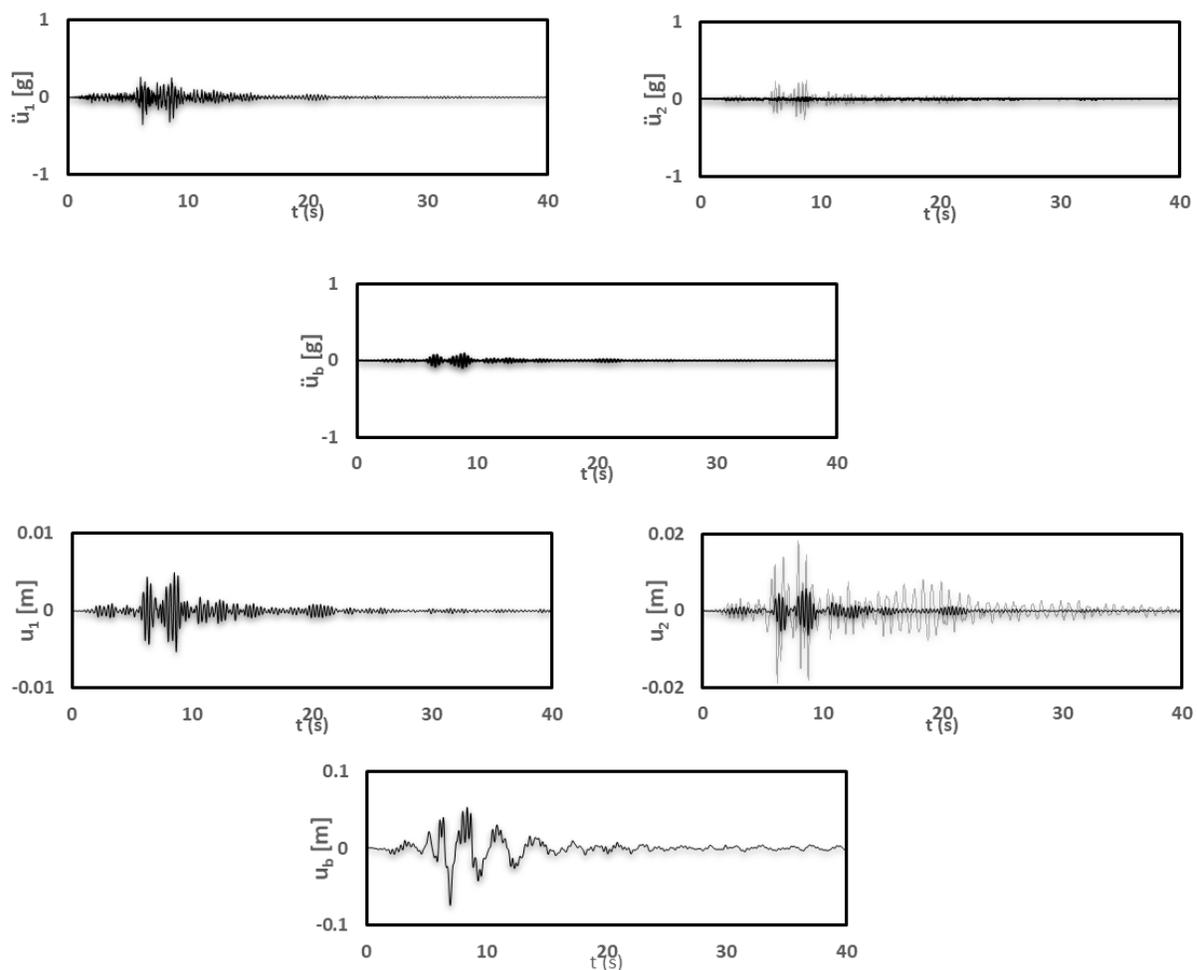


Figura B.9. Historias de aceleración relativa del nivel 1 (a), aceleración relativa nivel 2 (b), aceleración del aislador (c), historias de desplazamiento relativo del nivel 1 (d), desplazamiento relativo del nivel 2 (e) y desplazamiento del aislador (f). HMTT. Sistemas de 2GDL (Línea gris) y 3GDL (Línea negra). Éste último incluye un sistema de aislación a media altura.

Caso JAMI 30/09/1999 $M_w = 7.6$

Periodo $T_b = 1$ s. Historias de desplazamiento y aceleración relativa

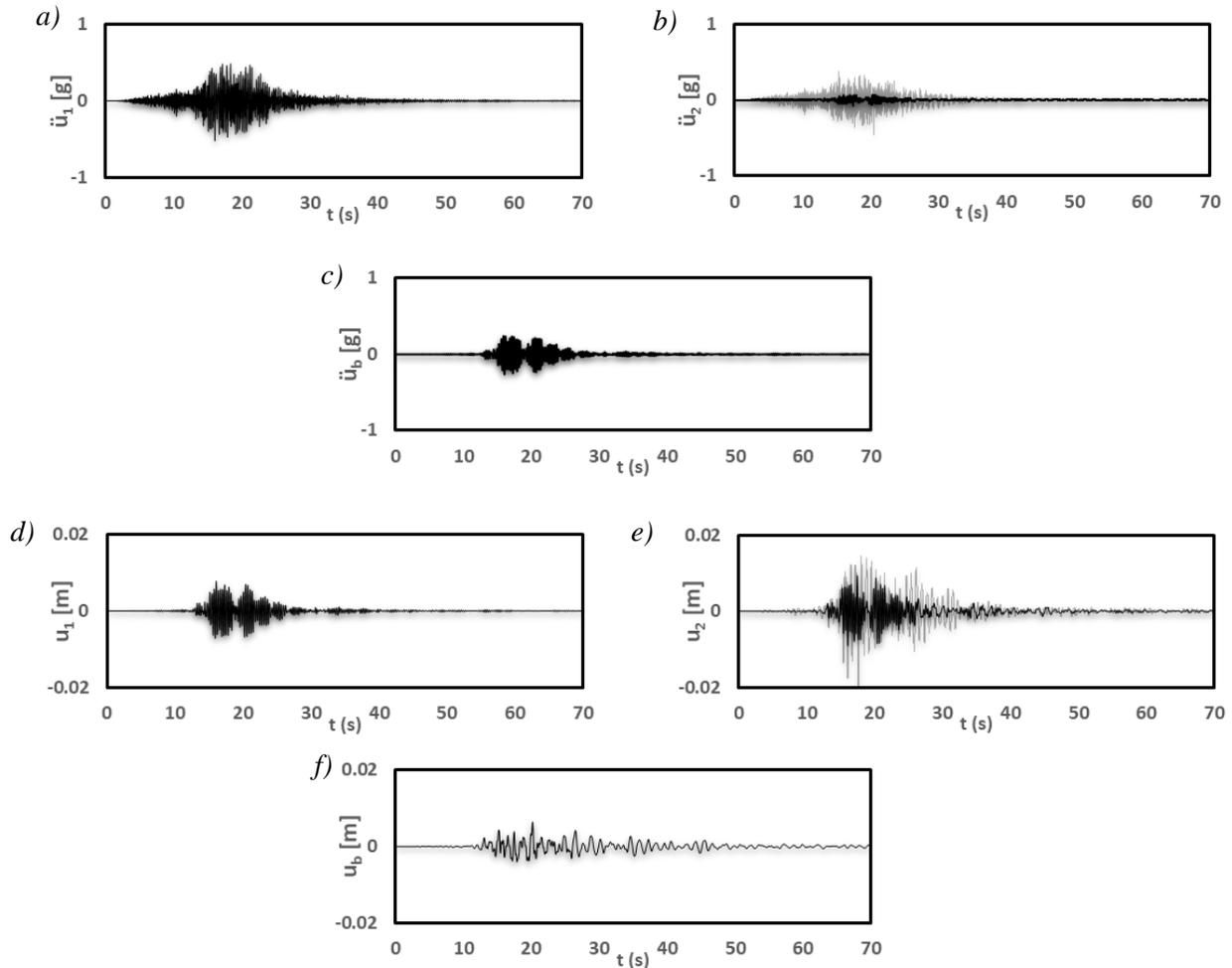


Figura B.10. Historias de aceleración relativa del nivel 1 (a), aceleración relativa nivel 2 (b), aceleración del aislador (c), historias de desplazamiento relativo del nivel 1 (d), desplazamiento relativo del nivel 2 (e) y desplazamiento del aislador (f). JAMI. Sistemas de 2GDL (Línea gris) y 3GDL (Línea negra). Éste último incluye un sistema de aislación a media altura.

Periodo $T_b = 2$ s. Historias de desplazamiento y aceleración relativa

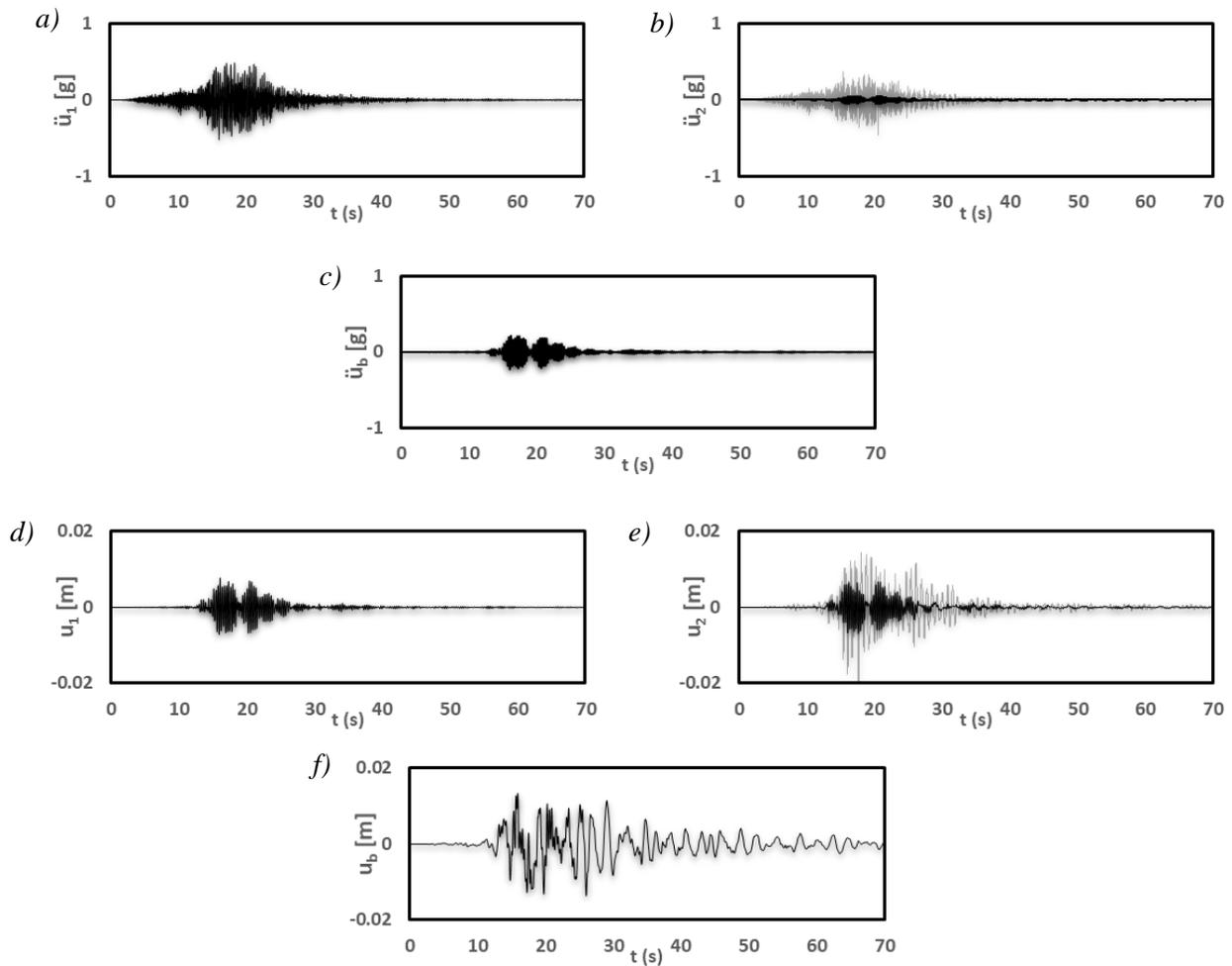


Figura B.11. Historias de aceleración relativa del nivel 1 (a), aceleración relativa nivel 2 (b), aceleración del aislador (c), historias de desplazamiento relativo del nivel 1 (d), desplazamiento relativo del nivel 2 (e) y desplazamiento del aislador (f). JAMI. Sistemas de 2GDL (Línea gris) y 3GDL (Línea negra). Éste último incluye un sistema de aislación a media altura.

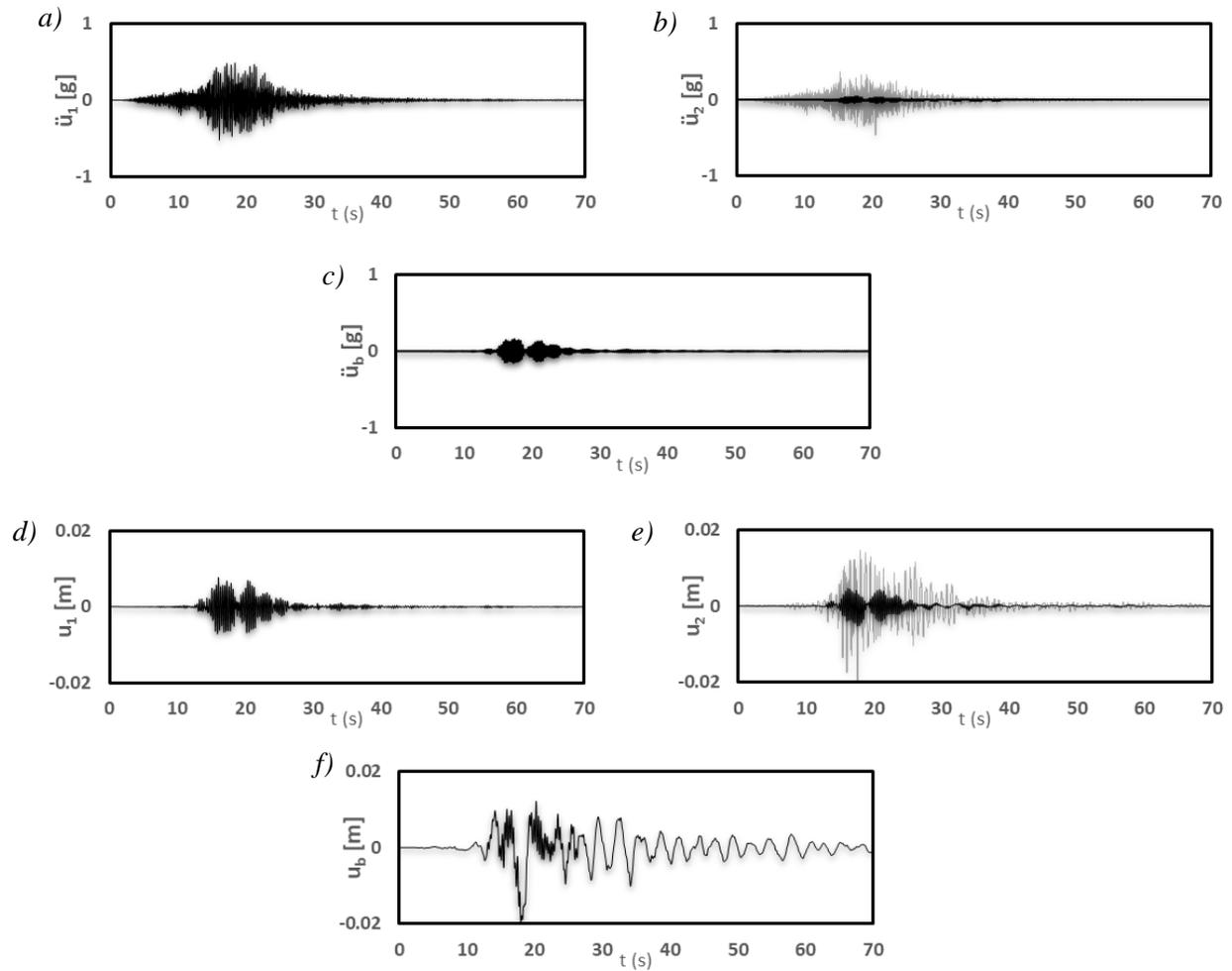
Periodo $T_b = 3$ s. Historias de desplazamiento y aceleración relativa

Figura B.12. Historias de aceleración relativa del nivel 1 (a), aceleración relativa nivel 2 (b), aceleración del aislador (c), historias de desplazamiento relativo del nivel 1 (d), desplazamiento relativo del nivel 2 (e) y desplazamiento del aislador (f). JAMI. Sistemas de 2GDL (Línea gris) y 3GDL (Línea negra). Éste último incluye un sistema de aislación a media altura.

Caso LANE 30/09/1999 $M_w = 7.6$

Periodo $T_b = 1$ s. Historias de desplazamiento y aceleración relativa

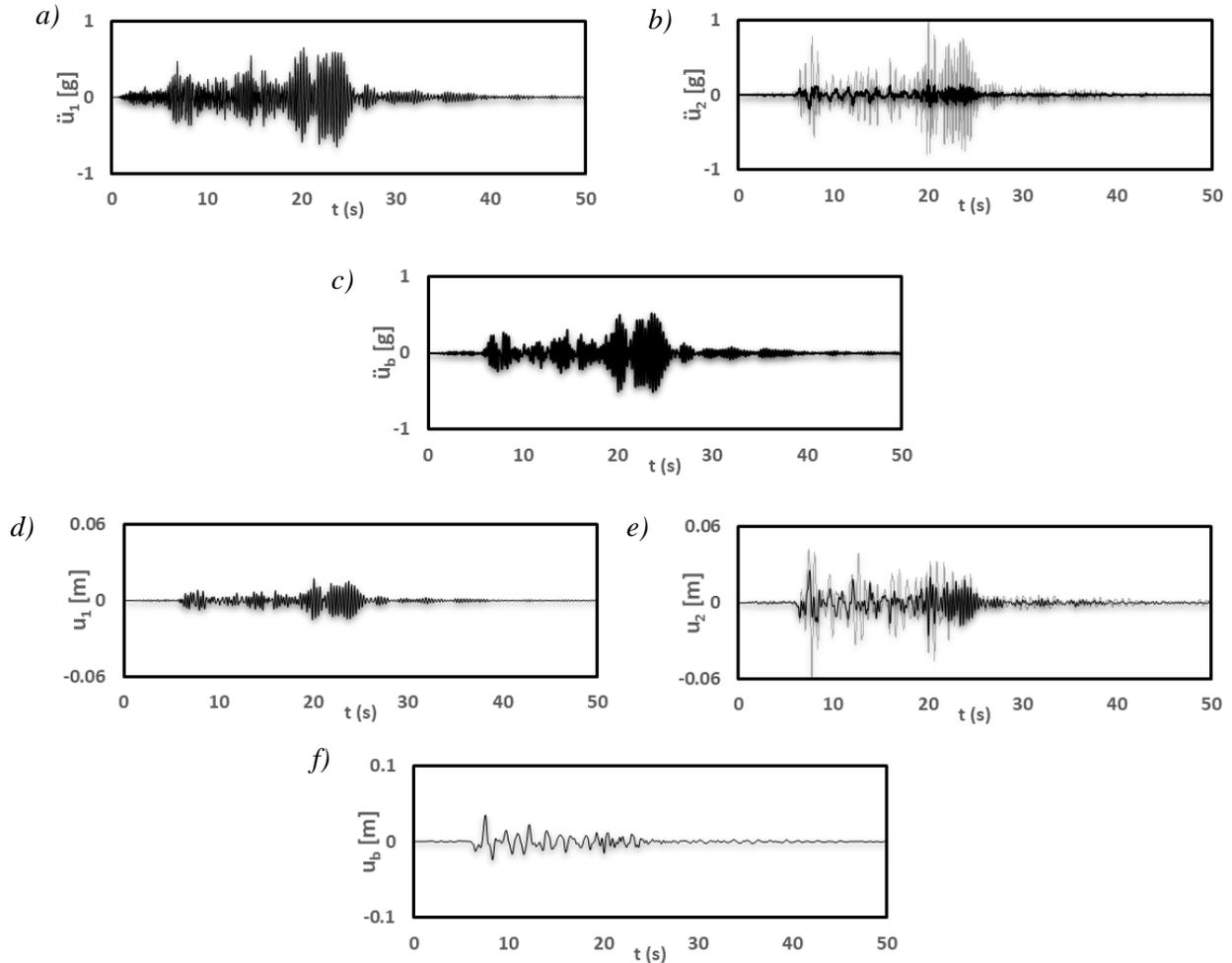


Figura B.13. Historias de aceleración relativa del nivel 1 (a), aceleración relativa nivel 2 (b), aceleración del aislador (c), historias de desplazamiento relativo del nivel 1 (d), desplazamiento relativo del nivel 2 (e) y desplazamiento del aislador (f). LANE. Sistemas de 2GDL (Línea gris) y 3GDL (Línea negra). Éste último incluye un sistema de aislación a media altura.

Periodo $T_b = 2$ s. Historias de desplazamiento y aceleración relativa

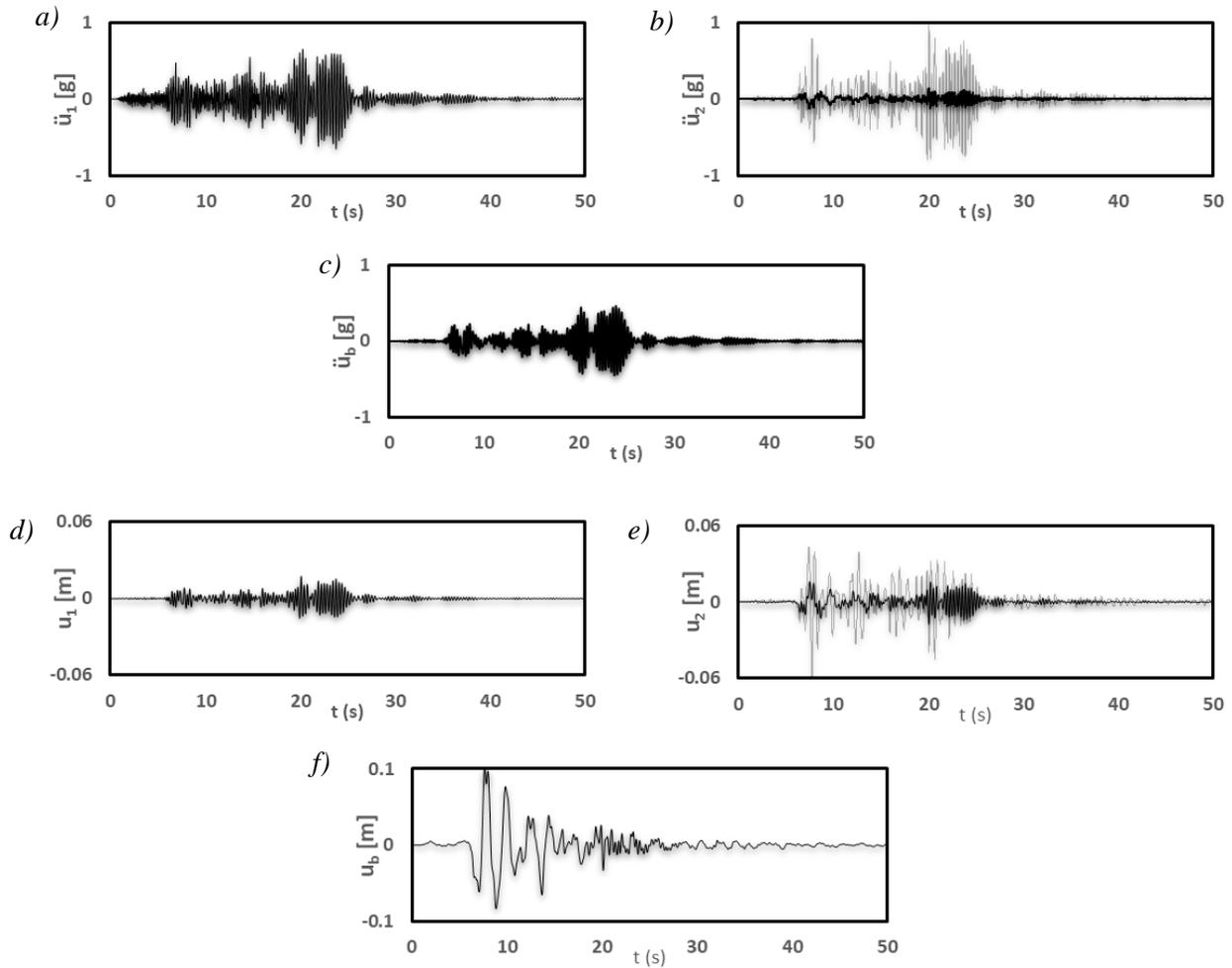


Figura B.14. Historias de aceleración relativa del nivel 1 (a), aceleración relativa nivel 2 (b), aceleración del aislador (c), historias de desplazamiento relativo del nivel 1 (d), desplazamiento relativo del nivel 2 (e) y desplazamiento del aislador (f). LANE. Sistemas de 2GDL (Línea gris) y 3GDL (Línea negra). Éste último incluye un sistema de aislación a media altura.

Periodo $T_b = 3$ s. Historias de desplazamiento y aceleración relativa

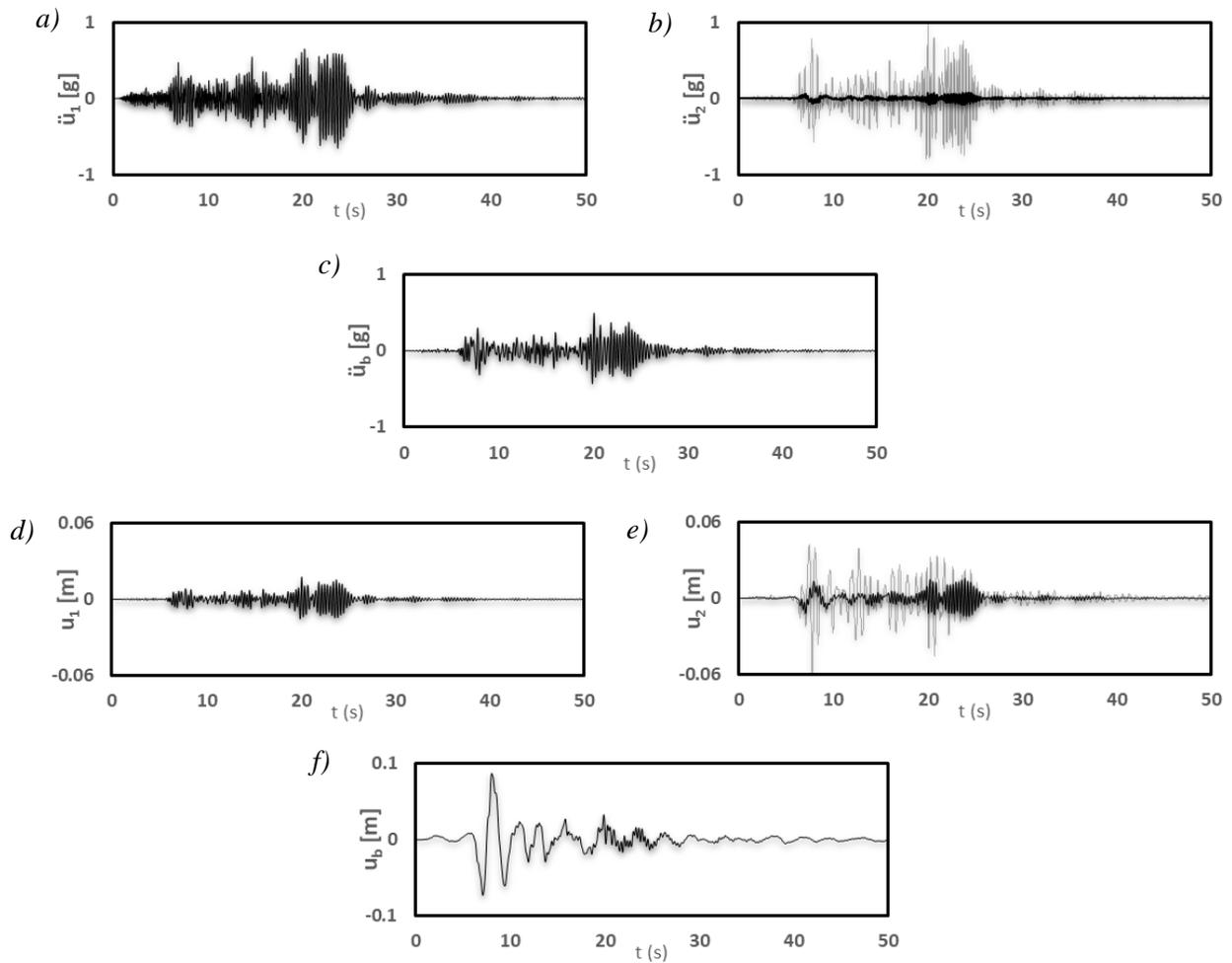


Figura B.15. Historias de aceleración relativa del nivel 1 (a), aceleración relativa nivel 2 (b), aceleración del aislador (c), historias de desplazamiento relativo del nivel 1 (d), desplazamiento relativo del nivel 2 (e) y desplazamiento del aislador (f). LANE. Sistemas de 2GDL (Línea gris) y 3GDL (Línea negra). Éste último incluye un sistema de aislación a media altura.

Caso NILT 08/09/2017 $M_w = 8.2$

Periodo $T_b = 1$ s. Historias de desplazamiento y aceleración relativa

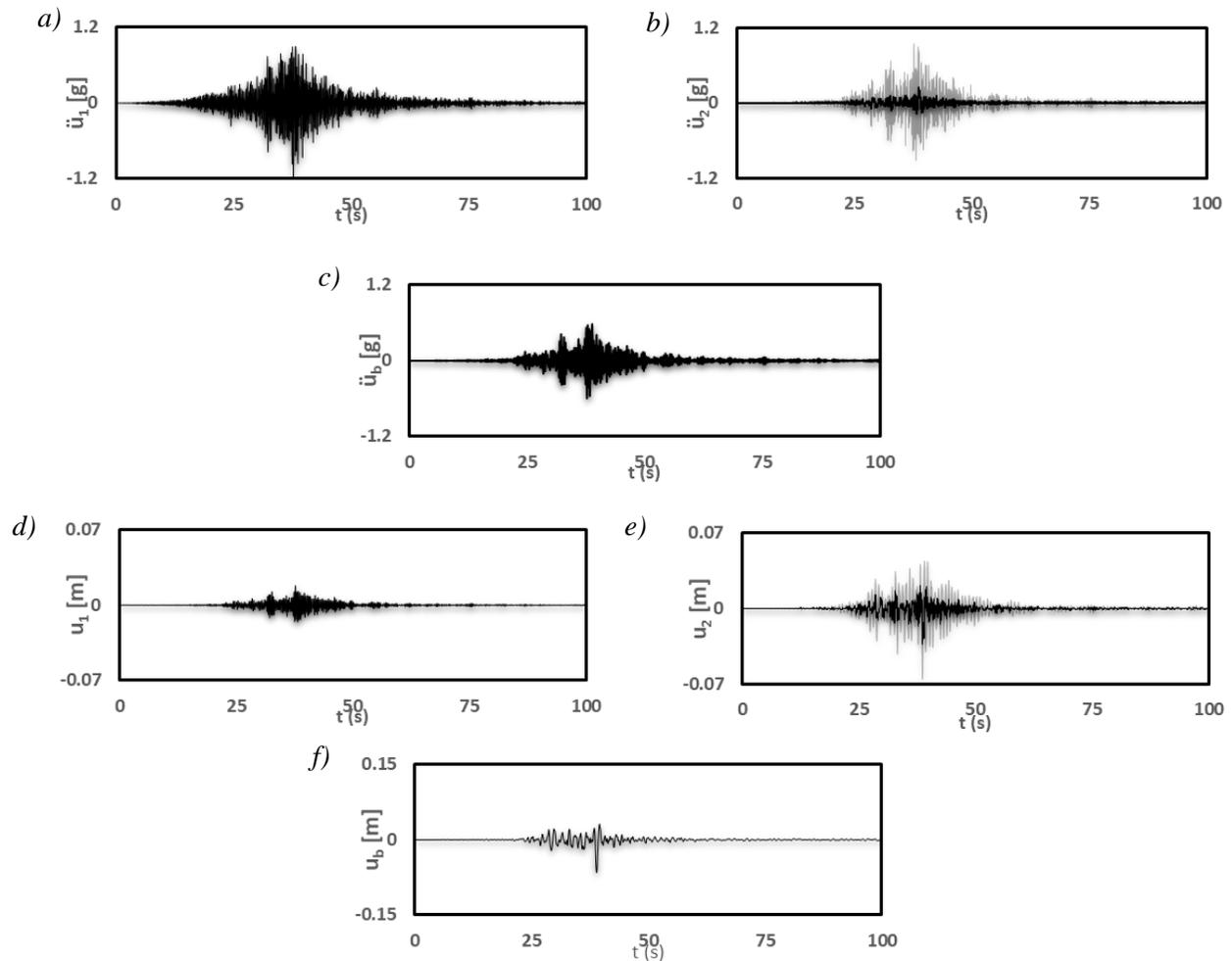


Figura B.16. Historias de aceleración relativa del nivel 1 (a), aceleración relativa nivel 2 (b), aceleración del aislador (c), historias de desplazamiento relativo del nivel 1 (d), desplazamiento relativo del nivel 2 (e) y desplazamiento del aislador (f). NILT. Sistemas de 2GDL (Línea gris) y 3GDL (Línea negra). Éste último incluye un sistema de aislación a media altura.

Periodo $T_b = 2$ s. Historias de desplazamiento y aceleración relativa

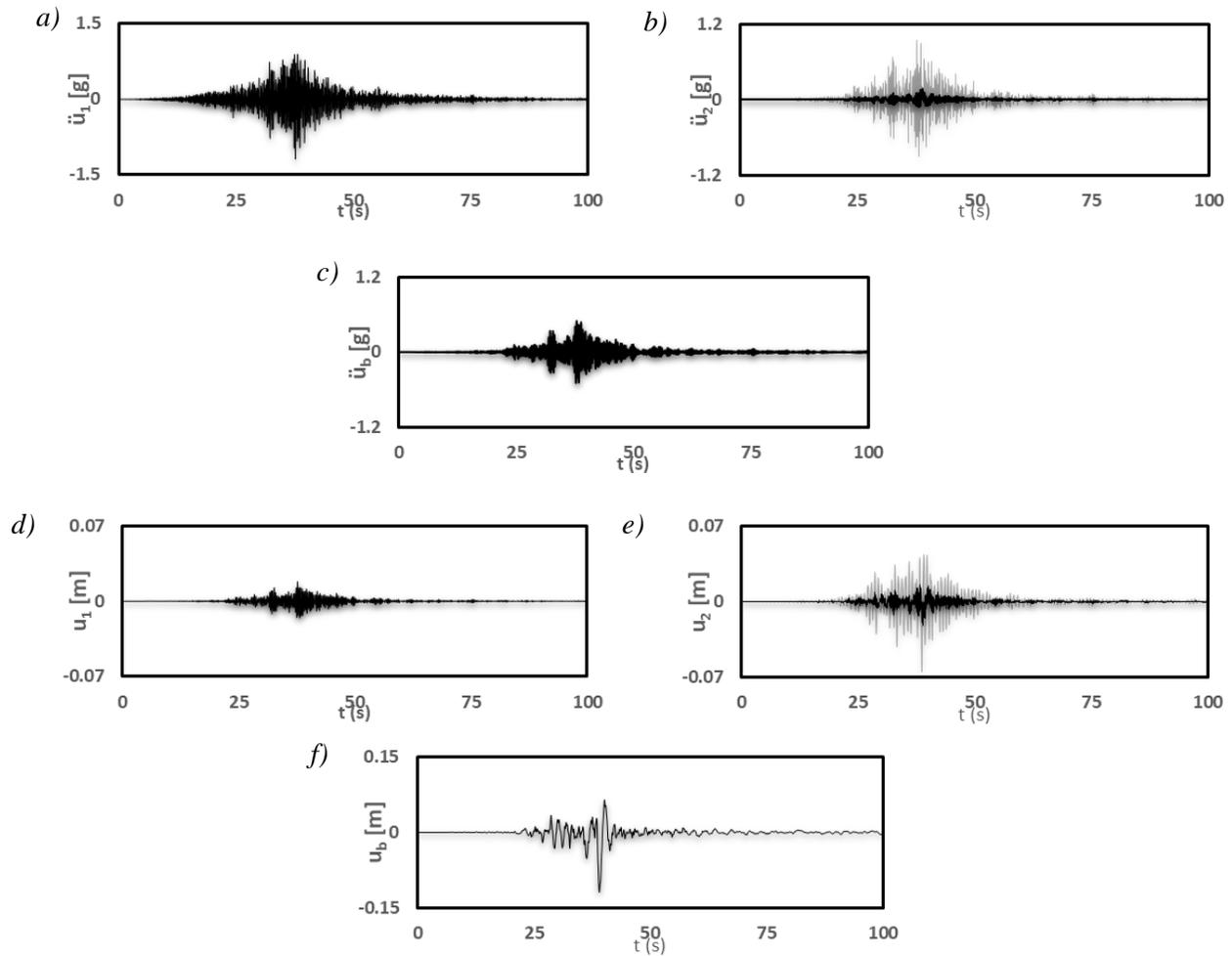


Figura B.17. Historias de aceleración relativa del nivel 1 (a), aceleración relativa nivel 2 (b), aceleración del aislador (c), historias de desplazamiento relativo del nivel 1 (d), desplazamiento relativo del nivel 2 (e) y desplazamiento del aislador (f). NILT. Sistemas de 2GDL (Línea gris) y 3GDL (Línea negra). Éste último incluye un sistema de aislación a media altura.

Periodo $T_b = 3$ s. Historias de desplazamiento y aceleración relativa

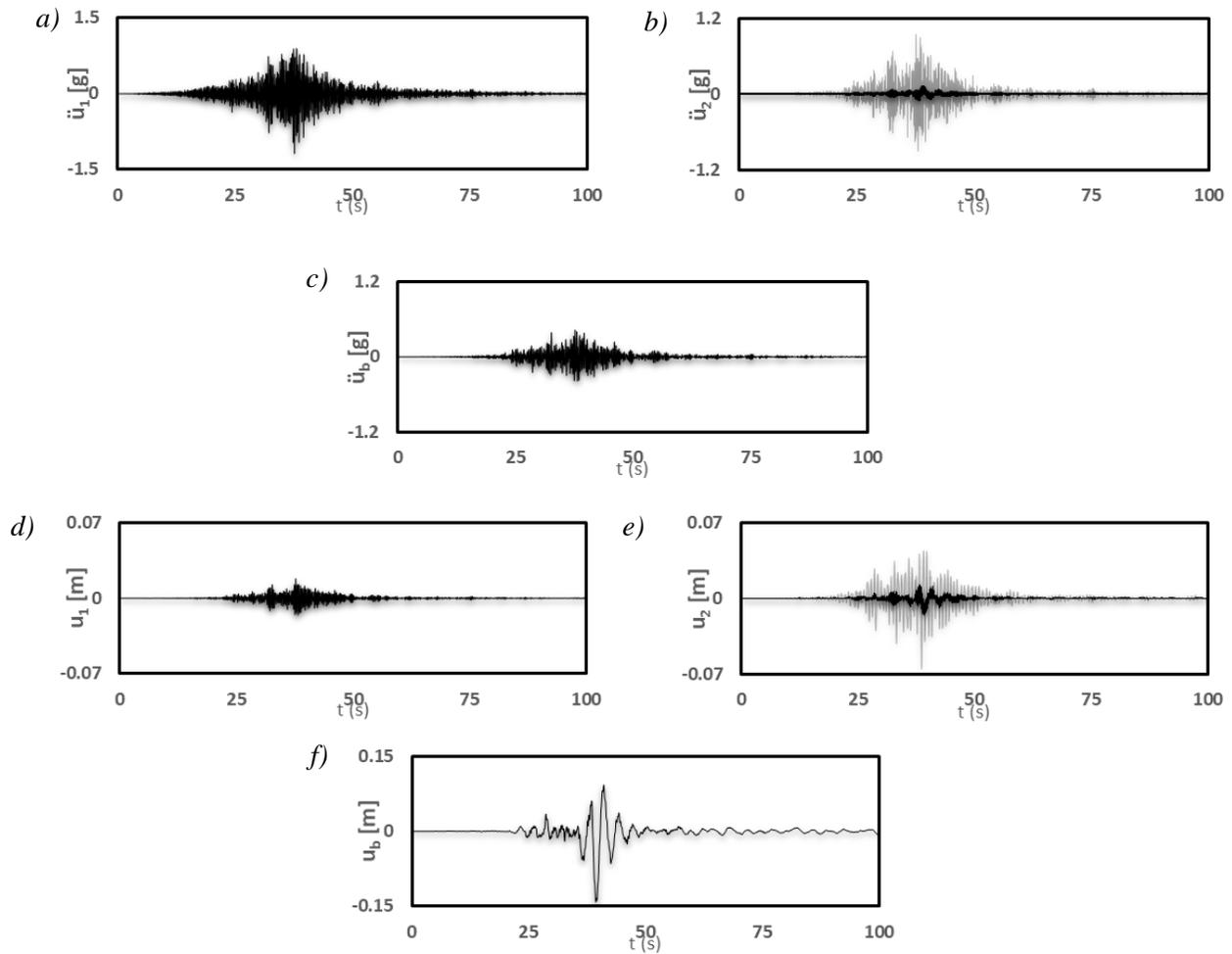


Figura B.18. Historias de aceleración relativa del nivel 1 (a), aceleración relativa nivel 2 (b), aceleración del aislador (c), historias de desplazamiento relativo del nivel 1 (d), desplazamiento relativo del nivel 2 (e) y desplazamiento del aislador (f). NILT. Sistemas de 2GDL (Línea gris) y 3GDL (Línea negra). Éste último incluye un sistema de aislación a media altura.