



UNIVERSIDAD TÉCNICA  
FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Obras Civiles

**ANÁLISIS DE SISTEMAS DE AISLACIÓN SÍSMICA EN  
EDIFICIOS UTILIZANDO SIMULACIONES DE ALTA  
FIDELIDAD**

Memoria de Título presentada por

**Antonia Francisca Braniff Sánchez**

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

**Ingeniería Civil**

Profesores Guía  
Danilo Kusanovic M.  
Claudio Sepúlveda C.

DICIEMBRE, 2023



UNIVERSIDAD TECNICA  
FEDERICO SANTA MARIA

TÍTULO DE LA TESIS:

**ANÁLISIS DE SISTEMAS DE AISLACIÓN SÍSMICA EN EDIFICIOS UTILIZANDO SIMULACIONES DE ALTA FIDELIDAD**

AUTORA:

**ANTONIA FRANCISCA BRANIFF SÁNCHEZ**

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

	<u>Nombre</u>	<u>Firma</u>
Profesor Guía	Danilo Kusanovic	.....
Profesor Guía	Claudio Sepúlveda	.....
Miembro Comisión	Ramiro Bazaez	.....

Valparaíso, Chile, 20 de Diciembre, 2023

# Índice

<b>Lista de figuras</b>	<b>III</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>V</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>VI</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>3</b>
2.1. Objetivo general . . . . .	3
2.2. Objetivos específicos . . . . .	3
<b>3. Marco Teórico</b>	<b>3</b>
3.1. Interacción suelo-estructura . . . . .	3
3.1.1. Interacción cinemática . . . . .	4
3.1.2. Interacción inercial . . . . .	4
3.2. Métodos de modelación numérica . . . . .	5
3.2.1. DRM (Domain Reduction Method) . . . . .	5
3.2.2. PML (Perfectly Matched Layers) . . . . .	6
3.3. Sistema de aislación . . . . .	6
3.3.1. Modelo de aislador . . . . .	7
3.4. Problema de estudio . . . . .	8
<b>4. Descripción de modelos</b>	<b>9</b>
4.1. Prototipos de estructura . . . . .	10
4.2. Sistema de aislación . . . . .	11
4.3. Modelo de suelo semi-infinito . . . . .	11
4.4. Señal sísmica . . . . .	12
<b>5. Resultados y discusión</b>	<b>13</b>
5.1. Drifts entre pisos . . . . .	13
5.2. Aceleraciones horizontales máximas de piso . . . . .	15
5.3. Aceleraciones verticales máximas de piso . . . . .	17
5.4. Aceleraciones verticales máximas de viga . . . . .	21
5.5. Esfuerzo axial en aisladores . . . . .	23
5.6. Deformación de corte . . . . .	26
5.7. Desplazamientos máximos de la fundación . . . . .	26
5.8. Espectros de aceleraciones en la fundación . . . . .	28
5.9. Espectros de aceleraciones horizontales de piso . . . . .	30
5.10. Espectros de aceleraciones de suelo adyacente . . . . .	32
<b>6. Conclusiones y comentarios</b>	<b>33</b>

## Índice de figuras

1.	Ilustración del concepto campo libre y los efectos de la interacción suelo-estructura.	4
2.	Esquema ilustrativo del Método del Dominio Reducido (DRM).	6
3.	Esquema ilustrativo del dominio de capa de PML unido al dominio del suelo. El dominio de suelo se representa en amarillo, mientras que el dominio de la capa de PML en gris. El vector $s$ representa la coordenada compleja de estiramiento, que podría ser $x_1$ o $x_3$ , mientras que $s_0$ es la $s$ -enésima componente del punto de referencia donde se define el estiramiento. Finalmente $L_{PML}$ corresponde al espesor de la capa.	6
4.	Modelo de aislador LRB y la descomposición de su fuerza restitutiva.	8
5.	Esquema de modelos de alta fidelidad para estructuras con aislación sísmica e interacción suelo-estructura. El dominio de suelo se representa en amarillo, el dominio de capa de PML en gris y el sistema de aislación con los elementos rojos.	9
6.	Tipos de estructuras consideradas según ubicación del sistema de aislación.	10
7.	Geometría de la sección transversal de los elementos estructurales utilizados en los modelos. Dimensiones en centímetros	10
8.	Comparación de señal producida con el DRM y registro extraído de la base de datos PEER Ground Motion. Donde $u_h^g(t)$ es el registro de desplazamiento horizontal <i>free-field</i> , $u_v^g(t)$ es el registro de desplazamiento vertical <i>free-field</i> y las etiquetas Seismo-VLAB representan las mediciones en superficie hechas en el software en condición <i>free-field</i> .	12
9.	Ilustración de puntos de mediciones de los resultados analizados.	13
10.	Drifts entre pisos de las estructuras con aislación a nivel de fundación.	14
11.	Drifts entre pisos de las estructuras con aislación a nivel de superficie.	15
12.	Aceleraciones horizontales máximas de piso de las estructuras con aislación a nivel de fundación.	16
13.	Aceleraciones horizontales máximas de piso de las estructuras con aislación a nivel de superficie.	17
14.	Aceleraciones verticales máximas de piso de las estructuras con aislación a nivel de fundación.	18
15.	Aceleraciones verticales máximas de piso de las estructuras con aislación a nivel de superficie.	19
16.	Comparación de aceleraciones de piso para la estructura de 6 pisos con aislación basal.	20
17.	Comparación de aceleraciones de piso para la estructura de 6 pisos con aislación superficial.	20
18.	Comparación del registro de aceleración vertical con la aceleración de piso 0 para la estructura de 4 pisos con aislación basal.	20
19.	Comparación del registro de aceleración vertical con la aceleración de piso 0 para la estructura de 4 pisos con aislación superficial.	21
20.	Aceleraciones verticales máximas de viga de las estructuras con aislación a nivel de fundación.	22
21.	Aceleraciones verticales máximas de viga de las estructuras con aislación a nivel de superficie.	22
22.	Tensión máxima experimentada en los aisladores de las estructuras con aislación a nivel de fundación. Los aisladores fueron enumerados de izquierda a derecha.	24
23.	Compresión máxima experimentada en los aisladores de las estructuras con aislación a nivel de fundación. Los aisladores fueron enumerados de izquierda a derecha.	24

24.	Tensión máxima experimentada en los aisladores de las estructuras con aislación a nivel de superficie. Los aisladores fueron enumerados de izquierda a derecha. . . . .	25
25.	Compresión máxima experimentada en los aisladores de las estructuras con aislación a nivel de superficie. Los aisladores fueron enumerados de izquierda a derecha. . . . .	25
26.	Deformación de corte en aisladores para cada tipo de estructura analizada. . . . .	26
27.	Espectro de respuesta de la aceleración horizontal experimentada por la fundación en los modelos con aislación en fundación. . . . .	28
28.	Espectro de respuesta de la aceleración horizontal experimentada por la fundación en los modelos con aislación en superficie. . . . .	29
29.	Espectro de respuesta de la aceleración vertical experimentada por la fundación en los modelos con aislación en fundación. . . . .	29
30.	Espectro de respuesta de la aceleración vertical experimentada por la fundación en los modelos con aislación en superficie. . . . .	30
31.	Espectros de respuesta de aceleraciones de piso de las estructuras con aislación a nivel de fundación para todas las condiciones de suelo. . . . .	31
32.	Espectros de respuesta de aceleraciones de piso de las estructuras con aislación a nivel de superficie para todas las condiciones de suelo. . . . .	31
33.	Espectros de respuesta de aceleraciones horizontales de piso comparados con el espectro de aceleraciones del registro de aceleración horizontal utilizado. . . . .	32
34.	Comparación del espectro de respuesta del registro de aceleración horizontal con los espectros de respuesta de las aceleraciones experimentadas en el suelo vecino a estructuras con aislación a nivel de fundación. . . . .	33
35.	Comparación del espectro de respuesta del registro de aceleración horizontal con los espectros de respuesta de las aceleraciones experimentadas en el suelo vecino a estructuras con aislación a nivel de superficie. . . . .	33

## Índice de tablas

1.	Parámetros de los aisladores correspondientes a cada configuración estudiada. . . . .	11
2.	Drifts máximos para los casos de aislación a nivel de fundación dependiendo del tipo de suelo. Valores expresados en porcentaje. . . . .	14
3.	Drifts máximos para los casos de aislación a nivel de superficie dependiendo del tipo de suelo. . . . .	15
4.	Aceleración horizontal máxima de piso para los casos de aislación a nivel de fundación dependiendo del tipo de suelo. . . . .	16
5.	Aceleración horizontal máxima de piso para los casos de aislación a nivel de superficie dependiendo del tipo de suelo. . . . .	17
6.	Aceleración vertical máxima de piso para los casos de aislación a nivel de fundación dependiendo del tipo de suelo. . . . .	18
7.	Aceleración vertical máxima de piso para los casos de aislación a nivel de superficie dependiendo del tipo de suelo. . . . .	19
8.	Aceleración vertical máxima de viga para los casos de aislación a nivel de fundación dependiendo del tipo de suelo. . . . .	22
9.	Aceleración vertical máxima de viga para los casos de aislación a nivel de superficie dependiendo del tipo de suelo. . . . .	23
10.	Rotación máxima de la fundación para cada estructura de interés. . . . .	27
11.	Rotación máxima de la fundación en estructuras sin aislación. . . . .	27
12.	Desplazamiento horizontal máximo de la fundación para cada estructura de interés. . . . .	27
13.	Desplazamiento vertical máximo de la fundación para cada estructura de interés. . . . .	28

## Agradecimientos

*La universidad fue una extraordinaria, pero difícil experiencia que conllevo un largo camino que no hubiera podido recorrer hasta el final sin el apoyo y cariño que recibí a cada momento de mi familia, amigos y compañero.*

*Quiero agradecer a mi linda familia que me ha acompañado toda mi vida con su apoyo incondicional y sin el cual no podría haberme convertido en lo que soy hoy. Gracias a mi Rodri que me abrazó y acompañó con su silencioso, pero cálido cariño después de cada prueba durante el largo encierro de la pandemia, y que me dejó desestresarme haciendo lo que más me entretiene, molestarlo. Gracias a mi abuelita, Irene, que me entregó la tranquilidad y consuelo cuando sentía que mis errores me consumían, que me dejó dormir en su cama plenamente, robarme sus chocolates para calmar mi cansancio y me llenó siempre de apapachos. Gracias a mi tía Sandra por ayudarme a entender que una nota no me define en la vida, por hacerme olvidar aquello que me molestaba con sus risas y bromas, por hacerme vivir en el video clip de la canción mi mamá me lo tejé todo jaja y por darme tantas buenas noches de vino y películas que siempre necesitaba. Y gracias a mi mamá que me enseñó a soñar sin límites y perseguir sin miedo mis objetivos, que me guio a cada momento con sabiduría para que no me perdiera en el camino, y siempre llenó mi vida con su amor incondicional, esta memoria te la dedico a ti mamá, que fuiste, eres y serás mi pilar fundamental en la vida.*

*Quiero dar las gracias mi Alejandro, mi compañero y mejor amigo, que desde hace años me impulsa a tomar nuevos desafíos, y quien me dio todos los cafés, pastelitos y abrazos que necesite cada día, quien con su tierna compañía me contuvo, refugió y regaló durante este tan estresante proceso que fue terminar mi tesis en tiempo récord. Gracias Ale, por ser y estar todos estos años.*

*También, quiero agradecer a mi tía Ceci, que me dio una familia en Valparaíso desde el primer día, infinitos cafecitos, y las risas que nunca faltaron. Y finalmente, gracias a mis amigos, Javilu, Rodrigo, Germán, Javiera, y mi pana rabbit Cristian, por haberme acompañado en esta locura que fue vivir la universidad, por haberme enseñado cada día sobre amistad, llegué llena de miedos y me fui llena alegría gracias a ustedes. Gracias por todas esas noches de estudio, todas las risas, fracasos y éxitos que vivimos juntos, los atesoraré siempre en mi corazón.*

*Los quiero mucho a todos, gracias por ayudarme en cada paso que me trajo hasta aquí hoy, gracias por volver el loco camino de la universidad una experiencia inolvidable.*

*Diciembre 2023, Valparaíso.*

# ANÁLISIS DE SISTEMAS DE AISLACIÓN SÍSMICA EN EDIFICIOS UTILIZANDO SIMULACIONES DE ALTA FIDELIDAD

Antonia Braniff Sánchez

## Resumen

La aislación sísmica es un método de protección sísmica que utiliza dispositivos mecánicos para desacoplar el movimiento de una estructura de los desplazamientos del suelo. Esta estrategia ofrece dos ventajas: permite que una estructura mantenga su funcionalidad incluso cuando ocurre un terremoto de gran intensidad y reduce el daño en elementos no estructurales. En las últimas décadas, se ha destacado el buen rendimiento de las estructuras con aislamiento basal. Este buen desempeño ha llevado a un aumento en las inversiones, desarrollo e investigación para mejorar las técnicas de aislamiento. A pesar de esto, el estado de la práctica en ingeniería sigue dependiendo de modelos simplificados al diseñar sistemas de aislamiento sísmico. Si bien estos modelos son prácticos dentro de la comunidad ingenieril, rara vez abordan efectos más complejos como la interacción suelo-estructura (SSI, por sus siglas en inglés). Es bien sabido que la cuantificación precisa de los efectos dinámicos de SSI desempeña un papel fundamental en el diseño de estructuras sismorresistentes. Por lo tanto, despreciar los efectos de SSI en estructuras equipadas con sistemas de aislamiento sísmico puede resultar en diseños inseguros o excesivamente conservadores. Específicamente, esta omisión puede pasar por alto efectos significativos, como el desarrollo de fuerzas de tracción dentro de los aisladores causadas por la rotación de la fundación, la componente sísmica vertical resultante del movimiento de la fundación durante un terremoto, o la subestimación de aceleraciones de piso por no considerar la flexibilidad inherente del suelo. En el presente estudio, se utilizan modelos numéricos de alta fidelidad para examinar las repercusiones de incorporar SSI en el comportamiento dinámico de edificios con sistemas de aislación sísmica. Para realizar el análisis se definen algunas métricas de desempeño que permiten concluir si el uso de modelos de alta fidelidad está justificado en la evaluación de sistemas de aislamiento sísmico. De acuerdo a los resultados obtenidos, la omisión de los efectos de SSI generalmente entrega respuestas horizontales representativas en términos de comportamiento y razonablemente conservadoras. Sin embargo, aceleraciones verticales de piso y fuerzas axiales de los aisladores son considerablemente sobrestimadas al omitir efectos de SSI.

*Palabras claves:* Edificios con aislación basal, interacción suelo-estructura, movimientos del suelo en campo cercano, método de reducción de dominio, descomposición de dominio, aislador elastomérico, computación de alto desempeño.

## 1. Introducción

Aislación sísmica (Naeim y Kelly 1999; Celebi 2000; De la Llera et al. 2004; Chopra 2007; Warn y Ryan 2012) es la denominación que recibe un conjunto de dispositivos mecánicos, que permiten desacoplar el movimiento de una estructura (llamada superestructura) de los desplazamientos generados en su base (INN 2013; Warn y Ryan 2012). Lo anterior es posible gracias a la alta flexibilidad horizontal que poseen estos dispositivos. Los aisladores, nombre que comúnmente reciben tales componentes, permiten que la deformación y disipación energética se concentre en dicho nivel (INN 2013). Esta característica posibilita que las estructuras se mantengan operativas (Warn y Ryan 2012) y los costos de reposición disminuyan drásticamente. Estas últimas dos consecuencias son probablemente

los beneficios más apreciados de estos sistemas, pues resuelven las principales problemáticas que presentan las estructuras críticas como hospitales o aeropuertos (Nagarajaiah y Sun 1996; Nagarajaiah y Xiaohong 2000; Miranda et al. 2012; Giarlelis et al. 2018; Nikfar y Konstantinidis 2019).

Importantes terremotos de las últimas décadas, como Northridge (1994), Kobe (1995) o el Maule (2010), mostraron los exitosos resultados que se obtienen con sistemas de aislación (INN 2013). Este hecho generó una ola de inversión y desarrollo del uso de estos sistemas en varios países del mundo, entre ellos Chile, debido a su alto nivel de actividad sísmica (Lagos et al. 2021). Prueba de esto, es que luego del terremoto del 2010, el número de edificios con aislación sísmica creció rápidamente, pasando de 13 a más de 110 en tan solo una década (Varela 2022). Dado lo anterior, los estudios y análisis que sustentan su diseño debieron adaptarse de igual manera. Aunque a nivel de investigación se llegan a utilizar modelos sofisticados para estimar la respuesta de dichos sistemas, en la mayoría de los modelos se omite la interacción suelo-estructura (Akehashi y Takewaki 2021; Haiyang et al. 2014).

El concepto de interacción suelo-estructura (SSI, de sus siglas en inglés) hace referencia al vínculo que existe entre el suelo, la fundación de una estructura y su influencia en la respuesta estructural (Wolf 1985). En general, incorporar la interacción de forma explícita resulta complejo en términos matemáticos y costoso en términos computacionales (D. S. Kusanovic, Seylabi y Asimaki 2023; D. S. Kusanovic, Seylabi, Nguyen et al. 2023; D. S. Kusanovic, Taborda et al. 2023). Los modelos que incorporan de manera explícita esta interacción y sus efectos, se conocen como modelos de alta fidelidad.

La complejidad inherente en este concepto ha llevado a dividir el comportamiento de interacción en efectos cinemáticos e inerciales (Kausel 2010). La influencia de un efecto con respecto al otro depende de las características del sistema, por ejemplo, en sistemas estructurales con subterráneos (FEMA 2020b), es esperable que la respuesta estructural sea modificada significativamente producto de la rotación inducida por la fundación (efectos cinemáticos). En cambio, en sistemas estructurales de gran altura, es esperable que la respuesta de la fundación sea modificada significativamente producto de las grandes fuerzas inducidas por la estructura (efectos inerciales) (Stewart et al. 2012).

En el caso de estructuras con sistemas de aislación sísmica, desprestigiar estos efectos, podría conllevar estimar de forma incorrecta las fuerzas axiales máximas de tracción y compresión en los aisladores, las aceleraciones de piso de la superestructura, entre otros (Akehashi y Takewaki 2021; Mylonakis y Gazetas 2000). En la actualidad, si bien, existen diversos estudios sobre aislación sísmica que integran la interacción suelo-estructura (Akehashi y Takewaki 2021; Luco 2014; Novak y Henderson 1989; Tsai et al. 2004), el alcance de estos no es suficientemente robusto para resolver estas interrogantes. Mayoritariamente, estos estudios consideran modelos de orden reducido para la interacción suelo-estructura, con superestructuras simplificadas que no permiten analizar en detalle la dinámica de pisos, y fundaciones superficiales que no presentan la interacción cinemática.

Considerando lo anteriormente expuesto, es que el presente trabajo busca responder algunas de las incógnitas existentes, al estudiar el comportamiento de un edificio con aislación sísmica, a través de modelos de alta fidelidad (Nguyen et al. 2022a; D. S. Kusanovic, Seylabi y Asimaki 2023), que mediante el uso del método elementos finitos y elementos de borde permiten simular adecuadamente la propagación y dinámica de ondas entre la estructura y el suelo.

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo general

Analizar el impacto que tiene incorporar la interacción suelo-estructura en la respuesta local y global de edificios de mediana altura con sistemas de aislación sísmica utilizando modelos numéricos de alta fidelidad.

### 2.2. Objetivos específicos

1. Cuantificar la respuesta máxima de los desplazamientos, aceleraciones y fuerzas para todas las configuraciones estudiadas.
2. Evaluar la diferencia entre los resultados de un sistema con aislación basal y un sistema con aislación a nivel de superficie.
3. Evaluar el impacto de incorporar interacción suelo-estructura dependiendo de la esbeltez de la estructura, calidad del suelo y configuración de aislación sísmica.

## 3. Marco Teórico

### 3.1. Interacción suelo-estructura

Interacción suelo-estructura alude a un concepto amplio e interdisciplinario, que resulta complejo de definir, ya que su interpretación depende estrechamente del área de estudio desde la cual se plantea su significado (Kausel 2010). Desde una perspectiva estructural, podría definirse como la modificación del comportamiento estructural de un sistema, como resultado de las acciones y reacciones producidas entre la fundación o base y el suelo circundante, cuyo origen es la flexibilidad que presenta este último (D. S. Kusanovic, Seylabi y Asimaki 2023). Por otro lado, si se estudia desde el área de la geotecnia, se podría definir como la modificación de la respuesta del suelo a fuentes dinámicas externas en las proximidades de una estructura (Gazetas 1983; Kausel 2010). En consideración del contexto y objetivo que persigue la presente memoria, se utilizará la primera definición.

Para comprender la importancia de considerar la interacción suelo-estructura, en primer lugar, aunque resulte evidente, se debe relevar el hecho de que prácticamente todas las estructuras (edificios, presas, viaductos, etc.) están de una u otra forma en contacto con el suelo (Zhang et al. 2019). Por ende, su respuesta estructural está condicionada en parte por sus fundaciones y el suelo circundante (FEMA 2020a). Si bien no en todos los casos este condicionamiento es significativo, como por ejemplo, en estructuras muy livianas como galpones de acero (Zhang et al. 2019), existen varios casos donde el suelo sí modifica significativamente la respuesta sísmica de una estructura (FEMA 2020b; Mylonakis y Gazetas 2000). La incorporación de la interacción suelo-estructura puede producir una distribución diferente de fuerzas entre las fundaciones y la estructura (FEMA 2020b), aumentar el amortiguamiento efectivo del sistema, e incluso modificar el movimiento del suelo en vecindades de grupos de estructuras (Isbilioğlu et al. 2015; Wang et al. 2022).

Se conoce como *señal de campo libre* (o *free-field* en inglés) a la señal sísmica que alcanza la superficie terrestre en ausencia de estructuras, excavaciones, efectos topográficos u otra perturbación (Wolf 1985), como se ilustra en la Figura 1(a). Cuando una estructura está presente en la superficie, la señal de campo libre experimenta una alteración significativa debido a que una porción de su energía es transmitida hacia la estructura en forma de vibraciones, es decir, se modifica producto

de la interacción entre la estructura y el suelo adyacente. Estas oscilaciones, se manifiestan predominantemente como aceleraciones y deformaciones en el sistema estructural, que a su vez, inducen deformaciones en el suelo.

La energía transmitida a la estructura se disipa esencialmente de dos modos: una parte de esta energía se irradia desde la estructura hacia el suelo circundante, mientras que la otra, se disipa dentro del sistema estructural, causando, en la mayoría de los casos daños a los componentes estructurales, tales como muros, vigas, losas y columnas.

Para una comprensión más profunda de este concepto resulta útil clasificar los efectos de la interacción suelo-estructura en dos categorías: la *interacción inercial* y la *interacción cinemática* (Stewart et al. 2012). Sin embargo, es relevante aclarar que esta división, es meramente académica, pues en la realidad, no es posible separar dichos efectos.

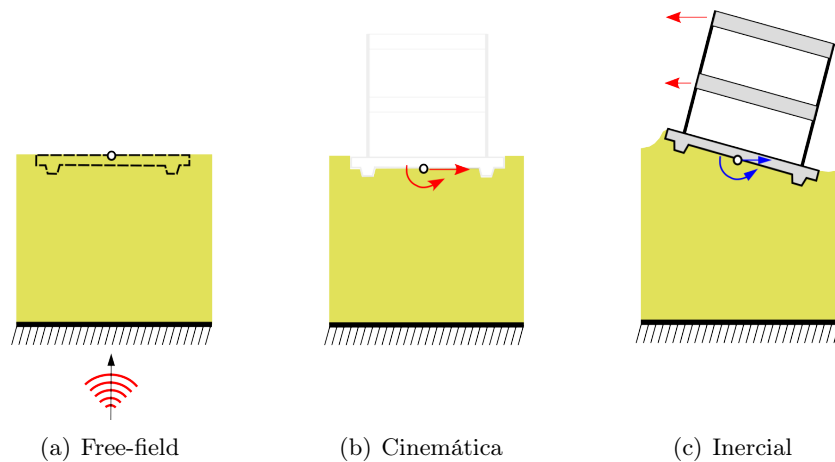


Figura 1: Ilustración del concepto campo libre y los efectos de la interacción suelo-estructura.

### 3.1.1. Interacción cinemática

Se denomina interacción cinemática a la diferencia que presenta el movimiento entrante a la fundación o base de una estructura respecto al movimiento *free-field*, esta diferencia en la Figura 1(b) es representada a través de las flechas rojas. Esta alteración del movimiento es producto de: (1) la diferencia de rigideces entre el suelo y la fundación, generando un desvío de las deformaciones al ser esta última de mayor rigidez, (2) el desfase temporal con que las ondas llegan a los distintos puntos de la fundación, producto de la distribución espacial que posee ésta, (3) el efecto de empotramiento que se produce en la zona más profunda de una fundación, debido a que los movimientos en profundidad son menores que los superficiales. (FEMA 2020b; Stewart et al. 2012)

### 3.1.2. Interacción inercial

Como se muestra en la Figura 1(c), los efectos inerciales (flechas rojas) producidos por una estructura se traducen en fuerzas de corte, momentos flectores y torsionales que se transmiten a su fundación (flechas azules), y generan en esta última desplazamientos y rotaciones adicionales al movimiento *free-field* (FEMA 2020a; Stewart et al. 2012). A esta respuesta adicional se le denomina interacción inercial, y se genera por la flexibilidad que posee el sistema suelo-fundación. Este efecto produce dos fuentes de amortiguación adicionales a la estructural, una amortiguación por radiación, generada por ondas de esfuerzos que se propagan hacia el suelo debido a los desplazamientos de la

fundación relativos al *free-field*, y una por la respuesta histerética del suelo. (FEMA 2020a; Stewart et al. 2012)

### 3.2. Métodos de modelación numérica

Actualmente, para estudiar y modelar la interacción suelo-estructura, existen dos métodos, el *método directo* y el *método de subestructura*. (FEMA 2020a; Stewart et al. 2012).

El *método de subestructura* modela el suelo como un conjunto de resortes y amortiguadores que simulan la flexibilidad y capacidad radiativa del suelo. En cambio, el método directo, considera la modelación explícita de la estructura, su fundación y el suelo circundante, utilizando comúnmente el método de elementos finitos (FEM por sus siglas en inglés). Pese a que, frecuentemente se utiliza el método de subestructura, debido a su menor costo computacional (Wolf 1985; Stewart et al. 2012), en el presente estudio, se utilizará el método directo, a través del método de elementos finitos.

El método de elementos finitos es ampliamente usado, en el área de mecánica estructural y de sólidos, pues permite estudiar sistemas de alta complejidad, mediante un ensamble de pequeños elementos que componen el modelo continuo (Bathe 2006; Cook et al. 2007; Chopra 2007). Además, esta metodología, permite incorporar efectos como grandes deformaciones y no-linealidad a nivel de cada elemento si es deseado. Esta capacidad hace posible representar de manera más fidedigna las interfases entre fundación y suelo, y por ende su comportamiento dinámico. En general, este método, es adecuado para modelar dominios acotados, por lo que para modelar dominios semi-infinitos, como es el caso del suelo, técnicas especiales deben ser incorporadas. En este contexto, es común integrar metodologías particulares, que, por ejemplo, permitan simular el ingreso de ondas sísmicas (Bielak et al. 2003; Zhang et al. 2019) y la condición semi-infinita del suelo (Kucukcoban y Kallivokas 2011; Kucukcoban y Kallivokas 2013) sin utilizar un dominio tan extenso.

#### 3.2.1. DRM (Domain Reduction Method)

El método de dominio reducido (Bielak et al. 2003, abreviado DRM por sus siglas en inglés) es una metodología que permite simular el ingreso de un campo de ondas en un modelo FEM. En particular, este método resulta útil para simular ondas sísmicas cuyo patrón de propagación es conocido. El DRM, consiste en aplicar en una capa de elementos (como se ilustra en la Figura 2(a)), las condiciones cinemáticas (puede ser de aceleración, desplazamiento o velocidad) y de esta forma inducir una onda de movimiento en el sistema. El alcance de este método permite simular campos arbitrarios de onda, sin embargo, en el presente estudio, se utiliza el caso simplificado de un campo de onda plano que permite ingresar alguna señal de interés.

Para imponer las condiciones cinemáticas se aplican fuerzas efectivas ( $\mathbf{P}_b$  y  $\mathbf{P}_e$ ) en cada nodo de la capa DRM como se esquematiza en la Figura 2(b). Los vectores correspondientes a estas fuerzas efectivas se calculan mediante la siguiente expresión:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_i \\ \mathbf{P}_b \\ \mathbf{P}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}_{be}^{\Omega^+} \ddot{\mathbf{u}}_e^0 - \mathbf{C}_{be}^{\Omega^+} \dot{\mathbf{u}}_e^0 - \mathbf{K}_{be}^{\Omega^+} \mathbf{u}_e^0 \\ \mathbf{M}_{eb}^{\Omega^+} \ddot{\mathbf{u}}_b^0 + \mathbf{C}_{eb}^{\Omega^+} \dot{\mathbf{u}}_b^0 + \mathbf{K}_{eb}^{\Omega^+} \mathbf{u}_b^0 \end{bmatrix},$$

donde los subíndices i, b y e corresponden al interior, borde y exterior de la capa DRM respectivamente.  $\mathbf{M}^{\Omega^+}$ ,  $\mathbf{C}^{\Omega^+}$ , y  $\mathbf{K}^{\Omega^+}$  son las submatrices fuera de la diagonal de las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez ensambladas a partir de la capa contenida entre los límites  $\Gamma_b$  y  $\Gamma_e$ , y  $\mathbf{u}^0$ ,  $\dot{\mathbf{u}}^0$ ,  $\ddot{\mathbf{u}}^0$  son los desplazamientos, la velocidad y la aceleración del suelo en el *free-field*.

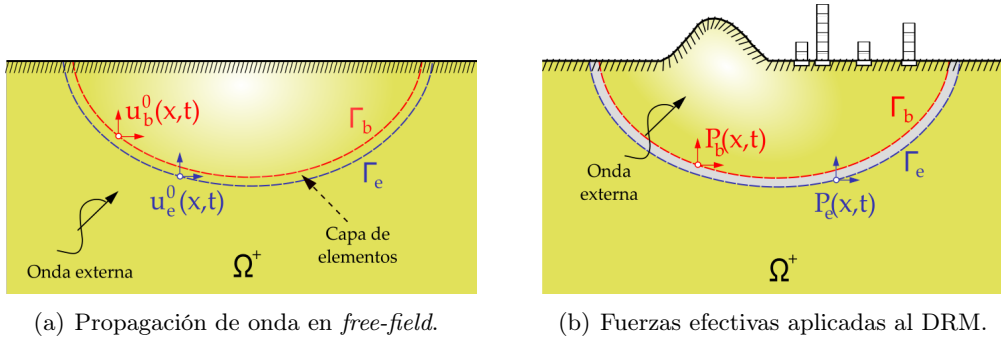


Figura 2: Esquema ilustrativo del Método del Dominio Reducido (DRM).

### 3.2.2. PML (Perfectly Matched Layers)

Un PML (Zhang et al. 2019) es un elemento de borde. Este elemento es formulado para truncar el dominio del suelo mediante la absorción de las ondas incidentes en los bordes del dominio como se muestra en la Figura 3(b). La absorción de las ondas se genera en la capa de PML donde la disipación se aumenta de forma progresiva, como se ilustra de manera esquemática en la Figura 3(a). Es importante destacar que los PML se colocan como una capa externa al dominio del suelo que actúa como una extensión del mismo.

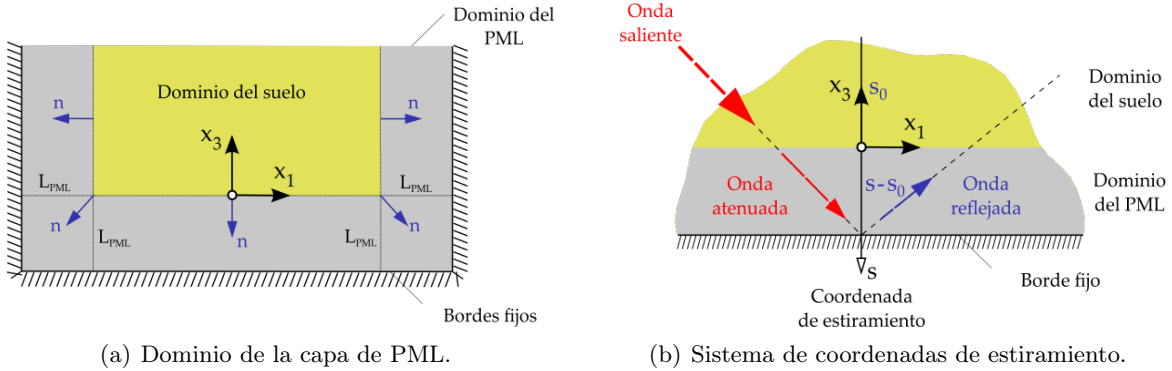


Figura 3: Esquema ilustrativo del dominio de capa de PML unido al dominio del suelo. El dominio de suelo se representa en amarillo, mientras que el dominio de la capa de PML en gris. El vector  $s$  representa la coordenada compleja de estiramiento, que podría ser  $x_1$  o  $x_3$ , mientras que  $s_0$  es la  $s$ -énesima componente del punto de referencia donde se define el estiramiento. Finalmente  $L_{PML}$  corresponde al espesor de la capa.

### 3.3. Sistema de aislación

Los sistemas de aislación sísmica son un método pasivo de protección sísmica (Christopoulos y Filiatrault 2006), y se consideran una de las mejores soluciones para evitar daños tanto en los elementos estructurales como en los no estructurales (Cimellaro 2023).

Este método consiste en desconectar el movimiento de una estructura (usualmente denominada superestructura) del movimiento en su base y/o fundación (Warn y Ryan 2012). Lo anterior se logra al emplazar entre la superestructura y su fundación, un nivel compuesto de dispositivos altamente

flexibles, que en general, poseen un mecanismo de disipación de energía para reducir desplazamientos (Christopoulos y Filiatrault 2006). Estos dispositivos, llamados aisladores, concentran la deformación horizontal impuesta por las solicitaciones sísmicas y limitan el traspaso de energía gracias a su baja rigidez lateral, disminuyendo las deformaciones y aceleraciones en la superestructura. De esta forma, la superestructura permanece en el rango de comportamiento lineal-elástico (o cercano a él), con un bajo o nulo daño, permitiendo la continuidad de operación (Warn y Ryan 2012).

Las estructuras con sistemas de aislación sísmica se caracterizan por poseer un periodo fundamental significativamente más alto que su versión sin aislación. En términos espectrales, la elongación del periodo traslada al sistema a la zona de bajas aceleraciones, reduciendo las fuerzas en la base (Christopoulos y Filiatrault 2006), así como las solicitaciones transmitidas a los pisos superiores.

Actualmente, existe una amplia variedad de aisladores en base a diferentes materiales y mecanismos. Los más comunes se clasifican en elastoméricos y de péndulo friccional. Los aisladores elastoméricos están compuestos por capas alternadas de caucho (sintético o natural) y acero, y se subdividen en:

- Aisladores de goma de bajo amortiguamiento (Low Damping Rubber Bearing – LDRB), caracterizados por un comportamiento casi lineal y un rango de 2 a 3 % de amortiguación cuando alcanzan un 100 % de deformación de corte (Warn y Ryan 2012).
- Aisladores de goma de alto amortiguamiento (High Damping Rubber Bearing – HDRB), que presentan un comportamiento altamente no lineal, y logran de 10 a 20 % de amortiguación cuando llegan a 100 % de deformación por corte (Warn y Ryan 2012).
- Aisladores de goma de bajo amortiguamiento con núcleo de plomo (Lead-core Rubber Bearing – LRB), los cuales poseen un comportamiento no-lineal debido a la respuesta plástica del plomo frente a deformaciones de corte (Naeim y Kelly 1999).

Por otra parte, los aisladores de péndulo friccional controlan la flexibilidad de los dispositivos mediante el radio de curvatura de la superficie, mientras que la disipación de energía la provee la fricción de la superficie deslizante (Christopoulos y Filiatrault 2006). Dentro de esta categoría se encuentran aisladores con diferentes superficie de contacto tales como teflón, acero, polímeros, entre otros. También existen diferentes configuraciones para alcanzar mayores desplazamientos en dispositivos más compactos, como por ejemplo aisladores de péndulo doble y triple.

En el presente trabajo se utilizan aisladores elastoméricos con núcleo de plomo, debido a su amplio uso en la actualidad en varios países del mundo.

### 3.3.1. Modelo de aislador

Los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo, o LRB por sus siglas en inglés (Lead Rubber Bearings), se modelan como elementos de dos nodos utilizando el modelo desarrollado por Yamamoto et al. 2012. En la Figura 4 se presenta un esquema con las variables del modelo de aislador.

El modelo establece el vector  $d(t)$ , que representa aproximadamente la dirección de desplazamiento, y se define a partir del vector radial de desplazamiento  $u_r(t)$  en función de  $x_1$  y  $x_2$  con la siguiente ecuación diferencial no lineal:

$$\dot{d}(t) = \frac{1}{\alpha} \|u_r(t)\| \left( \dot{u}_r(t) - \|d(t)\|^\beta d(t) \right), \quad \text{con } u_r(0) = 0 \quad \text{y} \quad d(0) = 0,$$

donde  $\dot{u}_r$  es la velocidad radial,  $\dot{u}_r$  y  $d(t)$  son los vectores unitarios en dirección de  $\dot{u}_r$  y  $d(t)$ , la función  $\|\cdot\| : R^2 \rightarrow R$  representa la norma euclidiana, y,  $\alpha$  y  $\beta$  son constantes positivas que dependen del desplazamiento de fluencia y la suavidad de la curva esfuerzo-deformación, respectivamente.

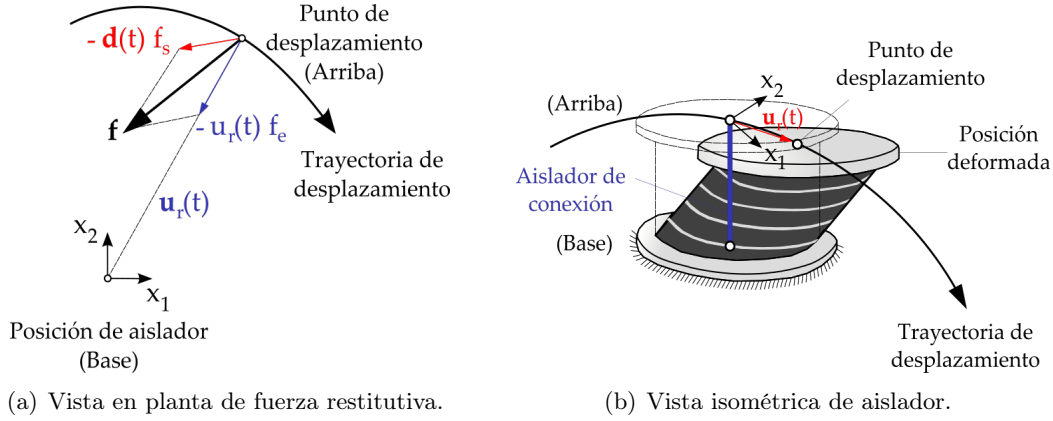


Figura 4: Modelo de aislador LRB y la descomposición de su fuerza restititiva.

Una vez calculado el vector  $d(t)$ , es posible obtener la fuerza restititiva  $F(t)$  en el aislador (en dirección  $x_1$  y  $x_2$ ) en términos del vector unitario  $\dot{u}_r$  y el vector  $d(t)$  con la siguiente expresión:

$$F(t) = -\dot{u}_r(t)f_e(t) - d(t)f_s(t),$$

donde  $f_e(t)$  es la componente elástica no-lineal de la fuerza y  $f_s(t)$  es la componente inelástica.

Finalmente, para estimar la componente elástica y la elastoplástica se establecen las relaciones a continuación:

$$\tau_e(t) = \frac{f_e(t)}{A}, \quad y \quad \tau_s(t) = \frac{f_s(t)}{A},$$

donde  $\tau_e(t)$  y  $\tau_s(t)$  son los esfuerzos correspondientes a las fuerzas  $f_e(t)$  y  $f_s(t)$ , respectivamente, y  $A$  es el área de la sección transversal del aislador, calculada como  $A = \pi (D_e^2 - D_i^2) / 4$ , donde  $D_e$  es el diámetro externo y  $D_i$  es el diámetro interno del dispositivo.

Los valores de  $\alpha$ ,  $\beta$ , y las funciones de  $\tau_e(t)$  y  $\tau_s(t)$  se establecen a partir de los resultados de calibración obtenidos por Jensen y D. Kusanovic 2014, utilizando datos chilenos de aisladores LRB a escala real. De acuerdo con estos resultados, las constantes  $\alpha$ ,  $\beta$  se estiman como  $0.2 H_r$  y  $0.7$  respectivamente, donde  $H_r$  es la altura total de goma del aislador, y las funciones de  $\tau_e(t)$  y  $\tau_s(t)$  son las presentadas a continuación:

$$\tau_e(t) = \begin{cases} 0.35\gamma(t), & \text{si } 0 \leq \gamma(t) \leq 1.8 \\ 0.35\gamma(t) + 0.2(\gamma(t) - 1.8)^2, & \text{si } \gamma(t) \geq 1.8 \end{cases},$$

$$\tau_s(t) = 0.125 + 0.015\gamma(t) + 0.012\gamma(t)^3,$$

donde  $\gamma(t) = \frac{\|u(t)\|}{H_r}$ , es la deformación promedio por corte.

Por último, se hace notar que en este modelo, el comportamiento horizontal se encuentra desacoplado de la carga axial del elemento.

### 3.4. Problema de estudio

En base a una revisión exhaustiva de la literatura especializada, se ha observado que la gran mayoría de las investigaciones de estructuras equipadas con sistemas de aislación, que consideran la interacción suelo-estructura, optan por el método de subestructuración con fundaciones superficiales

(Kausel 2010). Este enfoque a menudo resulta en despreciar los efectos de la interacción cinemática o, en el mejor de los casos, en una representación simplificada de esta (Stewart et al. 2012).

En consecuencia, numerosos fenómenos derivados de esta interacción no han sido analizados rigurosamente, generando incertidumbre respecto a los posibles efectos que podrían tener en sistemas de aislación. Lo anterior, es particularmente relevante, en casos donde tal interacción ejerce una influencia sustancial, como es el caso de edificios con sótanos profundos (FEMA 2020b). Además, es importante destacar que los modelos de superestructura que con frecuencia se emplean en los estudios de aislación e interacción suelo-estructura son de baja fidelidad (Akehashi y Takewaki 2021; Luco 2014; Novak y Henderson 1989; Tsai et al. 2004), ya que típicamente se representan con un número limitado de grados libertad (por ejemplo, uno por piso). Esto impide examinar parámetros cruciales para determinar la eficacia de la aislación sísmica en aspectos como las aceleraciones de piso, variable importante para la evaluación del desempeño de componentes no estructurales.

Ante esta carencia de modelos que aborden integralmente la realidad física que rige la respuesta dinámica de una estructura con aislación sísmica, esta tesis busca comprender las consecuencias que conlleva el tipo de suelo circundante en el funcionamiento de un sistema de aislación, y determinar si estas podrían generar problemas hasta ahora desapercibidos. Para lograr lo anterior, se propone desarrollar un conjunto de 24 modelos en total, constituido por 18 modelos de alta fidelidad (D. S. Kusanovic, Seylabi y Asimaki 2023; Nguyen et al. 2022b) utilizando el método directo y 6 modelos sin interacción suelo-estructura, considerando un modelo constitutivo para el sistema de aislación que permite capturar en la dirección horizontal el comportamiento no lineal de estos dispositivos. Los modelos se subdividen en 2 tipos en función de la configuración que presente su sistema de aislación. El primer tipo se aísla a nivel superficial, mientras que el segundo tipo posee la aislación a nivel de fundación. Estos modelos incorporan suelos homogéneos y consideran edificios de mediana altura, de entre 2 y 6 pisos sobre la superficie, y con dos niveles de subterráneo.

## 4. Descripción de modelos

En el presente estudio, los modelos de alta fidelidad se constituyen de una estructura, una fundación, y un suelo circundante rectangular. Para simular la naturaleza semi-infinita del suelo se emplea una capa de PML, y el método de dominio reducido (DRM) para transmitir en el suelo la señal sísmica. La configuración descrita se presenta esquemáticamente en la Figura 5.

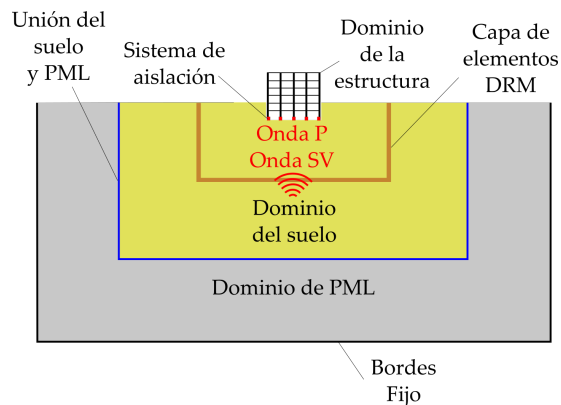


Figura 5: Esquema de modelos de alta fidelidad para estructuras con aislación sísmica e interacción suelo-estructura. El dominio de suelo se representa en amarillo, el dominio de capa de PML en gris y el sistema de aislación con los elementos rojos.

#### 4.1. Prototipos de estructura

Como se muestra en la Figura 6, se consideran dos tipos de estructura: una con aislación a nivel de superficie y una con aislación a nivel de fundación.

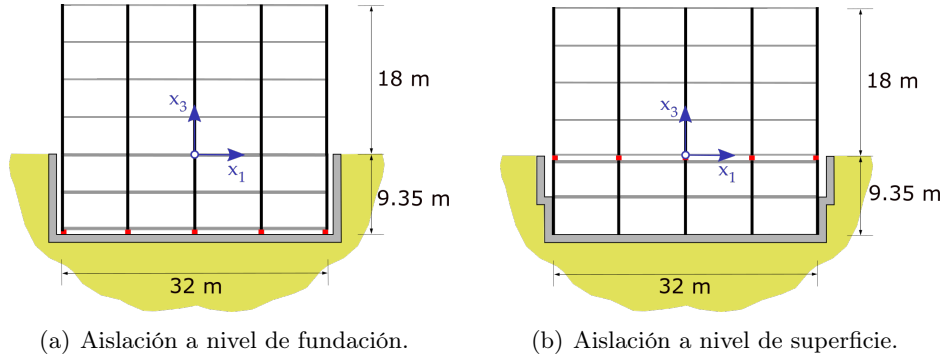


Figura 6: Tipos de estructuras consideradas según ubicación del sistema de aislación.

Para cada ubicación del sistema de aislación se consideran tres cantidades de pisos sobre la superficie: 2, 4 y 6 pisos, que corresponden a una altura total de 9 [m], 18 [m] y 27 [m] respectivamente considerando una altura de entre pisos fija de 4.25 [m]. La zona del subterráneo se supone diseñada para estacionamientos, y se compone de 2 pisos, que en total poseen una altura enterrada de 9.35 [m]. En función de lo anterior, se obtiene un total de 6 configuraciones para la estructura.

La estructura completa (incluida la fundación) se asume de hormigón armado, con módulo de elasticidad de  $E_c=25$  [GPa], una densidad de  $\rho_c=2500$  [kg/m<sup>3</sup>] y un módulo de Poisson de  $\nu_c=0.2$ . Dado que para sistemas aislados las estructuras debieran de permanecer en el rango de respuesta lineal durante un evento sísmico, los elementos estructurales (columnas y vigas) se modelan como elementos lineales tipo *frame* de 2 nodos. Todas las columnas de la estructura poseen una sección de  $85 \times 85$  [cm] como se muestra en la Figura 7(b), y cada una se discretiza en 5 o 6 elementos por piso. Las vigas se modelan con una sección equivalente T para considerar un ancho efectivo de la losa, con las dimensiones presentadas en la Figura 7(a), y cada vano se discretiza con entre 9 a 11 elementos para distribuir la masa del piso. También, se incorpora un amortiguamiento de Rayleigh proporcional solo a la rigidez con un coeficiente  $\beta=0.022282$ , el cual se obtuvo suponiendo un periodo estándar de 3.5 [s] para todos los prototipos y una fracción de amortiguamiento del 3%.

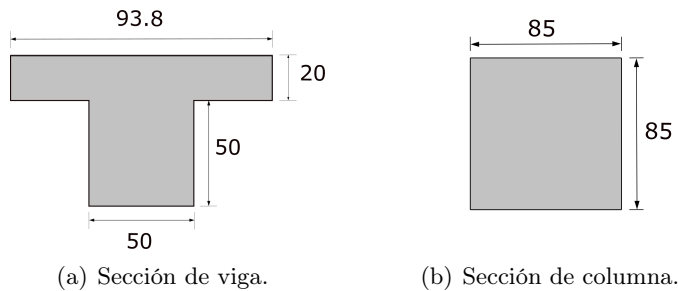


Figura 7: Geometría de la sección transversal de los elementos estructurales utilizados en los modelos. Dimensiones en centímetros

El modelo posee una profundidad perpendicular al plano de análisis de 8 [m], el cual equivale a la longitud de un vano del edificio. Este ancho aplica tanto para el suelo, como para el edificio en sí. En función de lo anterior, se considera 8 [m] de losa en cada piso para calcular el peso de la estructura y la sección equivalente de las vigas.

Finalmente, la fundación se compone de un muro de contención de 50 [cm] y una losa de fundación cuyo espesor depende de la cantidad de pisos sobre la superficie. Ambos componentes, se modelan mediante elementos tipo *quadrilateral* con dos grados de libertad traslacionales por nodo. Los espesores de losa considerados son de 80, 100 y 120 [cm] para las estructuras con 2, 4 y 6 pisos respectivamente. Para simular mejor el comportamiento dinámico de la fundación, esta se modela como un diafragma rígido en el plano de análisis, utilizando como punto de control su centro instantáneo de rotación (centro de la losa). Para todas las configuraciones se define una separación de 35 [cm] entre el borde la estructura y el muro de contención.

## 4.2. Sistema de aislación

Cada columna de la estructura descansa sobre un elemento LRB, lo que se traduce en 5 aisladores, cuyas propiedades geométricas y mecánicas dependen de la cantidad de pisos que se encuentran sobre el nivel de aislación. Para cada prototipo se diseñó un sistema de aislación diferente intentando llegar a periodos efectivos de entre 3 y 3.4 [s]. Las características del sistema de aislación de cada tipo de estructura se presentan en la Tabla 1.

Cada uno de los aisladores se modela a través de dos elementos conectados en paralelo a dos nodos. El primer elemento refleja el comportamiento no lineal del aislador en la dirección horizontal mediante las curvas de comportamiento descritas en el punto 3.3.1 El segundo elemento representa la rigidez vertical del aislador ( $K_v$ ), asumiendo un comportamiento lineal-elástico en esta dirección y desacoplado de la dirección horizontal. Para cada aislador,  $K_v$  se define en base a la rigidez nominal en compresión informada por el proveedor de los dispositivos.

Modelo	N de pisos	Diámetro externo [mm] ( $De$ )	Diámetro interno [mm] ( $Di$ )	Altura total goma [mm] ( $H_r$ )	Rigidez vertical ( $\times 10^3$ [N/m]) ( $K_v$ )
Estructura con aislación a nivel de fundación	2	700	110	16.195	2680
	4	750	120	16.195	3200
	6	850	130	16.195	4100
Estructura con aislación a nivel de superficie	2	600	90	16.195	2070
	4	700	110	16.195	2680
	6	750	120	16.195	3200

Tabla 1: Parámetros de los aisladores correspondientes a cada configuración estudiada.

## 4.3. Modelo de suelo semi-infinito

Cada configuración se analiza con tres tipos de suelo distintos, los cuales se definen en función de la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ). El registro sísmico utilizado en este estudio fue medido en un suelo que posee una velocidad de onda de corte de 282.3 [ $m/s^2$ ]. Es por esto que se utilizan suelos similares al real, con valores de  $V_s$  de 250 y 350 [ $m/s^2$ ], y un suelo con 150 [ $m/s^2$ ], que si bien no representa un caso consistente con el registro seleccionado, se utiliza únicamente con el fin académico de evaluar paramétricamente la importancia del suelo. Por último, para todas las estructuras prototipo, también se analiza un caso en el que los efectos de SSI son completamente

omitidos, empotrando la base del edificio para así someter a la estructura al registro de campo libre directamente. Este caso representa lo que comunmente se realiza en un análisis tiempo-historia.

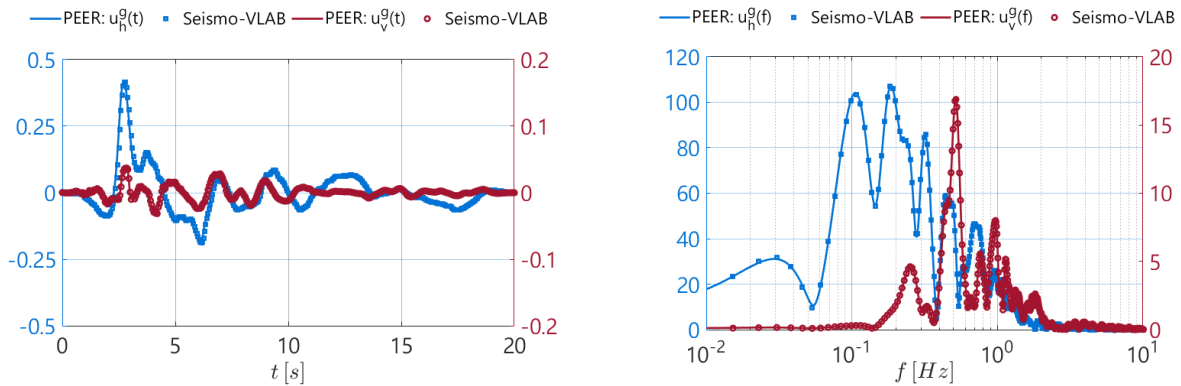
El suelo se modela como un medio homogéneo, mediante elementos lineales y elásticos, tipo *quadrilateral* con dos grados de libertad traslacionales por nodo, con módulo de elasticidad de  $E_s = 2(1 + \nu_s)\rho_s V_s^2$ , una densidad de  $\rho_s = 2000 [kg/m^3]$  y un módulo de Poisson de  $\nu_s = 0.35$ . Se considera un ancho de 90 [m] hacia cada lado de la estructura (medido desde el paramento externo del muro de contención), y una profundidad de 90 [m] por debajo de la cota de fundación.

Para absorber las ondas salientes del sistema suelo-estructura, en el borde del dominio del suelo se sitúa una capa de PML como se observa en la Figura 5, con un ancho de 100 [m] hacia cada lado del suelo, y 100 [m] de profundidad desde el fondo del suelo. Esta capa se modela a través de elementos PML con 5 grados de libertad en cada nodo, del mismo material del suelo, y con parámetros  $R = 10^{-3}$ ,  $n = 2$  y  $n_p = 4$ , donde  $R$  es el coeficiente de reflexión,  $n$  es el grado polinomial y  $n_p$  es el número de nodos utilizados para la integración. Al igual que la estructura, tanto el suelo como la capa de PML poseen un espesor perpendicular al plano de 8 [m].

#### 4.4. Señal sísmica

Para todos los modelos y casos analizados se utiliza como excitación basal la señal sísmica de Northridge (USA, 1994) registrada en la estación *Rinaldi Receiving Sta*, y extraída de la base de datos *PEER Ground Motion Database* (Ancheta et al. 2014). Se selecciona este registro debido a que: (1) representa un caso real, (2) es un sismo ampliamente documentado, (3) ha sido utilizado en varios estudios y (4) genera una alta demanda en los aisladores.

Para ingresar la señal sísmica a través del DRM se establece una capa como se ilustra en la Figura 5. Esta capa se posiciona a 40 [m] del contorno de la estructura, tanto en superficie (medido desde el paramento externo del muro de contención), como en profundidad (medido desde el fondo de losa de fundación).



(a) Tiempo-historia de desplazamientos en condición *free-field*.

(b) Contenido de frecuencia de los desplazamientos medidos en condición *free-field*.

Figura 8: Comparación de señal producida con el DRM y registro extraído de la base de datos PEER Ground Motion. Donde  $u_h^g(t)$  es el registro de desplazamiento horizontal *free-field*,  $u_v^g(t)$  es el registro de desplazamiento vertical *free-field* y las etiquetas Seismo-VLAB representan las mediciones en superficie hechas en el software en condición *free-field*.

La señal sísmica se aplica como un registro de desplazamientos en la capa DRM, tanto en dirección horizontal como vertical, a través de ondas SV y P respectivamente, generadas con una dirección de  $90^\circ$ , como se representa en la Figura 5. Para lograr que en superficie se mida un campo de desplazamientos idéntico al aplicado, se escalan ambos registros por un factor de 0.5. Como se puede observar en las Figuras 8(a) y 8(b), en condición *free-field*, el DRM reproduce con precisión tanto los desplazamientos como el contenido de frecuencia del terremoto de Northridge.

El registro original fue medido cada 0.01 [s], sin embargo, se remuestreo el registro a partir de su contenido de frecuencia utilizando una tasa de muestreo de 200 [Hz], y de esta forma se obtuvo la señal medida cada 0.005 [s], la que permite conseguir mejores resultados.

## 5. Resultados y discusión

Con el objetivo de facilitar la comprensión de los resultados, a continuación se presenta un esquema de los puntos de medición de las diferentes respuestas analizadas.

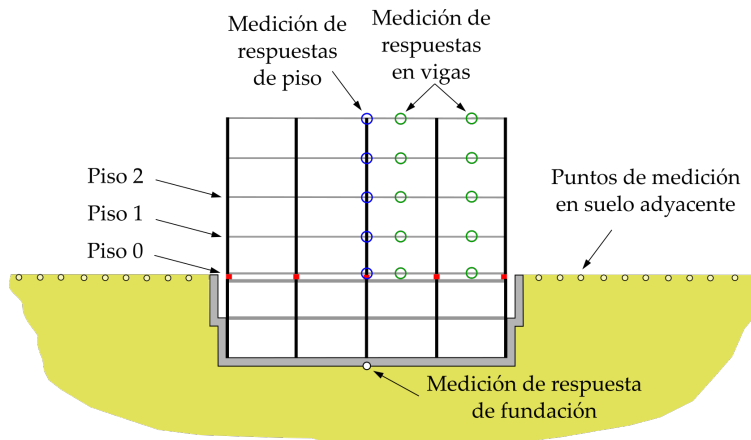


Figura 9: Ilustración de puntos de mediciones de los resultados analizados.

Las respuestas de piso presentadas a continuación corresponden a las mediciones realizadas en el nodo de unión viga-columna en el centro de cada piso como se ilustra en el Figura 9. Las mediciones realizadas en las columnas más externas también fueron analizadas, sin embargo, se notó que los resultados no difieren de manera significativa, por lo que resultados y conclusiones quedan bien representados por las mediciones realizadas en el centro de piso. Las respuestas de viga por piso en cambio corresponden a las respuestas máximas experimentadas, es decir, la envolvente de las respuestas en los centros de viga del piso respectivo. Dado que la cantidad de resultados que puede obtenerse de este análisis es muy amplia, se procede a discutir los resultados de las respuesta del lado derecho de cada modelo.

### 5.1. Drifts entre pisos

En las Figuras 10 y 11 se presentan los drifts de entrepiso máximos para ambas direcciones que se generan en cada caso y tipo de suelo para los pisos sobre el nivel de superficie. Además, en las Tablas 2 y 3 se muestran los valores máximos absolutos de drifts de cada caso para las diferentes condiciones de suelo.

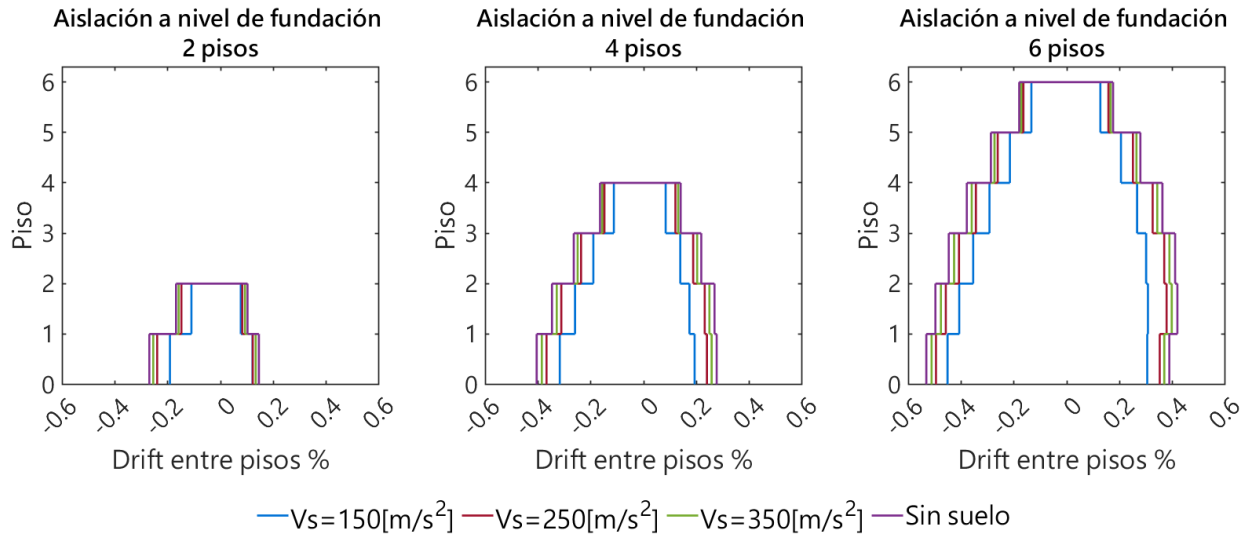


Figura 10: Drifts entre pisos de las estructuras con aislación a nivel de fundación.

Cantidad de pisos	$V_s = 150[m/s^2]$	$V_s = 250[m/s^2]$	$V_s = 350[m/s^2]$	Sin suelo
2	0.19 %	0.24 %	0.25 %	0.27 %
4	0.32 %	0.37 %	0.39 %	0.40 %
6	0.45 %	0.49 %	0.51 %	0.53 %

Tabla 2: Drifts máximos para los casos de aislación a nivel de fundación dependiendo del tipo de suelo. Valores expresados en porcentaje.

Las Figuras 10 y 11 muestran que los drifts de entrepiso aumentan levemente a medida que el suelo se rigidiza (aumenta su  $V_s$ ) independiente de la ubicación del sistema de aislación, sin embargo, esta tendencia no genera cambios significativos en las respuestas como se puede apreciar en las Tablas 2 y 3.

Al comparar los gráficos de la Figura 10 con los de la Figura 11, se aprecia que los drifts en los modelos con interacción suelo-estructura, son un poco mayores para los casos que poseen aislación en fundación versus los que poseen el sistema de aislación a nivel de superficie. De acuerdo con los valores informados en las Tablas 2 y 3, para los modelos con interacción suelo-estructura, el drift máximo global de estructuras con aislación en fundación aumenta desde un 20 % a un 48 % respecto al obtenido con estructuras aisladas a nivel de superficie.

Los resultados obtenidos con modelos sin interacción suelo-estructura aunque son ligeramente más conservadores que los resultados de alta fidelidad, entregan una buena y representativa respuesta tanto en magnitud como en distribución en la altura.

Las limitadas diferencias que se producen entre los tipos de suelo, permiten suponer que la interacción suelo-estructura que se genera en estos sistemas es baja y poco influyente para estimar el drift. No obstante lo anterior, los resultados igualmente comprueban que parte de la energía de la señal es irradiada al suelo, ya que al no considerarse éste, la energía se mantiene en la estructura aumentando la respuesta para el caso sin suelo.

Finalmente, al analizar las diferencias que se producen entre los sistemas de aislación, se observa que cuando existe la misma cantidad de pisos entre el nivel medido y el nivel de aislación, los drifts

son casi iguales, por lo que se deduce que las diferencias percibidas entre los dos sistemas de aislación son meramente producto de la diferencia de esbelteces entre las superestructuras, y dado que los casos con aislación superior siempre tendrán menores esbelteces al no incorporar los subterráneos en la superestructura, estos obtienen drifts más bajos.

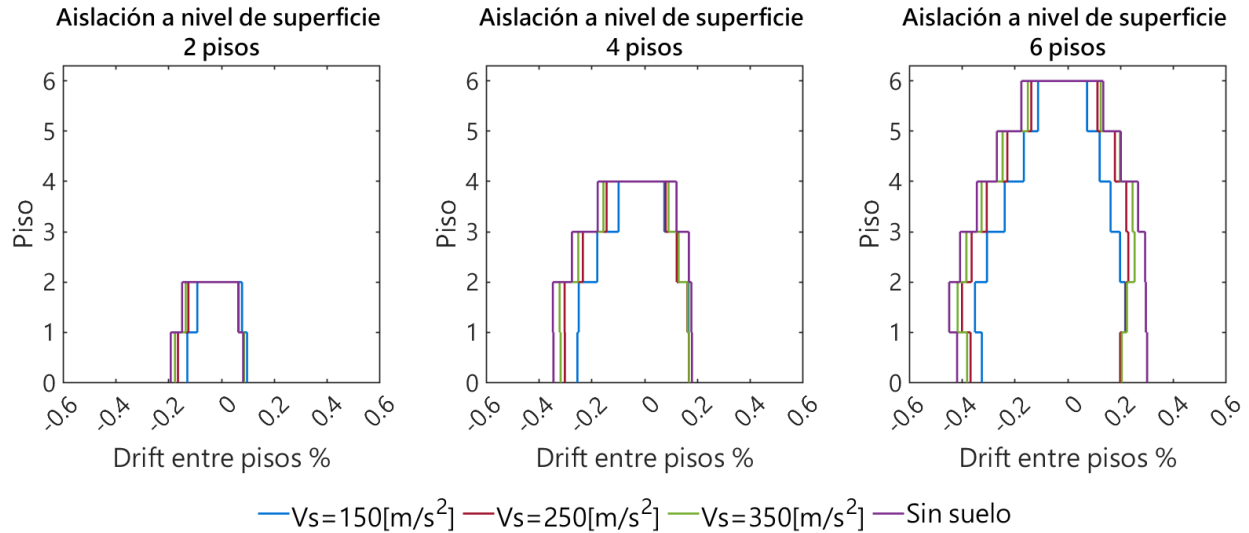


Figura 11: Drifts entre pisos de las estructuras con aislación a nivel de superficie.

Cantidad de pisos	$V_s = 150[m/s^2]$	$V_s = 250[m/s^2]$	$V_s = 350[m/s^2]$	Sin suelo
2	0.13 %	0.16 %	0.18 %	0.19 %
4	0.25 %	0.30 %	0.32 %	0.35 %
6	0.35 %	0.40 %	0.42 %	0.45 %

Tabla 3: Drifts máximos para los casos de aislación a nivel de superficie dependiendo del tipo de suelo.

Por último, cabe mencionar que todos los valores de drift de entrepiso fueron menores a 1%, que es un límite razonable después del cual se puede comenzar a observar comportamiento no lineal en los elementos estructurales. Esto sugiere un buen desempeño estructural, junto con validar la suposición de una superestructura modelada de forma lineal-elástica.

## 5.2. Aceleraciones horizontales máximas de piso

Las Figuras 12 y 13 muestran las aceleraciones horizontales máximas de cada piso por caso y tipo de suelo. Además, en las Tablas 4 y 5 se muestran los valores absolutos de la máxima aceleración horizontal de piso en cada caso para las diferentes condiciones de suelo.

Las aceleraciones presentadas en las Figuras 12 y 13 indican que esta respuesta, para ambos sistemas de aislación, no se modifica sustancialmente cuando se cambia la calidad del suelo.

Si se comparan los resultados de los dos sistemas de aislación, se nota que esencialmente ambos sistemas de aislación presentan la misma efectividad para reducir las aceleraciones de la superestructura. Asimismo, se nota que la efectividad de la aislación, en ambas configuraciones, es poco sensible a la esbeltez en el rango de estudio.

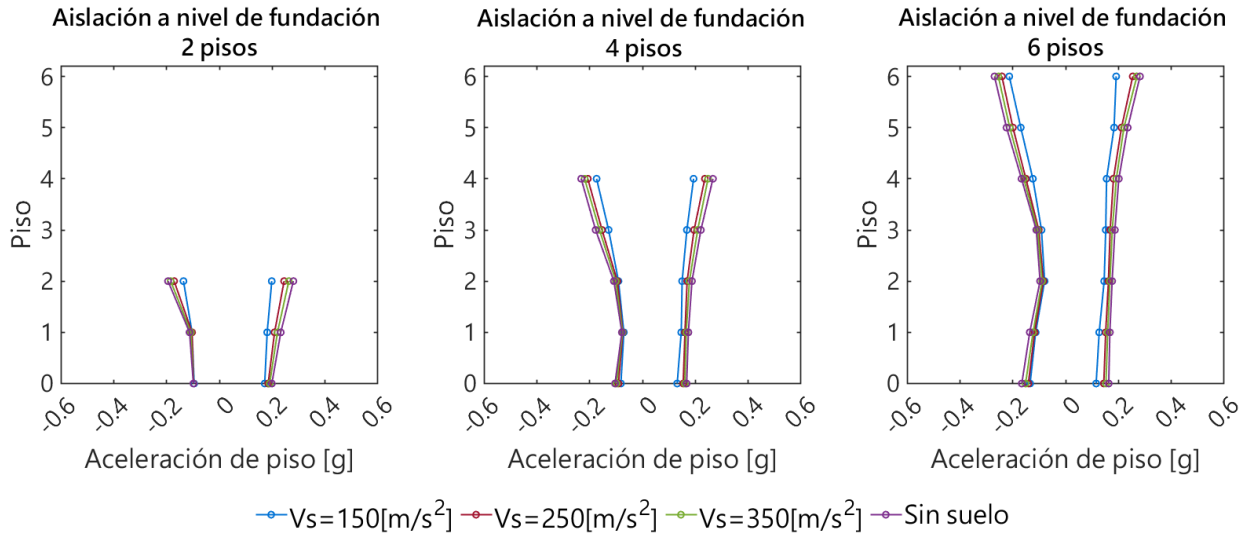


Figura 12: Aceleraciones horizontales máximas de piso de las estructuras con aislación a nivel de fundación.

Cantidad de pisos	$V_s = 150[m/s^2]$	$V_s = 250[m/s^2]$	$V_s = 350[m/s^2]$	Sin suelo
2	0.1983 g	0.2449 g	0.2628 g	0.2800 g
4	0.1933 g	0.2360 g	0.2480 g	0.2666 g
6	0.2131 g	0.2541 g	0.2697 g	0.2815 g

Tabla 4: Aceleración horizontal máxima de piso para los casos de aislación a nivel de fundación dependiendo del tipo de suelo.

Respecto a los resultados obtenidos sin considerar la interacción suelo-estructura, se percibe que para los casos con aislación basal, estos nuevamente son muy similares a la respuesta de alta fidelidad pese a que son más conservadores, siendo de 4% a 14% mayores para los casos con  $V_s$  de 250  $[m/s^2]$  y 350  $[m/s^2]$ , respectivamente, que son las condiciones más realistas. Para el caso teórico de 150  $[m/s^2]$  existe hasta un 40% de amplificación. En cambio, para los modelos con aislación en superficie, la estimación de las aceleraciones resulta mucho más conservadora, llegando a presentar sobrestimaciones de 50% a 126% para las estructuras más esbeltas, con suelos de  $V_s$  igual a 250  $[m/s^2]$  y 350  $[m/s^2]$ . Esta diferencia es relevante ya que son precisamente estos valores los que a veces se utilizan para realizar el diseño sísmico de elementos no-estructurales sensibles a aceleraciones. Es decir, al no considerar los efectos de SSI, se podría estar sobrestimando las fuerzas de diseño de elementos no-estructurales en más del doble.

La diferencia que presentan los modelos sin interacción para reproducir las respuestas de cada sistema de aislación se explica principalmente al notar la flexibilidad que están incorporando los niveles de subterráneo en los casos de aislación superior, ya que estos al no encontrarse aislados y tampoco poseer la restricción que les genera el suelo y fundación adyacente, incrementan la flexibilidad antes del nivel de aislación. Lo anterior, genera aceleraciones extras en la base que se adicionan a las originadas propiamente en la superestructura, produciendo la sobrestimación observada. Cuando se incorpora el suelo, este junto con la fundación, aumentan significativamente la rigidez del suelo, por lo que el subterráneo no genera amplificación dinámica significativa del registro. En los modelos

de aislación en fundación sin suelo, el fenómeno descrito no se produce producto de que los pisos subterráneos igualmente se aíslan, permitiendo obtener buenas estimaciones de las respuestas.

Como último punto, resulta relevante reiterar que los resultados, en particular los de modelos con aislación en fundación, indican que parte de la energía del sismo es transferida hacia el suelo, ya que en suelos más rígidos, donde la radiación es menor, la respuesta obtenida efectivamente es mayor respecto a un suelo más blando, mostrando que la energía irradiada disminuye y aumenta la energía entrante a la estructura. La falta de radiación en los modelos que no incorporan suelo explica, al igual que los resultados de drift, el pequeño aumento que presentan las aceleraciones medidas sin suelo respecto a las medidas con suelo.

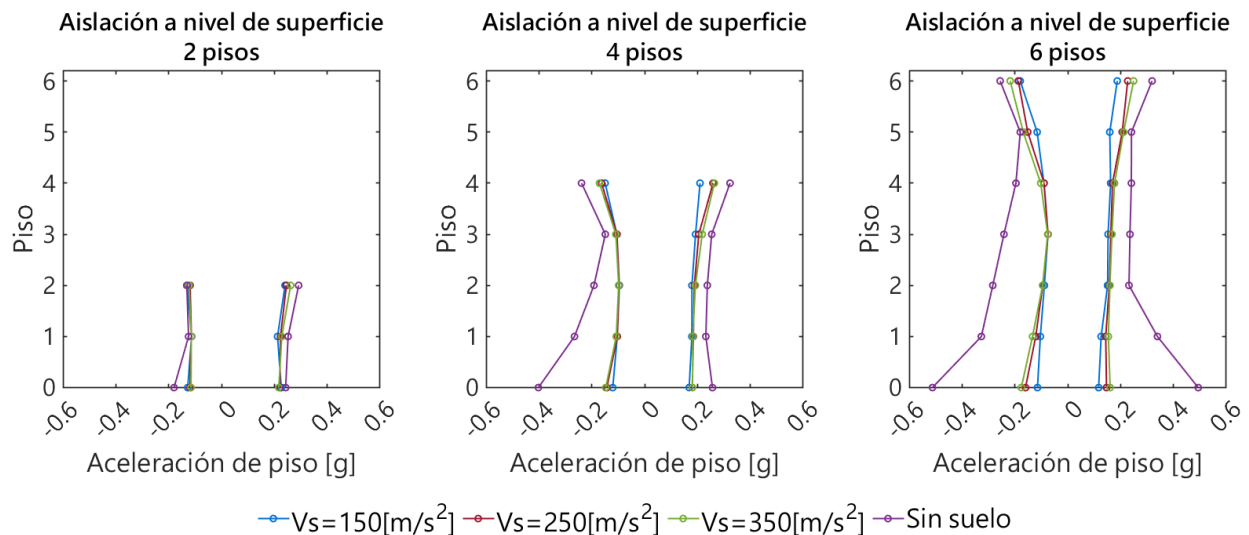


Figura 13: Aceleraciones horizontales máximas de piso de las estructuras con aislación a nivel de superficie.

Cantidad de pisos	$V_s = 150[m/s^2]$	$V_s = 250[m/s^2]$	$V_s = 350[m/s^2]$	Sin suelo
2	0.2404 g	0.2457 g	0.2615 g	0.2918 g
4	0.2096 g	0.2587 g	0.2640 g	0.4020 g
6	0.1872 g	0.2268 g	0.2491 g	0.5121 g

Tabla 5: Aceleración horizontal máxima de piso para los casos de aislación a nivel de superficie dependiendo del tipo de suelo.

### 5.3. Aceleraciones verticales máximas de piso

Las Figuras 12 y 13 muestran las aceleraciones verticales máximas que experimentan cada piso por caso y tipo de suelo. Los valores presentados aquí no incorporan la aceleración de gravedad. Además, en las Tablas 6 y 7 se muestran los valores absolutos de la máxima aceleración vertical de piso experimentada en la estructura en cada caso para las diferentes condiciones de suelo.

Los resultados de la Figura 14 muestran que para las estructuras con aislación en fundación, las aceleraciones verticales son aproximadamente un 10% más bajas en los dos suelos más rígidos en comparación al suelo más blando considerado, pero no presentan diferencias significativas en los

suelos más rígidos. Dado que el suelo con  $V_s=150[m/s^2]$  es solo incorporado para realizar análisis paramétrico y no representa una condición real, se infiere que este hecho origina la diferencia observada, por lo que se concluye que la aceleración vertical no se modifica sustancialmente con el tipo de suelo. Para las estructuras con aislación superficial, los resultados (Figura 15) no evidencian ninguna tendencia clara.

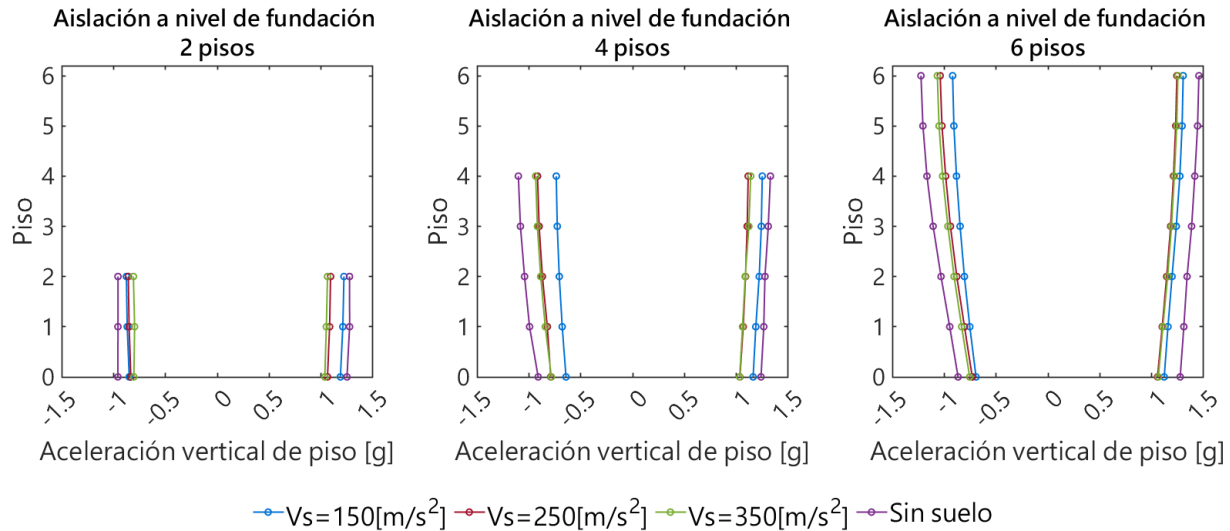


Figura 14: Aceleraciones verticales máximas de piso de las estructuras con aislación a nivel de fundación.

Cantidad de pisos	$V_s = 150[m/s^2]$	$V_s = 250[m/s^2]$	$V_s = 350[m/s^2]$	Sin suelo
2	1.2205 g	1.0918 g	1.0622 g	1.2751 g
4	1.2496 g	1.1138 g	1.1374 g	1.3279 g
6	1.3033 g	1.2426 g	1.2521 g	1.4549 g

Tabla 6: Aceleración vertical máxima de piso para los casos de aislación a nivel de fundación dependiendo del tipo de suelo.

Al confrontar los resultados obtenidos por cada sistema de aislación considerando la interacción suelo-estructura, se nota que en ambos se obtienen prácticamente los mismos resultados, pues las diferencias entre ellos se observan aleatorias y menores al 20 % en todos los casos.

Los resultados entregados por los modelos sin suelo resultan levemente más conservadores (5 %-20 % mayores) para las estructuras con aislación en fundación, pero reflejan adecuadamente la tendencia para los diferentes pisos que entregan los modelos de alta fidelidad. En cambio, para las estructuras con aislación en superficie, los valores de aceleraciones verticales máximas entregados por el modelo sin suelo son considerablemente mayores a los entregados por los modelos de alta fidelidad. Para las estructuras de mayor esbeltez (4 y 6 pisos), se genera una sobrestimación del 60 % al 70 %, mientras que para estructuras de 2 pisos se llegan a valores que exceden entre 130 % a 145 % la respuesta de alta fidelidad.

Al igual que en la sección anterior, la ausencia de radiación hacia el suelo en los modelos que no consideran la interacción suelo-estructura produce un aumento en las aceleraciones estimadas. Sin

embargo, en la dirección vertical, como se explica más adelante (Sección 5.8), cuando no se considera la interacción, se incrementa el contenido de alta frecuencia de la señal que entra a la estructura, produciendo una mayor excitación de los modos superiores de la estructura, que se caracterizan por influir y aumentar las aceleraciones de piso. Si bien esto también debería ocurrir para la dirección horizontal, el sistema de aislación se encarga de filtrar las frecuencias altas en dicha dirección. No así en la dirección vertical, en la cual los aisladores suelen tener una rigidez comparable a la rigidez axial de elementos estructurales convencionales.

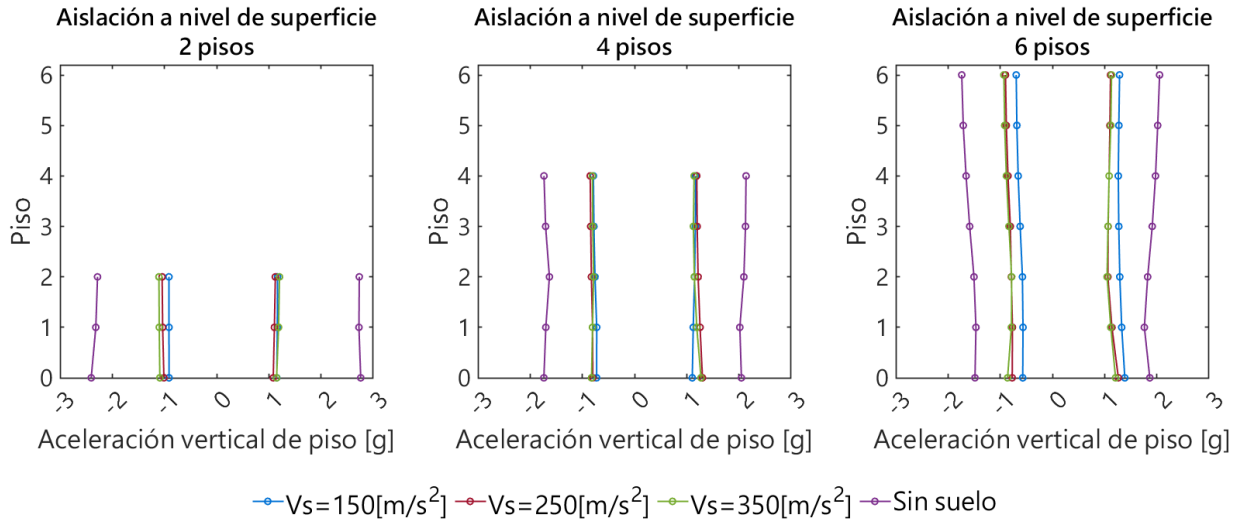


Figura 15: Aceleraciones verticales máximas de piso de las estructuras con aislación a nivel de superficie.

Cantidad de pisos	$V_s = 150[m/s^2]$	$V_s = 250[m/s^2]$	$V_s = 350[m/s^2]$	Sin suelo
2	1.1670 g	1.1246 g	1.2042 g	2.7599 g
4	1.1724 g	1.3015 g	1.2737 g	2.1364 g
6	1.3870 g	1.2629 g	1.2093 g	2.0525 g

Tabla 7: Aceleración vertical máxima de piso para los casos de aislación a nivel de superficie dependiendo del tipo de suelo.

Al observar las Figuras 14 y 15, se percibe que las aceleraciones se mantienen relativamente constantes en la altura para todos los casos analizados, lo cual permite deducir que en la dirección vertical la estructura se comporta como un cuerpo rígido.

Las Figuras 16 y 17 muestran la aceleración de los pisos 0 y 6 en el tiempo para las estructuras de 6 pisos, donde el piso 0 representa el piso a nivel de superficie. Como se puede observar en estas gráficas, las aceleraciones verticales experimentadas en cada piso muestran casi perfecta sincronía, aunque amplificada marginalmente. Con esto, se puede inferir que no solo los máximos valores de aceleraciones verticales son prácticamente los mismos en la altura del edificio, sino que también el contenido de frecuencia y la amplitud de las aceleraciones, corroborando el comportamiento de cuerpo rígido en la dirección vertical. Los casos presentados se seleccionaron de manera arbitraria, ya que todos exhiben el mismo tipo de respuesta.

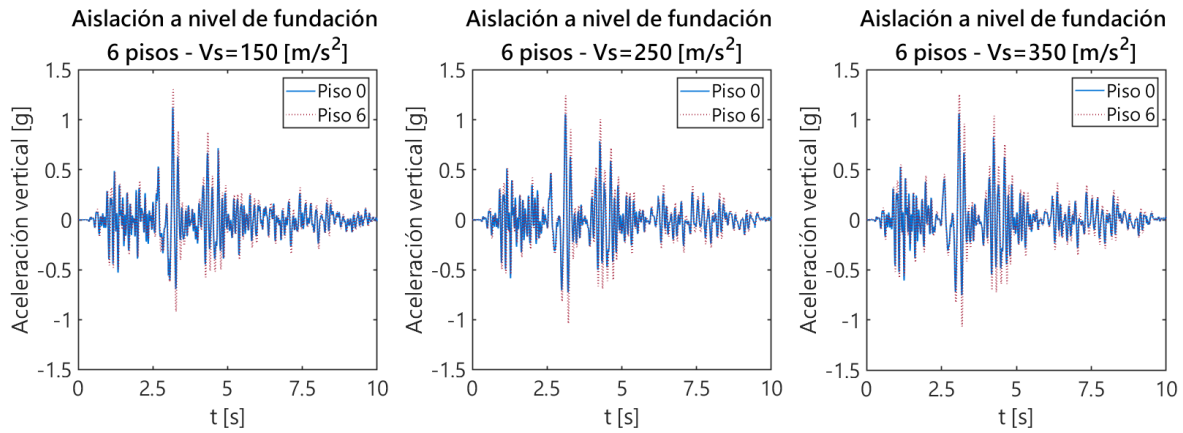


Figura 16: Comparación de aceleraciones de piso para la estructura de 6 pisos con aislación basal.

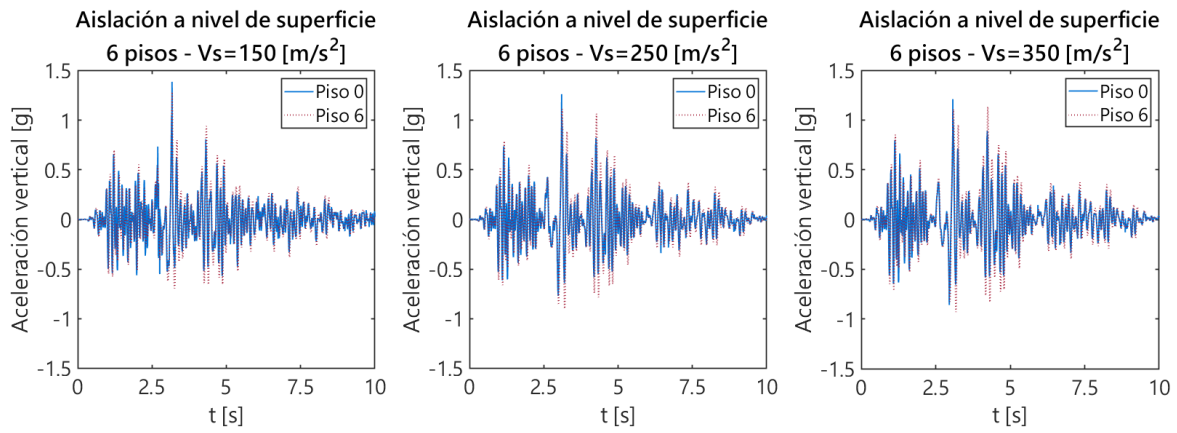


Figura 17: Comparación de aceleraciones de piso para la estructura de 6 pisos con aislación superficial.

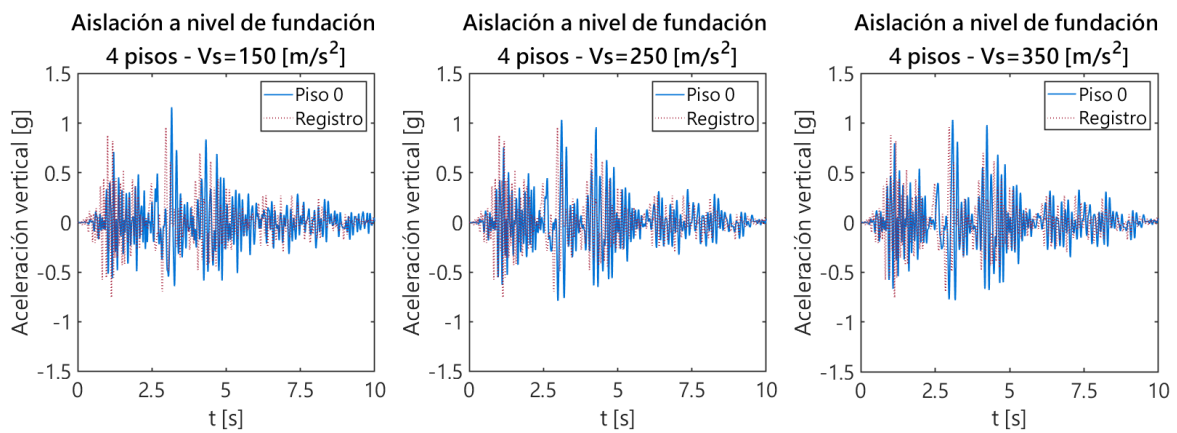


Figura 18: Comparación del registro de aceleración vertical con la aceleración de piso 0 para la estructura de 4 pisos con aislación basal.

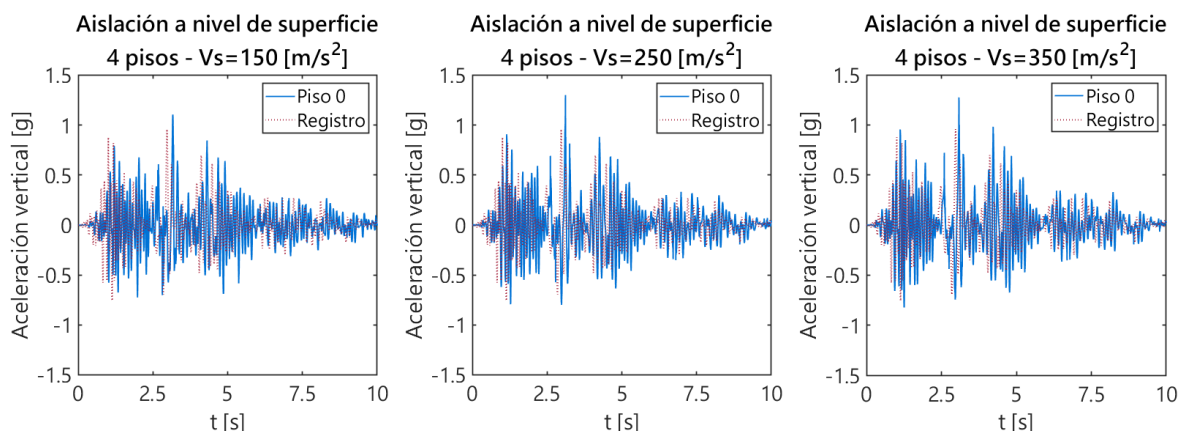


Figura 19: Comparación del registro de aceleración vertical con la aceleración de piso 0 para la estructura de 4 pisos con aislación superficial.

Finalmente, para evaluar el efecto de un sistema de aislación en la aceleración vertical, en las Figuras 18 y 19 se presentan para las estructuras con 4 pisos, la respuesta en tiempo historia del piso 0 en conjunto con el registro *free-field* de aceleraciones verticales correspondientes al terremoto Northridge. Como se puede ver en estas gráficas, si bien el contenido de frecuencias difiere un poco, la respuesta es muy similar al registro en términos de valores máximos, lo que lleva a concluir que en la dirección vertical no se produce el efecto de aislación, ratificando el comportamiento de cuerpo rígido. Al igual que en la comparación anterior, los casos presentados se seleccionaron de manera arbitraria, ya que todos muestran el mismo tipo de respuesta.

#### 5.4. Aceleraciones verticales máximas de viga

Si bien las aceleraciones verticales a nivel de unión viga-columna anteriormente mostrados nos entregan información de cómo se amplifica el movimiento en cada piso, observar las aceleraciones verticales al medio de cada viga se obtienen valores más relevantes a la hora de evaluar las sollicitaciones de elementos no-estructurales sensibles a aceleraciones.

En función de lo anterior es que en las Figuras 20 y 21 se muestran las aceleraciones verticales máximas que experimentan las vigas de cada piso por caso y tipo de suelo. También, en las Tablas 8 y 9 se muestran los valores absolutos de la máxima aceleración vertical de viga experimentada en la estructura en cada caso para las diferentes condiciones de suelo.

Cuando se comparan los valores mostrados en las Tablas 4 y 5 con los resultados de la Sección 5.3, tal como se esperaba considerando la flexibilidad del piso, se observa que las aceleraciones verticales se amplifican en los centros de vigas respecto a lo obtenido a nivel de unión viga-columna. Esta amplificación es levemente mayor en las estructuras con aislación en superficie.

Al comparar las distintas estructuras y tipos de suelo, se nota que los niveles de aceleraciones observados son relativamente insensibles a la ubicación del nivel de aislación. Por ejemplo, para todas las estructuras y tipos de suelo, los valores máximos en el piso 0 están en el orden de  $\pm 1[g]$ . Sin embargo, al evaluar los resultados obtenidos con los modelos sin suelo se observa que para casos con sistemas de aislación en fundación, nuevamente estos entregan una conservadora pero razonable aproximación, con porcentajes de amplificación de entre 10% y 25%. Al contrario, cuando se evalúan estos resultados para modelos sin suelo con sistemas de aislación en superficie, se observa que al igual que para las aceleraciones verticales a nivel de unión viga-columna, la omisión del suelo genera

respuesta muy sobrestimadas, con porcentajes de error de hasta 130 %, es decir, estimaciones que son más del doble de la respuesta de alta fidelidad.

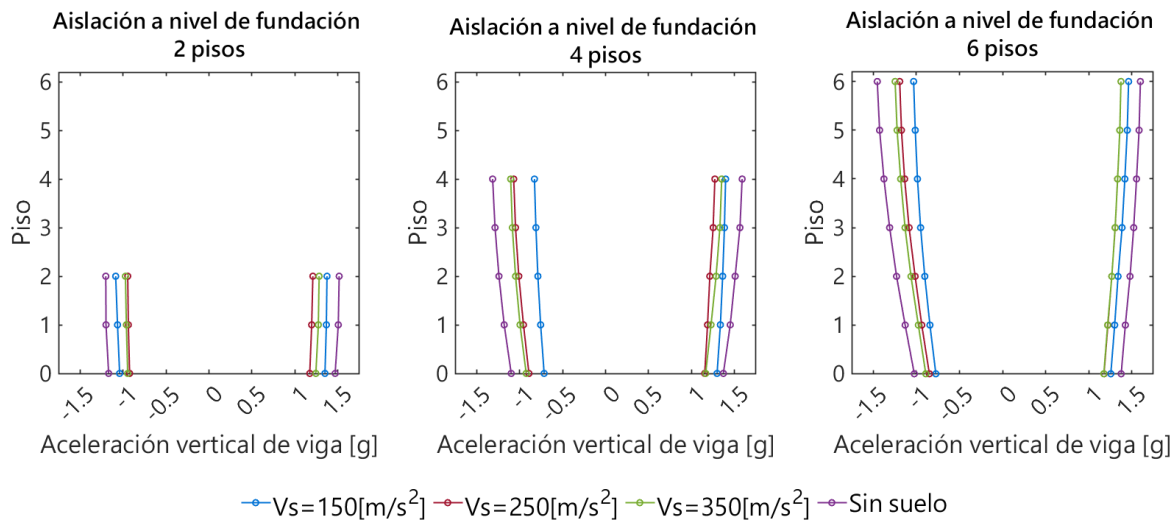


Figura 20: Aceleraciones verticales máximas de viga de las estructuras con aislación a nivel de fundación.

Cantidad de pisos	$V_s = 150[m/s^2]$	$V_s = 250[m/s^2]$	$V_s = 350[m/s^2]$	Sin suelo
2	1.3728 g	1.2084 g	1.2811 g	1.5141 g
4	1.3960 g	1.2713 g	1.3505 g	1.5883 g
6	1.4625 g	1.3738 g	1.3741 g	1.5995 g

Tabla 8: Aceleración vertical máxima de viga para los casos de aislación a nivel de fundación dependiendo del tipo de suelo.

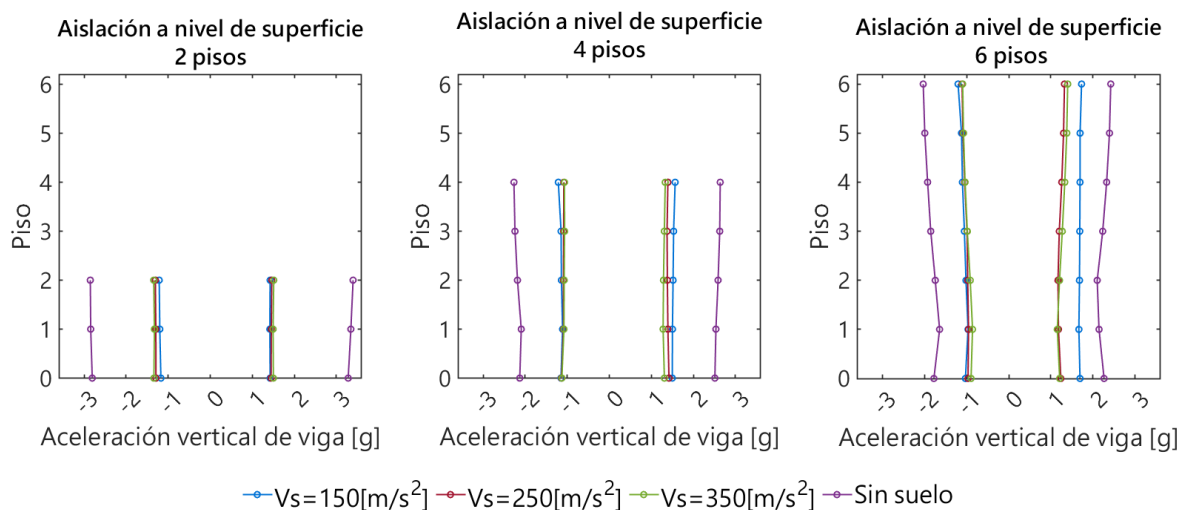


Figura 21: Aceleraciones verticales máximas de viga de las estructuras con aislación a nivel de superficie.

Cantidad de pisos	$V_s = 150[m/s^2]$	$V_s = 250[m/s^2]$	$V_s = 350[m/s^2]$	Sin suelo
2	1.4247 g	1.4638 g	1.5101 g	3.3969 g
4	1.5657 g	1.4193 g	1.3305 g	2.6371 g
6	1.7277 g	1.3224 g	1.3991 g	2.4202 g

Tabla 9: Aceleración vertical máxima de viga para los casos de aislación a nivel de superficie dependiendo del tipo de suelo.

Respecto a la magnitud de los valores obtenidos, en la mayoría de los casos en los que se considera el suelo, se obtienen valores de hasta  $\pm 1.5[g]$ , lo que se traduce que los elementos no-estructurales estarán sometidos a fuerzas equivalentes entre 0.5 y 2.5 veces su peso, lo que impacta en el diseño sísmico de estos componentes. Sin embargo, si es que el modelo no incorpora los efectos de SSI, los valores de aceleraciones máximas obtenidas pueden llegar a ser del orden de  $\pm 3.0[g]$ , lo que se traduce en fuerzas máximas del orden de 4 veces su peso.

Por último, de acuerdo con las Figuras 20 y 21 las aceleraciones verticales de viga presentan un comportamiento y distribución en la altura casi idéntica al de las aceleraciones de piso, ratificando que en la dirección vertical las estructuras responden como cuerpos rígidos.

### 5.5. Esfuerzo axial en aisladores

Las presiones que se presentan a continuación, por simplicidad, fueron calculadas asumiendo que la presión se distribuye uniformemente sobre el área completa del aislador, considerando área completa como la obtenida con el diámetro externo del dispositivo. Las fuerzas axiales debidas a las cargas gravitacionales se encuentran incorporadas en los valores mostrados a continuación.

Las Figuras 22 y 23 exponen las tensiones y compresiones máximas experimentadas por los aisladores de las estructuras con aislación a nivel de fundación, mientras que las Figuras 22 y 25 muestran las presiones máximas experimentadas en los aisladores del sistema de aislación a nivel de superficie.

Las Figuras 22 y 23 muestran que en sistemas de aislación a nivel de fundación, al no considerar la interacción suelo-estructura, los esfuerzos axiales máximos que se obtienen, tanto en tracción como en compresión, son desmesuradamente conservadores. Respecto a la distribución de fuerzas entre los aisladores, se nota que los dispositivos del borde experimentan mayores compresiones y tracciones, indicando que existe una amplificación en los elementos perimetrales debido a efectos de balanceo de la estructura respecto a su base en las estructuras que poseen la aislación a nivel de fundación.

Igualmente, las Figuras 24 y 25 constatan que para sistemas de aislación en superficie la omisión de la interacción suelo-estructura también genera fuerzas axiales sustancialmente mayores, aunque la diferencia es menor a los casos con aislación a nivel de fundación.

Resulta importante recordar el hecho que las tensiones obtenidas fueron estimadas considerando un comportamiento lineal elástico en la dirección vertical, por lo que en la realidad las tensiones informadas no se alcanzarían, ya que el aislador posee un comportamiento no lineal y una resistencia por debajo de las fuerzas presentadas. Si bien la modelación utilizada no permite generar conclusiones determinantes, sí se puede destacar la gran sobrestimación que genera la omisión de los efectos de SSI en la estimación de las fuerzas máximas en los aisladores, lo que podría conducir a concluir erróneamente que un aislador falla por compresión y/o tensión, cuando verdaderamente la fuerza resistida en el dispositivo es mucho menor.

Por otra parte, cabe mencionar que según el fabricante, la tensión máxima permitida es de 1  $[MPa]$ , mientras que en compresión, con distorsiones angulares de 300%, la compresión máxima es de 27  $[MPa]$ . Si se estudian en detalle los resultados de alta fidelidad, se ve que para gran parte de los

casos las presiones máximas que resisten los aisladores se encuentran dentro de rangos razonables o bien justo en el límite. Al no considerar el suelo, las fuerzas axiales permitidas se sobrepasan ampliamente en todos los casos producto de la excesiva sobrestimación ya mencionada.

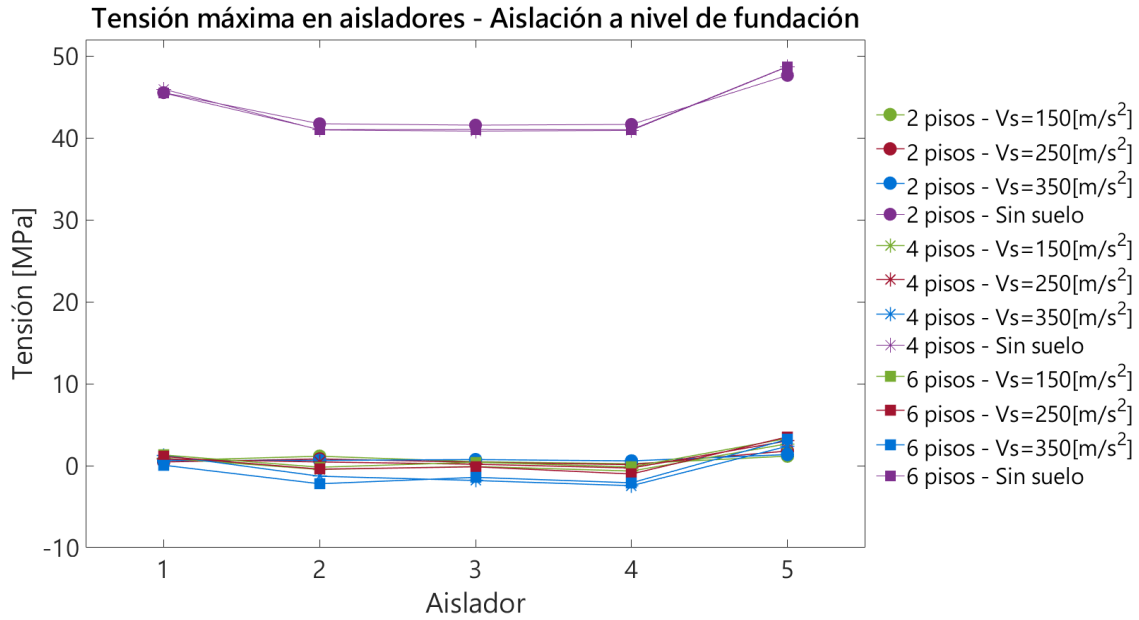


Figura 22: Tensión máxima experimentada en los aisladores de las estructuras con aislación a nivel de fundación. Los aisladores fueron enumerados de izquierda a derecha.

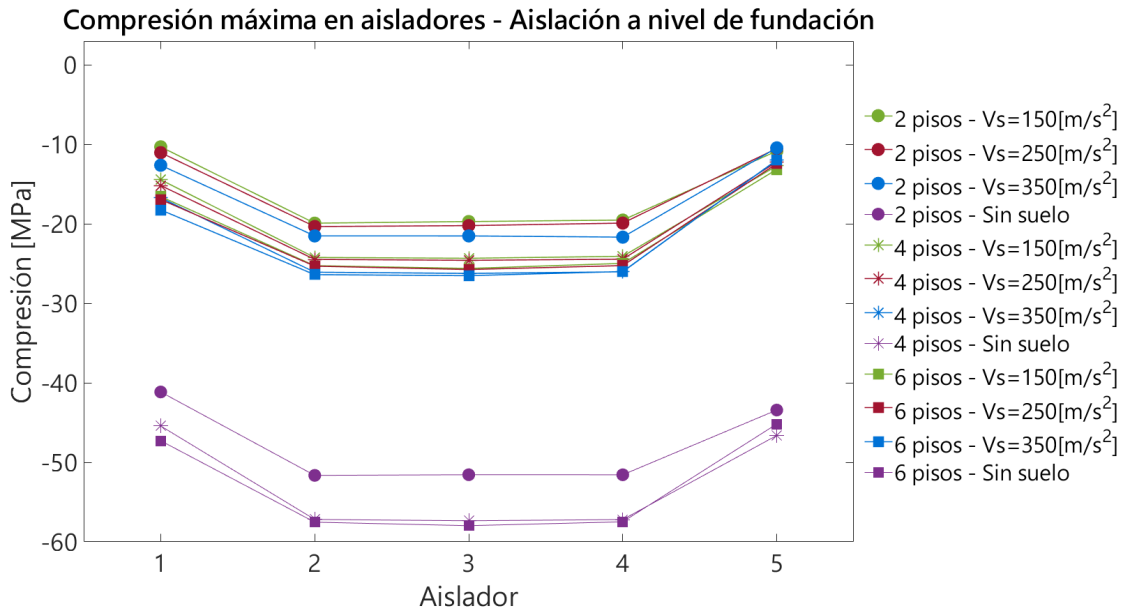


Figura 23: Compresión máxima experimentada en los aisladores de las estructuras con aislación a nivel de fundación. Los aisladores fueron enumerados de izquierda a derecha.

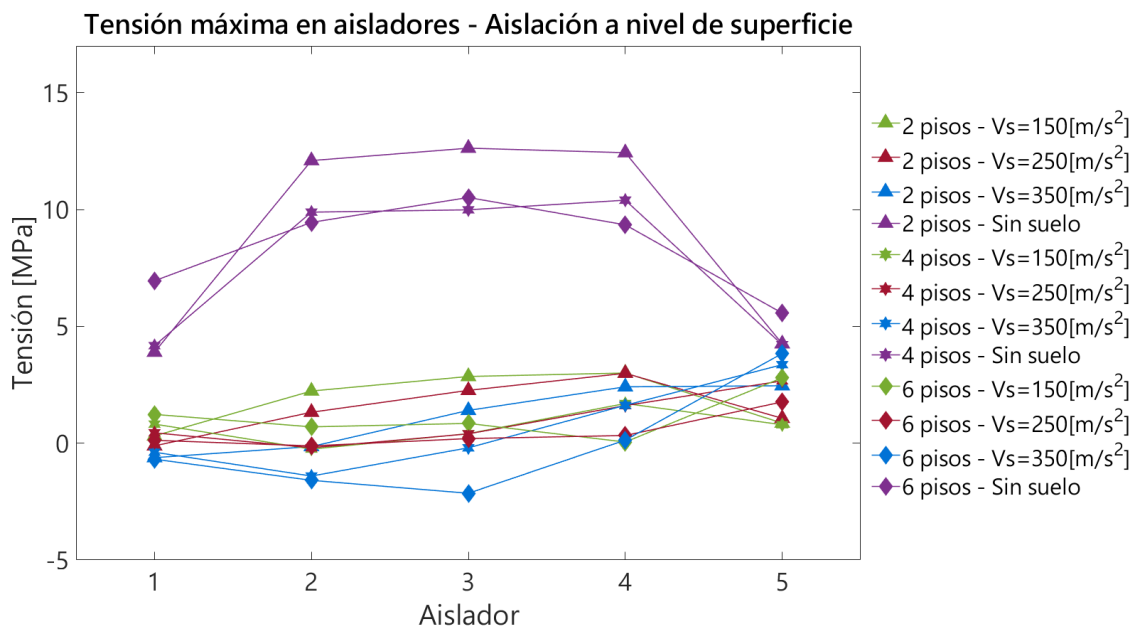


Figura 24: Tensión máxima experimentada en los aisladores de las estructuras con aislación a nivel de superficie. Los aisladores fueron enumerados de izquierda a derecha.

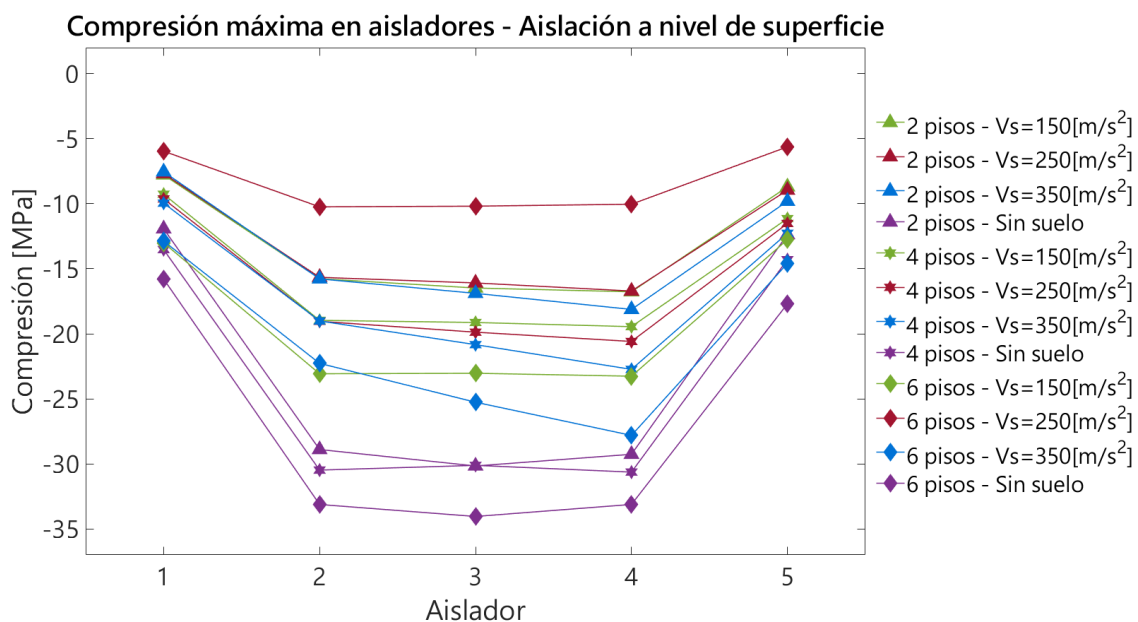


Figura 25: Compresión máxima experimentada en los aisladores de las estructuras con aislación a nivel de superficie. Los aisladores fueron enumerados de izquierda a derecha.

Finalmente, se observa que a diferencia de lo sistemas de aislación basal, en sistemas de aislación en superficie los aisladores con mayor tracción y compresión máxima, para casi todos los casos, son los aisladores del centro. Si bien el alcance del presente estudio no permite explicar con certeza el origen de esta cambio en la distribución de fuerzas axiales, los resultados permiten conjeturar que

el subterráneo también rota en la misma dirección de la superestructura, elevando el nodo inferior del aislador y disminuyendo de esta forma su deformación. Esto último no se produce en la aislación basal ya que el aislador se fija a la fundación, que tal como se presenta en la Tabla 10 experimenta rotaciones despreciables, explicando por qué existe una distribución diferente en cada sistemas de aislación.

### 5.6. Deformación de corte

La Figura 26 presenta en porcentaje la deformación de corte máxima ( $\tau_{m\acute{a}x}$ ) alcanzada por los aisladores en cada caso analizado.

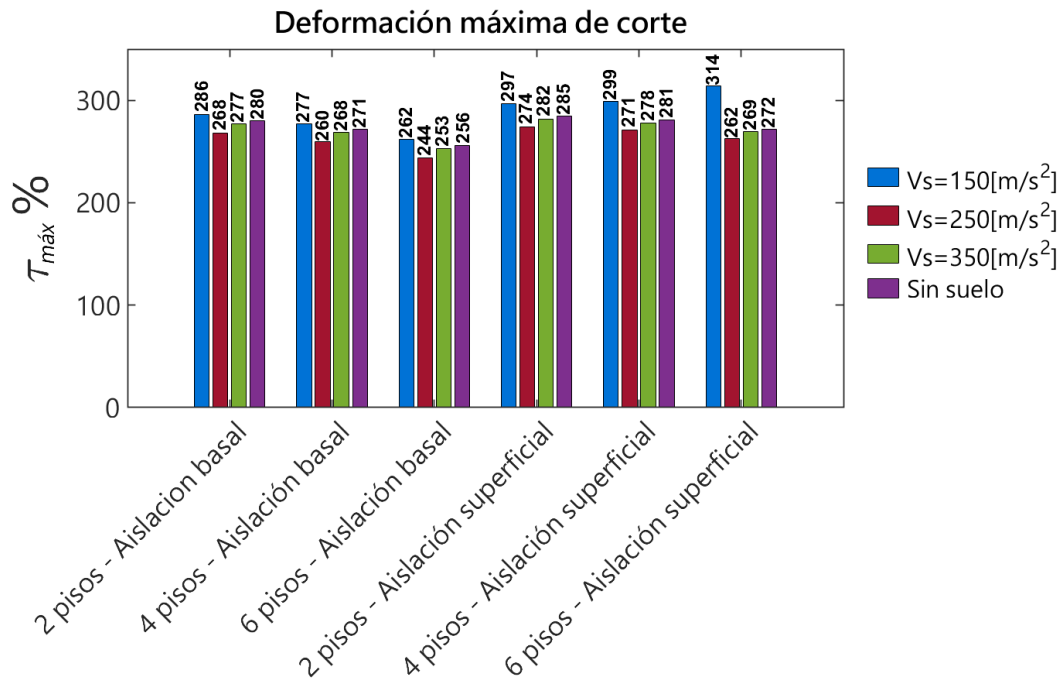


Figura 26: Deformación de corte en aisladores para cada tipo de estructura analizada.

En la Figura 26 se observa que la deformación por corte no se modifica significativamente por la esbeltez, el suelo o el sistema de aislación. Más aún, se nota que la omisión de la interacción suelo-estructura no genera importantes cambios en las deformaciones máximas alcanzadas en los aisladores.

Por último, dados los porcentajes de  $\tau_{m\acute{a}x}$  obtenidos, se desprende que para analizar correctamente la estabilidad de los sistemas de aislación contemplados en este estudio, se deberán incorporar los efectos que se van produciendo a estos niveles tan altos de deformación, como los efectos  $P - \Delta$ . Sin embargo, esto se encuentra fuera del alcance de este trabajo.

### 5.7. Desplazamientos máximos de la fundación

A continuación, en las Tablas 10, 12 y 13 se exponen las rotaciones y desplazamientos máximos de la fundación en cada modelo analizado con interacción suelo-estructura.

Adicionalmente, para poder evaluar las rotaciones, se estimaron las rotaciones en las mismas estructuras estudiadas pero sin nivel de aislación. Para realizar esta estimación se utilizaron los mismos

modelos de aislación en fundación, pero considerando que los aisladores tienen las mismas propiedades mecánicas que las columnas. Las rotaciones obtenidas con estos modelos extra, se presentan en la Tabla 11.

Cantidad de pisos	$V_s = 150[m/s^2]$		$V_s = 250[m/s^2]$		$V_s = 350[m/s^2]$	
	Aislación basal ( $\times 10^{-4}$ )	Aislación superficial ( $\times 10^{-4}$ )	Aislación basal ( $\times 10^{-4}$ )	Aislación superficial ( $\times 10^{-4}$ )	Aislación basal ( $\times 10^{-4}$ )	Aislación superficial ( $\times 10^{-4}$ )
2	2.796 rad	3.113 rad	0.858 rad	1.218 rad	0.422 rad	0.583 rad
4	2.812 rad	3.404 rad	0.876 rad	1.400 rad	0.498 rad	0.622 rad
6	2.857 rad	3.707 rad	0.985 rad	1.547 rad	0.566 rad	0.808 rad

Tabla 10: Rotación máxima de la fundación para cada estructura de interés.

Cantidad de pisos	$V_s = 150[m/s^2]$ ( $\times 10^{-4}$ )	$V_s = 250[m/s^2]$ ( $\times 10^{-4}$ )	$V_s = 350[m/s^2]$ ( $\times 10^{-4}$ )
2	4.340 rad	1.732 rad	0.962 rad
4	7.172 rad	2.895 rad	1.493 rad
6	8.165 rad	3.302 rad	1.743 rad

Tabla 11: Rotación máxima de la fundación en estructuras sin aislación.

Las pequeñas rotaciones informadas en la Tabla 10 muestran que el giro de la fundación es despreciable para todas las estructuras aisladas estudiadas en comparación con los drift de entrepiso obtenidos, por lo que estos no se ven afectados por la rotación de la fundación. Además, en las estructuras con aislación, la cantidad de pisos es irrelevante al comparar los diferentes niveles de rotación de la fundación. Sin embargo, en las estructuras sin aislación sísmica, la rotación de la fundación tiene una marcada relación con la cantidad de piso, es decir, con la esbeltez de la estructura. Lo anterior permite inferir que la incorporación de un sistema de aislación disminuye la interacción inercial en la dirección horizontal.

Cantidad de pisos	$V_s = 150[m/s^2]$		$V_s = 250[m/s^2]$		$V_s = 350[m/s^2]$	
	Aislación basal	Aislación superficial	Aislación basal	Aislación superficial	Aislación basal	Aislación superficial
2	0.3879 m	0.3893 m	0.4017 m	0.4031 m	0.4077 m	0.4086 m
4	0.3884 m	0.3894 m	0.4016 m	0.4029 m	0.4078 m	0.4086 m
6	0.3884 m	0.3898 m	0.4014 m	0.4029 m	0.4077 m	0.4086 m

Tabla 12: Desplazamiento horizontal máximo de la fundación para cada estructura de interés.

Para las siguientes observaciones se define el desplazamiento máximo del suelo ( $\mathcal{PGD}$  por sus siglas en inglés *Peak Ground Displacement*) como:

$$\mathcal{PGD}(\mathbf{x}) = \max_{t \in [0, T_s]} \|u(t)\|,$$

Donde  $\|\cdot\|$  es la función valor absoluto,  $u(t)$  es un registro escalar de desplazamiento, y  $T_s$  es la duración del registro.

El registro de desplazamientos aplicado a los diversos modelos, posee un  $\mathcal{PGD}$  igual a 0.4163 [m], por lo que al comparar este peak con los desplazamientos máximos alcanzados en la fundación, se nota que, si bien la fundación disminuye un poco los desplazamientos por su inercia, desde esta perspectiva, los resultados hacen pensar que la fundación prácticamente no está modificando los desplazamientos de la señal, y los está transmitiendo intactos a la estructura.

Cantidad de pisos	$V_s = 150[m/s^2]$		$V_s = 250[m/s^2]$		$V_s = 350[m/s^2]$	
	Aislación basal	Aislación superficial	Aislación basal	Aislación superficial	Aislación basal	Aislación superficial
2	0.03575 m	0.03586 m	0.03605 m	0.03616 m	0.03650 m	0.03659 m
4	0.03571 m	0.03587 m	0.03606 m	0.03618 m	0.03650 m	0.03659 m
6	0.03574 m	0.03590 m	0.03606 m	0.03616 m	0.03650 m	0.03659 m

Tabla 13: Desplazamiento vertical máximo de la fundación para cada estructura de interés.

Al repetir la comparación en la dirección vertical, con el  $\mathcal{PGD}$  vertical de 0.0372 [m], los resultados muestran la misma leve reducción, e indican nuevamente que el registro se transmite inalterado hacia la estructura en términos de desplazamientos.

## 5.8. Espectros de aceleraciones en la fundación

En las Figuras 27 y 28 se encuentran graficados los espectros de respuesta obtenidos a partir de la aceleración horizontal experimentada en la fundación de cada modelo analizado junto con el espectro de respuesta del registro de aceleración horizontal, mientras que en las Figuras 29 y 30 se muestran los espectros de respuesta correspondientes a la aceleración vertical de la fundación en conjunto con el espectro del registro de aceleración vertical utilizado.

En todos los gráficos obtenidos se observa que para períodos por sobre 1 [s] el espectro es esencialmente el mismo para la señal ingresada y la percibida en fundación para todos los tipos de suelo.

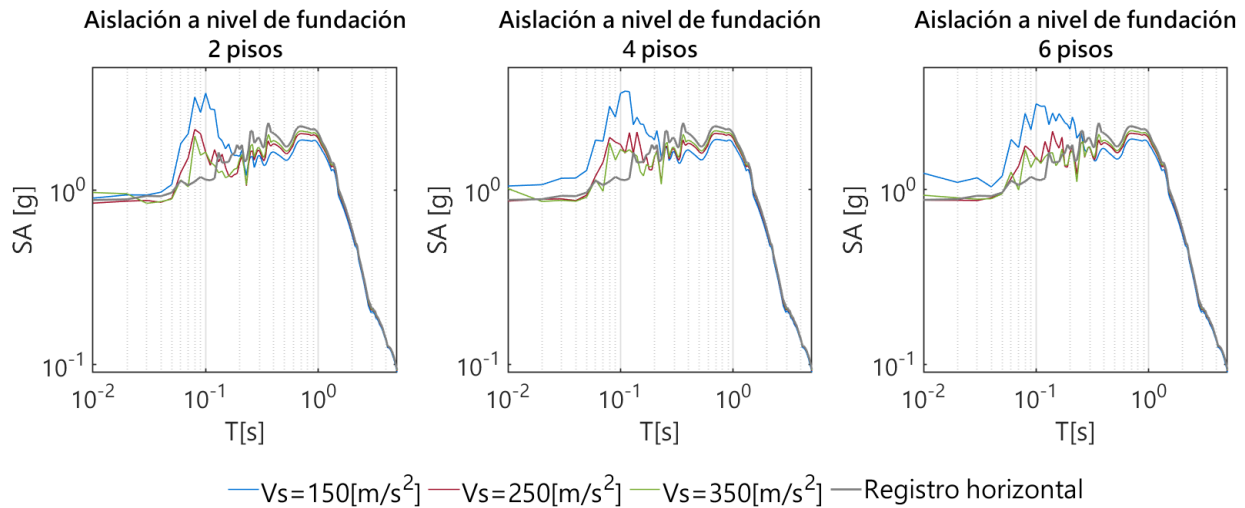


Figura 27: Espectro de respuesta de la aceleración horizontal experimentada por la fundación en los modelos con aislación en fundación.

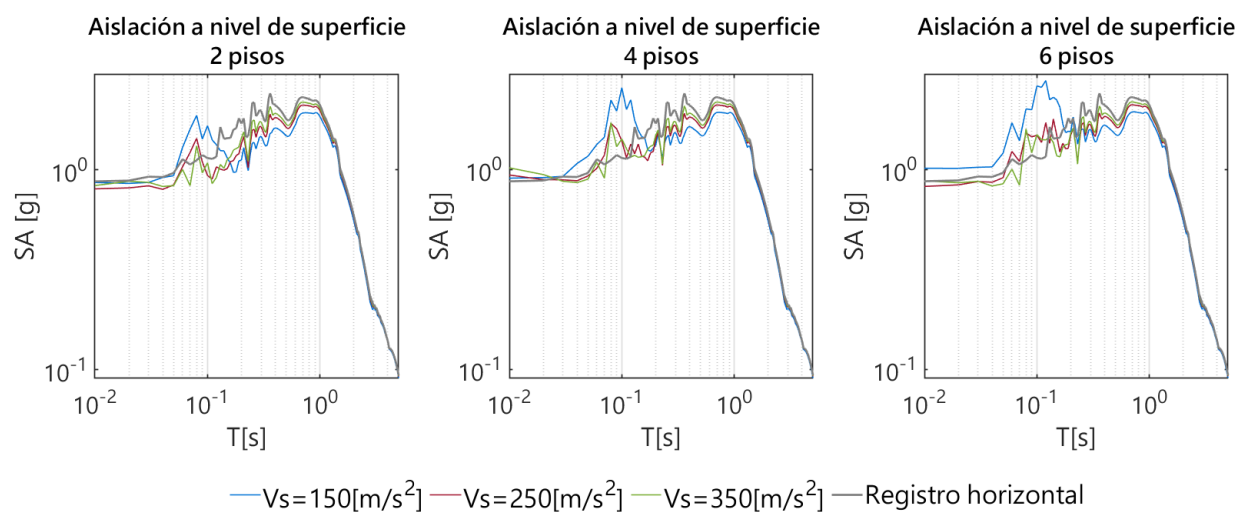


Figura 28: Espectro de respuesta de la aceleración horizontal experimentada por la fundación en los modelos con aislación en superficie.

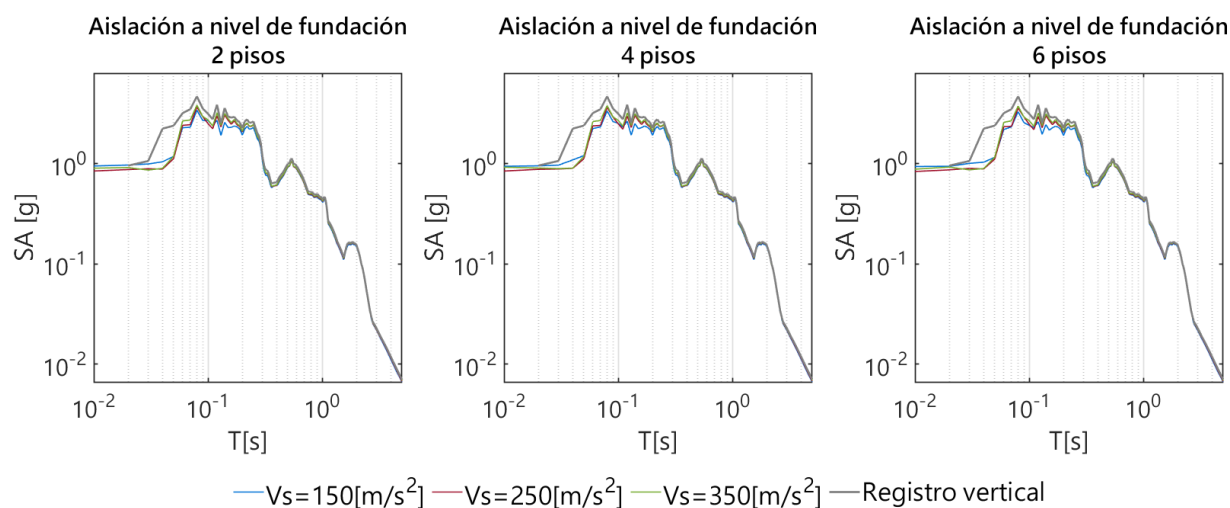


Figura 29: Espectro de respuesta de la aceleración vertical experimentada por la fundación en los modelos con aislación en fundación.

Sin embargo, al comparar los espectros de aceleraciones horizontales en el rango de períodos menores a 1 [s], se observa que existe una amplificación de la respuesta para períodos menores a 0.12 [s] aproximadamente, es decir, se aumenta el contenido de estas frecuencias (mayores a 50 [rad/s]), y una reducción en el rango de 0.12[s] a 1 [s], lo que significa que la fundación filtra este rango de frecuencias. Las diferencias señaladas reflejan los efectos de la interacción cinemática en la dirección horizontal para estructuras con sistemas de aislación, y comprueban que en estas, al igual que en estructuras tradicionales, dicha interacción posee mayor influencia en suelos blandos, pues en ellos las diferencias son mayores.

De forma similar ocurre en los espectros verticales para los periodos menores de 0.3 [s], donde se observa una reducción del espectro para los casos que integran la interacción suelo-estructura, advirtiendo que en la dirección vertical la fundación gracias a la interacción cinemática filtra parte de las frecuencias mayores a 20 [rad/s].

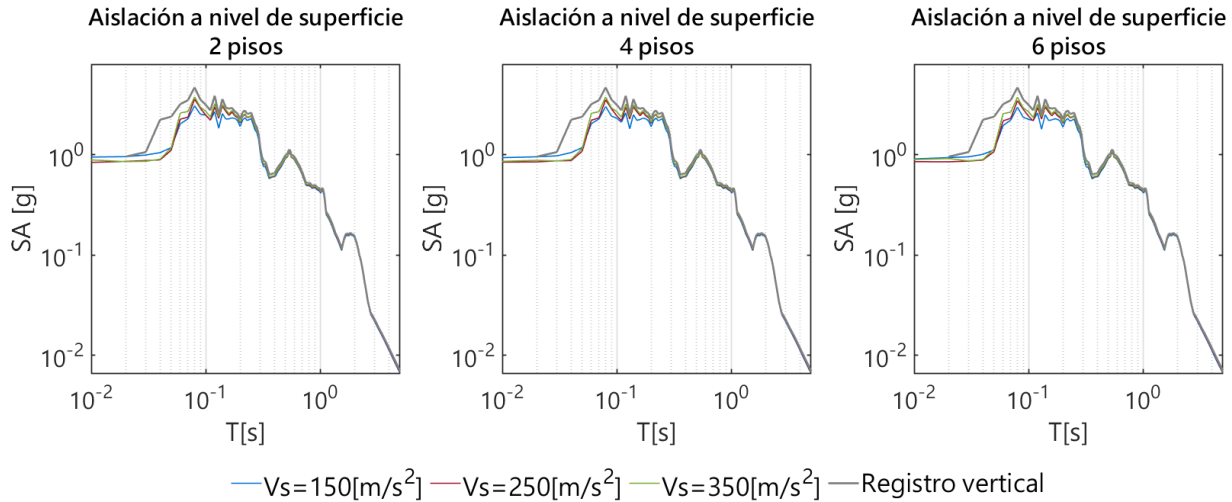


Figura 30: Espectro de respuesta de la aceleración vertical experimentada por la fundación en los modelos con aislación en superficie.

La combinación de esta última observación con los resultados de aceleraciones verticales lleva a inferir que este filtrado en dirección vertical es el origen de la diferencia observada entre los casos con suelo y los casos sin suelo. Al no considerar el suelo no se produce el filtrado de alta frecuencia, permitiendo que las ondas de alta frecuencia pasen a la superestructura, y exciten modos superiores, aumentando su contribución a la aceleración medida. Esto además explicaría por qué en los desplazamientos no se generan grandes diferencias entre modelos sin suelo y modelos con suelo, pues los modos superiores presenta una alta influencia en aceleraciones mas no en desplazamientos.

En la dirección horizontal, los efectos del filtrado (o la ausencia de este) no se observan con tanta intensidad por el nivel de aislación, pues este con o sin fundación genera igualmente un filtrado de las altas frecuencias, disminuyendo el paso de estas hacia la superestructura en todos los casos.

### 5.9. Espectros de aceleraciones horizontales de piso

Se presentan los espectros de respuesta de aceleraciones horizontales de piso de cada modelo en las Figuras 31 y 32 para todos los tipos de suelo. Para cada modelo se grafican todos los pisos en un mismo color en función del tipo de suelo que considera el modelo. Con el fin de comparar con mayor facilidad, se han graficado para todos los casos solo los espectros de los pisos sobre la superficie.

De igual manera, se grafican en las Figuras 33(a) y 33(b) los espectros de respuesta de aceleraciones horizontales de piso se grafican en conjunto con el espectro del registro de aceleraciones horizontales utilizado.

Al comparar los espectros de aceleraciones horizontales de piso, se observa que en los modelos donde no se considera la interacción suelo-estructura (modelos sin suelo) los espectros poseen peaks y valores más grandes, en particular en la zona de períodos cortos, que es la de mayor interés para el

resguardo de componentes no-estructurales. Estos resultados llevan a deducir nuevamente que en los casos donde no se considera el suelo, y por ende no se genera radiación de ondas hacia él, la energía permanece en la estructura amplificando las respuestas en ella.

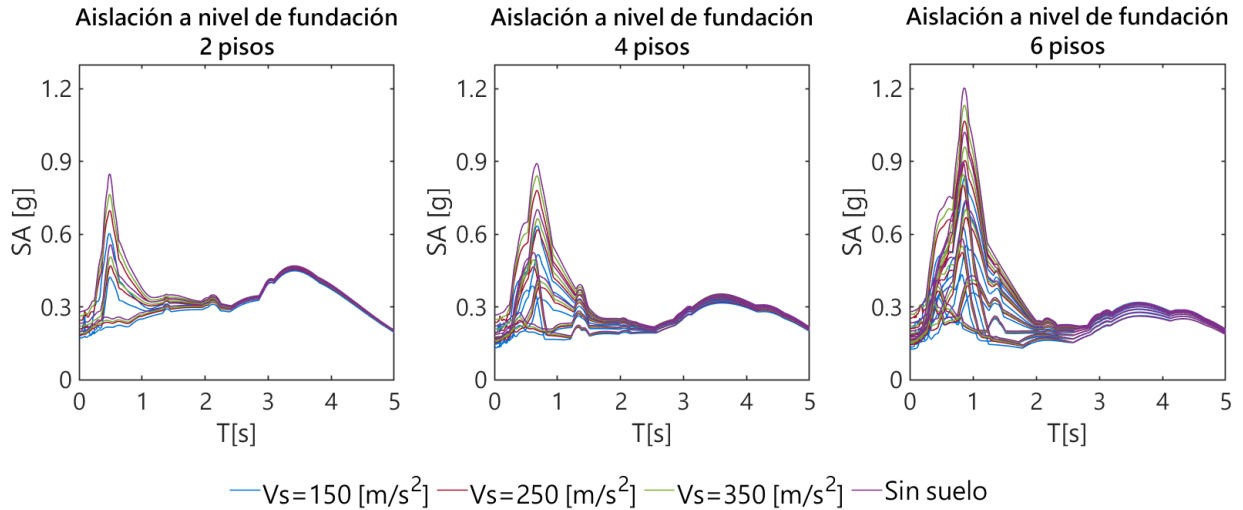


Figura 31: Espectros de respuesta de aceleraciones de piso de las estructuras con aislación a nivel de fundación para todas las condiciones de suelo.

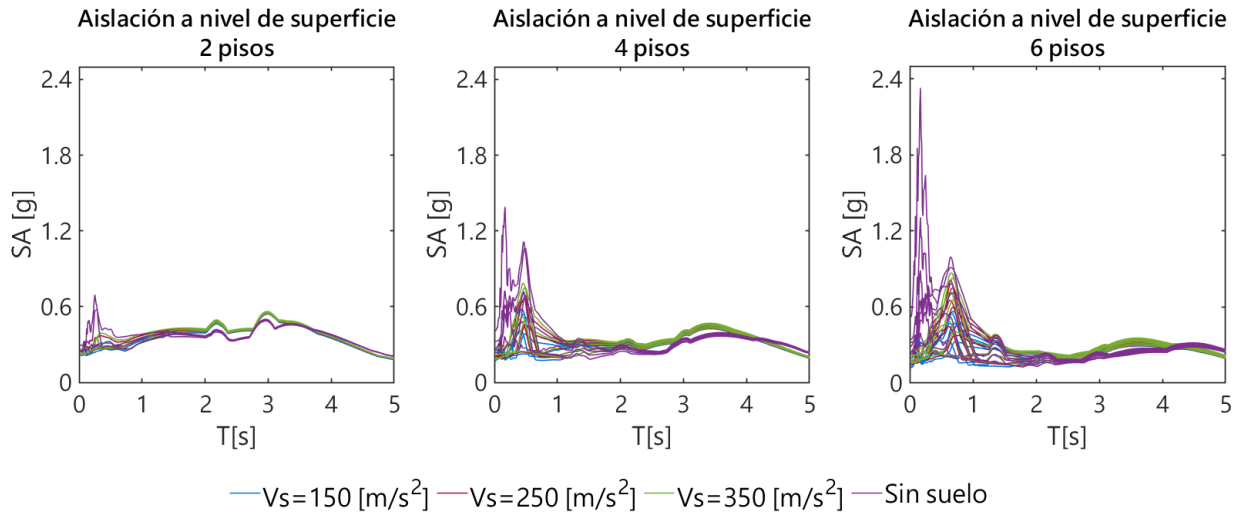


Figura 32: Espectros de respuesta de aceleraciones de piso de las estructuras con aislación a nivel de superficie para todas las condiciones de suelo.

Sin embargo, como se menciona en secciones anteriores, la radiación es baja en los casos estudiados debido a que la interacción cinemática es pequeña, por lo que el punto anterior explica perfectamente la baja diferencia observada en la Figura 31. Pero para poder explicar la amplificación observada en la Figura 32 se debe unir al efecto de la radiación de las vibraciones y aceleraciones

adicionales que se generan producto de que el subterráneo se vuelve flexible al no tener suelo contiguo ni estar aislado.

Por último, la Figura 33 permite verificar la efectividad de los sistemas de aislación, pues se observa que la magnitud de las aceleraciones percibida en los pisos (por ende por los elementos no estructurales) disminuye considerablemente y el rango de respuesta se desplaza hacia las frecuencias más bajas, con peak en períodos cercano al período efectivo de diseño (3 [s] - 3.4 [s]).

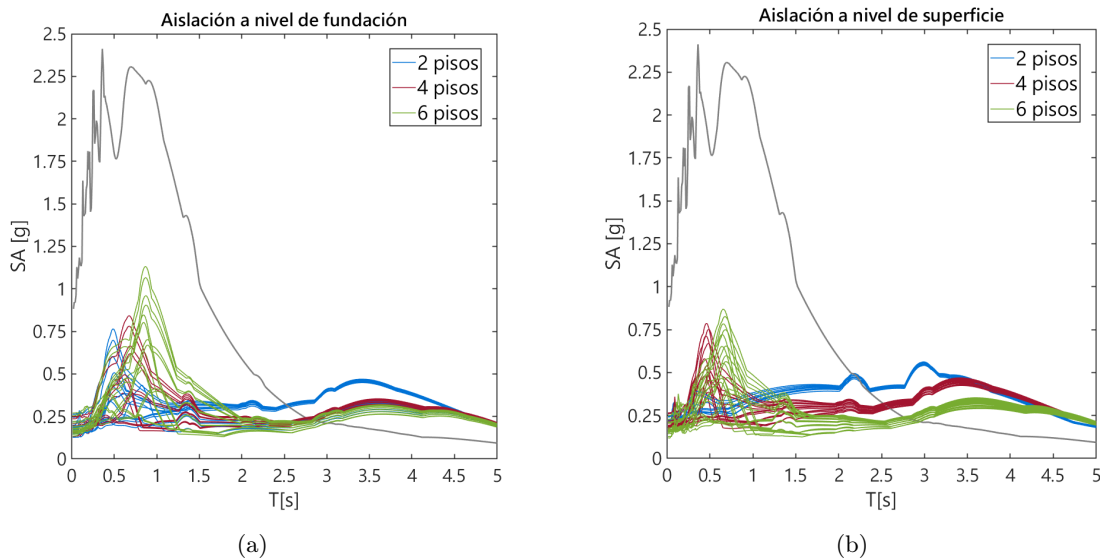


Figura 33: Espectros de respuesta de aceleraciones horizontales de piso comparados con el espectro de aceleraciones del registro de aceleración horizontal utilizado.

## 5.10. Espectros de aceleraciones de suelo adyacente

Para finalizar, en las Figuras 34 y 35 se presentan los espectros de respuesta de la aceleración horizontal del suelo cercano, estimados a partir de la aceleración obtenida en la superficie del suelo próximo (como se indica en la Figura 9). Los resultados se han agrupado en función del tipo de suelo puesto que los espectros de suelo mostraban la misma forma para los diversas estructuras, señalando que su forma dependía fundamentalmente del tipo de suelo considerado.

Los espectros de respuesta de la aceleración horizontal de suelo, en los períodos menores a 1 [s], presentan una amplificación respecto al espectro de respuesta del registro *free-field* utilizado. La alteración del espectro de aceleraciones, dado que no existen fuentes que generen ondas adicionales al registro *free-field*, comprueba que existe una radiación desde la estructura hacia el suelo circundante, y permite pensar que las ondas irradiadas por las estructuras aisladas son casi únicamente de alta frecuencia, pues no se observan modificaciones en la zona de períodos mayores a 1 [s].

La radiación se produce gracias a que elasticidad del suelo permite que la oscilación del edificio genere ondas salientes que se propagan por el suelo, como si la vibración de la estructura fuera una fuente de ondas. El patrón de ondas irradiadas se origina por la geometría de las fundaciones, y puede afectar a estructuras próximas al edificio, como se observa en las Figuras 34 y 35, que advierten que para los casos estudiados las ondas irradiadas podrían perjudicar a estructuras o elementos con períodos menores a 1 [s].

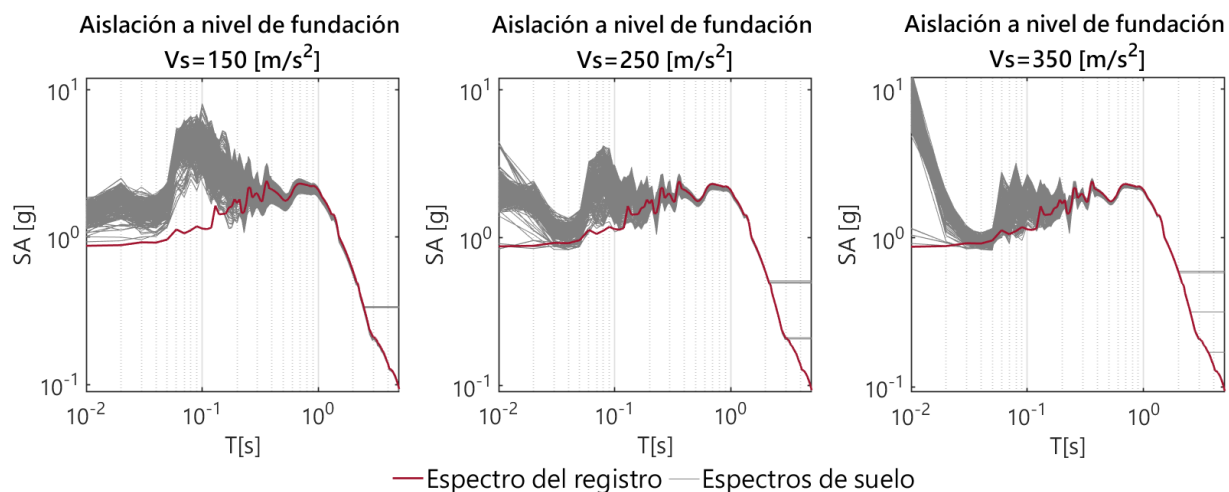


Figura 34: Comparación del espectro de respuesta del registro de aceleración horizontal con los espectros de respuesta de las aceleraciones experimentadas en el suelo vecino a estructuras con aislación a nivel de fundación.

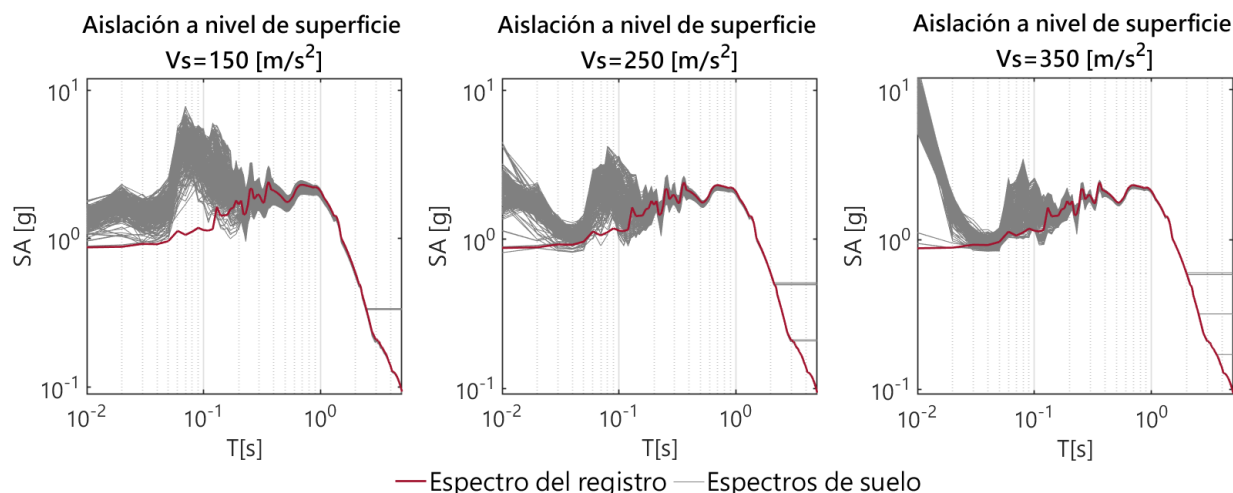


Figura 35: Comparación del espectro de respuesta del registro de aceleración horizontal con los espectros de respuesta de las aceleraciones experimentadas en el suelo vecino a estructuras con aislación a nivel de superficie.

## 6. Conclusiones y comentarios

A partir del análisis de las respuestas de drift, aceleración vertical y horizontal, las fuerzas axiales y distintos espectros de respuesta de los 24 modelos considerados se logró establecer que:

- La interacción suelo-estructura tiene baja influencia en la respuesta horizontal de las estructuras con aislación sísmica estudiadas, sin importar la posición del sistema de aislación, la

esbeltez de la estructura ni la rigidez del suelo.

- Aún cuando los efectos de la interacción suelo-estructura no generan grandes modificaciones en la respuesta horizontal de los casos estudiados, su incorporación resulta siempre benéfica en la evaluación del desempeño y comportamiento de la estructura, pues produce reducciones en las respuestas medidas, gracias a la interacción cinemática que irradia parte de la energía hacia el suelo y genera un filtrado de las ondas de alta frecuencia en la fundación. Producto de lo anterior, la omisión de los efectos de SSI entrega una estimación razonablemente conservadora para la respuesta horizontal del sistema.
- Omitir la interacción suelo-estructura al estimar la fuerza axial en aisladores genera resultados excesivamente elevados, con valores de 2 hasta 5 veces más grande que la obtenida en modelos de alta fidelidad. Si bien, esto se podría ver como un enfoque conservador, la excesiva sobrestimación de dichas fuerzas puede llevar a tener que elegir aisladores más robustos en el proceso de diseño, que se traduce en un sistema de aislación más rígido y/o con fuerza de activación más alta. Este aumento de fuerzas reduciría los beneficios de la aislación sísmica o incluso podría producir la inviabilidad de incorporar sistemas de aislación sísmica. De esta forma, se podría decir que omitir los efectos de SSI se podría llegar a convertir en una aproximación no-conservadora.
- La precisión de un modelo sin interacción suelo-estructura para reproducir las aceleraciones de un edificio con aislación medidas con modelos de alta fidelidad dependen de la posición del sistema de aislación. Para estructuras con aislación en fundación los modelos sin suelo presentan resultados razonablemente conservadores (error menor al 40 %), mientras que para estructuras con aislación en superficie el error en la estimación puede resultar desmesurado (más del 100 %), quitando veracidad y significado a los resultados.
- La interacción cinemática de estructuras aisladas afecta esencialmente el contenido de frecuencias de la señal transmitida a la estructura, manteniendo casi intactos los desplazamientos.
- La efectividad del sistema de aislación para disminuir las aceleraciones percibidas y deformaciones en la superestructura resulta esencialmente la misma para ambos sistemas de aislación.

En función de lo anterior, se concluye que el impacto en la respuesta de estructuras con aislación sísmica al incorporar la interacción suelo-estructura puede ser despreciable, o bien reducir la respuesta, dependiendo del parámetro analizado.

En consecuencia, omitir los efectos de SSI podría verse como un enfoque conservador, sin embargo, se debe tener presente que a veces las diferencias observadas pueden traducirse en estimaciones injustamente desfavorables o perjudiciales para el desempeño de la estructura.

Por ejemplo, como se menciona anteriormente, estimaciones excesivas de las fuerzas axiales en aisladores pueden incluso inviabilizar la incorporación de aislación sísmica en una estructura que se desea proteger. O bien, una sobrestimación de las aceleraciones de piso en estructuras con aislación sísmica debido a la omisión de los efectos de la interacción suelo-estructura conduce a una injusta sobrestimación en los daños de elementos no-estructurales, lo que aumenta erróneamente la estimación de pérdidas económicas esperadas durante el ciclo de vida de una infraestructura crítica.

## Referencias

- Akehashi, Hiroki e Izuru Takewaki (jun. de 2021). “Critical Analysis of Nonlinear Base-Isolated Building Considering Soil–Structure Interaction under Impulsive and Long-Duration Ground Motions”. En: *Geotechnics* 1.1, págs. 76-94. ISSN: 2673-7094. DOI: 10.3390/geotechnics1010005. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/geotechnics1010005>.
- Ancheta, Timothy D. et al. (2014). “NGA-West2 Database”. En: *Earthquake Spectra* 30.3, págs. 989-1005. DOI: 10.1193/070913EQS197M. eprint: <https://doi.org/10.1193/070913EQS197M>. URL: <https://doi.org/10.1193/070913EQS197M>.
- Bathe, K.J. (2006). *Finite Element Procedures*. Prentice Hall. ISBN: 9780979004902. URL: <https://books.google.com/books?id=rWvfeGICf08C>.
- Bielak, Jacobo et al. (abr. de 2003). “Domain Reduction Method for Three-Dimensional Earthquake Modeling in Localized Regions, Part I: Theory”. En: *Bulletin of the Seismological Society of America* 93.2, págs. 817-824. ISSN: 0037-1106. DOI: 10.1785/0120010251. URL: <https://doi.org/10.1785/0120010251>.
- Celebi, Mehmet (2000). “Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice”. En: *Earthquake Spectra* 16.3, págs. 709-710. DOI: 10.1193/1.1586135. eprint: <https://doi.org/10.1193/1.1586135>. URL: <https://doi.org/10.1193/1.1586135>.
- Chopra, A.K. (2007). *Dynamics of Structures*. Prentice-Hall international series in civil engineering and engineering mechanics. Pearson Education. ISBN: 9788131713297. URL: <https://books.google.cl/books?id=0dU1bDaRyP4C>.
- Christopoulos, C. y Andre Filiatrault (ene. de 2006). *Principle of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation*. Instituto Universitario di Studi Superiori di Pavia. ISBN: 9788873580379.
- Cimellaro, G.P. (2023). *Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures: 17th World Conference on Seismic Isolation (17WCSI)*. Lecture Notes in Civil Engineering. Springer International Publishing. ISBN: 9783031211867. URL: <https://books.google.cl/books?id=tyl2zweACAAJ>.
- Cook, Robert D. et al. (2007). *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. USA: John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 0470088214.
- De la Llera, Juan C. et al. (2004). “Analysis, testing, and implementation of seismic isolation of buildings in Chile”. En: *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 33.5, págs. 543-574. DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.360>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/eqe.360>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/eqe.360>.
- FEMA (2020a). *FEMA P-2082-1: NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures*.
- (2020b). *FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction*. URL: [www.ATCouncil.org](http://www.ATCouncil.org).
- Gazetas, George (1983). “Analysis of machine foundation vibrations: State of the art”. En: *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2.1, págs. 2-42. ISSN: 0261-7277. DOI: [https://doi.org/10.1016/0261-7277\(83\)90025-6](https://doi.org/10.1016/0261-7277(83)90025-6). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0261727783900256>.
- Giarlelis, Christos et al. (2018). “The seismic isolated Stavros Niarchos Foundation Cultural Center in Athens (SNFCC)”. En: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 114, págs. 534-547. ISSN: 0267-7261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.05.011>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726117303470>.
- Haiyang, Zhuang et al. (2014). “Shaking table tests for the seismic response of a base-isolated structure with the SSI effect”. En: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 67, págs. 208-218.

- ISSN: 0267-7261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.09.013>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726114002000>.
- INN (2013). *NCh2745 Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica*.
- Isbilibiroglu, Yigit, Ricardo Taborda y Jacobo Bielak (2015). “Coupled Soil-Structure Interaction Effects of Building Clusters during Earthquakes”. En: *Earthquake Spectra* 31.1, págs. 463-500. DOI: 10.1193/102412EQS315M. eprint: <https://doi.org/10.1193/102412EQS315M>. URL: <https://doi.org/10.1193/102412EQS315M>.
- Jensen, H.A. y D.S. Kusanovic (2014). “On the effect of near-field excitations on the reliability-based performance and design of base-isolated structures”. En: *Probabilistic Engineering Mechanics* 36, págs. 28-44. ISSN: 0266-8920. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2014.03.003>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266892014000174>.
- Kausel, Eduardo (2010). “Early history of soil–structure interaction”. En: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 30.9. Special Issue in honour of Prof. Anestis Veletsos, págs. 822-832. ISSN: 0267-7261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2009.11.001>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726109001754>.
- Kucukcoban, S. y L.F. Kallivokas (2011). “Mixed perfectly-matched-layers for direct transient analysis in 2D elastic heterogeneous media”. En: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 200.1, págs. 57-76. ISSN: 0045-7825. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2010.07.013>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045782510002252>.
- (2013). “A symmetric hybrid formulation for transient wave simulations in PML-truncated heterogeneous media”. En: *Wave Motion* 50.1, págs. 57-79. ISSN: 0165-2125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2012.06.004>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165212512000790>.
- Kusanovic, Danilo S., Elnaz Seylabi y Domniki Asimaki (2023). “Seismo-VLAB: An open-source finite element software for seismic meso-scale simulations”. En: *SoftwareX* 21, pág. 101300. ISSN: 2352-7110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.softx.2022.101300>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352711022002187>.
- Kusanovic, Danilo S., Elnaz Seylabi, Kien T. Nguyen et al. (2023). “Seismo-VLAB: An Open-Source Software for Soil-Structure Interaction Analyses”. En: *Mathematics* 11.19. ISSN: 2227-7390. DOI: 10.3390/math11194098. URL: <https://www.mdpi.com/2227-7390/11/19/4098>.
- Kusanovic, Danilo S., Ricardo Taborda y Domniki Asimaki (jul. de 2023). “Soil–Structure Interaction Effects on a Regional Scale through Ground-Motion Simulations and Reduced Order Models: A Case Study from the 2008 Mw 5.4 Chino Hills Mainshock”. En: *Bulletin of the Seismological Society of America*. ISSN: 0037-1106. DOI: 10.1785/0120220241. eprint: <https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/bssa/article-pdf/doi/10.1785/0120220241/5933817/bssa-2022241.1.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1785/0120220241>.
- Lagos, Rene et al. (2021). “The quest for resilience: The Chilean practice of seismic design for reinforced concrete buildings”. En: *Earthquake Spectra* 37.1, págs. 26-45. DOI: 10.1177/8755293020970978. eprint: <https://doi.org/10.1177/8755293020970978>. URL: <https://doi.org/10.1177/8755293020970978>.
- Luco, J. Enrique (2014). “Effects of soil–structure interaction on seismic base isolation”. En: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 66, págs. 167-177. ISSN: 0267-7261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.05.007>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726114001110>.
- Miranda, Eduardo et al. (2012). “Performance of Nonstructural Components during the 27 February 2010 Chile Earthquake”. En: *Earthquake Spectra* 28.1\_suppl1, págs. 453-471. DOI: 10.1193/1.

4000032. eprint: <https://doi.org/10.1193/1.4000032>. URL: <https://doi.org/10.1193/1.4000032>.
- Mylonakis, George y George Gazetas (2000). “SEISMIC SOIL-STRUCTURE INTERACTION: BENEFICIAL OR DETRIMENTAL?” En: *Journal of Earthquake Engineering* 4.3, págs. 277-301. DOI: 10.1080/13632460009350372. eprint: <https://doi.org/10.1080/13632460009350372>. URL: <https://doi.org/10.1080/13632460009350372>.
- Naeim, F. y J.M. Kelly (1999). *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*. Bibliyografya Ve Indeks. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 9780471149217. URL: [https://books.google.cl/books?id=2Gqi9A29H\\_4C](https://books.google.cl/books?id=2Gqi9A29H_4C).
- Nagarajaiah, Satish y X Sun (1996). “Seismic performance of base isolated buildings in the 1994 Northridge earthquake”. En: *Proc. 11th WCEE. Paper 598*.
- Nagarajaiah, Satish y Sun Xiaohong (2000). “Response of Base-Isolated USC Hospital Building in Northridge Earthquake”. En: *Journal of Structural Engineering* 126.10, págs. 1177-1186. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:10(1177). eprint: <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%290733-9445%282000%29126%3A10%281177%29>. URL: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%5C%28ASCE%5C%290733-9445%5C%282000%5C%29126%5C%3A10%5C%281177%5C%29>.
- Nguyen, Kien T., Danilo S. Kusanovic y Domniki Asimaki (2022a). “Dynamic soil impedance functions for cylindrical structures buried in elastic half-space”. En: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 162, pág. 107431. ISSN: 0267-7261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107431>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726122002809>.
- (2022b). “Three-dimensional nonlinear soil–structure interaction for Rayleigh wave incidence in layered soils”. En: *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 51.11, págs. 2752-2770. DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.3700>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/eqe.3700>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/eqe.3700>.
- Nikfar, Farzad y Dimitrios Konstantinidis (2019). “Experimental Study on the Seismic Response of Equipment on Wheels and Casters in Base-Isolated Hospitals”. En: *Journal of Structural Engineering* 145.3, pág. 04019001. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002266. eprint: <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%29ST.1943-541X.0002266>. URL: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%5C%28ASCE%29ST.1943-541X.0002266>.
- Novak, M. y P. Henderson (1989). “Base-isolated buildings with soil-structure interaction”. En: *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 18.6, págs. 751-765. DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.4290180602>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/eqe.4290180602>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/eqe.4290180602>.
- Stewart, Jonathan et al. (2012-09-13 de 2012). *Soil-Structure Interaction for Building Structures*. English. URL: [https://tsapps.nist.gov/publication/get\\_pdf.cfm?pub\\_id=915495](https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=915495).
- Tsai, C. S., Ching-Shyang Chen y Bo-Jen Chen (2004). “Effects of unbounded media on seismic responses of FPS-isolated structures”. En: *Structural Control and Health Monitoring* 11.1, págs. 1-20. DOI: <https://doi.org/10.1002/stc.28>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/stc.28>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/stc.28>.
- Varela, N. (2022). “Comportamiento mecánico de aisladores sísmicos elastoméricos en corte-compresión y grandes deformaciones”. En.
- Wang, Liangkun et al. (2022). “Seismic performance improvement of base-isolated structures using a semi-active tuned mass damper”. En: *Engineering Structures* 271, pág. 114963. ISSN: 0141-0296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114963>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029622010392>.

- Warn, Gordon P. y Keri L. Ryan (ago. de 2012). "A Review of Seismic Isolation for Buildings: Historical Development and Research Needs". En: *Buildings* 2.3, págs. 300-325. ISSN: 2075-5309. DOI: 10.3390/buildings2030300. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/buildings2030300>.
- Wolf, J.P. (1985). *Dynamic soil-structure interaction*. Prentice-Hall international series in civil engineering and engineering mechanics. Prentice-Hall. ISBN: 9780132215657. URL: <https://books.google.com/books?id=0ORRAAAAMAAJ>.
- Yamamoto, Masashi et al. (2012). "Nonlinear behavior of high-damping rubber bearings under horizontal bidirectional loading: full-scale tests and analytical modeling". En: *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 41.13, págs. 1845-1860. DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.2161>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/eqe.2161>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/eqe.2161>.
- Zhang, W., E. Esmailzadeh Seylabi y E. Taciroglu (2019). "An ABAQUS toolbox for soil-structure interaction analysis". En: *Computers and Geotechnics* 114, pág. 103143. ISSN: 0266-352X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103143>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266352X19302071>.