



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

**ANALISIS DE ACELERACIONES DE PISO EN ESTRUCTURAS
CON AISLACIÓN SISMICA CONSIDERANDO LA INTERACCIÓN
SUELO-ESTRUCTURA DE MANERA SIMPLIFICADA**

Memoria de Título presentada por

Javier Alejandro Labraña Bustos

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Claudio Ignacio Sepúlveda Contreras

Julio de 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título; Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: ANALISIS DE ACELERACIONES DE PISO EN ESTRUCTURAS CON AISLACIÓN SISMICA CONSIDERANDO LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA DE MANERA SIMPLIFICADA.

Nombre del candidato(a): Javier Alejandro Labraña Bustos

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: Santiago San Joaquín ; **Departamento:** Departamento de Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Claudio Sepúlveda, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses; 12 meses; 2 años; 3 años; 5 años; 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 31-07-2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 31-07-2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA TESIS:

“ANALISIS DE ACELERACIONES DE PISO EN ESTRUCTURAS CON AISLACIÓN SISMICA CONSIDERANDO LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA DE MANERA SIMPLIFICADA”

AUTOR:

JAVIER ALEJANDRO LABRAÑA BUSTOS

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>
Prof. Guía	Claudio Sepúlveda C.
Miembro 1 Comisión	Claudio Sepúlveda C.
Miembro 2 Comisión	Cristian Cruz D.

Valparaíso/Santiago, Chile, Julio de 2025.

ANÁLISIS DE ACELERACIONES DE PISO EN ESTRUCTURAS CON AISLACIÓN SÍSMICA CONSIDERANDO LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA DE MANERA SIMPLIFICADA

Javier Alejandro Labraña Bustos

Resumen

La presente memoria aborda el impacto de la interacción suelo-estructura (SSI, por sus siglas en inglés *Soil Structure Interaction*) en la respuesta sísmica de estructuras con aislación sísmica basal, enfocándose en aceleraciones de piso, tanto horizontales como verticales, que afectan directamente a elementos no estructurales. Este estudio nace de la necesidad de garantizar la continuidad operacional de hospitales ante eventos sísmicos severos, especialmente tras experiencias como el terremoto del Maule (2010) en Chile y el de Kahramanmaraş (2023) en Turquía, donde los daños no estructurales fueron determinantes en la pérdida de funcionalidad de estos recintos. En Chile, tras el sismo de 2010, se impulsó normativamente el uso de sistemas de aislación sísmica en hospitales. Sin embargo, la evaluación de componentes no estructurales expuestos a aceleraciones no ha considerado en profundidad los efectos de la interacción suelo-estructura. Generalmente, los análisis se basan en registros de campo libre, sin contemplar cómo la señal sísmica se modifica al atravesar el suelo y llegar a la estructura. Para abordar esta problemática, se desarrollaron cuatro modelos computacionales de una estructura de marcos de hormigón armado, tipo hospitalaria en el software ETABS, considerando combinaciones con y sin aislación sísmica, e incluyendo o no los efectos de SSI mediante un enfoque simplificado basado en el desacople de fenómenos, el cual permite separar los efectos cinemáticos e inerciales del sistema suelo-estructura. Los resultados muestran que la inclusión de SSI reduce de forma considerable las aceleraciones de piso, derivas, desplazamientos y fuerzas internas en los aisladores, sin alterar significativamente el patrón de comportamiento general, salvo en algunos casos en que debido a efectos locales del sistema estructural ocurren amplificaciones en la respuesta en la componente vertical. En particular, se observó una disminución de hasta un 50 % en aceleraciones de piso y reducciones en desplazamientos máximos de aisladores. Esto puede afectar directamente el dimensionamiento y la viabilidad económica de los sistemas de aislación sísmica, comprometiendo así, decisiones claves en el diseño de estructuras críticas como hospitales.

Palabras claves: interacción suelo-estructura, edificios con aislación basal, modelos Etabs, interacción cinemática, interacción inercial, aislador elastomérico.

1 Introducción

La seguridad estructural y la prevención del colapso de estructuras ha experimentado un notable avance en las últimas décadas. En la actualidad, es poco probable que un edificio moderno colapse de manera generalizada debido a fallas estructurales, dejando de lado eventos particulares y excepcionales. Sin embargo, terremotos recientes han demostrado que el desempeño sísmico de elementos no estructurales sigue siendo un tema fundamental en el que falta desarrollo (Miranda et al., 2012).

En Chile, no son pocos los casos de estructuras que, sin presentar problemas estructurales de consideración, sufrieron daños no estructurales que causaron pérdidas parciales o totales de operación. En caso de estructuras críticas, esenciales, y/o de contenidos de gran valor, tales como son los hospitales el objetivo de desempeño de la norma actual de prevenir el colapso estructural no es suficiente, ya que se requiere que la estructura continúe operando durante o inmediatamente después de ocurrido un sismo severo.

Es casi una regla que los servicios hospitalarios se interrumpan temporal o permanentemente, sobre todo por daños en su infraestructura, cuando se ven afectados por fenómenos naturales de gran magnitud. La pérdida de funcionamiento de estas instalaciones es no solo una pérdida de inversión sino, lo más importante, constituye un gran impacto negativo para el bienestar y el desarrollo social y económico de la población y del país (Boroschek & Retamales, 2004).

Posterior a las consecuencias del terremoto del Maule del 27 de febrero de 2010, el Ministerio de Obras Públicas de Chile (MOP) comenzó a requerir dentro de sus licitaciones la incorporación de sistemas de aislación sísmica basal en hospitales, con el objetivo de mantener el funcionamiento de estos establecimientos luego de un sismo de gran intensidad. Sin embargo, ensayos experimentales en mesa vibradora (Furukawa et al., 2013), y durante terremotos recientes como el de Turquía de 2023 mostraron que, para sismos excepcionalmente severos, pueden existir daños en elementos no estructurales en estructuras con aislación sísmica (K. Önder Çetin et al., 2023). Durante el terremoto en Turquía se observaron daños de elementos no estructurales como son los cielos falsos y redes contra incendios en hospitales con sistemas de aislación sísmica, estos componentes no estructurales son especialmente sensibles a las aceleraciones de piso de la estructura (K. Önder Çetin et al., 2023).

En base a esto, en la literatura se pueden encontrar diferentes simulaciones numéricas y campañas experimentales que evalúan las aceleraciones de piso en estructuras con aislación (Furukawa et al., 2013). Sin embargo, en la gran mayoría de estas investigaciones el registro sísmico utilizado generalmente es obtenido de mediciones de campo libre, sin considerar la interacción que puede existir entre el movimiento del suelo y la estructura. La interacción Suelo-Estructura o SSI por sus siglas en inglés (*Soil Structure Interaction*) produce modificaciones entre el registro a campo libre (FFM) y los movimientos a nivel de fundación (FM) principalmente para frecuencias relativamente altas (Zogh et al., 2021). Si bien este rango de frecuencias no modifica mayormente los desplazamientos de una estructura sísmicamente aislada, sí modifica el contenido de frecuencias de las aceleraciones de piso, lo que impacta el comportamiento de elementos no-estructurales sensibles a aceleraciones.

En este estudio se pretende estudiar las aceleraciones de piso de estructuras con y sin aislación sísmica considerando la interacción suelo-estructura de manera simplificada. Los resultados serán comparados con el caso en que la interacción suelo-estructura es omitida, de forma tal de cuantificar la importancia de este efecto en las aceleraciones de piso de estas estructuras.

2 Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar el impacto de la interacción suelo-estructura (SSI) en la respuesta sísmica de una estructura tipo hospitalaria con sistema de protección sísmica basal, comparando principalmente las aceleraciones de piso —incluyendo la componente vertical— obtenidas al considerar u omitir dichos efectos mediante un enfoque de modelación simplificada.

2.2 Objetivos Específicos

- Seleccionar y aplicar un método simplificado basado en la literatura para incorporar los efectos cinemáticos e inerciales de la interacción suelo-estructura mediante el enfoque de subestructuras.
- Desarrollar modelos computacionales de una estructura tipo hospitalaria con y sin aislación sísmica basal, considerando tanto la inclusión como la omisión de los efectos de SSI.
- Analizar y comparar las aceleraciones de piso horizontales y verticales obtenidas en diferentes niveles y puntos de la estructura, evaluando el impacto de los sistemas de aislación y de la integración de los efectos SSI.
- Evaluar la influencia de SSI sobre parámetros relevantes para el diseño, como derivas de piso, desplazamientos máximos de aisladores y fuerzas axiales internas, considerando su efecto en el desempeño estructural y no estructural.

3 Marco Teórico

3.1 Interacción Suelo-Estructura

La interacción suelo estructura (*Soil Structure Interaction*, SSI) consiste en la influencia que tiene el suelo circúndate a las fundaciones de una estructura en la respuesta de esta misma. Los efectos suelo estructura no fueron considerados sino hasta el terremoto de San Fernando de 1971 y con la construcción de una planta nuclear en California, propensa a terremotos (Spyrakos et al., 2009). El estudio de estos efectos surge de la necesidad de obtener el comportamiento más detallado de estructuras masivas, para así poder realizar análisis más profundos. Desde entonces hasta la fecha se han realizado numerosos estudios para evaluar este efecto (Chaudhary et al., 2001; Tongaonkar & Jangid, 2003).

La respuesta de una estructura frente a un sismo está fuertemente influenciada por el comportamiento del suelo en donde este fundada. El suelo se deforma bajo la influencia de ondas sísmicas incidentes, deformaciones que se transfieren a los cimientos y consigo a la estructura la cual soporta. Por otra parte, la estructura genera fuerzas inerciales sobre los cimientos, las cuales son transmitidas al suelo que la soporta. Estos comportamientos ocurren simultáneamente durante un evento sísmico (Mylonakis et al., 2006).

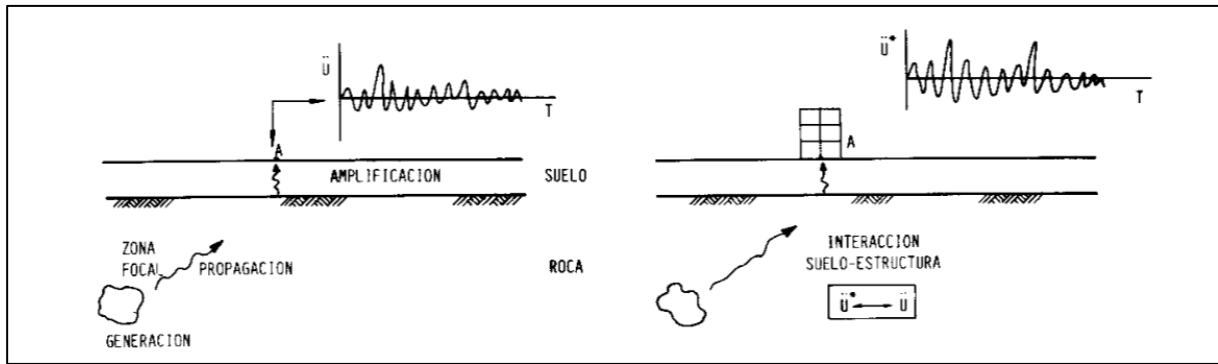


Figura 1: Modificación del movimiento del campo libre debido a la presencia de estructuras.

Fuente: Soriano E.T.S Ing. Caminos & Puertos. (1989)

Hay diversas formas de tener en cuenta los efectos SSI en la respuesta de una estructura. Uno de los enfoques viables para abordar este fenómeno se relaciona con los métodos directos y los basados en subestructuras. El enfoque directo consiste en la realización de un modelo de elementos finitos del suelo y la estructura, en donde el sistema se resuelve considerando el movimiento a campo abierto como entrada. El enfoque de subestructuras consiste en el desacople de los fenómenos para ser resueltos por separado, superponiendo al final todos los resultados obtenidos para así obtener la respuesta completa. Es en este último, donde se puede tratar la interacción suelo estructura como dos grandes fenómenos, la interacción cinemática e inercial, utilizando funciones de transferencia e impedancia respectivamente. El enfoque de subestructuras tiene la ventaja de permitir elegir la estrategia de resolución óptima para cada problema de los efectos SSI, sin mencionar que computacionalmente resulta ser un análisis menos costoso computacionalmente hablando, que el enfoque directo (Anand & Satish Kumar, 2018).

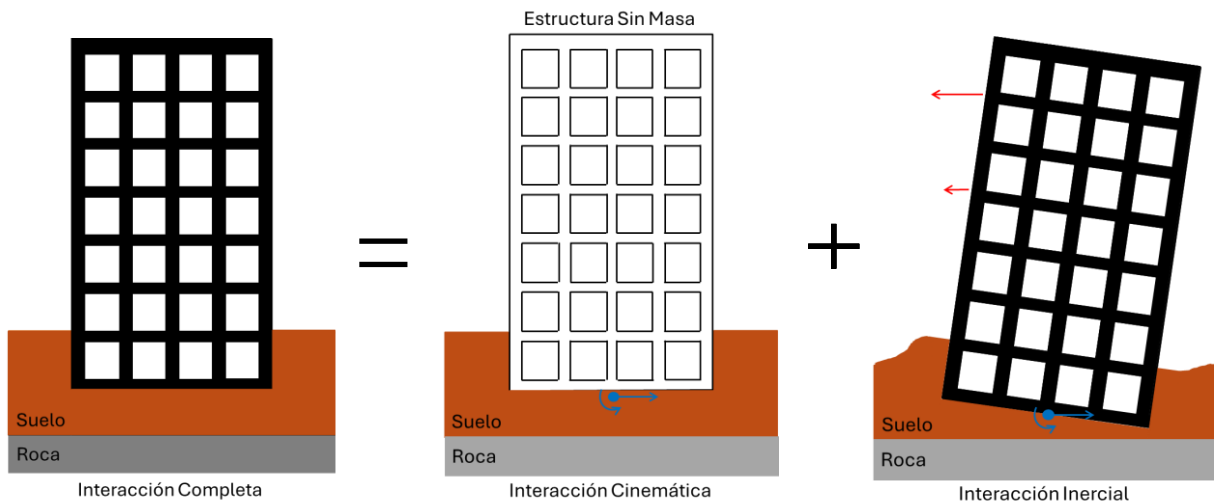


Figura 2: Esquema representativo del desacople de los efectos de la interacción Suelo-Estructura.

3.1.1 Interacción Cinemática

Los efectos cinemáticos de este fenómeno corresponden a los producidos por las ondas sísmicas incidentes en el sistema cimientos – suelo soportante, la presencia de elemento de cimentación rígidos sobre o empotrados al suelo, generan que se desvíen los movimientos respecto de los movimientos a campo libre. Esta diferencia, se genera debido a que los movimientos del suelo son espacialmente variables en los cimientos de las estructuras (importante en estructuras de grandes cimentaciones), este efecto se le denomina “Promedio de Losa Base” generando así reducciones en las translaciones debido a la rigidez y resistencia que genera la cimentación. Para el análisis de este fenómeno no se considera la masa de la estructura, generando un movimiento a nivel de fundación, generalmente menor al movimiento registrado del suelo a campo abierto. Esta diferencia aumenta considerablemente en presencia de estructuras con empotramientos considerables en relación con su geometría (Mylonakis et al., 2006).

3.1.2 Interacción Inercial

Estos son producidos por las fuerzas de corte y momentos que se transmiten a la fundación de la estructura, generando así desplazamientos y rotaciones adicionales al movimiento a campo abierto (FEMA 2020a; Stewart et al. 2012). Tiene relación a la respuesta completa del sistema, es decir, suelo-cimiento-estructura, frente a fuerzas asociadas a las aceleraciones inducidas a la estructura debido a la interacción cinemática. Este fenómeno toma mayor relevancia en estructuras de gran envergadura, en donde su masa o inercia son considerables, como por ejemplo centrales nucleares (Anand & Satish Kumar, 2018) y en suelos menos rígidos, en donde se ve aumentado el efecto inercial.

3.2 Aislación Sísmica

Debido a la interacción antes mencionada entre la respuesta del suelo y la estructura, el comportamiento dinámico de esta última es tan crucial como el del suelo. En este contexto, es esencial considerar la incursión de elementos estructurales en comportamientos no lineales o la implementación de sistemas de protección sísmica en la estructura al evaluar los efectos de SSI. Entre los sistemas de protección sísmica disponibles, los sistemas de aislación sísmica son ampliamente utilizados en la actualidad con el objetivo de reducir los efectos de los sismos en las estructuras. Estos sistemas, “aíslan” la estructura del suelo mediante elementos estructurales que absorben, mediante deformaciones la energía que es transmitida por el suelo durante los terremotos. Estos dispositivos se instalan en los puntos de soporte de las estructuras y debido a su gran flexibilidad, estos cambian el periodo natural del sistema.

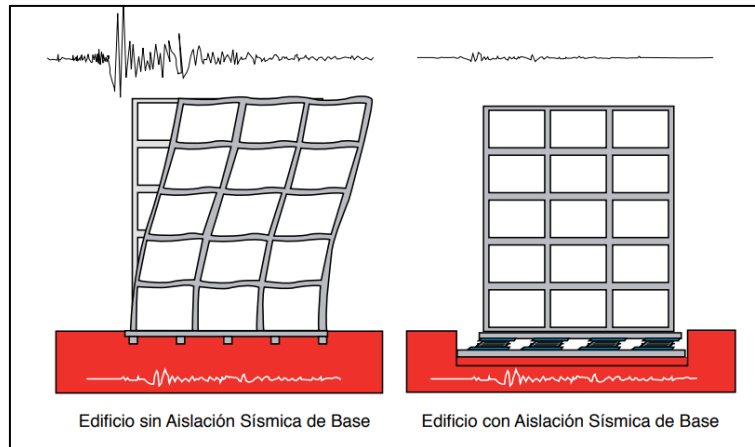


Figura 3: Comparación del comportamiento esperado de una misma estructura con y sin aislamiento sísmico basal. Fuente: CDT-CCHC (2011)

Dentro de la categoría de aisladores basales, se encuentran los aisladores de goma con alto amortiguamiento (HDRB), aisladores de goma natural con núcleo de plomo (LRB) y sin núcleo de plomo (RB) y, los sistemas friccionales. En particular los aisladores con núcleo de plomo, los cuales serán considerados para esta investigación, constan de dos placas de acero de fijación en la parte superior e inferior del cojinete, al centro de estos un núcleo de plomo central el cual proporciona la componente de amortiguamiento y varias capas de elastómero y láminas de acero los cuales proporcionan flexibilidad lateral al sistema.

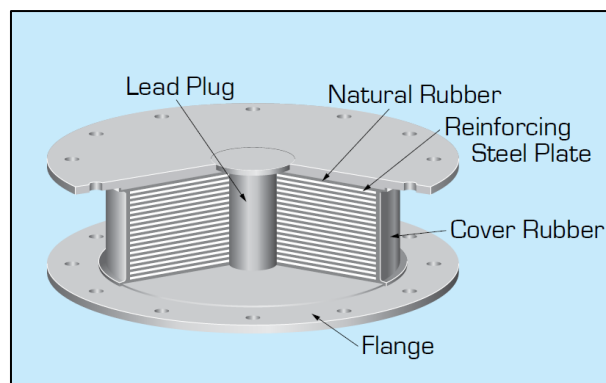


Figura 4: Esquema de componente de un aislador con núcleo de plomo. Fuente: Bridgestone Seismic Isolation Product Line-Up. (2017 Vol.1)

4 Metodología

4.1 Estudio en software ETABS

Se utiliza el software de análisis y dimensionamiento estructural ETABS para realizar los modelos de la estructura base a evaluar. Este software es uno de los más populares utilizados en el campo de la ingeniería estructural debido a su amplia gama de herramientas y funcionalidades, con alta capacidad de poder analítico lineal y no lineal. Se considera esta herramienta de modelación por sobre otras debido a su interfaz grafica intuitiva y fácil de usar, ayudando así el proceso de modelamiento e interpretación de resultados, sin perder potencia de análisis comparado con otros softwares programables, los cuales, a pesar de ofrecer mayor flexibilidad y personalización, requieren mayor tiempo de configuración y procesamientos. Para lograr un buen manejo de ETABS se estudia la información oficial del software, investigaciones científicas donde se utiliza ETABS y ejemplos relevantes de internet.

4.2 Definición de Tipo de Suelo

Al estar evaluando el desempeño estructural en Chile, es lógico utilizar suelos que se encuentren clasificados dentro de la normativa del país. Considerando la clasificación de la norma NCh433 Of.1996 Mod.2009 (Instituto Nacional de Normalización, 2009), en esta norma los suelos de fundación se clasifican según su rigidez media, esta rigidez se mide a través de la velocidad de onda de corte del suelo.

Tabla 4-1: Clasificación sísmica de suelo de fundación. Fuente: NCh433 Of.1996 Mod.2009

Suelo Tipo		V_{S30} (m/s)	RQD	q_u (MPa)	(N_1) (golpes/pie)	S_u (MPa)
A	Roca, suelo cementado	≥ 900	$\geq 50\%$	≥ 10		
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	≥ 500		$\geq 0,40$	≥ 50	
C	Suelo denso o firme	≥ 350		$\geq 0,30$	≥ 40	
D	Suelo medianamente denso, o firme	≥ 180			≥ 30	$\geq 0,05$
E	Suelo de compacidad, o consistencia mediana	< 180			≥ 20	$< 0,05$
F	Suelos Especiales	*	*	*	*	*

Para esta investigación se considera como parámetro de estudio los suelos Tipo C según la Tabla 4-1, la elección de este tipo de suelo se fundamenta en su calidad y/o capacidad de soporte moderada, siendo un suelo no óptimo para fundar una estructura, pero suficientemente competente para construir estructuras aisladas sobre ellos. Además, considerando lo evidenciado por Braniff (2023) en su investigación, en donde se concluye que las aceleraciones verticales no se modifican sustancialmente con el tipo de suelo que se utilice para evaluar la respuesta estructural. La definición de este parámetro tiene influencia en los registros de aceleraciones que se consideren y en las formulaciones utilizadas en la definición del efecto suelo-estructura.

4.3 Definición de Registros Sísmicos

Para realizar la selección de registros se utiliza la base de datos del centro sismológico nacional (CSN), seleccionándose eventos transcurridos entre 1996 y 2022, la cual se discretizo en primera instancia por el tipo de suelo en el cual se registra las ondas en los acelerógrafos, ya que como se mencionó anteriormente se considera un suelo tipo C según la clasificación de la norma NCh433 Of.1996 Mod.2009 (INN, 2009).

Por otro lado, según como se dispone en la norma NCh2745 (INN, 2003) la cual establece los lineamientos para el análisis y diseño de edificios con aislación sísmica, las estructuras con aislación sísmica se deben diseñar con espectros de diseño basados en espectros propuestos por Newmark & Hall (1982). La construcción de estos espectros depende del tipo de suelo en que se funde la estructura y la zonificación sísmica en la que este ubicada la estructura, esta zonificación ya definida en la norma NCh433 (INN, 2009).

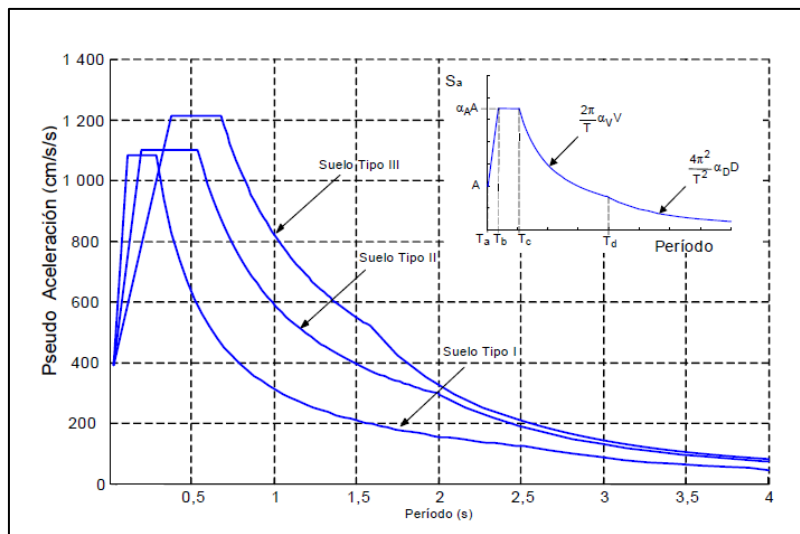


Figura 5: Espectro base de diseño para zona 2 con los tipos de suelos. Fuente: NCh2745 (INN, 2003)

Para la investigación se considera una zona sísmica 2, y un suelo tipo III (según NCh433 suelos tipo C y D). Con estos parámetros definidos para el suelo se realiza la selección de los registros que serán ingresados a los modelos para evaluar la respuesta estructural.

4.4 Modelación del suelo

4.4.1 Interacción Cinemática

Considerando el desacople de los efectos de la interacción suelo estructura, se utilizan las formulaciones o recomendaciones sobre la Interacción Suelo-Estructura del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST por sus siglas en inglés, *National Institute of Standards and Technology*). El informe desarrollado por esta institución representa un avance del estado del conocimiento sobre los efectos SSI, proporcionando técnicas específicas mediante las cuales se puede simular los fenómenos del SSI en la práctica de la ingeniería, brindando recomendaciones para modelar los efectos sísmicos de la interacción suelo-estructura en los edificios. Bajo este contexto la integración de los efectos SSI se separó en dos grandes fenómenos, la interacción cinemática y la interacción inercial.

La interacción cinemática fue evaluada mediante el Capítulo 3 de este informe, en donde se describen los dos fenómenos importantes para esta investigación los cuales son el promedio de la losa base y los efectos del empotramiento en la respuesta cinemática, los cuales son los factores más relevantes en las desviaciones y reducciones de los movimientos a nivel de fundación con los movimientos registrados a

campo abierto. Los modelos matemáticos que se presentan en este capítulo describen los efectos cinemáticos como relaciones que dependen de la frecuencia de las amplitudes de Fourier del registro sísmográfico evaluado. Estas relaciones se materializan mediante funciones de transferencia las cuales generan un movimiento a nivel de fundaciones denominado u_{FIM} (de las siglas *Foundation Input Motion*, por el término en inglés), el cual es un movimiento teórico de la losa en la base de la estructura que no considera la masa de la estructura, ni la masa de los elementos de fundación cercanos (Figura 2). Este análisis es parte del enfoque de subestructuras (desacople de los fenómenos) empleado para esta investigación.

Se considera una estructura empotrada para el modelo matemático, obtenido de la Sección 3.2 de este capítulo, se tiene la siguiente función de transferencia.

$$H_u = \frac{u_{FIM}}{u_g} = \cos\left(\frac{D}{B_e} a_0^k\right) = \cos\left(\frac{D\omega}{V_s}\right), \quad \frac{D\omega}{V_s} < 1.1$$

$$H_u = 0.45, \quad \frac{D\omega}{V_s} > 1.1$$

En donde D es la profundidad de empotramiento de la estructura, V_s es la velocidad de onda de corte del suelo de fundación, el cociente $\frac{D\omega}{V_s}$ es una frecuencia adimensional, siendo ω el vector de frecuencias angulares del registro sísmográfico y u_g corresponde a la transformada discreta de Fourier del registro de aceleraciones a campo abierto.

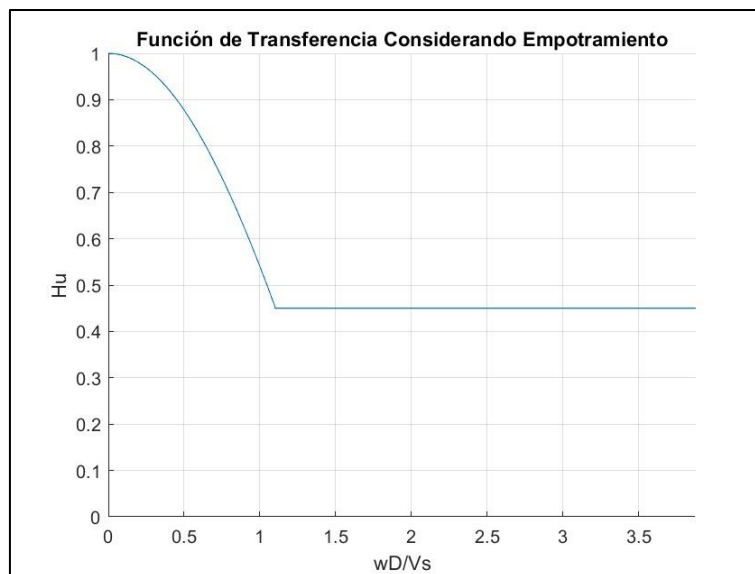


Figura 6: Grafica de función de transferencias considerando empotramiento en la fundación.

El proceso de obtención de los registros de aceleraciones considerando los efectos cinemáticos son los siguientes:

- 1.- Obtención de la transformada discreta de Fourier de cada registro de aceleraciones a campo libre seleccionado en el acápite anterior. Además de la obtención del rango de frecuencias angulares de cada registro.
- 2.- Obtención de $H_u(\omega, V_s, D)$ para cada registro seleccionado. Como se puede observar en la Figura 6, esta función de transferencia tiene un límite de reducción del registro llegando a un coeficiente de 0.45 para altas frecuencias $\left(\frac{D\omega}{V_s} > 1.1\right)$.

3.- Una vez teniendo la función de transferencia correspondiente a cada registro en función de su contenido de frecuencias, se puede obtener el registro de aceleraciones considerando los efectos cinemáticos en él a través de la siguiente ecuación:

$$H_u = \frac{u_{FIM}}{u_g}$$

$$u_{FIM} = H_u \times u_g$$

Mediante este proceso se logra integrar los efectos cinemáticos en los registros de aceleraciones, los cuales serán utilizados como datos de entrada para la evaluación de la respuesta estructural de esta investigación.

4.4.2 Interacción Inercial

Por otra parte, los efectos inerciales de la interacción suelo-estructura se refieren a los desplazamientos y rotaciones a nivel de fundación de la estructura que resultan de las fuerzas impulsadas por la inercia. Estos efectos pueden ser una fuente importante de flexibilidad y disipación de energía en el suelo. Para integrar estos efectos se utiliza el Capítulo 2 del NIST, más específicamente la Sección 2, la cual proporciona una descripción para resortes y amortiguadores de fundación para representar la flexibilidad y el amortiguamiento asociados a los efectos SSI.

Las soluciones describen la rigidez traslacional y el amortiguamiento a lo largo de los ejes x, y, z, también se define la rigidez y el amortiguamiento rotacionales alrededor de esos ejes (xx, yy, zz). Definiendo las siguientes variables, con los parámetros de los cuales dependen cada una de ellas.

$$K_j = GB^m f\left(\frac{B}{L}, \nu\right)$$

$$\eta_j = f\left(\frac{B}{L}, \frac{D}{B}, \frac{d_w}{B}, \frac{A_w}{BL}\right)$$

$$\alpha_j = f\left(\frac{B}{L}, a_0\right)$$

$$k_j = K_j \times \alpha_j \times \eta_j$$

Donde K_j es la rigidez estática para fundaciones superficiales, la cual depende del módulo de corte G , parámetros geométricos de la fundación como es B y L , el módulo de Poisson ν y por último se considera $m=1$ para traslaciones y $m=3$ para rotaciones. η_j es un factor de modificación de rigidez para empotramientos, el cual está en función de parámetros geométricos de la fundación empotrada considerada y α_j es el modificador de rigidez dinámica y amortiguamiento por radiación en cual depende de parámetros geométrico y del parámetro $a_0 = \frac{\omega B}{v_s}$. De esta forma se puede obtener k_j el cual es la rigidez dinámica en cada dirección j .

El ASCE/SEI 7-10 (*Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, 2010) y FEMA P-750 (*NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures*, 2009) proporcionan la información para ajustar el módulo de corte y la velocidad de onda de corte para grandes niveles de deformaciones mediante la siguiente tabla.

Tabla 4-2: Corrección de velocidad de onda de corte y módulo de corte para distintos tipos de suelos.

Fuente: NIST (2012).

Site Class	Reduction Factor (V_s)			Reduction Factor (G/G_0)		
	$S_{DS}/2.5^{(1)}$			$S_{DS}/2.5^{(1)}$		
	≤ 0.1	0.4	≥ 0.8	≤ 0.1	0.4	≥ 0.8
A	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
B	1.00	0.97	0.95	1.00	0.95	0.90
C	0.97	0.87	0.77	0.95	0.75	0.60
D	0.95	0.71	0.32	0.90	0.50	0.10
E	0.77	0.22	(2)	0.60	0.05	(2)
F	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)

Para obtener los factores de reducción de la velocidad de onda de corte y del módulo de corte se necesita obtener el valor de S_{DS} , este valor se define en el código ASCE/SEI 7-10, donde este parámetro corresponde a la aceleración espectral de diseño definida para periodos cortos en este código. Para esta investigación se utilizará como valor S_{DS} el *peak* de aceleraciones espectrales obtenido del escalado y selección de registros correspondiente a esa zona de periodos. Obteniendo un valor de S_{DS} igual a 1,237 (g) y realizando una interpolación lineal de los datos considerando que según los tipos de suelo en concordancia con el utilizado para esta investigación (Suelo Tipo D según ASCE/SEI), se obtienen los siguientes coeficientes de ajuste.

$$C_{V_s} = 0,62 \quad C_{G/G_0} = 0,41$$

De esta forma mediante las tablas anexadas en el Apéndice 1, se obtienen las funciones para representar la rigidez y el amortiguamiento por radiación, estas funciones dependen principalmente de la frecuencia angular. Para un análisis en el dominio del tiempo generalmente se utiliza una única frecuencia, la cual según recomendación del documento utilizado se considera la frecuencia angular asociada al periodo fundamental de la estructura evaluada. Para entender de mejor forma la filosofía de estudio realizada, se puede observar en la Figura 7 un diagrama de flujo de cómo se integran los efectos de la interacción suelo estructura en el análisis de la respuesta estructural.

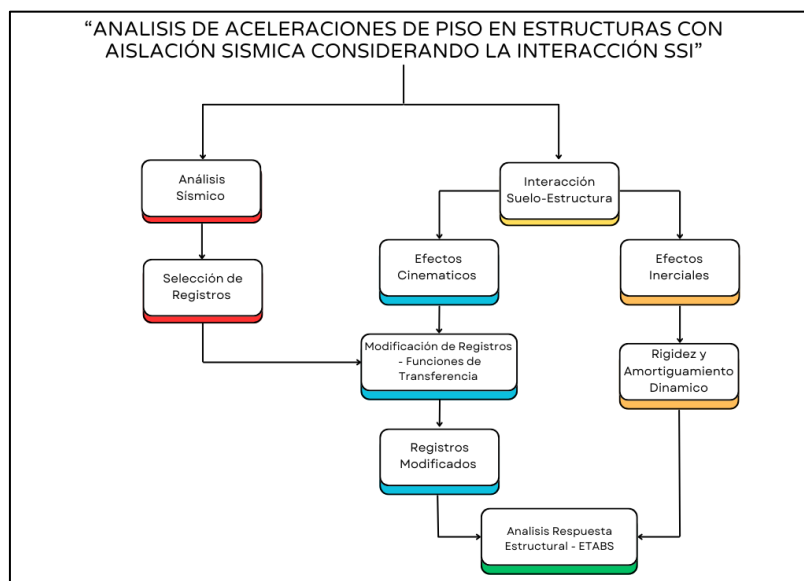


Figura 7: Diagrama de Flujo sobre la metodología de integración de la interacción suelo estructura.

4.5 Sistema de aislación

En las últimas dos décadas ha ganado aceptación entre la comunidad profesional el uso de sistemas de protección sísmica en las estructuras. Entre ellos, los sistemas de aislación sísmica y disipación de energía han sido los más utilizados. El diseño de estructuras con aislación sísmica consiste en desconectar o separar el movimiento de una estructura, del movimiento en su base y/o fundación. Esto se logra instalando entre la superestructura y su fundación, dispositivos altamente flexibles, que posee mecanismos de disipación de energía para reducir los desplazamientos (Christopoulos y Filiatrault 2006).

Como se menciona en el marco teórico existen diferentes tipos de aisladores sísmicos, los que se pueden separar en dos macro clasificaciones: tipo péndulo friccional, y elastoméricos. Para efectos de esta investigación nos centraremos en los aisladores elastoméricos, los que están compuestos por un conjunto de láminas planas de elastómeros intercalados con capas de acero, con sección circular o cuadrada. A través de esta estructura estos dispositivos logran la flexibilidad lateral necesaria para permitir el desplazamiento horizontal relativo entre la estructura aislada y el suelo.

Existen varios tipos de apoyos elastoméricos, entre ellos se encuentran los apoyos de goma natural (NRB, Natural Rubber Bearing), los apoyos de goma de bajo amortiguamiento (LDRB, Low-Damping Rubber Bearing) y alto amortiguamiento (HDRB, High-Damping Rubber Bearing), y los apoyos de goma con núcleo de plomo (LRB, Lead-plug Rubber Bearing), esto últimos, considerados para evaluar la respuesta estructural en esta investigación.

4.5.1 Modelo Aislador

Los aisladores sísmicos elastoméricos con núcleo de plomo presentan una serie de propiedades que dependen de la amplitud de deformación de corte. Estas propiedades son fundamentales para describir el comportamiento del aislador bajo condiciones sísmicas y se pueden expresar mediante una serie de ecuaciones y factores. Considerando un comportamiento perfectamente bilineal del sistema de aislación basal, los parámetros de la aproximación que expresan el comportamiento de la ley histerética son:

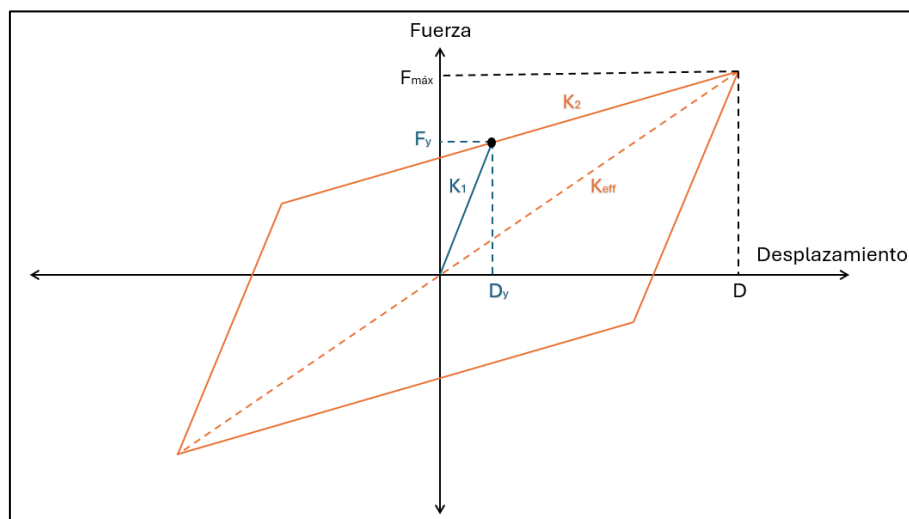


Figura 8: Comportamiento histerético del aislador con núcleo de plomo.

4.5.1.1 Desplazamiento de Fluencia (D_y)

Se define como:

$$D_y = \frac{Q}{(K_1 - K_2)}$$

Donde Q corresponde a la fuerza de fluencia de la barra de plomo para el LRB, está asociada al desplazamiento nulo durante el ciclo de carga.

4.5.1.2 Rigidez Elástica (K_1)

Corresponde a la rigidez elástica para una carga monótona, también se observa este valor en la fase de descarga del ciclo histeretico ya que el signo de este valor depende de la dirección de la deformación observada.

$$K_1 = \frac{F_y}{\pm D_y}$$

Donde, F_y corresponde a la fuerza de fluencia, como se puede ver en la Figura 8

4.5.1.3 Rigidez Post-Fluencia (K_2)

Para un modelo Bilineal se define como:

$$K_2 = \frac{(F_{m\acute{a}x} - F_y)}{(D - D_y)}$$

Donde $F_{m\acute{a}x}$ corresponde a la fuerza máxima del ciclo histeretico.

De esta forma y como se puede observar en la Figura 8 se pueden definir una rigidez efectiva del LRB y un amortiguamiento efectivo.

4.5.1.4 Rigidez Efectiva (K_{eff})

$$K_{eff} = K_2 + \frac{Q}{D}$$

4.5.1.5 Relación de amortiguamiento equivalente (ξ_{eq})

Por último, la relación de amortiguamiento equivalente se expresa como:

$$\xi_{eq} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{Q(D - D_y)}{K_{eff} \cdot (D)^2}$$

Cada una de estas ecuaciones permite caracterizar el comportamiento del aislador bajo condiciones de carga cíclica, considerando la capacidad del elastómero y el núcleo de plomo para absorber y disipar energía durante un sismo. Esto resulta en un sistema de aislamiento eficaz que reduce la demanda sísmica sobre la estructura. Finalmente, el área bajo la curva de histéresis, o energía disipada por el sistema de aislación se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$E_H = 4Q(D - K_y)$$

5 Caso de Estudio

Posterior al terremoto de Maule en 2010 en Chile, con la finalidad de garantizar la operatividad de hospitales, los cuales tienen especial demanda posterior a eventos sísmicos, en Chile se establece por normativa el uso de aislación sísmica basal en este tipo de estructuras. Si bien los sistemas de aislación basal han demostrado ser eficaces en términos de protección estructural de edificios, su impacto en elementos no estructurales sensibles a las aceleraciones del piso ha presentado nuevos desafíos. Como se ha podido evidenciar en recientes eventos sísmicos como el de Kahramanmaraş, Turquía en 2023, la diferencias entre las capacidades de atención de los hospitales afectados radica en el nivel de daño no estructural existente (Çetin et al., 2023).

Luego de una exhaustiva revisión literaria, a la fecha existente pocas investigaciones que estudien la respuesta estructural a nivel de aceleraciones de piso en edificaciones con sistemas de aislación sísmica, que consideren, además, los efectos de la interacción suelo-estructura. No considerar los efectos SSI en el análisis y diseño de estas estructuras puede generar una sobreestimación de las solicitaciones estructurales y por consecuencia una sobredimensión de los sistemas estructurales y más importante aún, del sistema de aislación sísmica.

Esta tesis busca estudiar y comprender los efectos que tiene en la respuesta estructural, más específicamente a nivel de aceleraciones de pisos, de una estructura con sistema de aislación sísmica al considerar u omitir los efectos de la interacción suelo-estructura. Esto se materializa con el desarrollo de 4 modelos de la misma estructura en el software ETABS en donde se consideran y omiten el sistema de aislación sísmica y la interacción suelo estructura. De esta forma se tienen 2 modelos con aislación sísmica y 2 modelos sin protección sísmica basal, en los cuales se omiten y consideran los efectos SSI. La interacción suelo-estructura se aborda mediante el método de subestructuras en donde se desacoplan los efectos a modo de simplificación en los modelos.

5.1 Sistema Estructural

La estructura seleccionada para esta investigación corresponde a un edificio de tipo hospitalario, con un sistema estructural de marcos de hormigón armado. Cuenta con total de 6 pisos, de los cuales dos de estos son subterráneos. Un ancho de 32 metros y un largo de 64 metros, resultando en un área en planta de 96 metros cuadrados. Además, se considera una altura entre pisos de 4.5 metros. Se considerando dos tipos de estructuras con las características mencionadas: una con aislación sísmica a nivel de fundación y otra sin sistema de protección sísmica. Permitiendo de esta forma evaluar las diferencias en la respuesta estructural con y sin sistema de protección sísmica de la misma estructura. Como se mencionó, la estructura se proyecta de hormigón armado, con las siguientes propiedades:

Tabla 5-1: Propiedades de hormigón armado considerado para el caso de estudio.

Peso Específico [kg/m ³]	2,500
Resistencia a la compresión [kg/cm ²]	300
Esfuerzo de Fluencia acero de refuerzo [kg/cm ²]	4,200
Módulo de Elasticidad del concreto [kg/cm ²]	238,752
Módulo de Poisson	0.2

Aunque la incorporación de aisladores sísmicos implica que el sistema estructural principal (columnas y vigas) opere predominantemente en el rango elástico, se definieron para ambos prototipos estructurales columnas cuadradas de 80×80 cm², armadas con 4 barras longitudinales de Ø28 mm

ubicadas en las esquinas de la sección transversal, y 16 barras de $\varnothing 22$ mm distribuidas equitativamente en los lados. Las vigas, comunes a ambos modelos, presentan una sección transversal de 50×70 cm², con doble armadura superior compuesta por $4\varnothing 28$ mm + $4\varnothing 25$ mm y una armadura inferior de $4\varnothing 25$ mm. Esta configuración busca responder adecuadamente a las solicitaciones combinadas de cargas gravitacionales y sísmicas, especialmente en las zonas de conexión viga-columna.

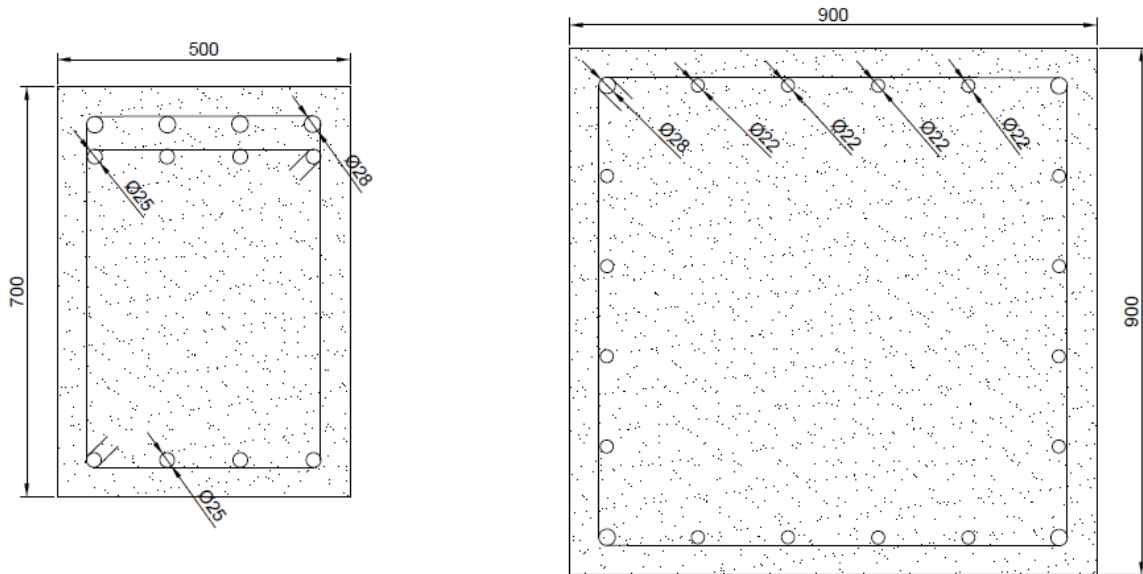


Figura 9: Secciones transversales de vigas y columnas modeladas.

5.2 Descripción de Modelos

Para este estudio se considera utilizar la herramienta FNA, (por su nombre en inglés *Fast-Nonlinear Analysis*) para un análisis de Tiempo-Historia. Este método resulta ser eficiente a la hora de utilizarlo para sistemas estructurales que son primariamente lineales-elásticos, con no linealidad concentrada en pocos elementos, como es el caso de esta investigación donde se considera la no linealidad de la respuesta de los aisladores elastoméricos solamente.

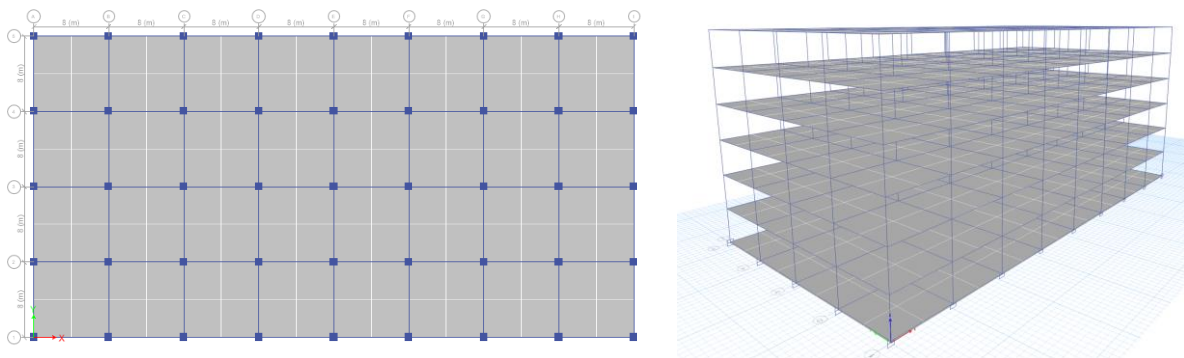


Figura 10: Modelo estructural realizado en software ETABS.

En ETABS, el modelado de vigas y columnas de hormigón armado se realiza a través de elementos de tipo "frame" o barra, que representan los miembros estructurales en un sistema tridimensional. Para

vigas y columnas, se definen las secciones transversales utilizando las propiedades geométricas y materiales correspondientes al hormigón armado, incluyendo el tipo de concreto y las características de refuerzo longitudinal y transversal. Estos elementos "frame" permiten asignar condiciones de apoyo, cargas y restricciones, lo que facilita el análisis estructural.

5.2.1 Modelo Suelo

Para simplificar el complejo comportamiento del suelo alrededor de la estructura y siguiendo con la metodología de desacople de los efectos de la interacción suelo estructura, para la representación de los efectos inerciales en los modelos de ETABS, se emplean un sistema de resortes, los cuales mediante las formulaciones definidas en el apartado 4.5 representan las propiedades esenciales del suelo.

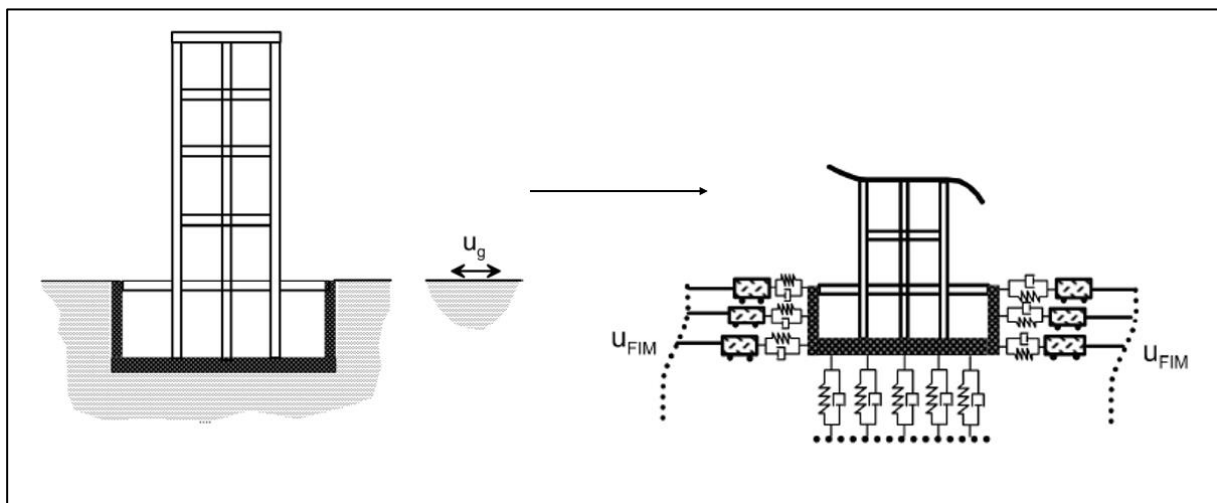


Figura 11: Esquema de representación de resortes y amortiguadores equivalentes del suelo.

El comportamiento dinámico del suelo se representa mediante constantes de rigidez y amortiguamiento. Estas constantes simulan la rigidez efectiva y la disipación de energía que ocurre en un semi-espacio infinito. Se define una densidad del suelo $\rho=2,000$ (kg/m³), un coeficiente de Poisson de $\nu=0.35$ y un valor de velocidad de onda de corte promedio de 328 (m/s), este último valor surge del proceso de selección se registros el cual se explica de mejor forma en el acápite 5.2.2.

Para modelar los efectos inerciales también es necesario conocer las dimensiones de las fundaciones de la estructura, para fundaciones empotradas, las funciones de impedancia (definidas en el capítulo 4.5) se ajustan considerando tanto la rigidez adicional debido al suelo circundante a la fundación como el amortiguamiento que este suelo alrededor genera. Esto supone que los valores de rigidez son mayores en comparación con casos donde las fundaciones son superficiales, debido a la resistencia lateral generada. Los parámetros geométricos considerados para modelar el suelo son los siguientes:

Tabla 5-2: Parámetros geométricos considerados para el modelamiento del suelo.

Largo Fundación L [m]	64.0
Ancho Fundación A [m]	32.0
Prof. de Empotramiento D [m]	10.5
Prof. de Empotramiento Efectiva de Contacto d [m]	7.88

El módulo de corte máximo del suelo estudiado se obtiene con la densidad del suelo y la velocidad de onda de corte definidas con anterioridad, obteniendo así:

$$G_0 = \rho \cdot V_{s30}^2 = 215 \text{ [MPa]}$$

Este parámetro representa la rigidez del suelo al inicio de la curva esfuerzo-deformación y como se menciona en capítulos anteriores para esta investigación permite obtener un valor teórico del módulo de corte efectivo utilizando la Tabla 4-2, se obtiene un valor de $G = 88.21 \text{ [MPa]}$.

Finalmente, para obtener la característica dinámica de estas constantes, se utiliza la frecuencia angular del primer modo en cada dirección de análisis. Los parámetros dinámicos del suelo se ajustan mediante la frecuencia adimensional a_0 . Este parámetro controla cómo la frecuencia angular afecta la rigidez y el amortiguamiento en el suelo. A valores altos de a_0 (frecuencias altas o grandes dimensiones de fundación), el suelo se comporta de forma más flexible, lo cual se incorpora en las formulaciones mediante factores de ajuste a la rigidez y amortiguamiento. Para efectos de esta investigación se considera solo una frecuencia angular, y no el rango completo del contenido de frecuencias de cada sismo evaluado, sino que se considera la frecuencia predominante de la estructura, enfocándose en el primer modo de vibración en cada dirección, el cual suele dominar la respuesta dinámica del sistema completo. De esta forma las frecuencias consideradas para cada modelo son:

$$\omega_{Asilada-Horizontal} = \frac{2\pi}{T_{XY}} = \frac{2\pi}{3.6} = 1.745 \left[\frac{rad}{s} \right]$$

$$\omega_{Base Fija-Horizontal} = \frac{2\pi}{T_{XY}} = \frac{2\pi}{1.32} = 4.76 \left[\frac{rad}{s} \right]$$

$$\omega_{Asilada-Vertical} = \frac{2\pi}{T_Z} = \frac{2\pi}{0.16} = 39.27 \left[\frac{rad}{s} \right]$$

$$\omega_{Base Fija-Vertical} = \frac{2\pi}{T_Z} = \frac{2\pi}{0.16} = 39.27 \left[\frac{rad}{s} \right]$$

Por otra parte, considerando la elevada rigidez vertical que aportan los aisladores sísmicos a la estructura en los modelos que los incluyen, se considera el mismo valor de frecuencia angular en la dirección vertical tanto para las estructuras aisladas como fijas.

Tabla 5-3: Parámetros de rigidez y amortiguamiento dinámicos considerados para modelamiento del suelo.

Modelo	Parámetro	Dirección X	Dirección Y	Dirección Z
Base Aislada	Rigidez $\times 10^{10}$ [N/m]	1.3964	1.5903	2.1677
	Amortiguamiento $\times 10^9$ [N-s/m]	1.2886	1.4841	1.6557
Base Fija	Rigidez $\times 10^{10}$ [N-s/m]	1.3964	1.5903	2.1677
	Amortiguamiento $\times 10^9$ [N-s/m]	1.2886	1.4841	1.6557

5.2.2 Modelo Sistema de Aislación

Los aisladores sísmicos elastoméricos con núcleo de plomo (LRB por sus siglas en inglés *Lead Rubber Bearing*) se consideran en la base de la estructura, entre los cimientos y la estructura, se proyecta que cada columna de la estructura descansa en un aislador. Cada aislador actúa como una conexión flexible entre el suelo y la superestructura, permitiendo la rotación y desplazamiento controlado de la base del edificio.

En ETABS, el comportamiento no lineal del aislador se puede modelar mediante el elemento *Links* del tipo *Rubber Isolator*, en donde es importante definir el módulo de rigidez inicial y post-elástico, la capacidad de desplazamiento, la rigidez horizontal y la capacidad de disipación de energía del núcleo de plomo. Para los modelos que consideran protección sísmica basal se consideran las siguientes características geométricas y propiedades de desempeño:

Tabla 5-4: Propiedades Aislador LRB.

Diámetro Exterior [mm]	750
Grosor total de caucho [mm]	165
N° de capas de caucho	34
Espesor capas de caucho [mm]	4.85
Carga de Fluencia [kN]	131
Rigidez Inicial [$\times 10^3$ kN/m]	10.6
Rigidez Post Fluencia [$\times 10^3$ kN/m]	1.06
Rigidez Vertical [$\times 10^3$ kN/m]	3200

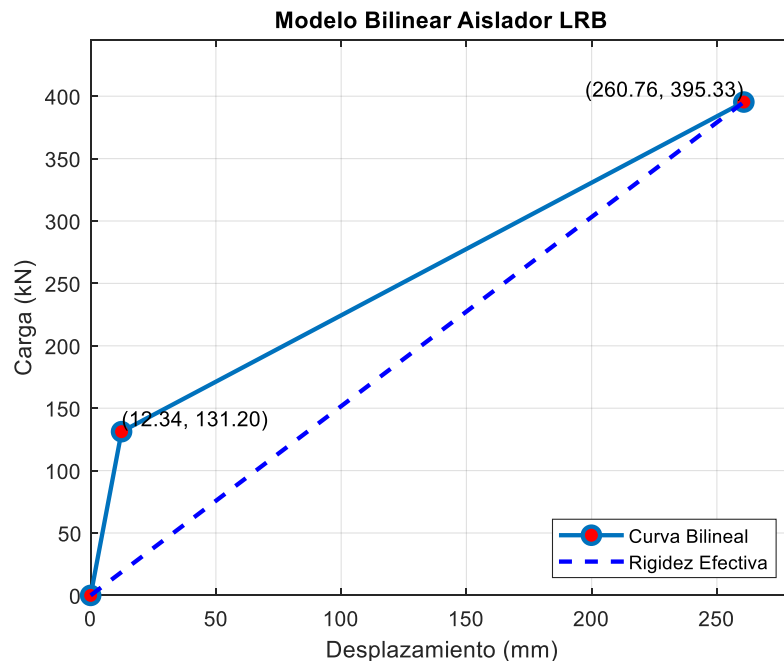


Figura 12: Modelo Bilineal de aislador elastomérico con núcleo de plomo considerado para los modelos.

5.2.3 Registros Sísmicos

Se realizó una selección de 11 registros, utilizando el método de selección de Escalamiento por forma Espectral, el cual consiste en realizar un escalado de los espectros de respuesta obtenidos para cada registro, minimizando las diferencias (al cuadrado) con el espectro de diseño de la normativa NCh2745 considerando un suelo de fundación tipo III. Se limitó el factor de escalado de registro al rango de 0.01-4, con la finalidad de no perder información característica de cada registro. Además, el rango de periodos considerados para el escalado de los espectros de respuesta es de 0-5 segundos, como se puede observar en la Figura 13.

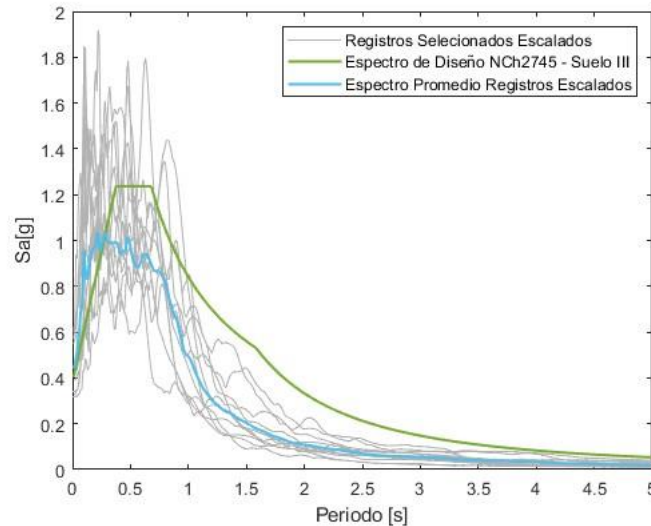


Figura 13: Espectros de respuesta obtenidos de la selección de registros y posterior escalado por forma espectral, considerando un coeficiente de amortiguamiento igual a un 5%.

Se realiza un filtrado de estas señales sísmicas en donde se identifican las componentes horizontales y verticales de los sismos seleccionados, con el objetivo de realizar el procesamiento para la integración de los efectos cinemáticos de la interacción suelo estructura, en los casos y/o modelos en que corresponda este procesamiento. Para la integración de los efectos cinemáticos, se realiza la reducción para todas las componentes (horizontales y verticales) de la señal sísmica mediante el algoritmo de procesamiento definido en el acápite 4.4.1.

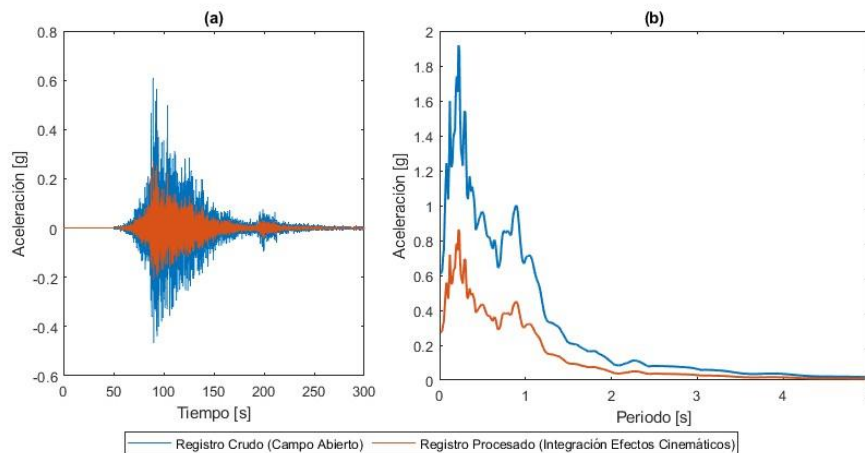


Figura 14: Comparación del registro sísmico N°4 en campo libre versus el mismo registro procesado con integración de los efectos de interacción cinemática. (a) Aceleraciones del registro sísmico. (b) Aceleraciones espectrales.

6 Resultados y discusión

El análisis de aceleraciones de piso se realiza en tres puntos por losa de la estructura; centro, viga perimetral y esquina en la unión viga-columna, tal como se muestra en la Figura 15. Estos puntos se evalúan en cada nivel para todos los modelos en ETABS.

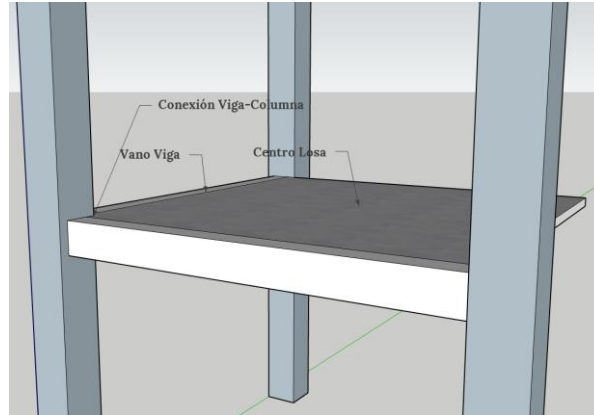


Figura 15: Esquema con la ubicación de puntos en que se analiza la respuesta estructural.

Además, con el objetivo de facilitar la comprensión de los resultados obtenidos, la Figura 16 presenta un esquema en elevación con los puntos de medición considerados. En ella se indica en qué modelos, según sus características, el nivel de fundación corresponde al piso más bajo de la estructura, y en cuáles se encuentra por debajo del sistema de aislación sísmica.

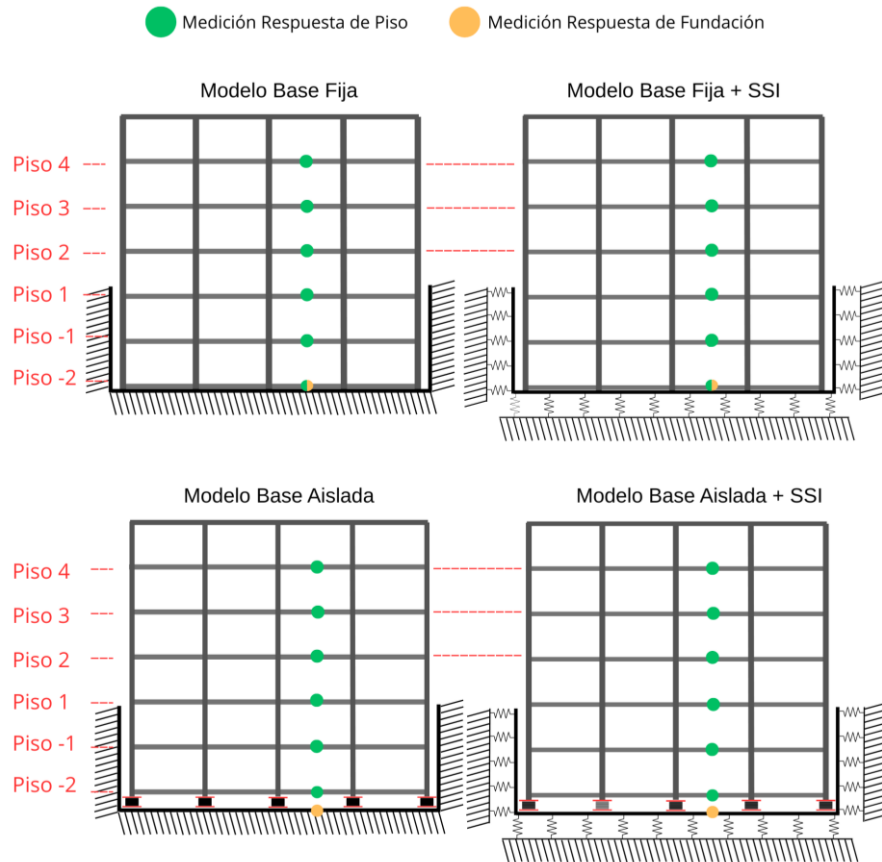


Figura 16: Ilustración en 2D de los puntos de mediciones de los resultados analizados.

6.1 Aceleraciones horizontales de piso

En la Figura 17 se presentan las aceleraciones horizontales promedio obtenidas luego de evaluar los 11 registros de aceleraciones. Se presentan tres gráficos, cada uno correspondiente a las aceleraciones promedio registradas en una ubicación específica de la losa.

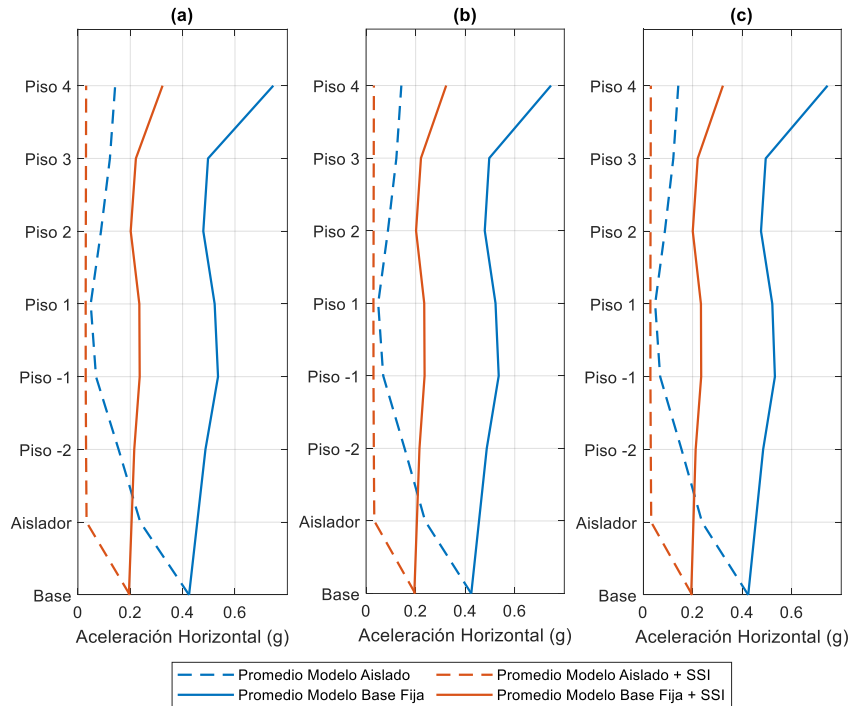


Figura 17: Aceleraciones de piso horizontales promedio medidas: (a) Al centro de la losa (b) A la mitad del vano de la viga (c) En la unión viga-columna.

La Figura 17 muestra que las aceleraciones horizontales promedio de cada uno de los modelos entre los diferentes puntos de medición (Figura 17a, 17b y 17c) no varía significativamente. La geometría de la estructura tiene influencia en este fenómeno ya que estructuras con geometrías regulares y simétricas (como es el caso), no generan concentraciones de masas en puntos específicos, lo que favorece a una respuesta uniforme a lo largo y ancho del piso. De esto se puede considerar que para este análisis basta con considerar la respuesta en solo un punto (de interés) del piso, ya que los resultados no difieren significativamente.

Si se compara la respuesta obtenida entre los modelos con sistema de aislación sísmica (líneas discontinuas) versus los modelos que se omitía este sistema de protección (líneas continuas), se puede observar una notable diferencia entre las aceleraciones promedio, diferencias esperables debido a los efectos del correcto funcionamiento de los sistemas de aislación basal.

Al comparar los modelos en que se aplican los efectos de la interacción suelo-estructura, se puede notar que el PGA (del inglés, *Peak Ground Acceleration*) es menor que en los modelos que no consideran este fenómeno, esto debido a la integración de los efectos cinemáticos en los registros sísmicos lo que genera una disminución en la señal de aceleraciones y por consiguiente menor excitación sísmica en los modelos.

Finalmente se puede notar los efectos en las aceleraciones horizontales la aplicación de aisladores sísmicos donde se reduce notablemente las aceleraciones, esta reducción es mayor al comparar los modelos que no consideran los efectos de la interacción suelo estructura, donde si se considera como la respuesta “normal” al modelo *Base Fija*, cuando se integra este sistema de protección resulta en una reducción de un 95% de la respuesta, en promedio.

6.2 Aceleraciones verticales de piso

En la Figura 18, se presentan las aceleraciones verticales promedio obtenidas luego de evaluar los 11 registros de aceleraciones.

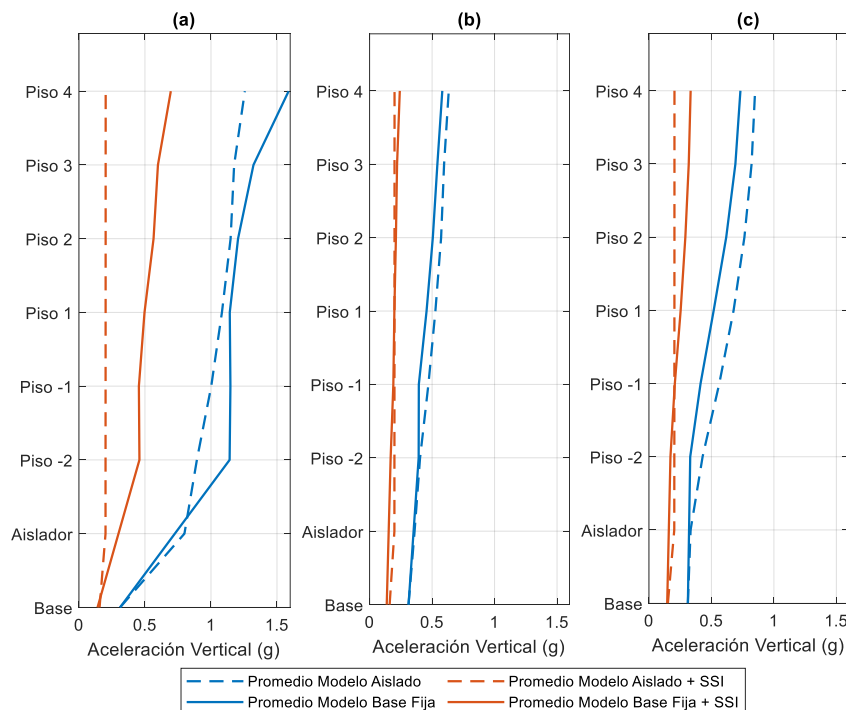


Figura 18: Aceleraciones de piso verticales promedio medidas (a) Al centro de la losa (b) A la mitad del vano de la viga (c) En la unión viga-columna.

Se puede observar de la Figura 18 que las mayores aceleraciones verticales en los modelos sin sistema de protección sísmica se registraron al centro de la losa (Figura 18a). Esto debido a la rigidez de los puntos en los cuales se consideran las mediciones ya que el centro de la losa es una zona con menor rigidez comparada con las uniones viga-columna, que están reforzadas por elementos estructurales más rígidos (vigas y columnas). Esta menor rigidez permite que la losa experimente mayores deformaciones y, por lo tanto, mayores aceleraciones verticales bajo cargas dinámicas.

Por otra parte, se puede notar que la influencia que tiene considerar la interacción suelo-estructura es más relevante en el centro de la losa de la estructura. Como se puede notar en la Figura 18a, existe una reducción considerable en las aceleraciones verticales en los modelos sin protección sísmica que consideran y no consideran el fenómeno SSI. Esta diferencia en los otros puntos de la estructura también se observa, pero no son tan exagerados.

Es posible analizar de forma preliminar el desempeño de los aisladores sísmicos también en la dirección vertical. Se observa que, si bien estos dispositivos contribuyen a reducir las aceleraciones verticales máximas en el centro de la losa, dicha reducción no se replica en los otros puntos evaluados. De hecho, en el análisis de las solicitaciones en la unión viga-columna (Figura 18c), se evidencia una leve amplificación de las aceleraciones en los modelos que no consideran los efectos de interacción suelo-estructura (SSI) en su modelación. Esta baja influencia en las respuestas máximas obtenidas se debe a que a pesar de que los aisladores basales están diseñados para reducir principalmente las fuerzas horizontales transmitidas por el sismo al desacoplar la superestructura de los movimientos del suelo, su alta rigidez vertical intenta evita la amplificación de las aceleraciones verticales.

6.3 Espectros de aceleraciones horizontales

A continuación, en la Figura 19a y la Figura 19b se presentan los espectros de aceleraciones promedio horizontales de piso de cada modelo a nivel de fundación y justo sobre la aislación, respectivamente.

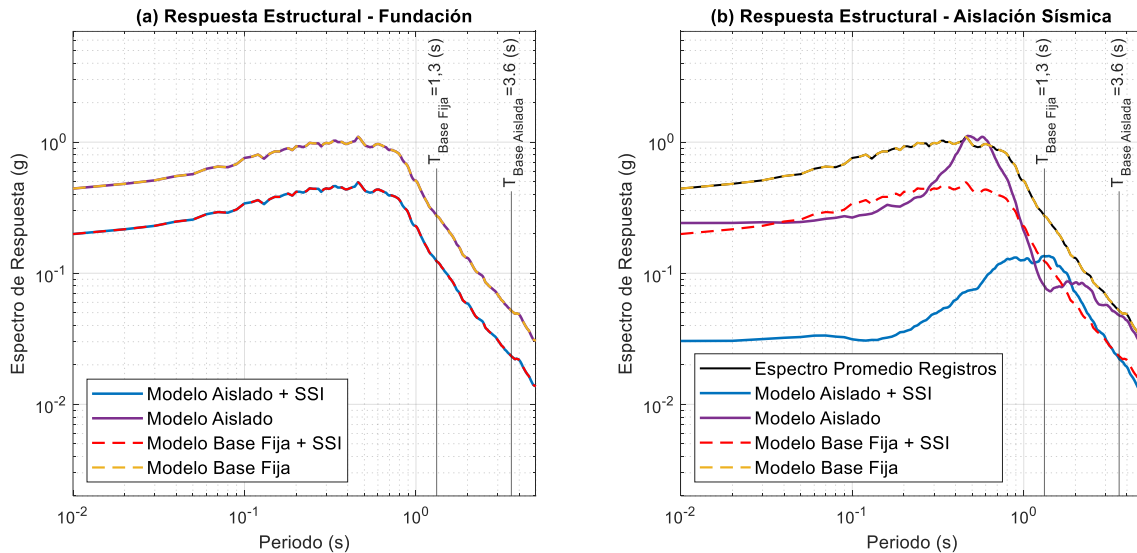


Figura 19: Espectros de aceleraciones horizontales promedios en escala logarítmica: (a) A nivel de Fundación (b) sobre nivel de aislación.

En la Figura 19a se observa que los espectros de respuesta a nivel de fundación se superponen, generando dos respuestas "globales" que se diferencian según se considere o no la interacción suelo-estructura. Como es de esperarse en este nivel, los modelos *Aislado* y *Base Fija* presentan espectros de respuesta similares, debido a que la medición se realiza en la fundación, donde los aisladores sísmicos del modelo *Aislado* todavía no filtran la excitación sísmica.

Cabe señalar que en la Figura 19a no se incluye en la leyenda el espectro de respuesta promedio derivado de la selección de registros sísmicos, ya que dicho espectro coincide con los obtenidos para los modelos con *Base Fija* y con *Aislación Sísmica*. Para evitar una sobrecarga visual en la gráfica, se optó por no incluirlo explícitamente a nivel de fundación. Esta coincidencia es esperable, considerando que el punto de evaluación de la respuesta se encuentra en la base de los aisladores (en el modelo con aislación), por lo que no se anticipa una modificación significativa de la señal sísmica que excita a las estructuras. En consecuencia, tanto los modelos *Aislado* como de *Base Fija* reflejan una respuesta espectral concordante con el espectro promedio de los registros horizontales utilizados.

En la Figura 19b se evidencia el efecto del filtrado de la señal sísmica sobre la respuesta estructural en los modelos que incorporan sistemas de protección basal. Particularmente, se observa que el modelo con aislación sísmica que además considera la interacción suelo-estructura (SSI) presenta la mayor reducción en la respuesta estructural. Esto permite apreciar la acción conjunta de ambos mecanismos: por un lado, el sistema de aislación sísmica desacopla dinámicamente la estructura del movimiento del suelo, atenuando la energía sísmica que alcanza la superestructura; y por otro, la consideración de los efectos suelo-estructura modifica las condiciones de borde en la base, lo cual influye en la respuesta global del sistema. En conjunto, estos factores contribuyen a una disminución de las demandas sísmicas sobre la estructura.

También es importante analizar como varían las respuestas estructurales a medida que se sube en los pisos de la estructura es por ellos que se presentan en la Figura 20 los espectros de aceleraciones promedio horizontales de piso de cada modelo en la planta principal de la estructura y en el Piso 4 (último piso) , respectivamente.

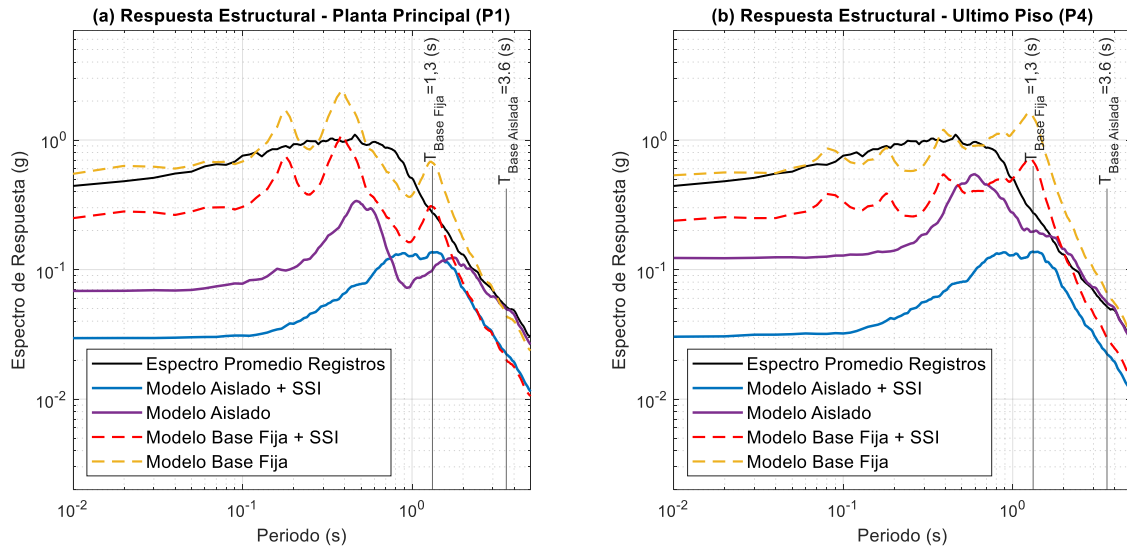


Figura 20: Espectros de aceleraciones horizontales promedios en escala logarítmica: (a) En planta principal (P1) (b) En último piso (P4).

En la Figura 20a se observa que, en los niveles superiores de las estructuras sin aislación sísmica, aparecen peaks notorios en los espectros de respuesta. Estos peaks corresponden a amplificaciones inducidas por los modos superiores de vibración, como resultado de resonancias modales entre las frecuencias naturales de dichos modos y el contenido de altas frecuencias de las señales sísmicas. Además, se identifica una resonancia en torno al período fundamental de las estructuras con base fija, lo que provoca amplificaciones significativas en la respuesta espectral respecto a la señal sísmica original.

Por otra parte, para la respuesta obtenida en el último piso (Figura 20b), se observa que las amplificaciones por los modos superiores ya no son tan marcadas, salvo al peak que se observa en torno a los 1,3 segundos, que es el periodo fundamental de las estructuras sin protección basal. Este peak en el primero modo (modo fundamental en la horizontal) que también ocurre en la planta principal pero no siendo el más importante, indica que el primer modo de vibración está entrando en resonancia con el contenido de frecuencias dominante en el set de sismos utilizados.

6.4 Espectros de aceleraciones verticales

La Figura 21a y la Figura 21b presentan los espectros de aceleraciones promedio verticales de piso de cada modelo a nivel de fundación y a nivel sobre la aislación respectivamente.

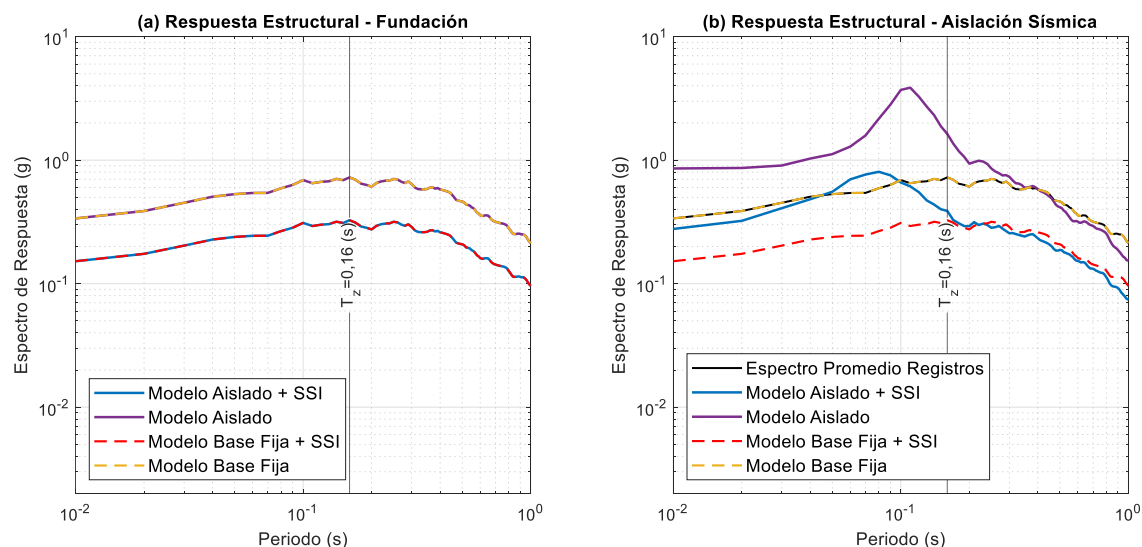


Figura 21: Espectros de aceleraciones verticales promedios en escala logarítmica: (a) A nivel de fundación (b) sobre nivel de aislación.

En la Figura 21a se observa un comportamiento similar al presentado en el espectro de respuesta horizontal a nivel de fundación (Figura 19a), donde nuevamente se evidencia una superposición de los espectros, generando dos respuestas "globales". Tal como se mencionó previamente, y en concordancia con lo mostrado en la Figura 16, este fenómeno se debe a la elevación en la cual se mide la respuesta estructural. En los modelos con base fija, la respuesta a nivel de fundación coincide con el Piso -2 de la estructura, mientras que en los modelos con aislación sísmica corresponde a la cota inferior a los aisladores, donde estos aún no influyen en la disipación de energía del movimiento sísmico. Por esta razón, la principal diferencia que da origen a estas dos respuestas globales radica en el registro sísmico que solicita a la estructura, el cual, en los casos donde se considera la interacción suelo-estructura, incluye los efectos cinemáticos asociados a dicha interacción.

En la Figura 21b se observa que los modelos que incorporan aislación sísmica presentan una amplificación de la respuesta para períodos menores a 0,3 segundos, en comparación con sus modelos equivalentes con base fija. En particular, el Modelo *Aislado + SSI* (curva azul) muestra aceleraciones que prácticamente duplican las del Modelo *Base Fija + SSI* (curva roja) en ese rango, aunque esta diferencia disminuye progresivamente al acercarse a los 0,3 segundos, siendo similares para períodos mayores. En el caso del Modelo *Aislado*, ocurre un comportamiento similar: su respuesta por debajo de los 0,3 segundos es el doble respecto al Modelo *Base Fija*. Además, se observa un peak destacado que alcanza a ser hasta seis veces mayor que el del modelo con base fija y que el espectro promedio de los registros utilizados.

Este comportamiento puede estar asociado a que los aisladores sísmicos, si bien poseen una alta rigidez vertical, no están diseñados para controlar movimientos en esa dirección, sino que están optimizados para atenuar las demandas horizontales. En consecuencia, la rigidez vertical que aportan sigue siendo menor que la de una conexión rígida, lo que introduce una mayor flexibilidad vertical en el sistema. Esta condición puede favorecer la amplificación de las aceleraciones verticales cuando existen componentes verticales significativos en el registro sísmico, especialmente en los rangos de período más bajos.

Al igual que con la respuesta en la horizontal, se presentan en la Figura 22 los espectros de aceleraciones promedio verticales de piso de cada modelo en la planta principal de la estructura y en el Piso 4 (último piso) , respectivamente.

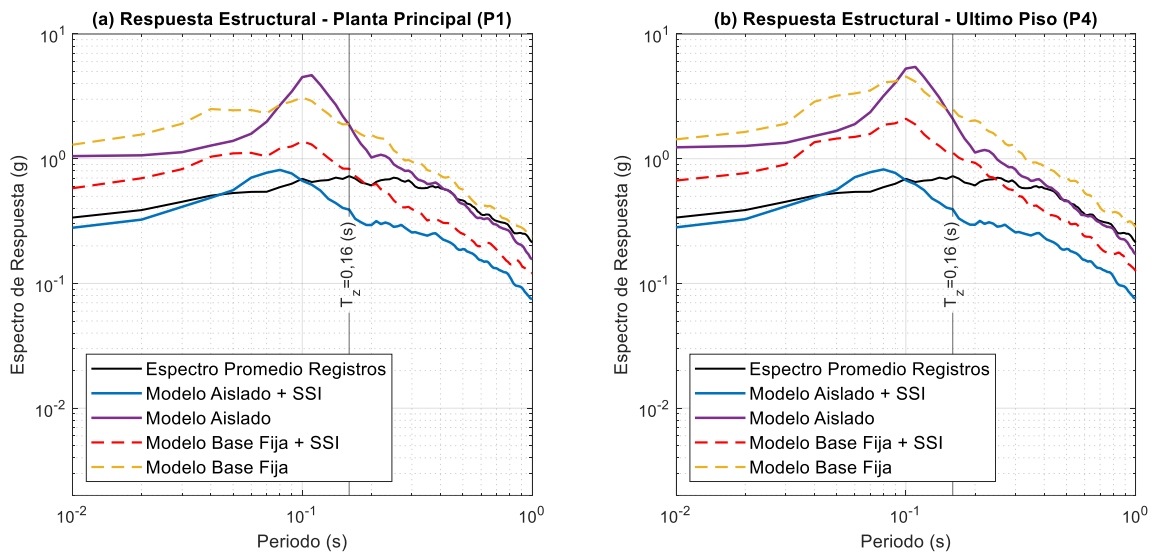


Figura 22: Espectros de aceleraciones verticales promedios en escala logarítmica: (a) En planta principal (P1) (b) En último piso (P4).

Como se observa en la Figura 22, en los modelos que incorporan aislación sísmica basal, las aceleraciones verticales no presentan variaciones significativas a lo largo de la altura de la estructura, siendo los valores prácticamente iguales a los observados en la Figura 21b, justo por sobre los aisladores. Esto indica que, en estos casos, la superestructura se comporta como un cuerpo rígido en la dirección vertical, lo que permite que las aceleraciones verticales se transmitan de manera uniforme desde la base hasta los niveles superiores, sin generar amplificaciones importantes.

Por el contrario, los modelos sin aislación sísmica sí presentan amplificaciones en la respuesta vertical a medida que se incrementa la altura, siendo el modelo con base fija convencional el que alcanza los mayores valores de aceleración vertical, similares a los observados en el modelo aislado (en su nivel más alto). En cuanto a los modelos que consideran la interacción suelo-estructura (SSI), su comportamiento vertical es análogo al observado en la componente horizontal, mostrando una respuesta atenuada en comparación con sus modelos equivalentes sin SSI. No obstante, en la Figura 22b se puede apreciar que el modelo *Base Fija + SSI* presenta aun así una amplificación en la respuesta en torno al periodo dominante en la componente vertical, en comparación con el espectro de la señal sísmica de entrada.

6.5 Ratio 1 - Análisis variabilidad entre modelos aislados y no, versus la integración de los efectos de la interacción suelos estructura.

Para comprender de manera más clara cómo varía la respuesta entre los distintos modelos, se define una razón que compara las aceleraciones obtenidas considerando y no considerando la interacción suelo-estructura en modelos con y sin aislación sísmica. Esta razón se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Ratio} = \frac{\text{Respuesta Modelo Aislado}}{\text{Respuesta Modelo Base Fija}} \quad \text{Ratio}_{SSI} = \frac{\text{Respuesta Modelo Aislado} + SSI}{\text{Respuesta Modelo Base Fija} + SSI}$$

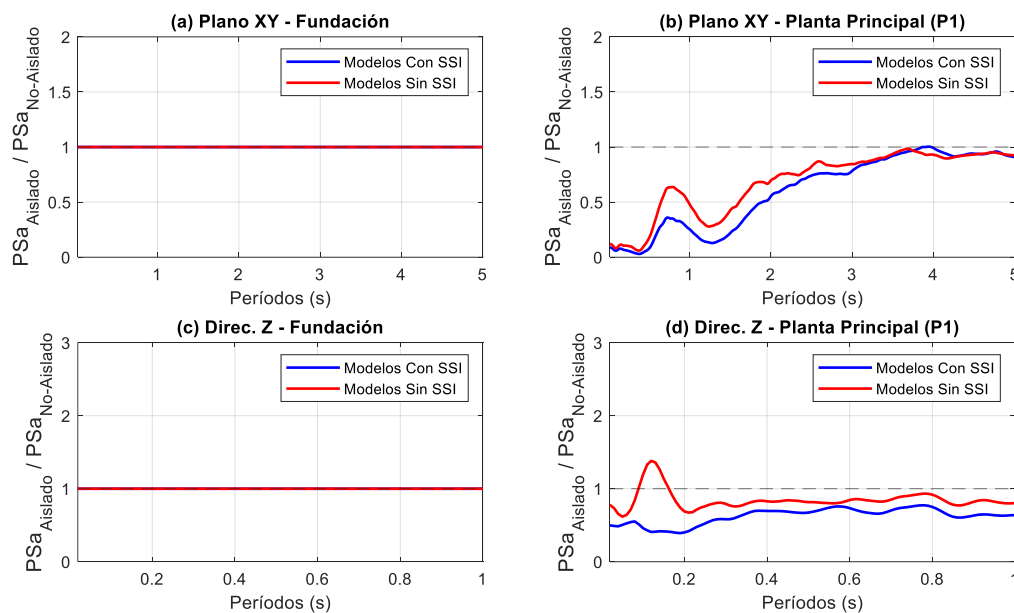


Figura 23: Ratio 1 obtenido para: (a) Horizontal – A nivel de Fundación (b) Horizontal - A nivel de Planta Principal. (c) Vertical – A nivel de Fundación. (d) Vertical - A nivel de Planta Principal.

Al analizar la respuesta en la fundación, tanto en la dirección horizontal como en la vertical (Figura 23a y Figura 23c), se observa que ambas curvas presentan un valor constante igual a 1. Esto se debe a lo explicado en el acápite 6.3, donde se menciona que en la fundación se generan dos respuestas globales, las cuales se diferencian según se consideren o no los efectos de interacción suelo-estructura (SSI). Este valor constante se debe a que, en los modelos sin SSI, se utilizan las mismas señales sísmicas, únicamente escaladas según el proceso de selección de registros. En cambio, en los modelos que sí consideran los efectos SSI, además de ser escaladas, las señales son procesadas para incorporar los efectos cinemáticos propios de esta interacción.

En la Figura 23b se observa cómo varía el cociente que compara la respuesta entre modelos con aislación y de base fija, considerando o no los efectos de interacción suelo-estructura (SSI). Se evidencia primero una reducción de la respuesta estructural en los períodos cortos y medios, atribuida al filtrado de la señal sísmica por parte del sistema de aislación. Al comparar la forma de las curvas a lo largo de los distintos períodos, se aprecia que mantienen una tendencia similar. Sin embargo, al incluir los efectos SSI, esta reducción se intensifica. Esto se refleja en que la curva roja (modelo sin SSI) permanece por sobre de la curva azul (modelo con SSI) en los períodos cortos y medios.

Finalmente, al analizar la Figura 23d que grafica la respuesta en la planta principal, es decir el Piso 1, se observa un peak en los modelos que no consideran los efectos de interacción suelo-estructura (SSI). Este peak coincide con el observado en la curva morada Figura 22a y, como se explicó previamente, está relacionado con el comportamiento del sistema de protección basal. Aunque estos sistemas se diseñan con alta rigidez vertical, esta sigue siendo menor en comparación con la que proporciona una conexión completamente rígida, lo que permite una mayor flexibilidad en la dirección vertical y da origen al peak visible en la curva roja. Según lo expuesto en el acápite 6.4, este peak presenta una mayor diferencia en el nivel inmediatamente sobre los aisladores (Piso -2), donde los modelos sin aislación no amplifican tanto su respuesta a medida que aumenta la altura de la estructura.

6.6 Ratio 2 - Análisis de la influencia de la interacción suelo estructura en la respuesta de modelos con base fija y aislada.

A continuación, se presentan los resultados del análisis de la variación en la respuesta estructural al considerar o no los efectos de la interacción suelo-estructura (SSI), mediante la normalización de los modelos con SSI respecto a sus equivalentes sin SSI, obteniendo los siguientes coeficientes:

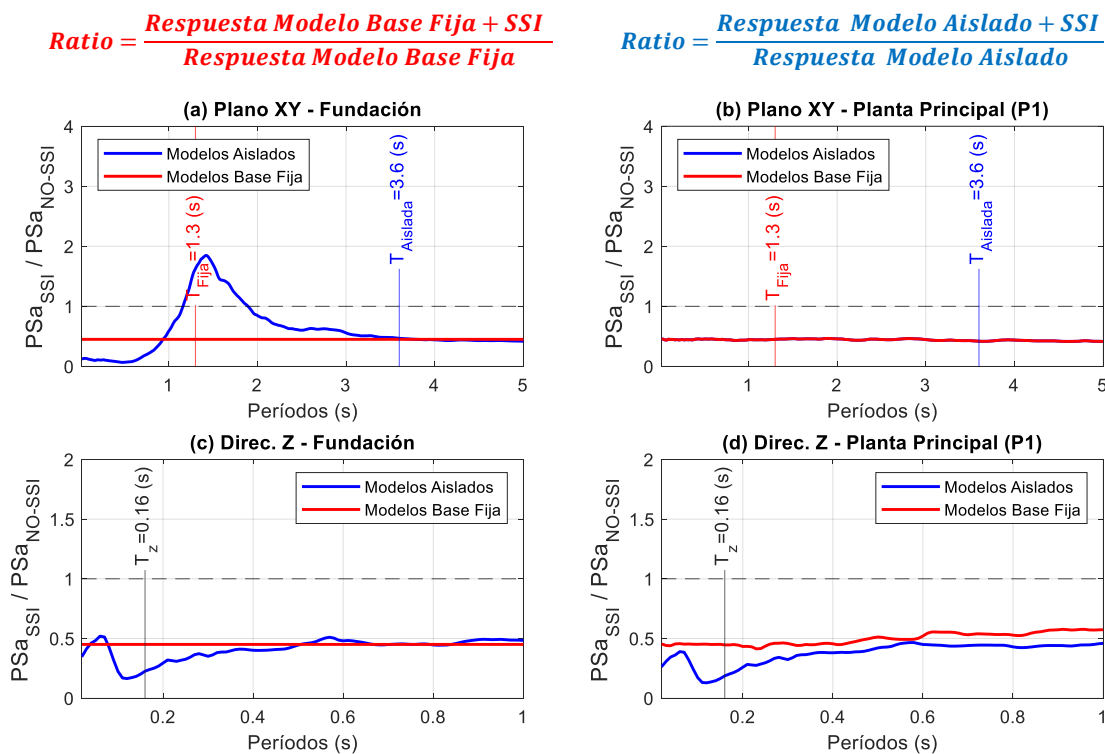


Figura 24: Ratio 2 obtenido para: (a) Horizontal – A nivel de Fundación. (b) Horizontal - A nivel de Planta Principal. (c) Vertical – A nivel de Fundación. (d) Vertical - A nivel de Planta Principal.

Este coeficiente compara la variación en la respuesta de una estructura al integrar o no los efectos de la interacción suelo-estructura. En la Figura 24a, se observa que, en el caso de los modelos aislados, la integración de los efectos SSI genera una amplificación en la fundación (sobre los aisladores sísmicos) en el rango de 1 a 2 segundos. Aunque este peak se encuentra fuera del rango del modo fundamental de la estructura aislada en esa dirección, es importante destacarlo, ya que podría generar sobrestimaciones en la respuesta estructural a nivel sobre los aisladores. Esta amplificación se limita a este nivel, lo que sugiere que, efectos locales de interacción entre los resortes modelados (para representar los efectos SSI) y los aisladores sísmicos. En los pisos superiores al nivel de aislación (Figura 24b), el coeficiente entre los modelos se mantiene constante en torno a un valor cercano a los 0,45, lo que indica una predominancia de los efectos cinemáticos de la interacción suelo estructura, en la respuesta de los modelos aislados.

Por otra parte, la curva roja horizontal constante observada en las Figura 24a y Figura 24b también está relacionada con los registros de aceleraciones utilizados en los modelos. Como se menciona en el acápite 4.4.1, los registros de aceleraciones en campo libre fueron filtrados para considerar los efectos de la interacción cinemática dentro de la interacción suelo-estructura (SSI). Este filtrado reduce la señal sísmica en función de la frecuencia, con un límite máximo de reducción del 55%. Esta reducción se refleja en las figuras mencionadas, donde el coeficiente constante de 0.45 corresponde precisamente a esta disminución del 55%.

En la Figura 24c se observa una mayor reducción de la respuesta en los modelos aislados, donde el coeficiente en la dirección vertical, para rangos cercanos al período fundamental de la estructura, es menor en comparación con los modelos en base fija. Esto indica que, en este caso particular, la interacción suelo-estructura (SSI) genera mayores reducciones en la respuesta vertical de los modelos aislados para períodos inferiores a 0.5 segundos. Además, se destaca que, a medida que el período aumenta, la tendencia de los modelos aislados es acercarse al valor constante obtenido en los modelos con base fija.

Finalmente, al comparar las Figura 24c y 21d, se observa que en los pisos superiores se mantiene la tendencia de que, para períodos mayores a 0,5 s, la influencia de la integración de los efectos SSI en los modelos es similar, con una reducción de la respuesta cercana al 50%. Además, en períodos cercanos al modo fundamental en la dirección vertical, no se observan peaks o amplificaciones. Por el contrario, para las estructuras aisladas, se percibe un mayor efecto de la interacción suelo-estructura en la reducción de la respuesta. Esta reducción se mantiene en los pisos superiores a la planta principal, los cuales no están graficados, pero sí han sido verificados.

6.7 Ratio 3 – Coeficiente de modificación de respuesta por piso

A continuación, en la Figura 25 y Figura 26 se presenta la variación de la respuesta estructural por piso para cada modelo en relación a la respuesta a nivel de fundación de cada modelo. La Figura 25 muestra la respuesta en la dirección horizontal, mientras que la Figura 26 corresponde a la dirección vertical. Esto permite visualizar cómo varía la respuesta en los pisos superiores de la estructura y cómo influyen tanto la integración de la protección sísmica como los efectos de la interacción suelo-estructura (SSI).

$$Ratio_N = \frac{Respuesta\ Modelo\ Piso\ N}{Señal\ Sísmica\ en\ la\ Fundación}$$

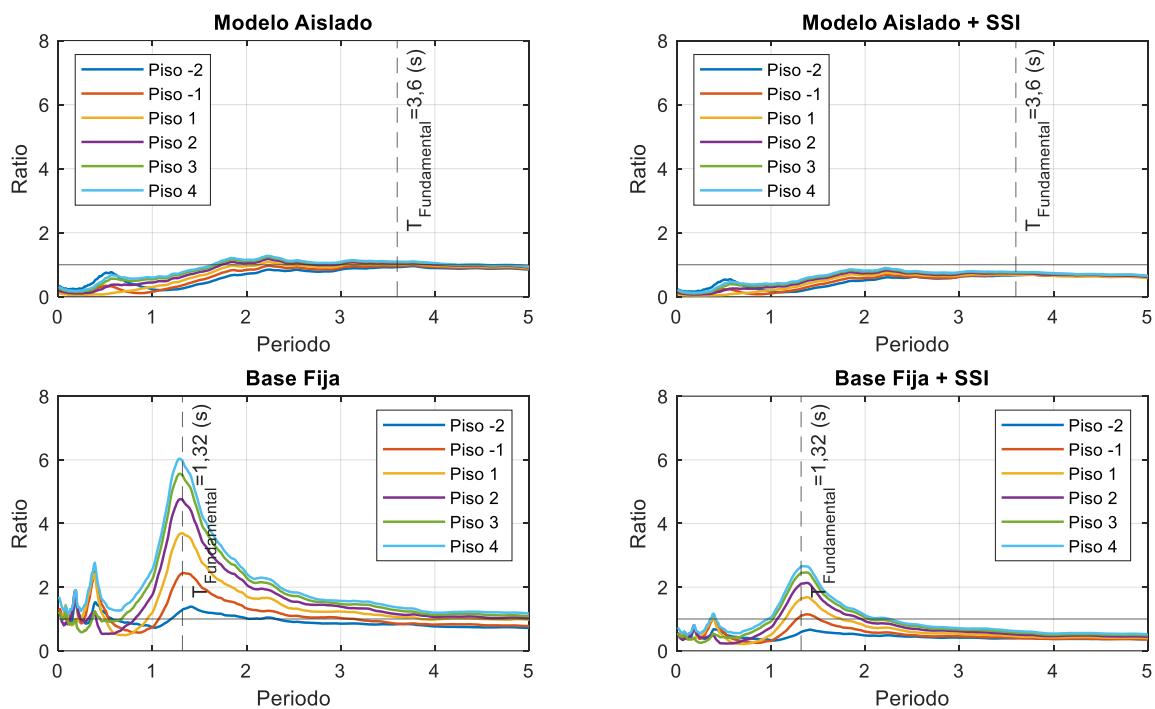


Figura 25: Coeficiente de modificación de respuesta por piso para cada modelo en la dirección horizontal.

A partir de las respuestas horizontales de cada modelo (Figura 25), se observa que la inclusión de los efectos de interacción suelo-estructura tiende a reducir la demanda sísmica por piso. En el caso del modelo con *Base Fija + SSI*, se atenúan las amplificaciones en los pisos superiores en comparación con el modelo con *Base Fija*. Por otro lado, en los modelos con aislación sísmica, la incorporación de SSI no solo disminuye la respuesta en cada nivel, sino que además contribuye a una distribución aún más uniforme en términos de aceleraciones, reforzando el comportamiento de cuerpo rígido característico de estructuras aisladas, resultando en una respuesta estructural más uniforme debido a la combinación de ambos mecanismos de atenuación.

Al analizar la variación de la respuesta en los modelos sin aislación sísmica, también se evidencia una amplificación de la respuesta en torno al modo fundamental de la estructura, lo que implica mayores demandas de aceleración, especialmente en los niveles superiores. Esta resonancia también se presenta en el modelo que incorpora los efectos SSI, aunque con menor impacto debido a la atenuación que estos efectos generan.

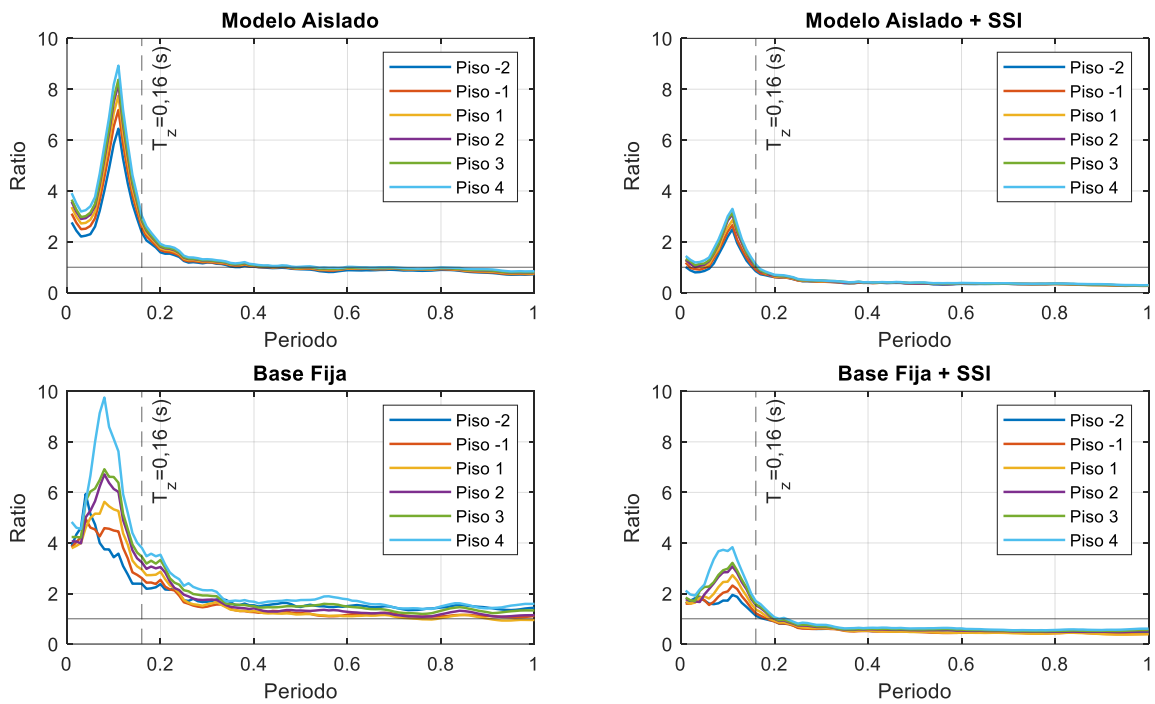


Figura 26: Coeficiente de modificación de respuesta por piso para cada modelo en la dirección vertical.

En la vertical, se puede observar una tendencia similar al comportamiento analizado en la componente horizontal, donde en los modelos donde se considerando los efectos SSI existe una reducción considerable en la respuesta.

Por otra parte, se observa en todos los modelos un peak o amplificación de la respuesta en torno a los 0,1 segundos, siendo más pronunciado en los modelos sin efectos SSI, donde en el último piso de la estructura las amplificaciones alcanzan hasta 9-10 veces la señal sísmica utilizada como input. Este comportamiento se presenta independientemente de la presencia de aislación sísmica basal. Exponiendo nuevamente con este coeficiente que la influencia de los aisladores sísmicos en la reducción de la respuesta vertical es limitada. Como resultado, las aceleraciones verticales no se ven significativamente atenuadas y pueden ser similares a las del suelo, e incluso amplificarse en ciertos casos debido a efectos de resonancia.

Finalmente, en la dirección vertical, la integración de sistemas de protección sísmica en la estructura reduce la variabilidad de la respuesta entre pisos, como se puede notar al comparar las curvas del modelo *Aislado* y *Base Fija*, tal como ocurre en la componente horizontal.

6.8 Esfuerzos axiales en aisladores

A continuación, se presentan los esfuerzos axiales en los aisladores en la Figura 27. Para evitar los efectos de frontera en los bordes o esquinas de la estructura, se analizan los aisladores ubicados en el eje E, tal como se ilustra en la Figura 10. Además, los esfuerzos calculados se han convertido en presiones, asumiendo una distribución uniforme sobre el área del aislador, definida a partir de su diámetro exterior. Las fuerzas axiales debidas a las cargas gravitacionales se encuentran integradas en los resultados obtenidos.

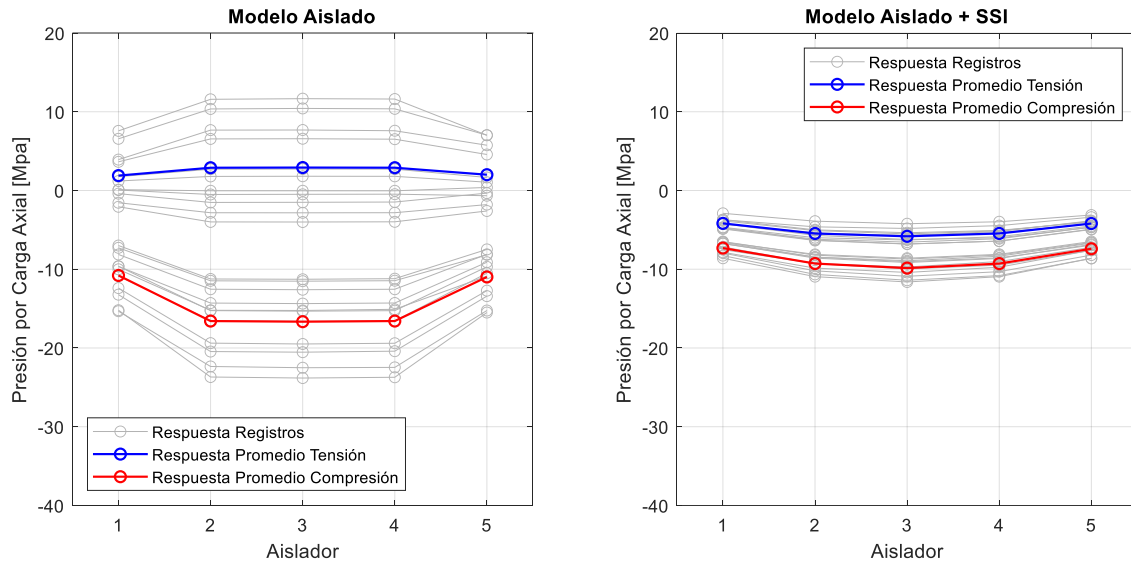


Figura 27: Presiones de aisladores obtenidas a partir de las cargas axiales resultantes del análisis no lineal realizado en ETABS para los modelos que consideran sistemas de protección sísmica.

En los resultados del modelo Aislado se identificaron tensiones que superan 1 MPa, valor límite de sollicitación establecido por el fabricante para los aisladores utilizados. La distribución de fuerzas entre los dispositivos es relativamente uniforme, sin grandes diferencias entre ellos. Sin embargo, en el caso de las compresiones, se evidencian mayores sollicitaciones en los aisladores ubicados en la zona central de la estructura. Aun así, el valor promedio de compresión en los aisladores interiores no supera los 20 MPa.

Cabe señalar que los aisladores fueron modelados con un comportamiento lineal elástico en la dirección vertical. Sin embargo, en la realidad, estos dispositivos presentan un comportamiento altamente no lineal en dicha dirección, además de una capacidad de resistencia a tracción inferior a la registrada en los resultados numéricos. Por lo tanto, las tensiones verticales alcanzadas en el modelo no se materializarían en la práctica, lo que debe ser considerado al interpretar los resultados.

En los resultados del modelo Aislado + SSI se observan tensiones negativas, correspondientes a esfuerzos de compresión. Además, se observan compresiones máximas significativamente menores que las registradas en el modelo Aislado, lo cual es coherente con la teoría estructural, ya que la inclusión de la interacción suelo-estructura introduce una mayor flexibilidad en la base de la estructura. Esta flexibilidad adicional permite una redistribución de esfuerzos y una mayor disipación de energía a través del movimiento relativo entre la estructura y el terreno, reduciendo así la demanda sobre los elementos de aislamiento. Si bien esta disminución de fuerzas no necesariamente implica una inconsistencia en el modelo, sí destaca la importancia de una adecuada caracterización del suelo y de los parámetros de los resortes, ya que una representación poco precisa podría subestimar la demanda real sobre los aisladores.

6.9 Drift entre pisos

En la Figura 28 se muestran los drifts entre pisos para las direcciones X e Y que se generan en cada uno de los modelos.

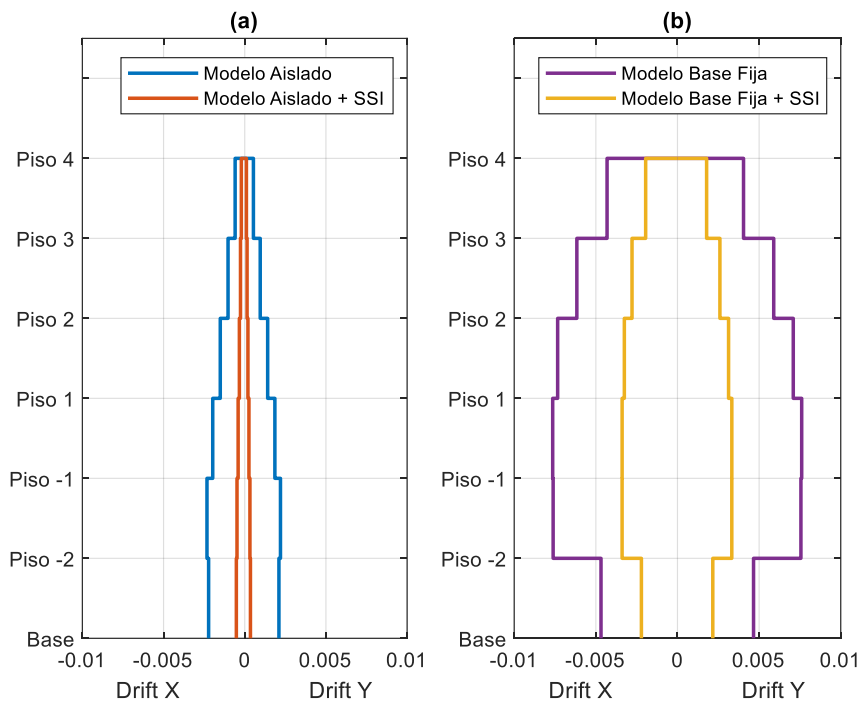


Figura 28: Drifts entre pisos de las estructuras (a) Con aislación sísmica. (b) Sin aislación sísmica.

Es importante señalar que, en el análisis de estructuras con sistemas de protección basal como los aisladores sísmicos, las derivas de piso no se consideran como un parámetro relevante dentro del sistema de aislación. Esto se debe a que estos dispositivos están diseñados para experimentar grandes deformaciones sin comprometer su desempeño. Por lo tanto, resulta más adecuado evaluar el desplazamiento total del sistema de aislación respecto al suelo, ya que este valor representa de forma más precisa la demanda mecánica sobre los aisladores. A partir de los drifts promedio obtenidos para los modelos con aislación sísmica y considerando la altura de los aisladores definida en el caso de estudio, se estimó el desplazamiento promedio de estos dispositivos. Los resultados indican valores de 62 mm y 33 mm para los modelos que omiten e incorporan los efectos de interacción suelo-estructura, respectivamente. En ambos casos, los desplazamientos superan el valor de fluencia del sistema, pero se mantienen muy por debajo del límite de diseño de 260 mm, confirmando un desempeño seguro del sistema de aislamiento.

De la Figura 28 se desprende que la incorporación de los efectos de interacción suelo-estructura (SSI) genera, en general, una reducción significativa en las derivas de piso. Para las estructuras sin aislación sísmica (Figura 28b), se observa una disminución del 55 % en las derivas en todos los niveles, en comparación con el modelo que no considera SSI. En las estructuras con aislación, esta reducción se refleja en los desplazamientos máximos de los aisladores, los cuales disminuyen en un 47 % respecto al modelo aislado sin SSI. Además, al analizar las derivas de piso en los modelos aislados, se aprecia que el modelo con SSI presenta drifts aproximadamente cinco veces menores que el modelo que omita estos efectos, confirmando así el impacto que introduce la interacción suelo-estructura en la respuesta global.

7 Conclusiones y comentarios

A partir de los datos obtenidos de drifts, aceleraciones máximas y espectros de respuesta verticales y horizontales y los diferentes coeficientes (Ratios) analizados de los 4 modelos estudiados se logra establecer que:

- El análisis de las aceleraciones por piso y de los espectros de respuesta mostró que al considerar la interacción suelo-estructura (SSI), las aceleraciones disminuyen de forma importante, tanto en la dirección horizontal como en la vertical, especialmente en los pisos superiores. En sentido horizontal, la respuesta fue uniforme en toda la losa, mientras que en la vertical se notaron aceleraciones mayores en el centro, debido a una menor rigidez en esa zona. En términos espectrales, la combinación de SSI con aislación sísmica logró reducir la respuesta en los períodos más importantes. No obstante, en la componente vertical se observaron aumentos de aceleración cerca del primer modo en esa dirección, debido a la baja rigidez vertical de los aisladores. Esto resalta la importancia de analizar ambas componentes por separado, sobre todo en estructuras con elementos no estructurales sensibles a esta componente.
- Las razones de respuesta relativa entre modelos con y sin aislación (Ratio 1) muestran curvas de comportamiento similares en todo el rango de períodos analizado. No obstante, al incluir los efectos de SSI, dicha curva presentó valores levemente inferiores, lo que indica que este fenómeno se suma el efecto atenuador de la aislación sin alterar significativamente el patrón de comportamiento estructural, aportando mayor confianza a los modelos empleados.
- La inclusión de los efectos de interacción suelo-estructura generó una disminución considerable de la respuesta estructural, con reducciones cercanas al 50 % en los modelos con aislación sísmica. Esta tendencia se mantuvo en todos los niveles superiores, reflejando el predominio de los efectos cinemáticos en la atenuación del contenido sísmico. Si bien se detectaron amplificaciones locales a nivel de fundación, estas no se propagaron hacia la superestructura.
- El análisis del coeficiente de modificación de respuesta por piso mostró que la incorporación de los efectos SSI reduce las demandas sísmicas tanto en la dirección horizontal como vertical. En los modelos con aislación sísmica, esta integración refuerza el comportamiento de cuerpo rígido, resultando en una respuesta más uniforme por nivel. No obstante, en la componente vertical, se registraron amplificaciones importantes en torno a los 0,1 segundos, especialmente en los pisos superiores, lo que confirma la limitada efectividad de los aisladores en la reducción de aceleraciones verticales.
- El análisis de las fuerzas internas en los aisladores sísmicos evidenció que la omisión de los efectos de interacción suelo-estructura puede sobreestimar las fuerzas axiales entre 1,5 y 2 veces, en comparación con los modelos que sí los integran. Aunque estas diferencias no son extremadamente altas, pueden generar un sobredimensionamiento innecesario en el sistema de aislación, afectando la eficiencia técnica y económica del diseño estructural. Asimismo, se observó que la inclusión de SSI reduce los desplazamientos máximos de los aisladores en un 47 % y las derivas de piso en hasta cinco veces en los modelos aislados, mientras que en los modelos sin protección sísmica se observa una reducción de un 55% aproximadamente, lo que refuerza su efecto beneficioso sobre la respuesta global de la estructura.

Un punto clave de este estudio fue el análisis de las aceleraciones verticales, un aspecto poco considerado en la práctica profesional, a pesar de su impacto en elementos no estructurales sensibles como ductos o equipos médicos suspendidos. Los resultados mostraron que estas aceleraciones pueden amplificarse en estructuras con aislación sísmica, sobre todo cerca del período dominante vertical. Sin embargo, al incorporar la interacción suelo-estructura, estas ampliaciones se reducen notablemente, lo que demuestra que la SSI ayuda a no generar sobrestimaciones que podrían pasar desapercibidas en modelos más simples

El estudio en su conjunto demuestra que al considerar la interacción suelo-estructura (SSI) se evita la sobrestimación de aceleraciones, derivas y esfuerzos internos que suelen presentarse en modelos que la omiten, sin modificar de forma significativa el comportamiento relativo entre modelos. Por ello, si bien omitir estos efectos puede parecer un enfoque conservador, en la práctica puede conducir a sobrestimaciones injustificadas de demandas sísmicas, especialmente en fuerzas axiales de aisladores y aceleraciones de piso. Esto puede afectar directamente el dimensionamiento y la viabilidad económica de los sistemas de aislación, comprometiendo decisiones clave en el diseño de estructuras críticas como hospitales, donde no solo se busca evitar el colapso, sino garantizar la continuidad operacional post-sismo.

Se sugiere ampliar el estudio a distintos tipos de suelos, estructuras con variaciones en altura y masa, y considerar condiciones de borde más variadas y/o complejas, incluyendo variabilidad en el grado de empotramiento. Esto permitiría evaluar con mayor profundidad cómo influyen los efectos de la interacción suelo-estructura (SSI) utilizando enfoques simplificados, como el empleado en esta investigación. Avanzar en esa dirección contribuirá a validar y optimizar estas aproximaciones, facilitando su aplicación en etapas tempranas de diseño estructural y promoviendo su eventual incorporación en normativa técnica.

8 Referencias

- Anand, V., & Satish Kumar, S. R. (2018). Seismic Soil-structure Interaction: A State-of-the-Art Review. In *Structures* (Vol. 16, pp. 317–326). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.10.009>
- Çetin, K. Ö., Bray, J. D., Frost, J. D., Hortacsu, A., Miranda, E., Moss, R. E. S., & Stewart, J. P. (2023). *FEBRUARY 6, 2023 TÜRKIYE EARTHQUAKES: REPORT ON GEOSCIENTIFIC AND ENGINEERING IMPACTS MAY 6, 2023*. <https://doi.org/10.18118/G6PM34>
- Chaudhary, M. T. A., Abé, M., & Fujino, Y. (2001). Identification of soil–structure interaction effect in base-isolated bridges from earthquake records. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21(8), 713–725. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(01\)00042-2](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(01)00042-2)
- Furukawa, S., Sato, E., Shi, Y., Becker, T., & Nakashima, M. (2013). Full-scale shaking table test of a base-isolated medical facility subjected to vertical motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(13), 1931–1949. <https://doi.org/10.1002/EQE.2305>
- Instituto Nacional de Normalización. (2003). *NCh2745.Of2003*.
- K. Önder Çetin, Jonathan D. Bray, J. David Frost, Ayse Hortacsu, Eduardo Miranda, Robb Eric S. Moss, & Jonathan P. Stewart. (2023, May 6). *2023 Kahramanmaras, Turkey Earthquake*. https://www.geerassociation.org/index.php/component/geer_reports/?view=geerreports&layout=build&id=109
- Miranda, E., Mosqueda, G., Retamales, R., & Pekcan, G. (2012). Performance of Nonstructural Components during the 27 February 2010 Chile Earthquake. <https://doi.org/10.1193/1.4000032>, 28(SUPPL.1). <https://doi.org/10.1193/1.4000032>
- Mylonakis, G., Nikolaou, S., & Gazetas, G. (2006). Footings under seismic loading: Analysis and design issues with emphasis on bridge foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26(9), 824–853. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2005.12.005>
- SORIANO ETS ng Caminos, A., & Puertos, C. (1989). *2. Interacción suelo-estructura. Modificación del movimiento*.
- Spyrakos, C. C., Koutromanos, I. A., & Maniatakis, C. A. (2009). Seismic response of base-isolated buildings including soil–structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(4), 658–668. <https://doi.org/10.1016/J.SOILDYN.2008.07.002>
- Tongaonkar, N. P., & Jangid, R. S. (2003). Seismic response of isolated bridges with soil–structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23(4), 287–302. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(03\)00020-4](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(03)00020-4)
- Zogh, P., Motamed, R., & Ryan, K. (2021). Empirical evaluation of kinematic soil-structure interaction effects in structures with large footprints and embedment depths. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106893>

A. Apéndice 1

Tabla 8-1: Soluciones elásticas para la rigidez estática de fundaciones rígidas a nivel de superficie. Fuente: NIST (2012).

Degree of Freedom	Pais and Kausel (1988)	Gazetas (1991); Mylonakis et al. (2006)
Translation along z-axis	$K_{z, sup} = \frac{GB}{1-\nu} \left[3.1 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.75} + 1.6 \right]$	$K_{z, sup} = \frac{2GL}{1-\nu} \left[0.73 + 1.54 \left(\frac{B}{L} \right)^{0.75} \right]$
Translation along y-axis	$K_{y, sup} = \frac{GB}{2-\nu} \left[6.8 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.65} + 0.8 \left(\frac{L}{B} \right) + 1.6 \right]$	$K_{y, sup} = \frac{2GL}{2-\nu} \left[2 + 2.5 \left(\frac{B}{L} \right)^{0.85} \right]$
Translation along x-axis	$K_{x, sup} = \frac{GB}{2-\nu} \left[6.8 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.65} + 2.4 \right]$	$K_{x, sup} = K_{y, sup} - \frac{0.2}{0.75-\nu} GL \left(1 - \frac{B}{L} \right)$
Torsion about z-axis	$K_{zz, sup} = GB^3 \left[4.25 \left(\frac{L}{B} \right)^{2.45} + 4.06 \right]$	$K_{zz, sup} = GJ_i^{0.75} \left[4 + 11 \left(1 - \frac{B}{L} \right)^{10} \right]$
Rocking about y-axis	$K_{yy, sup} = \frac{GB^3}{1-\nu} \left[3.73 \left(\frac{L}{B} \right)^{2.4} + 0.27 \right]$	$K_{yy, sup} = \frac{G}{1-\nu} (I_y)^{0.75} \left[3 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.15} \right]$
Rocking about x-axis	$K_{xx, sup} = \frac{GB^3}{1-\nu} \left[3.2 \left(\frac{L}{B} \right) + 0.8 \right]$	$K_{xx, sup} = \frac{G}{1-\nu} (I_x)^{0.75} \left(\frac{L}{B} \right)^{0.25} \left[2.4 + 0.5 \left(\frac{B}{L} \right) \right]$
Notes:	<p>Axes should be oriented such that $L \geq B$.</p> <p>I_i = area moment of inertia of soil-foundation contact, i denotes which axis to take the surface around.</p> <p>$J_i = I_x + I_y$ polar moment of inertia of soil-foundation contact surface.</p> <p>G = shear modulus (reduced for large strain effects, e.g., Table 2-1).</p>	

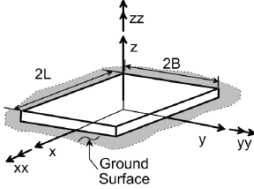


Tabla 8-2: Factores de corrección de empotramiento para la rigidez estática de fundaciones rígidas. Fuente: NIST (2012).

Degree of Freedom	Pais and Kausel (1988)	Gazetas (1991); Mylonakis et al. (2006)
Translation along z-axis	$\eta_z = \left[1.0 + \left(0.25 + \frac{0.25}{L/B} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^{0.8} \right]$	$\eta_z = \left[1 + \frac{D}{21B} \left(1 + 1.3 \frac{B}{L} \right) \right] \left[1 + 0.2 \left(\frac{A_w}{4BL} \right)^{2/3} \right]$
Translation along y-axis	$\eta_y = \left[1.0 + \left(0.33 + \frac{1.34}{1 + L/B} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^{0.8} \right]$	$\eta_y = \left(1 + 0.15 \sqrt{\frac{D}{B}} \right) \left[1 + 0.52 \left(\frac{z_w A_w}{BL^2} \right)^{0.4} \right]$
Translation along x-axis	$\eta_x \approx \eta_y$	Same equation as for η_y , but A_w term changes for $B \neq L$
Torsion about z-axis	$\eta_{zz} = \left[1 + \left(1.3 + \frac{1.32}{L/B} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^{0.9} \right]$	$\eta_{zz} = 1 + 1.4 \left(1 + \frac{B}{L} \right) \left(\frac{d_w}{B} \right)^{0.9}$
Rocking about y-axis	$\eta_{yy} = \left[1.0 + \frac{D}{B} + \left(\frac{1.6}{0.35 + (L/B)^4} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^2 \right]$	$\eta_{yy} = 1 + 0.92 \left(\frac{d_w}{B} \right)^{0.6} \left[1.5 + \left(\frac{d_w}{D} \right)^{1.9} \left(\frac{B}{L} \right)^{-0.6} \right]$
Rocking about x-axis	$\eta_{xx} = \left[1.0 + \frac{D}{B} + \left(\frac{1.6}{0.35 + L/B} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^2 \right]$	$\eta_{xx} = 1 + 1.26 \frac{d_w}{B} \left[1 + \frac{d_w}{B} \left(\frac{d_w}{D} \right)^{-0.2} \sqrt{\frac{B}{L}} \right]$
Notes:	<p>d_w = height of effective side wall contact (may be less than total foundation height)</p> <p>z_w = depth to centroid of effective sidewall contact</p> <p>A_w = sidewall-solid contact area, for constant effective contact height, d_w, along perimeter.</p> <p>For each degree of freedom, calculate $K_{emb} = \eta K_{sur}$</p> <p>Coupling Terms: $K_{emb,xy} = \left(\frac{D}{3} \right) K_{emb,x}$</p> <p>$K_{emb,yx} = \left(\frac{D}{3} \right) K_{emb,y}$</p>	

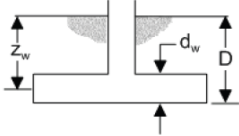


Tabla 8-3: Modificadores de rigidez dinámica y relaciones de amortiguación de la radiación para fundaciones rígidas (Adaptado por Pais y Kausel, 1988). Fuente: NIST (2012).

Degree of Freedom	Surface Stiffness Modifiers	Radiation Damping
Translation along z-axis	$\alpha_z = 1.0 - \left[\frac{\left(0.4 + \frac{0.2}{L/B}\right) a_0^2}{\left(\frac{10}{1+3(L/B-1)}\right) + a_0^2} \right]$	$\beta_z = \left[\frac{4\psi(L/B)}{(K_{z,sur}/GB)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_z} \right]$
Translation along y-axis	$\alpha_y = 1.0$	$\beta_y = \left[\frac{4(L/B)}{(K_{y,sur}/GB)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_y} \right]$
Translation along x-axis	$\alpha_x = 1.0$	$\beta_x = \left[\frac{4(L/B)}{(K_{x,sur}/GB)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_x} \right]$
Torsion about z-axis	$\alpha_{zz} = 1.0 - \left[\frac{\left(0.33 - 0.03\sqrt{L/B-1}\right) a_0^2}{\left(\frac{0.8}{1+0.33(L/B-1)}\right) + a_0^2} \right]$	$\beta_{zz} = \left[\frac{(4/3)[(L/B)^3 + (L/B)] a_0^2}{(K_{zz,sur}/GB^3) \left[\left(\frac{1.4}{1+3(L/B-1)^{0.7}}\right) + a_0^2 \right]} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{zz}} \right]$
Rocking about y-axis	$\alpha_{yy} = 1.0 - \left[\frac{0.55a_0^2}{\left(0.6 + \frac{1.4}{(L/B)^3}\right) + a_0^2} \right]$	$\beta_{yy} = \left[\frac{(4\psi/3)(L/B)^3 a_0^2}{\left(\frac{K_{yy,sur}}{GB^3}\right) \left[\left(\frac{1.8}{1+1.75(L/B-1)}\right) + a_0^2 \right]} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{yy}} \right]$
Rocking about x-axis	$\alpha_{xx} = 1.0 - \left[\frac{\left(0.55 + 0.01\sqrt{L/B-1}\right) a_0^2}{\left(2.4 - \frac{0.4}{(L/B)^3}\right) + a_0^2} \right]$	$\beta_{xx} = \left[\frac{(4\psi/3)(L/B) a_0^2}{(K_{xx,sur}/GB^3) \left[\left(2.2 - \frac{0.4}{(L/B)^3}\right) + a_0^2 \right]} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{xx}} \right]$
Notes:	Orient axes such that $L \geq B$. Soil hysteretic damping, β_s , is additive to foundation radiation damping, β . $a_0 = \omega B / V_z$; $\psi = \sqrt{2(1-\nu)/(1-2\nu)}$; $\psi \leq 2.5$	

Tabla 8-4: Modificadores de rigidez dinámica y relaciones de amortiguación de la radiación para fundaciones empotradas (Adaptado por Pais y Kausel, 1988). Fuente: NIST (2012).

Degree of Freedom	Radiation Damping
Translation along z-axis	$\beta_z = \left[\frac{4[\psi(L/B) + (D/B)(1+L/B)]}{(K_{z,emb}/GB)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_z} \right]$
Translation along y-axis	$\beta_y = \left[\frac{4[L/B + (D/B)(1+\psi L/B)]}{(K_{y,emb}/GB)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_y} \right]$
Translation along x-axis	$\beta_x = \left[\frac{4[L/B + (D/B)(\psi + L/B)]}{(K_{x,emb}/GB)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_x} \right]$
Torsion about z-axis	$\beta_{zz} = \left[\frac{(4/3)[3(L/B)(D/B) + \psi(L/B)^3(D/B) + 3(L/B)^2(D/B) + \psi(D/B) + (L/B)^3 + (L/B)] a_0^2}{\left(\frac{K_{zz,emb}}{GB^3}\right) \left[\left(\frac{1.4}{1+3(L/B-1)^{0.7}}\right) + a_0^2 \right]} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{zz}} \right]$
Rocking about y-axis	$\beta_{yy} = \left[\frac{(4/3) \left[\left(\frac{L}{B}\right)^3 \left(\frac{D}{B}\right) + \psi \left(\frac{D}{B}\right)^3 \left(\frac{L}{B}\right) + \left(\frac{D}{B}\right)^3 + 3 \left(\frac{D}{B}\right) \left(\frac{L}{B}\right)^2 + \psi \left(\frac{L}{B}\right)^3 \right] a_0^2 + \left(\frac{4}{3}\right) \left(\frac{L}{B} + \psi\right) \left(\frac{D}{B}\right)^3}{\left(\frac{K_{yy,emb}}{GB^3}\right) \left[\left(\frac{1.8}{1+1.75(L/B-1)}\right) + a_0^2 \right]} + \left(\frac{K_{yy,emb}}{GB^3}\right)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{yy}} \right]$
Rocking about x-axis	$\beta_{xx} = \left[\frac{(4/3) \left[\left(\frac{D}{B}\right) + \left(\frac{D}{B}\right)^3 + \psi \left(\frac{L}{B}\right) \left(\frac{D}{B}\right)^3 + 3 \left(\frac{D}{B}\right) \left(\frac{L}{B}\right) + \psi \left(\frac{L}{B}\right) \right] a_0^2 + \left(\frac{4}{3}\right) \left(\psi \frac{L}{B} + 1\right) \left(\frac{D}{B}\right)^3}{\left(\frac{K_{xx,emb}}{GB^3}\right) \left[\left(\frac{1.8}{1+1.75(L/B-1)}\right) + a_0^2 \right]} + \left(\frac{K_{xx,emb}}{GB^3}\right)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{xx}} \right]$
Notes:	Soil hysteretic damping, β_s , is additive to foundation radiation damping, β . $\alpha_{emb} = \alpha_{sur}$; from Table 2-3a $a_0 = \omega B / V_z$; $\psi = \sqrt{2(1-\nu)/(1-2\nu)}$; $\psi \leq 2.5$