

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



SIMULACIÓN ESTRUCTURAL DE ALTA FIDELIDAD PARA LA
PREDICCIÓN DEL DESEMPEÑO SÍSMICO EN EDIFICIOS
EXPUESTOS A EVENTOS DE CAMPO CERCANO

OMAR IGNACIO OYARCE ACHARÁN

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

PROFESOR GUÍA: JOSÉ ANTONIO ABELL

SANTIAGO, JUNIO DE 2023

Dedicatoria

Dedico este trabajo a todas las personas que me han brindado su apoyo en mi carrera. En especial, a mi madre Paola Acharán Gotuzzo, a mi padre Omar Oyarce Stecher y al resto de mi familia cercana, incluyendo a María Angélica Stecher y Virginia Pacheco, por su amor incondicional y su constante motivación.

También quiero agradecer a mis amigos del colegio Gonzalo Bolt, Matías Castro, Tania García, Sheila Gonzalez, Sebastián Molina, Vicente Murillo, Nicolás Rodriguez y Sebastián Pérez, por ser ejemplos a seguir y por motivarme a ser una mejor persona cada día.

Asimismo, agradezco a mis amigos del bachillerato, Diego Garib, Vicente Lambert, Juan Julio Luna y Víctor Gautier, por su orientación en mis primeros años y por creer en mi potencial.

A mis compañeros de la carrera Diego Aparicio, Tomás Campusano, Matías León, Crescente Pérez, Tomás Schilling, Tomás y Exquiel Vial, les agradezco por acompañarme en todo el camino de Ingeniería Civil en Obras Civiles y por brindarme su ayuda cuando la necesité.

Agradezco especialmente a mi compañero de investigación Alberto Hurtado y a mi profesor guía José Antonio Abell, por su dedicación, su ejemplo y su constante apoyo en este trabajo.

Finalmente, quiero reconocer mi propio esfuerzo y dedicación en este proyecto. Las innumerables horas de trabajo y la pasión que puse en él han hecho de esta experiencia una de las mejores de mi vida.

Resumen

En esta sección se debe incluir un resumen de los principales aspectos desarrollados en la tesis, justificación, metodología y principales resultados. (Máximo 1 página).

El siguiente documento no puede ser la copia del escrito del o los artículos publicados (si corresponde). Estos deben ser incluidos como Apéndices al final de la tesis.

Los márgenes son 2.5 cm superior e inferior, y 3 cm derecha e izquierda, en todo el documento.

Se debe mantener el formato tipo de letra Times New Roman, tamaño 12 e interlineado 1.5 líneas.

Abstract

En esta sección se debe incluir un resumen en Inglés de los principales aspectos desarrollados en la tesis, justificación, metodología y principales resultados. (Máximo 1 página).

Agradecimientos

Quiero expresar mi gratitud al organismo Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) de Chile por el financiamiento otorgado a la investigación liderada por el profesor José Antonio Abell, quien guió y supervisó la realización de esta tesis. Sin su apoyo financiero y su confianza en nuestro trabajo, esta investigación no hubiera sido posible.

Asimismo, quisiera agradecer a los académicos y profesionales que colaboraron conmigo en el desarrollo de esta tesis. En primer lugar, agradezco a ASDEA, la empresa italiana que me proporcionó la oportunidad de realizar esta investigación y brindó un ambiente de trabajo estimulante y enriquecedor, donde pude desarrollar mis habilidades profesionales. Agradezco especialmente a Massimo Petraca y Guido Camatta, quienes desempeñaron un papel fundamental en el éxito de este proyecto al compartir su conocimiento y experiencia.

También quisiera expresar mi agradecimiento a mis profesores de la carrera de Ingeniería Civil en Obras Civiles, por su apoyo y enseñanzas durante mi formación académica. En especial, agradezco al profesor José Antonio Abell por su paciencia, dedicación y guía en todo momento.

Índice general

Dedicatoria	IV
Resumen	V
Abstract	VI
Agradecimientos	VII
1. Introducción	1
1.1. Hipótesis	4
1.2. Objetivos	4
1.3. Alcance	5
1.4. Estructura del informe	5
2. Revisión Bibliográfica	6
2.1. Caso de estudio	6
2.1.1. Metodologías de diseño	6
2.1.2. Fallas corticales: La Falla de San Ramón	8
2.2. Simulación estructural	9
2.2.1. Modelación con elementos finitos	9
2.2.2. Linealidad de los elementos	10
2.2.3. Métodos de modelación	12
2.2.4. Método de Reducción de Dominio	14
2.3. Programas de simulación estructural	14
2.3.1. ShakerMaker	14
2.3.2. OpenSees	15
2.3.3. Elastic Beam-Column	15
2.3.4. Shell MITC4	16
2.3.5. STKO	16
2.4. Métricas de desempeño sísmico	16
2.4.1. Corte Basal	17
2.4.2. Drift entre piso	17

2.4.3. Norma NCh433	17
2.5. Almacenamiento de datos en SQL	19
2.6. Computación de Alto Rendimiento	20
3. Metodología	22
3.1. Modelos STKO	22
3.1.1. Edificio de 20 pisos	23
3.1.2. Edificio de 55 pisos	28
3.2. Simulación con Base Fija	28
3.2.1. Análisis Dinámico	28
3.3. Simulación con SSI	28
3.3.1. Análisis Dinámico	28
3.4. Almacenamiento de la información	28
3.5. Análisis Estadístico	28
4. Resultados y Análisis	29
4.1. Resultados Baja Fidelidad	29
4.1.1. Corte Basal	29
4.1.2. Drift	29
4.2. Resultados Alta Fidelidad	29
4.2.1. Corte Basal	29
4.2.2. Drift	29
4.3. Comparativa	29
4.3.1. ANOVA	29
5. Conclusiones	31
5.1. Conclusiones teóricas	31
5.2. Conclusiones prácticas	31
5.3. Investigación futura	31
Glosario	32
Siglas	34
Referencias	36
Anexos	40

A. Detalles Revisión Bibliográfica	40
A.1. Método de Frecuencia-Onda (F-K)	40
B. Validación de los MSE	43
B.0.1. Modelo de 20 pisos	43
B.0.2. Modelo de 55 pisos	45
C. Base de datos MySQL	46
D. Benchmark del servidor HPC Clúster	48

Índice de figuras

1.1. Detalle de la FSR. Fuente: Infografía Diario La Tercera - Tema: Falla San Ramón	2
2.1. Plano geométrico de la FSR. Fuente: Ammirati et al. 2019	8
2.2. Modelo de Elementos Finitos de Viga. Fuente: Sato & Tetsuro, 2002	10
2.3. Detalle de cuerpo elástico-lineal Fuente: Surendran et al., 2017	10
2.4. Modelo de Elementos Finitos para representar la Interacción Suelo-Estructura de un edificio con DRM. Fuente: Pinto, 2021	13
2.5. Clasificación sísmica del terreno de fundación. Fuente: INN, 2012	18
3.1. Discretización de modelos de baja y alta fidelidad. Fuente: Elaboración propia.	23
3.2. Visualización en STKO de edificio 20 pisos - 2 subterráneos. Fuente: Elaboración propia.	23
3.3. Visualización en STKO de edificio 20 pisos - 4 subterráneos. Fuente: Elaboración propia.	24
3.4. Visualización de las fundaciones del modelo de 20 pisos en STKO. Fuente: Elaboración propia.	25
3.5. Modos fundamentales de vibración de edificio de 20 pisos - 4 subterráneos. Fuente: Elaboración propia.	27
4.1. Corte Basal del edificio B1 para los distintos campos. Se tomó el valor promedio de las 3 iteraciones de cada tipo de ruptura. Fuente: Elaboración Propia.	30
B.1. Modos de base fija para el edificio B1. Fuente: Pinto 2021	43
B.2. Drift de modelo de 20 pisos y 4 subterráneos para Ranco 1985. Fuente: Elaboración propia.	44
B.3. Drift de modelo de 20 pisos y 4 subterráneos para Talca 2010. Fuente: Elaboración propia.	45

C.1. Base de datos MySQL relacional usada para almacenar y extraer los resultados. Fuente: Elaboración propia.	47
--	----

Índice de tablas

3.1. Parámetros usados en el material: Hormigón Armado. Fuente: Pinto et al. (2021)	25
3.2. Propiedades físicas de los elementos tipo viga-columna. Fuente: Elaboración propia.	26
3.3. Propiedades físicas de los elementos tipo muro-losa. Fuente: Elaboración propia.	26
3.4. Resultado análisis modal edificio de 20 pisos - 4 subterráneos. Fuente: Elaboración propia.	27
B.1. Resultado de análisis transiente de Ranco 1985 (Mw=7.9). Fuente: Elaboración propia.	44
B.2. Resultado de análisis transiente de Talca 2010 (Mw=8.8). Fuente: Elaboración propia.	44

Capítulo 1

Introducción

La ciudad de Santiago de Chile, hogar de más de siete millones de personas, está situada en los faldeos occidentales de la cordillera de Los Andes, una de las cadenas montañosas con más actividad geológica del mundo. Según los estudios actuales, su formación está vinculada a la subducción de la placa de Nazca por debajo de la placa Sudamericana. Como consecuencia de esta interacción tectónica, las rocas de la placa Sudamericana se deforman y se fracturan cerca de la superficie, dando lugar a la Falla San Ramón (FSR), ubicada en el piedemonte del frente cordillerano de Santiago (Easton et al., 2022).

En los últimos años, diversos estudios han resaltado los riesgos potenciales vinculados a la FSR, aunque persiste una considerable incertidumbre respecto al impacto real que podrían tener en las estructuras, dada la complejidad inherente a la propagación de las ondas sísmicas. Sin embargo, las regulaciones que abordan específicamente los sismos superficiales¹ siguen siendo limitadas, en parte debido a su baja probabilidad de ocurrencia. La normativa sísmica vigente establece un espectro de diseño que fundamenta sus parámetros en la actividad sísmica histórica, centrada principalmente en terremotos de gran profundidad. Esta circunstancia no solo subraya una oportunidad valiosa para inaugurar nuevas líneas de investigación, como la simulación avanzada de movimientos sísmicos o las interacciones suelo-estructura, sino que también señala una oportunidad crucial para revisar y consolidar las áreas insuficientemente atendidas en la normativa actual. (Easton et al., 2022).

¹Se distinguen tres tipos de terremotos, *superficiales* (0-60km), *intermedios* (60-300km) y *profundos* (300-700km). Fuente: (Vidal, 1994)

Un sismo en la FSR, representa una amenaza por tres principales razones:

- (i) La posibilidad de propagación de la ruptura en la superficie con movimientos de suelo de hasta 3 veces los producidos en el terremoto del 2010 ²(Easton et al., 2018)
- (ii) Escenarios con aceleraciones de suelo que llegan hasta 0.8g, lo que excede significativamente los límites establecidos por la norma NCh433³ (Estay et al., 2016).
- (iii) La potencial ocurrencia de remociones de masa en el frente cordillerano y cerros de la región (Easton, 2021)

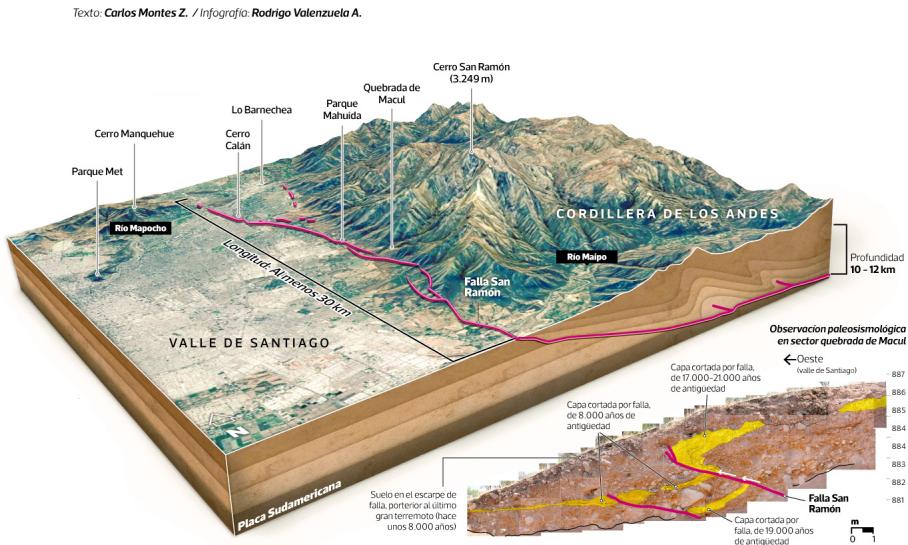


Figura 1.1: Detalle de la FSR.

Fuente: Infografía Diario La Tercera - Tema: Falla San Ramón

Considerando las amenazas previamente mencionadas, es de suma importancia examinar el posible impacto de un terremoto generado por la FSR en las edificaciones residenciales adyacentes. En el marco del presente trabajo, primero se debe entender el concepto de *fidelidad*, relativo a los *Modelos de Simulación Estructural* (MSE).

Un MSE se puede entender como la representación matemática del comportamiento físico y mecánico de una estructura, en el cual se definen claramente las leyes y supuestos que gobernarán su respuesta frente a excitaciones que cambien su estado en el tiempo.

²En antiguos terremotos, la propagación de la ruptura en superficie levantó de 2 a 3m el bloque cordillerano por sobre el valle de Santiago. Fuente: Easton (2021)

³Para más información, ver 2.4.3

El término *fidelidad* denota el nivel de exactitud con la que un MSE puede replicar el desempeño real de un sistema físico, suponiendo que este último pudiera ser medido de manera precisa, dependiendo directamente de las consideraciones y parámetros establecidos. Un *Modelo de Baja Fidelidad* (MBF) asume una serie de supuestos que permiten simplificar la representación y el comportamiento de la estructura. Estos supuestos pueden abarcar aspectos como el supuesto de una base fija, un comportamiento perfectamente elástico y/o isotrópico de los materiales, y la consideración de deformaciones pequeñas con desplazamientos lineales en los elementos. Un *Modelo de Alta Fidelidad* (MAF) sería entonces, aquel que tenga los supuestos más realistas, o bien, considere simultáneamente la ocurrencia de más fenómenos físicos. Esto implica discernir detalladamente 'cómo'y 'cuánto'del dominio del suelo debe ser considerado, especialmente en términos de interacción suelo-estructura, así como abordar la no-linealidad presente en el comportamiento de los materiales y elementos involucrados. Un buen ejemplo es el uso del *Domain Reduction Method* (DRM), que contempla las ondas sísmicas desde su origen y las introduce a un dominio de suelo localizado. En este tipo de análisis, es posible modelar el suelo mediante elementos finitos, teniendo en cuenta una gama de características como la rigidez, capacidad de amortiguamiento, resistencia, entre varias más.

Entonces ¿como escoger el nivel de fidelidad al que se debe modelar? La respuesta es específica al caso que se esté analizando, y dependerá del objetivo de simulación, capacidades del software/hardware, tiempo disponible, habilidades del modelador, entre varias más. Los MAF en general poseen una demanda computacional significativamente mayor y son considerablemente mucho más complejos de desarrollar, pero sus resultados son, en teoría, más *fieles* a la realidad. No obstante, durante el proceso de elaboración de un MAF, es imperativo evaluar meticulosamente la magnitud de mejora en los resultados obtenidos y la incertidumbre asociada con los datos de entrada. Es ineficaz dedicar recursos significativos para desarrollar un modelo de extrema complejidad que considere una multitud de variables, si, en última instancia, la discrepancia en los resultados comparado con un MBF resulta ser marginal..

1.1. Hipótesis

La adopción de métodos avanzados de modelación de input sísmico es esencial para obtener métricas de desempeño estructural confiables en edificios habitacionales, especialmente ante la amenaza de un terremoto cortical somero potencialmente inducido por la Falla de San Ramón, donde la complejidad de las ondas sísmicas se amplifica en el campo cercanos. Se espera que a medida que el epicentro se aleje, la complejidad de las ondas sísmicas disminuya, y los resultados obtenidos mediante Modelos de Alta Fidelidad se vuelvan cada vez más comparables con los obtenidos mediante Modelos de Baja Fidelidad.

1.2. Objetivos

El objetivo general es evaluar el desempeño sísmico en estructuras de edificios habitacionales, mediante modelos de fidelidad variable que estén sujetos a movimientos sísmicos provenientes de posibles escenarios simulados en la Falla de San Ramón. Para alcanzar este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar modelos de simulación estructural de baja y alta fidelidad, utilizando el software STKO. Estos modelos servirán para evaluar el desempeño sísmico de edificios habitacionales de baja y alta altura, con núcleo resistente de muros de corte, en diferentes ubicaciones de la cuenca de Santiago.
- Generar los movimientos provenientes de diversos escenarios sísmicos en la Falla San Ramón, para obtener el input que se usará en los modelos de simulación estructural.
- Analizar estadísticamente los resultados del desempeño sísmico de los modelos en las diversas condiciones, comparando con las exigencias de la normativa chilena actual y concluyendo sobre la necesidad de los Modelos de Alta Fidelidad en dicho contexto.

1.3. Alcance

En el contexto del proyecto de investigación FONDECYT N° 11220530, el enfoque se centra en el desarrollo de modelos lineales elásticos de base fija e interacción suelo-estructura. La importancia de este estudio reside en comprender y abordar la incertidumbre inherente en los modelos de simulación estructural, lo cual es fundamental para mejorar la precisión y confiabilidad de los resultados. Esta tesis aspira a contribuir al avance del conocimiento en esta área y a establecer una base sólida para futuras investigaciones en el campo de la simulación estructural.

1.4. Estructura del informe

En este Capítulo 1 se habló de la importancia e implicancia que habría dado un terremoto generado por la Falla de San Ramón, se introdujo el concepto de fidelidad en los modelos de simulación estructural y se revisó de manera general la forma en que se abordará el problema. En el Capítulo 2 se llevará a cabo una revisión bibliográfica de los conceptos claves que justifican y motivan este trabajo y en el Capítulo 3 se describirán los modelos estructurales que se plantearon, los escenarios usados como input, la configuración del servidor para obtener resultados y la estructura de almacenamiento de la información. El Capítulo 4 se dedicará a la presentación de los resultados de las simulaciones. Esto implica la explicación, análisis y discusión de estos. Finalmente, el Capítulo 5, reunirá las conclusiones que surgieron de la investigación, resaltando los logros en base a los objetivos e hipótesis planteada. Además, propone recomendaciones para futuras investigaciones, delineando brevemente cómo este trabajo podría ser extendido o mejorado en estudios posteriores.

Capítulo 2

Revisión Bibliográfica

Esta revisión bibliográfica se enfoca en analizar el concepto del diseño basado en desempeño y su relevancia en el campo de la ingeniería estructural, con especial atención a su aplicación en contextos donde existen amenazas de fallas corticales someras, como es el caso de la FSR en Chile. Se examinarán los métodos de Elementos Finitos y Reducción de Dominio, y se analizarán programas de simulación específicos, como ShakerMaker, OpenSees y STKO. Además, se discutirá el concepto de linealidad en los modelos estructurales, así como la evaluación de métricas de desempeño sísmicas como el drift y corte basal. Finalmente se explicarán los papeles de las bases de datos y el HPC en la presente investigación.

2.1. Caso de estudio

2.1.1. Metodologías de diseño

En la actualidad, el objetivo primordial de las normativas de construcción de estructuras sismorresistentes es prevenir el colapso ante la acción de un terremoto esperado (Gaxiola, 2022). En el contexto de Chile, se ha establecido una filosofía de diseño que se centra en dos metas principales: salvaguardar la vida humana y asegurar la continuidad de las operaciones en la industria. Aunque estos objetivos son de suma importancia, el enfoque se basa principalmente en el control del daño estructural a través de criterios de resistencia, sin abordar de manera precisa el modo y la ubicación de posibles fallas en caso de eventos sísmicos significativos. Esta práctica, conocida como *Diseño por*

Capacidad, busca garantizar la existencia de mecanismos dúctiles en distintos niveles estructurales con el fin de prevenir colapsos frágiles no deseados (Marcus & Thiers, 2015).

A finales de los años ochenta y principios de los noventa, el mundo fue testigo de una serie de terremotos significativos que causaron daños estructurales generalizados en diversos tipos de edificaciones. Estos eventos telúricos marcaron el inicio de una revolución en el pensamiento de los ingenieros estructurales de diferentes países y plantearon la posibilidad de un cambio en el objetivo principal de los reglamentos de construcción. Surgió así una nueva perspectiva que se centraba en el control de los daños estructurales a través del análisis y diseño considerando distintos niveles de desempeño. Esta filosofía se conoce como *Ingeniería Basada en Desempeño* (PBE)(Gaxiola, 2022).

La PBE engloba una serie de aspectos importantes en el proceso de diseño y construcción de estructuras. Estos incluyen: la selección de criterios de diseño, la elección de sistemas estructurales adecuados, la distribución óptima de los elementos, el dimensionamiento preciso de los componentes y la atención a los detalles constructivos. Además, también se ocupa del aseguramiento de la calidad durante la fase de construcción y el mantenimiento a largo plazo de la estructura. En conjunto, estos elementos garantizan que se cumplan los estándares requeridos y que la estructura sea capaz de resistir las cargas y condiciones a las que estará expuesta a lo largo de su vida útil (Saouma & Hariri-Ardebili, 2021).

Dentro de la PBE, se encuentra la *Ingeniería Sísmica Basada en Desempeño* (PBEE) se define como la aplicación de la PBE al caso en que el riesgo sísmico controla el diseño. Por lo tanto, implica que las estructuras construidas sean capaces de resistir los efectos de los movimientos del suelo durante un terremoto de diferentes intensidades, dentro de niveles especificados de daño limitado (Saouma & Hariri-Ardebili, 2021).

Por otro lado, el *Diseño Sísmico Basado en Desempeño* (PBSD) es el subconjunto de actividades de la PBEE que se centran en el proceso de diseño. Por lo tanto, incluye la identificación de los riesgos sísmicos, la selección de los niveles de desempeño y los objetivos de diseño de la estructura (Saouma & Hariri-Ardebili, 2021).

2.1.2. Fallas corticales: La Falla de San Ramón

La FSR es una estructura geológica que se encuentra en la corteza terrestre y se extiende desde una profundidad de aproximadamente 5 a 20 km hasta la superficie del territorio.¹. Con una longitud de más de 30 km, la falla se localiza entre los ríos Maipo y Maipo. Su posible activación en el piedemonte ha generado preocupación en términos sociales y de sostenibilidad urbana (Easton et al., 2018).

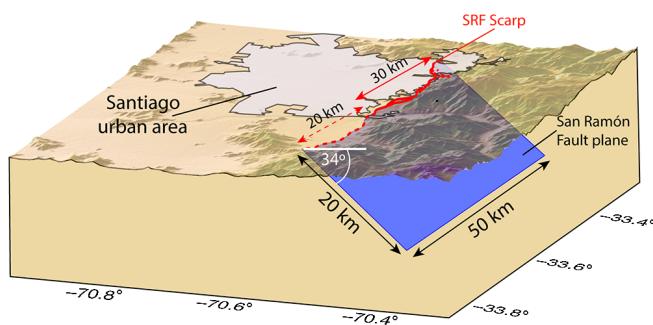


Figura 2.1: Plano geométrico de la FSR.

Fuente: Ammirati et al. 2019

Estudios realizados por Armijo et al. (2010) confirman que la falla está activa y representa un peligro potencial para la ciudad, especialmente debido a las intensidades sísmicas significativas en sus cercanías (Vargas et al., 2014). La investigación de Ammirati et al. (2019) se centró en examinar la actividad sísmica en la FSR, lo que permitió mejorar la definición geométrica de la superficie de ruptura y proponer un escenario mejorado que involucra un terremoto característico de magnitud Mw 7.5. Se encontró que la actividad sísmica predominaba en la cordillera de Los Andes, tanto en el lado oriental como en el occidental, a profundidades de 5 a 15 km y 10 a 20 km, respectivamente.

En la actualidad, se ha superado la concepción de que las fallas corticales en Chile eran inactivas o presentaban una actividad insignificante. Esto ha sido respaldado por evidencias científicas y ha impulsado la necesidad de revisar y actualizar las normativas de planificación urbana para considerar adecuadamente el riesgo sísmico asociado. Es en este escenario que la FSR destaca como un caso de estudio relevante (Easton, 2021).

¹Al ubicarse en la corteza, se dice que es cortical, y al ser superficial se considera somera.

Dado lo anterior, es de vital importancia realizar un estudio detallado sobre el impacto de la FSR en los edificios ubicados en su vecindad. La metodología de la PBEE, permite analizar y evaluar el comportamiento de las estructuras frente a distintos escenarios sísmicos con el fin de disminuir el riesgo en la población de Santiago.

2.2. Simulación estructural

En el contexto de esta tesis, la simulación estructural se refiere al proceso en el que se le asignan propiedades físicas a los materiales y elementos de una estructura. Esta se modela con elementos finitos, y depende de una serie de cargas sísmicas en todas las direcciones. El objetivo es predecir su comportamiento mediante la obtención de métricas de desempeño sísmico ante los diversos escenarios de la FSR y comparar los resultados entre MBF y MAF.

2.2.1. Modelación con elementos finitos

El Método de Elementos Finitos (FEM, por su sigla en inglés) es una técnica de análisis numérico que se utiliza para obtener soluciones aproximadas a problemas con condiciones de borde. Consiste en dividir el dominio de un problema, en elementos más pequeños, donde cada elemento tiene un sistema de ecuaciones asociado. Dicha discretización se hace mediante la creación de una malla los cuales se interconectan en puntos llamados nodos. Las ecuaciones propias de los elementos se ensamblan en un sistema de ecuaciones global que se resuelve mediante álgebra matricial. Dicha solución, tiene la ventaja de ser independiente de la geometría original (Jagota et al., 2013).

Gracias al método, se puede modelar y simular el comportamiento de diversos sistemas complejos, como estructuras metálicas, elementos de hormigón armado, componentes mecánicos y fluidos. La capacidad del método para adaptarse a diferentes tipos de problemas y su versatilidad lo convierten en una herramienta esencial en el campo de la ingeniería (McKenna, 1997; McKenna et al., 2010). En el presente trabajo, tanto los MBF como los MAF serán modelados con FEM.

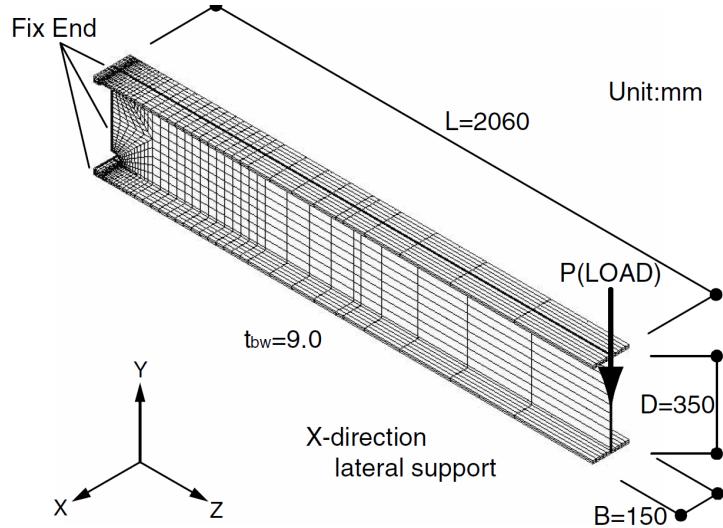


Figura 2.2: Modelo de Elementos Finitos de Viga.

Fuente: Sato & Tetsuro, 2002

2.2.2. Linealidad de los elementos

Al realizar simulaciones estructurales con elementos finitos, es importante considerar si el comportamiento de los elementos en la malla será lineal o no. Esto se refiere a la relación entre el estrés aplicado a los elementos y la deformación resultante. En este caso, se asume un comportamiento lineal-elástico e isotrópico del cuerpo, lo cual implica que existe una relación lineal entre el estrés y la deformación. Esta suposición se basa en la demostración presentada por Surendran et al. (2017):, donde se establece la continuidad en el comportamiento del material utilizado en el análisis.

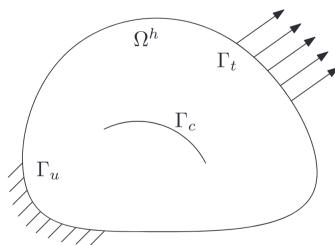


Figura 2.3: Detalle de cuerpo elástico-lineal

Fuente: Surendran et al., 2017

El dominio se denota como $\Omega \in \mathbb{R}^d$ y está delimitado por la frontera Γ . En este caso, la frontera se divide en tres partes: Γ_u , donde se aplican las condiciones de borde de desplazamiento; Γ_t , donde se aplican las condiciones de borde de tracción; y Γ_c , que

representa la superficie libre de tracciones que marca la discontinuidad. En resumen, tenemos que $\Gamma = \Gamma_u \cup \Gamma_t \cup \Gamma_c$, y se cumple que $\Gamma_u \cap \Gamma_t = \emptyset$. La ecuación gobernante a resolver es:

$$\nabla \cdot \sigma + b = 0 \quad \text{en } \Omega \quad (2.1)$$

Las condiciones de borde son las siguientes:

$$\sigma \cdot \hat{\mathbf{n}} = 0 \quad \text{en } \Gamma_c, \quad (2.2)$$

$$\sigma \cdot \hat{\mathbf{n}} = \hat{t} \quad \text{en } \Gamma_t, \quad (2.3)$$

$$u = \hat{u} \quad \text{en } \Gamma_u, \quad (2.4)$$

donde ∇ es el operador de gradiente, σ es el tensor de tensiones de Cauchy , b es la fuerza por unidad de volumen, n es la normal unitaria hacia afuera, y t la tracción aplicada.

Para un cuerpo que experimenta desplazamientos y deformaciones pequeñas, la ecuación de deformación-desplazamiento se formula de la siguiente manera:

$$\epsilon = \nabla_s u, \quad (2.5)$$

donde ∇_s representa la parte simétrica del operador de gradiente. Finalmente, se obtiene un sistema de ecuaciones lineales:

$$K \cdot u_h = f \quad (2.6)$$

$$K = \sum_h K_h = \sum_h \int_{\Omega_h} B^T C B d\Omega \quad (2.7)$$

$$f = \sum_h f_h = \sum_h \left(\int_{\Omega_h} N^T b d\Omega + \int_{\Gamma_h} N^T \hat{t} d\Gamma \right) \quad (2.8)$$

Donde K es la matriz de rigidez ensamblada; f , el vector de fuerzas nodales ensambladas; u_h , el vector ensamblado de desplazamientos nodales; N , la matriz de funciones de forma; C , la matriz constitutiva para un material elástico lineal e isótropo; y $B = \nabla N_s$, la matriz de deformación-desplazamiento que se calcula utilizando las derivadas de las funciones de forma (Surendran et al., 2017).

2.2.3. Métodos de modelación

Cuando una fuerza dinámica externa, como un terremoto, actúa sobre las estructuras, tanto la respuesta estructural como del suelo se ven mutuamente afectadas. Este fenómeno se conoce como Interacción Suelo-Estructura (SSI, por su sigla en inglés). En ella, los efectos dinámicos del suelo influyen en el comportamiento estructural, y viceversa (Scarfone et al., 2020). La SSI ha sido ampliamente investigada en la literatura, especialmente en relación con la respuesta sísmica de edificaciones. Mientras que se pueden despreciar los efectos de esta en suelos muy rígidos, persiste un debate en el caso de suelos blandos (Bapir et al., 2023).

Se ha demostrado que la consideración de la SSI puede incrementar las demandas sísmicas y causar daños adicionales en las estructuras modeladas. Además, su implementación provoca la modificación del período natural, la reducción del corte basal y el aumento de los desplazamientos inter-pisos en los modelos estructurales. A pesar de los efectos significativos que se han comprobado, solo algunos códigos de diseño internacionales, como la ASCE y Eurocode², recomiendan considerar su influencia en el proceso de diseño (Bapir et al., 2023).

El comportamiento de la SSI varía según diversos factores, como la rigidez del suelo y la estructura y las características del movimiento sísmico, entre varios más. Se requiere una investigación adicional en áreas como el impacto entre edificaciones, sistemas de muros, estructuras irregulares y procedimientos de diseño (Bapir et al., 2023).

En contraste a la modelación con SSI está la modelación con Base Fija, la cual es un enfoque común en el PBSD. Esta consiste en analizar la estructura suponiendo que no existe el suelo y que su base está con condiciones de borde que restringen su movimiento y giro en todas las direcciones. En la mayoría de los casos de análisis y diseño, se suele omitir la SSI y se utiliza Base Fija, especialmente en propuestas preliminares y en situaciones donde no se dispone de informes geotécnicos y geológicos detallados (Ahmed et al., 2020).

²Tanto el Código ASCE como el Eurocode establecen los criterios y métodos de diseño que los ingenieros deben seguir al diseñar estructuras de edificios.

Aunque la modelación con Base Fija simplifica el análisis y puede ser adecuada en ciertas situaciones, es importante tener en cuenta que esta aproximación tiene limitaciones. La verdadera respuesta de una estructura a las cargas sísmicas está influenciada por las propiedades del suelo, la SSI y las características del movimiento del terreno. En aplicaciones más avanzadas y precisas, es necesario considerarla de manera explícita utilizando técnicas de análisis más sofisticadas (Ahmed et al., 2020). Por ejemplo, las plantas de energía nuclear suelen ser estructuras muy rígidas cuya respuesta sísmica es altamente sensible a la interacción suelo-estructura (Abell et al., 2018). Los edificios son cada vez más susceptibles a moverse y girar durante los terremotos, y el movimiento de las ondas puede aumentar estos movimientos rotacionales, como la respuesta de torsión. Para modelar estos sistemas de manera precisa, es importante simular cuidadosamente cómo se propagan las ondas desde el origen del terremoto hasta el lugar del edificio. Una técnica utilizada para lograr esto es el Método de Reducción de Dominio (Pinto et al., 2021).

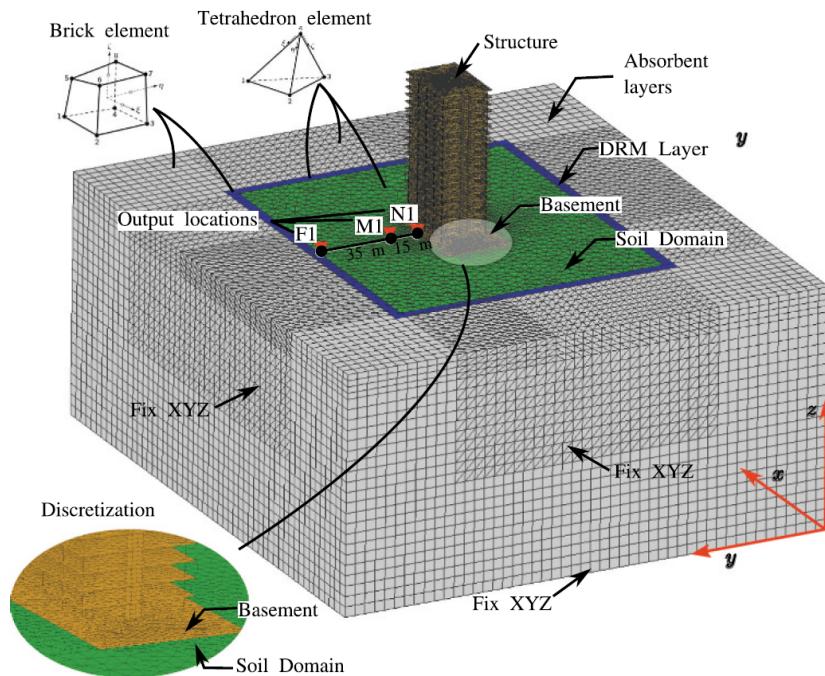


Figura 2.4: Modelo de Elementos Finitos para representar la Interacción Suelo-Estructura de un edificio con DRM.

Fuente: Pinto, 2021

2.2.4. Método de Reducción de Dominio

El Método de Reducción de Dominio (DRM, por sus siglas en inglés) es una metodología utilizada para modelar el movimiento sísmico del suelo en regiones localizadas altamente heterogéneas con grandes contrastes de longitudes de onda. El DRM es un enfoque modular de dos pasos que utiliza el FEM, donde se aborda el desafío de usar escalas físicas variadas, al subdividir el problema original en dos problemas más simples (Bielak et al., 2003).

En el primer paso, se resuelve un problema auxiliar que simula los efectos de la fuente del terremoto y la propagación de las ondas. El segundo paso se enfoca en modelar los efectos locales del sitio, utilizando como input las fuerzas obtenidas en el primer paso. Estas fuerzas actúan únicamente en una capa de elementos adyacente a la interfaz entre la región exterior y la característica geológica de interés. Esto permite reducir el tamaño del dominio y mejorar la eficiencia computacional (Bielak et al., 2003).

El DRM puede ser particularmente beneficioso en situaciones donde la fuente del terremoto está lejos de la estructura local y cuando la característica localizada muestra un comportamiento no lineal. También es útil cuando se desea realizar una secuencia de simulaciones con variaciones en las propiedades de la característica local, como por ejemplo, edificios. Ha demostrado ser útil en la evaluación y reducción de peligros sísmicos en áreas urbanas con topografía compleja (Yoshimura et al., 2003).

2.3. Programas de simulación estructural

2.3.1. ShakerMaker

ShakerMaker es un framework en Python que simplifica la generación de sismogramas sintéticos de banda ancha. Son producidos mediante representaciones cinemáticas de fallas finitas de terremotos, utilizando un modelo de capas unidimensional de la corteza terrestre y el método F-K³. Se diseñó para unir las comunidades de sismología e ingeniería sísmica (Abell et al., 2022).

³Para más información del método, ver Apéndice A.

Uno de los objetivos particulares de este framework es proporcionar una forma sencilla de producir movimientos sísmicos de alta fidelidad para su uso con DRM. Su escalabilidad tiene alcance desde máquinas simples hasta clústeres de computación de alto rendimiento (Abell et al., 2022).

2.3.2. OpenSees

OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation) es una plataforma flexible y extensible que permite analizar de manera precisa y eficiente la respuesta de estructuras ante eventos sísmicos. El software utiliza un enfoque basado en elementos finitos, lo que permite modelar de manera realista y detallada el comportamiento no lineal de los sistemas estructurales. Es posible simular fenómenos complejos como la respuesta inelástica de los materiales, la interacción suelo-estructura y la propagación de ondas sísmicas a través de diferentes tipos de estructuras. Una de las principales ventajas de OpenSees es su capacidad dentro la computación de alto rendimiento, estando diseñado para aprovechar al máximo el potencial de los sistemas de computación paralela, lo que permite realizar simulaciones de gran escala en tiempos reducidos (McKenna, 2011).

2.3.3. Elastic Beam-Column

El elemento *Elastic Beam-Column* en OpenSees es un tipo de elemento finito utilizado para modelar el comportamiento de vigas y columnas en estructuras. Este elemento asume una respuesta elástica lineal para representar el comportamiento de deformación de la viga/columna. Se define por su geometría, propiedades materiales y condiciones de apoyo. Se especifican la longitud, la sección transversal, los materiales utilizados y las restricciones en los extremos de la viga o columna. Estos parámetros determinan cómo el elemento se deformará y cómo se transferirán las cargas a través de la estructura (Rinche et al., 2016).

2.3.4. Shell MITC4

En el contexto de simulación estructural, *ShellMITC4* de OpenSees es un elemento de capa utilizado para modelar estructuras delgadas, como losas y muros, y tiene la capacidad de considerar tanto deformaciones lineales como no lineales. El término *MITC4* se refiere a *Mixed Interpolation of Tensorial Components* de orden 4, que se utiliza para aproximar los desplazamientos y deformaciones en la capa. El elemento combina deformaciones de flexión y membrana, siendo adecuado para estructuras con comportamiento mixto (Dvorkin & Bathe, 1984).

2.3.5. STKO

STKO es una interfaz gráfica avanzada que brinda a diversas entidades, como empresas, científicos, investigadores y académicos, todos los materiales, elementos, condiciones e interacciones existentes en OpenSees. Ofrece todas las herramientas de preprocesamiento, permitiendo diseñar geometrías complejas gracias a su amigable y sencilla interfaz, asignar propiedades no lineales a los elementos, y realizar diversos tipos de análisis avanzados, como el análisis transiente. Además, tiene un avanzado postprocesado para analizar y visualizar los resultados (Pettraca et al., 2017)⁴.

2.4. Métricas de desempeño sísmico

Las métricas de desempeño sísmico funcionan como indicadores cuantitativos que permiten evaluar y cuantificar la respuesta de las estructuras durante eventos sísmicos. Estas métricas proporcionan una evaluación objetiva de la resistencia de una estructura, su vulnerabilidad y el grado de daño que podría sufrir bajo un escenario telúrico específico. En Chile, las métricas más comúnmente utilizadas son el corte basal y el drift entre pisos, los cuales proporcionan información acerca de los esfuerzos que se ejercerán en la base del edificio y cuánto movimiento puede experimentar cada piso durante un terremoto. La norma NCh433 establece condiciones de diseño específicas relacionadas con el drift entre pisos y proporciona una fórmula para el cálculo del corte basal.

⁴-Ver la opción de poner una imagen en el anexo.(Si eres corrector, ignorar esto)-

2.4.1. Corte Basal

El corte basal es una consecuencia directa de la acción de las cargas sísmicas, que generan movimientos laterales en la estructura durante un terremoto. Hace referencia a las fuerzas horizontales en las direcciones \hat{x} e \hat{y} , que son las resultantes en la base de una estructura al realizar un análisis (Chopra, 2020).. La determinación del corte basal en un modelo estructural depende de si se trata de un modelo con base fija o con interacción suelo-estructura. En el primero, el corte basal se calcula simplemente sumando las reacciones en la base de la estructura. En el caso del modelo con SSI, el corte basal se obtiene como la sumatoria del producto entre las aceleraciones en el centro de gravedad de cada piso y sus respectivas masas (Hurtado, 2022).

2.4.2. Drift entre piso

Se refiere al desplazamiento lateral relativo entre dos pisos adyacentes de una estructura. Es una medida importante para evaluar la respuesta sísmica de un edificio ya que proporciona información sobre la rigidez y la capacidad de deformación de la estructura frente a cargas sísmicas. El drift entre pisos es adimensional y se calcula como:

$$\delta_i = \frac{\Delta_i - \Delta_{i-1}}{h} \quad (2.9)$$

Donde Δ_i se refiere al drift del piso i , δ_i al desplazamiento del piso i y h a la distancia que hay entre ambos pisos (Paulay & Priestley M, 1992).

2.4.3. Norma NCh433

La norma NCh433 establece los requisitos exigibles para el diseño sísmico de edificios, esto implica las exigencias sísmicas que deben cumplir los equipos y otros elementos secundarios. También se incluyen recomendaciones sobre la evaluación del daño sísmico y su reparación (INN, 2012).

Dentro de sus disposiciones generales, está la zonificación sísmica, el efecto de suelo de fundación y de la topografía en las características del movimiento sísmico, y la explotación geotécnica asociada a la clasificación sísmica de suelos.

Zonificación Sísmica y Efectos del suelo de fundación

Se distinguen tres zonas sísmicas en el territorio nacional, donde las regiones IV, V, VI, VII, VIII, IX y Metropolitana tienen una división en base a sus comunas. Los parámetros que representan las características del suelo de fundación que influyen en el valor del esfuerzo de corte basal, se determinan de acuerdo a la Figura 2.5.

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 ($\varepsilon_{qu} \leq 2\%$)		
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	≥ 500		$\geq 0,40$ ($\varepsilon_{qu} \leq 2\%$)	≥ 50	
C	Suelo denso o firme	≥ 350		$\geq 0,30$ ($\varepsilon_{qu} \leq 2\%$)	≥ 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	*	*	*	*	*

Figura 2.5: Clasificación sísmica del terreno de fundación.

Fuente: INN, 2012

Por otro lado, el esfuerzo de corte basal está dado por:

$$Q_o = CIP \quad (2.10)$$

Donde: C = coeficiente sísmico, I = coeficiente relativo al edificio (definido por la Norma) y P = peso total del edificio sobre el nivel basal.

$$C = \frac{2,75SA_o}{gR} \left(\frac{T'}{T^*} \right)^n \quad (2.11)$$

Donde n, T', S, A_o, R son parámetros definido por Norma y T^* período del modo con mayor masa traslacional equivalente en la dirección de análisis.

Deformaciones Sísmicas

En cuanto a los drift entre pisos, se establece un valor máximo para 3 casos:

- a) El drift máximo medido en el centro de masas en cada una de las direcciones de análisis, no debe ser mayor que la altura entre pisos multiplicada por 0.002
- b) El drift máximo medido en cualquier punto de la planta, en cada una de las direcciones de análisis, no debe exceder en más de 0.001 h al drift medido en el centro de masas, con h altura entre pisos.
- c) Para estructuras de hormigón armado, el desplazamiento lateral de diseño en el techo, debe ser igual a

$$\delta_u = 1,3S_{de}(T_{ag}) \quad (2.12)$$

2.5. Almacenamiento de datos en SQL

Una base de datos es una colección estructurada de datos que abarca desde simples listas de compras hasta galerías de imágenes o vastas cantidades de información en redes corporativas. Para agregar, acceder y procesar los datos almacenados en una base de datos informática, se requiere un sistema de gestión de bases de datos. Dado que las computadoras tienen una gran capacidad para manejar grandes volúmenes de datos, los *sistemas de gestión de bases de datos* desempeñan un papel central en la informática, ya sea como utilidades independientes o como componentes de otras aplicaciones. Uno de los *sistemas de gestión de bases de datos* más ampliamente utilizados en Internet es MySQL, con miles de sitios que lo utilizan para una variedad de propósitos. (Axmark & Widenius, 2023).

Una base de datos relacional almacena los datos en tablas separadas en lugar de colocar todos los datos en un único almacén masivo. Las estructuras de la base de datos están organizadas en archivos físicos optimizados para obtener velocidad y eficiencia. El modelo lógico, con objetos como bases de datos, tablas, vistas, filas y columnas, proporciona un entorno de programación flexible. Se establecen reglas que gobiernan las relaciones entre diferentes campos de datos, como uno a uno, uno a muchos, únicos,

requeridos uopcionales, y punteros entre distintas tablas. La base de datos hace cumplir estas reglas, de manera que, con una base de datos bien diseñada, tu aplicación nunca encontrará datos inconsistentes, duplicados, huérfanos, desactualizados o faltantes (Axmark & Widenius, 2023).

Para el propósito de esta investigación, se utilizará MySQL Server como fuente para guardar toda la información de las simulaciones hechas junto con sus resultados, de manera que el análisis estadístico será más rápido, seguro y eficiente de hacer.

2.6. Computación de Alto Rendimiento

La *Computación de Alto Rendimiento* (HPC), es una tecnología que aprovecha el poder de las supercomputadoras o grupos de computadoras para resolver problemas complejos que dispositivos comerciales no pueden hacer o bien demorarían mucho en resolver. Su principal ventaja está en que permite al usuario procesar grandes cantidades de datos en una cantidad de tiempo significativamente menor.(Almeida, 2013).

Un Clúster HPC es una infraestructura de computación que se compone de varios ordenadores interconectados, trabajando juntos como un solo sistema. Es común referirse a cada uno de los n computadores del clúster como *nodo i* . Las ventajas y desventajas en comparación con un único ordenador dependen del programa informático que se ejecute, del tamaño del conjunto de datos y de los tipos de operaciones que se lleven a cabo. En un clúster, existen dos tipos de nodos: el nodo maestro, que gestiona a los demás nodos y los coordina para realizar cálculos operacionales, y los nodos trabajadores, que se encargan de ejecutar los cálculos asignados. Para obtener resultados, hay que conectarse al clúster desde una computadora externa mediante la Terminal del sistema operativo y ejecutar las líneas de comandos necesarias para iniciar el proceso, y luego extraer y visualizar los resultados obtenidos (Almeida, 2013).

La HPC se ha convertido en una herramienta esencial para cualquier investigador que busca soluciones a problemas altamente complejos y será utilizado como método de cálculo para obtener los resultados de los MSE del presente trabajo.

Capítulo 3

Metodología

En este capítulo se aborda el estudio de dos tipologías de edificios con diferentes configuraciones de subterráneos. El objetivo principal es llevar a cabo una serie de análisis, divididos en dos categorías: base fija e interacción suelo-estructura (SSI), y modificando el input sísmico. Además, se presenta en detalle una base de datos MySQL diseñada específicamente para el almacenamiento y extracción de los resultados obtenidos. Por último, se plantea la realización de un análisis estadístico con el propósito de evaluar los valores de corte basal y drift entre pisos obtenidos en las simulaciones.

3.1. Modelos STKO

La primera parte de la metodología consiste en hacer 2880 simulaciones utilizando OpenSees, donde se modificará el input de 8 modelos previamente definidos en STKO. Se clasifican en 2 categorías, Modelos de Baja Fidelidad, que corresponden a la simulación con Base Fija, y Modelos de Alta Fidelidad, que se refiere a SSI con DRM. Cada categoría contempla 2 tipos de edificios: uno de 20 pisos y otro de 55 pisos. Para el primero serán considerados configuraciones con 2 y 4 subterráneos, mientras que para el segundo se evaluarán configuraciones con 4 y 7 subterráneos. Los modelos STKO utilizados en las simulaciones tendrán una altura entre pisos de 3,5 metros desde la base y 3 metros para el subterráneo. También, seguirán un comportamiento lineal elástico, caracterizándose por contar con muros y columnas de espesor variable. El material seleccionado es hormigón armado, con *Elastic Beam-Column* para las vigas y columnas, y *Shell MITC4* para los muros y losas.

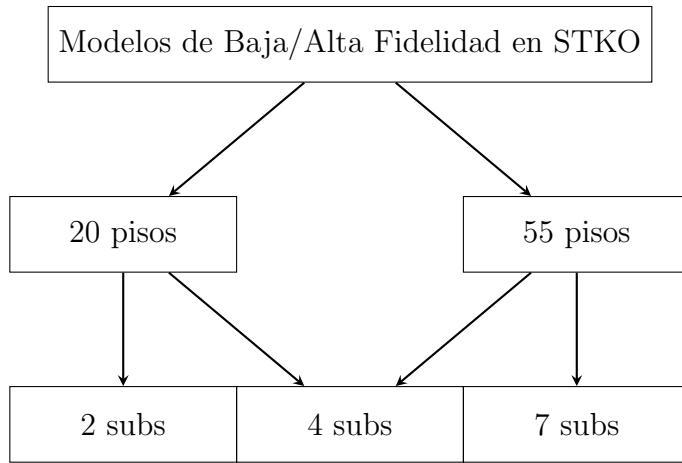


Figura 3.1: Discretización de modelos de baja y alta fidelidad.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.1. Edificio de 20 pisos

Las dos configuraciones del modelo de 20 pisos, basadas en el estructura B1 del estudio de Pinto et al. (2021), representan un edificio habitacional ubicado en Santiago de Chile. En las Figuras 3.2 y 3.3 se muestra la representación visual del edificio.

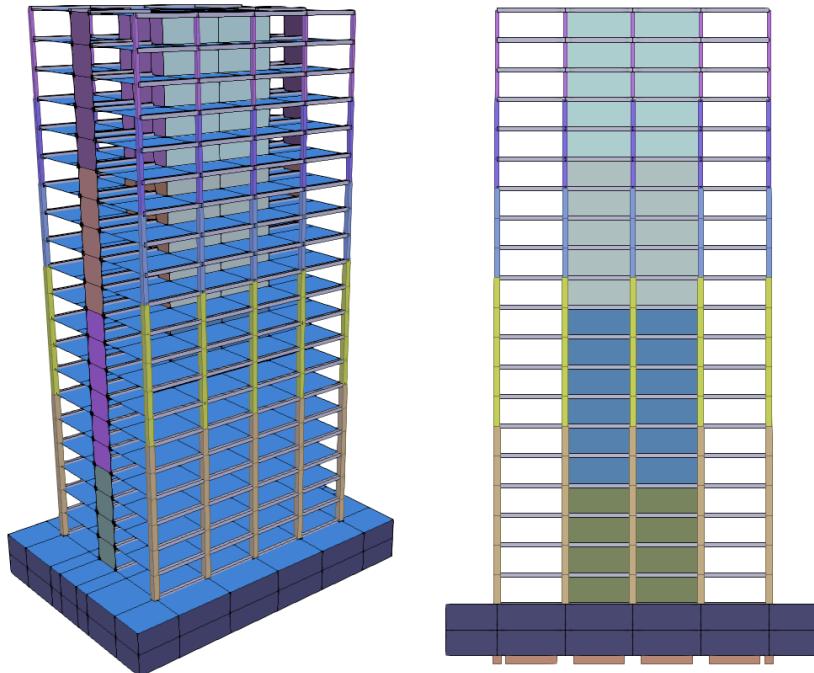


Figura 3.2: Visualización en STKO de edificio 20 pisos - 2 subterráneos.

Fuente: Elaboración propia.

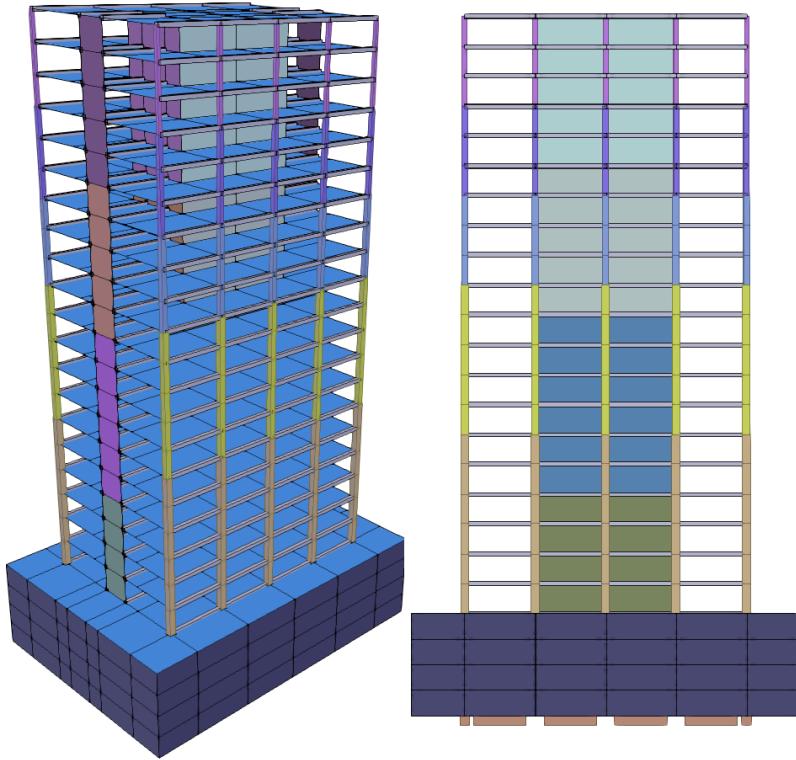


Figura 3.3: Visualización en STKO de edificio 20 pisos - 4 subterráneos.

Fuente: Elaboración propia.

Estructuración, fundaciones y cargas consideradas

El edificio de 20 pisos se estructura en torno a un núcleo resistente compuesto por muros de corte, que forman la espina dorsal central de la construcción. Este núcleo es el principal encargado de resistir las cargas laterales y proporcionar estabilidad a la estructura. Adicionalmente, dos columnas de muros de corte se sitúan en los extremos del eje horizontal, reforzando aún más la resistencia a las cargas laterales. Para soportar las losas, se emplean columnas unidas a vigas, creando un sistema de soporte adicional que se encarga de las cargas gravitacionales.

El plano de elementos finitos de las fundaciones es el mismo para ambas configuraciones, y se muestra en la Figura 3.4. Este comprende las cimentaciones de las columnas, un emplantillado central que sirve para soportar el núcleo de muros de corte, 2 emplantillados secundarios para soportar los muros externos y vigas de conexión. El subterráneo tendrá un mayor perímetro y estará rodeado por muros de contención.

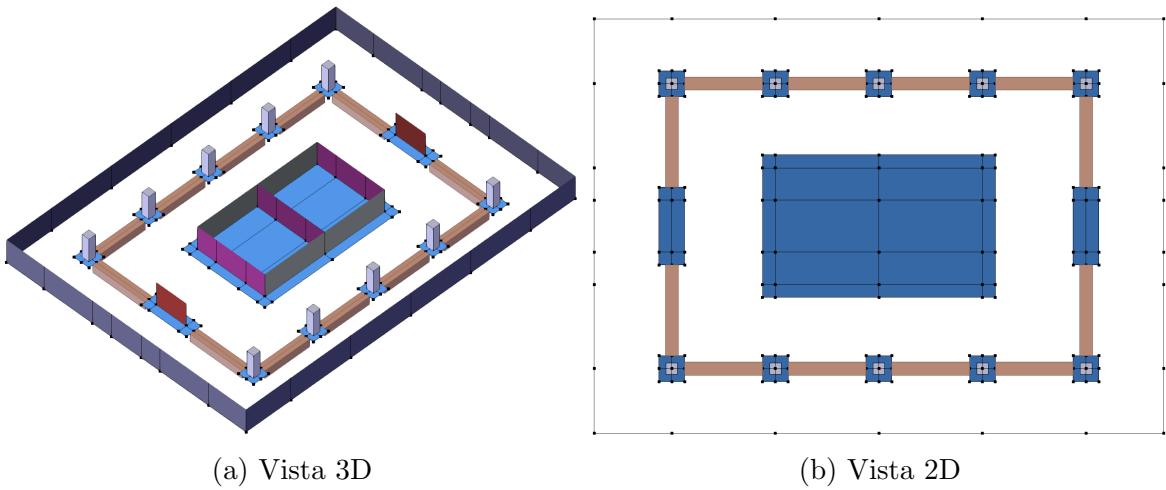


Figura 3.4: Visualización de las fundaciones del modelo de 20 pisos en STKO.
Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a las cargas consideradas, se tomará en cuenta el peso propio de las vigas, columnas y muros, mientras que las losas estarán sujetas a lo establecido por la norma NCh433 (INN, 2012) en la ecuación 3.1, donde D_L representa la carga muerta y L_L la carga viva.

$$Q_{Losas} = 1,0D_L + 0,5L_L \quad (3.1)$$

En OpenSees, los materiales se definen en Physical Properties, mientras que los elementos se definen en Element Properties. Para el cálculo del Módulo de Elasticidad, se emplea la expresión $E_c = 4700\sqrt{f'_c}$ (318, 2019), mientras que el Módulo de Corte se determina mediante la relación $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$. Esto permite definir un material elástico con parámetros E y G, y elementos lineales con dimensiones y cargas específicas. La Tabla 3.1 contiene las propiedades mecánicas del material, que abarcan la Resistencia a la Compresión (f'_c), el Módulo de Elasticidad (E), el Módulo de Poisson (ν) y el Módulo de Corte (G).

Parámetro	Magnitud	Unidades
f'_c	24,00	MPa
E_c	23.025,2	MPa
ν	0,20	-
G	9.593,83	MPa

Tabla 3.1: Parámetros usados en el material: Hormigón Armado.

Fuente: Pinto et al. (2021)

Por otro lado, las Tablas 3.2 y 3.3 contienen información detallada sobre los diferentes elementos considerados en el modelo, como el área transversal de las vigas y columnas, el espesor de los muros y losas, y las densidades junto a las cargas.

Elemento	Área Transversal [m²]	Densidad [kg/m³]	Carga [kN/m]
Vigas	0,25	0,61	-6,00
Vigas de conexión	1	2,4	-
Columna Sub	0,81	1,98	-19,44
Columna P1-P6	0,64	1,57	-15,36
Columna P7-P11	0,49	1,20	-11,76
Columna P12-P14	0,36	0,88	-8,64
Columna P15-P17	0,25	0,61	-6,00
Columna P18-P20	0,16	0,39	-3,84

Tabla 3.2: Propiedades físicas de los elementos tipo viga-columna.

Fuente: Elaboración propia.

Elemento	Espesor [m]	Densidad [kg/m³]	Carga [kN/m²]
Losas sub	0,15	4,1	-6,03
Losas P1-P19	0,15	5,45	-8,02
Losas Techo	0,15	6,80	-10,01
Muro Perimetral	0,5	2,4	-12
Nucleo Exterior Sub	0,4	2,4	-9,6
Nucleo Exterior P1-P4	0,4	2,4	-9,6
Nucleo Exterior P5-P10	0,3	2,4	-7,2
Nucleo Exterior P11-P15	0,2	2,4	-4,8
Nucleo Exterior P16-P20	0,15	2,4	-3,6
Nucleo Interior Corto Sub	0,35	2,4	-8,4
Nucleo Interior Corto P1-P4	0,35	2,4	-8,4
Nucleo Interior Corto P5-P10	0,25	2,4	-6
Nucleo Interior Corto P11-P15	0,15	2,4	-3,6
Nucleo Interior Corto P16-P20	0,15	2,4	-3,6
Nucleo Interior Long Sub	0,25	2,4	-6,00
Nucleo Interior Long P1-P4	0,25	2,4	-6,00
Nucleo Interior Long P5-P10	0,15	2,4	-3,60
Nucleo Interior Long P11-P15	0,15	2,4	-3,60
Nucleo Interior Long P16-P20	0,15	2,4	-3,60

Tabla 3.3: Propiedades físicas de los elementos tipo muro-losa.

Fuente: Elaboración propia.

Verificación y Validación

Se llevó a cabo una verificación del modelo, la cual consistió en examinar los modos de vibración y sus períodos correspondientes, validando los modos de vibración y los períodos del modelo con los obtenidos en la investigación realizada por Pinto et al. (2021) (ver Apéndice B). La Tabla 3.4 muestra los resultados modales de la configuración de 4 subterráneos, y en la Figura 3.5 se presentan sus formas respectivas. Estos concuerdan con las propuestas existentes en la literatura y se aproximan de manera precisa a los valores referenciados de Pinto et al. (2021). Las diferencias con el presente modelo radican en la configuración del núcleo estructural y la superficie del subterráneo; se ha diseñado un núcleo doblemente simétrico y se ubicó la estructura en el centro del subterráneo con un área basal reducida. Estas modificaciones se realizaron con el fin de simplificar la implementación DRM en el análisis de la SSI de los MAF.

Modo	Frecuencia [Hz]	Período[s]	Pinto (2021)[s]
1	0,43	2,34	2,73
2	0,64	1,57	2,38
3	1,19	0,84	0.88
4	1,99	0,50	0.66
5	2,63	0,38	0.55
6	3,17	0,32	0.41

Tabla 3.4: Resultado análisis modal edificio de 20 pisos - 4 subterráneos.

Fuente: Elaboración propia.

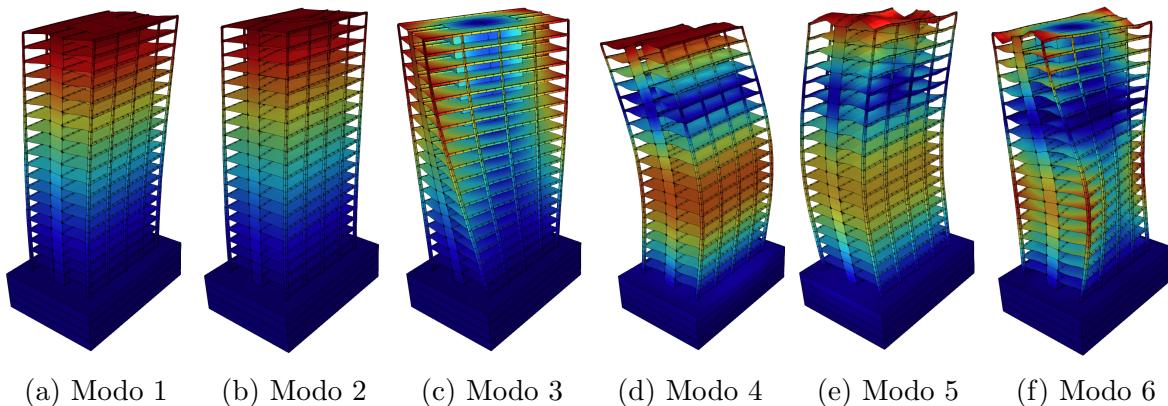


Figura 3.5: Modos fundamentales de vibración de edificio de 20 pisos - 4 subterráneos.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2. Edificio de 55 pisos

Estructuración, elementos, fundaciones y cargas consideradas

El edificio de 55 pisos sigue la misma estructuración que el modelo de 20 pisos, es decir, se basa en un núcleo resistente de muros de corte, con la diferencia de que este no posee muros de corte en sus extremos horizontales. Otra diferencia, es que el modelo tiene 2 tipos de vigas: perimetrales e internas. Las cargas serán las mismas, es decir, peso propio considerado para muros, vigas y columnas y la ecuación ?? de la NCh433.

Verificación y Validación

3.2. Simulación con Base Fija

3.2.1. Análisis Dinámico

3.3. Simulación con SSI

3.3.1. Análisis Dinámico

3.4. Almacenamiento de la información

3.5. Análisis Estadístico

Capítulo 4

Resultados y Análisis

En esta sección debe incluir todos los resultados obtenidos, incluyendo figuras, gráficas y tablas. Estos resultados deben ser explicados, analizados y discutidos respecto del estado del arte de la investigación. (Máximo 20 páginas).

4.1. Resultados Baja Fidelidad

4.1.1. Corte Basal

4.1.2. Drift

4.2. Resultados Alta Fidelidad

4.2.1. Corte Basal

4.2.2. Drift

4.3. Comparativa

4.3.1. ANOVA

Coeficiente de Corte Basal vs Magnitud vs Localización

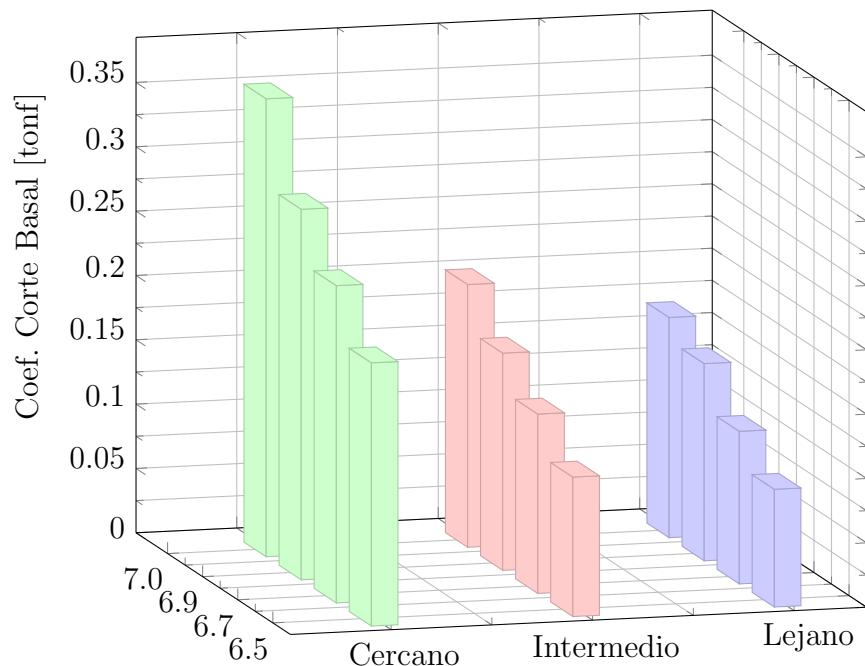


Figura 4.1: Corte Basal del edificio B1 para los distintos campos. Se tomó el valor promedio de las 3 iteraciones de cada tipo de ruptura.

Fuente: Elaboración Propia.

Capítulo 5

Conclusiones

En esta sección debe incluir todas las conclusiones del trabajo que den respuesta a las diferentes preguntas de investigación, hipótesis y objetivos propuestos. La sección de conclusiones no incluye análisis y discusiones de resultados realizados en las secciones anteriores (3 a 4 páginas).

5.1. Conclusiones teóricas

5.2. Conclusiones prácticas

5.3. Investigación futura

Glosario

ASCE American Society of Civil Engineers (ASCE), es una sociedad profesional que establece y publica códigos y normas técnicas para el diseño y construcción de infraestructuras civiles en los Estados Unidos. Estos códigos, como el ASCE 7 para cargas estructurales o el ASCE 41 para la evaluación y rehabilitación de edificios existentes, proporcionan directrices detalladas sobre aspectos como el diseño sísmico, el diseño de cimentaciones, el diseño de puentes y muchas otras áreas relacionadas con la ingeniería civil. Los códigos ASCE son ampliamente utilizados por ingenieros y profesionales de la construcción para garantizar la seguridad, la funcionalidad y la sostenibilidad de las estructuras en el contexto estadounidense . 12

Clúster HPC Infraestructura de computación que se compone de varios ordenadores interconectados, trabajando juntos como un solo sistema. 20

Eurocode Conjunto de normas europeas que proporcionan directrices y criterios técnicos para el diseño y construcción de estructuras civiles, como edificios, puentes y otras infraestructuras. Estas normas establecen estándares comunes en toda Europa, promoviendo la armonización y facilitando la interoperabilidad en el campo de la ingeniería civil. Los Eurocódigos abarcan diferentes aspectos del diseño estructural, incluyendo cargas, resistencia de materiales, análisis estructural y requisitos de seguridad. Su objetivo es garantizar la seguridad, durabilidad y eficiencia de las estructuras construidas en Europa. 12

framework Un framework de código abierto en Python es una estructura o conjunto de herramientas y bibliotecas predefinidas que permiten a los desarrolladores construir aplicaciones o resolver problemas específicos utilizando el lenguaje de

programación Python. Estos frameworks proporcionan una base sólida y abstraen ciertos aspectos de desarrollo, lo que permite a los desarrolladores centrarse en la lógica de la aplicación en lugar de preocuparse por detalles técnicos y repetitivos. Al ser de código abierto, significa que el framework está disponible para su uso, modificación y distribución de forma gratuita. Esto fomenta la colaboración y la comunidad de desarrolladores, ya que cualquiera puede contribuir con mejoras, correcciones de errores o nuevas características al framework. Además, los frameworks de código abierto suelen tener una gran base de usuarios y una amplia documentación, lo que facilita su aprendizaje y utilización por parte de los desarrolladores. 14

Python Python es un lenguaje de programación de alto nivel, interpretado y de propósito general. Fue creado en 1991 por Guido van Rossum y se caracteriza por ser fácil de leer, escribir y entender. Python se destaca por su simplicidad y legibilidad de código, lo que lo convierte en una excelente opción tanto para principiantes como para programadores experimentados. Es un lenguaje versátil que se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, como desarrollo web, análisis de datos, inteligencia artificial, automatización de tareas, entre otros. Además, Python cuenta con una gran comunidad de desarrolladores que contribuyen con bibliotecas y herramientas que amplían su funcionalidad y facilitan el desarrollo de proyectos. 14

ShakerMaker ShakerMaker es un framework de trabajo de Python de código abierto que simplifica la generación de sismogramas sintéticos de banda ancha, producidos por representaciones cinemáticas de fallas finitas de rupturas sísmicas, utilizando un modelo estratificado 1D de la corteza y el método de frecuencia-onda (f-k). 3, 6

Siglas

DRM Domain Reduction Method — Método de Reducción de Dominio. 3, 14, 15, 22, 27

FEM Finite Elements Method — Método de Elementos Finitos. 9, 14

FSR Falla San Ramón. 1–3, 6, 8, 9

HPC High Perfomance Computing — Computación de Alto Rendimiento. 6, 20

MAF Modelos de Alta Fidelidad. 3, 9, 27

MBF Modelos de Baja Fidelidad. 2, 3, 9

MSE Modelos de Simulación Estructural. 2, 3, 20

OpenSees Open System for Earthquake Engineering Simulation — Sistema Abierto para la Simulación de Ingeniería Sísmica. 3, 6, 16, 22

PBE Perfomance Based Engineering — Ingeniería Basada en Desempeño. 7

PBEE Perfomance Based Earthquake Engineering — Ingeniería Sísmica Basada en Desempeño. 7, 9

PBSD Perfomance Based Seismic Design — Diseño Sísmico Basado en Desempeño. 7, 12

SQL Structured Query Language — Lenguaje de Consulta Estructurada. 5

SSI Soil-Structure Interaction — Interacción suelo estructura. 12, 13, 17, 22, 27

STKO Scientific ToolKit for OpenSees — Kit de herramientas científicas para OpenSees. 3, 4, 6, 22

Referencias

- 318, A. C. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19): An ACI Standard ; Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-19)*. Opal Collection. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- Abell, J. A., Crempien, J., & Recabarren, M. (2022). ShakerMaker: A framework that simplifies the simulation of seismic ground-motions. *SoftwareX*, 17, 100911.
- Abell, J. A., Orbović, N., McCallen, D. B., & Jeremic, B. (2018). Earthquake soil-structure interaction of nuclear power plants, differences in response to 3-D, 3 × 1-D, and 1-D excitations. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 47(6), 1478–1495.
- Ahmed, H., Ramadhan, N., & Mawlood, Y. (2020). Effect of Fixed-Base and Soil Structure Interaction on the Dynamic Responses of Steel Structures. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(9), 6298–6305.
- Almeida, S. (2013). An Introduction to High Performance Computing. Research report, CENTRA, Departamento de Física, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Ammirati, J., Vargas, G., Rebolledo, S., Abrahami, R., Potin, B., Leyton, F., & Ruiz, S. (2019). The Crustal Seismicity of the Western Andean Thrust (Central Chile, 33°–34° S): Implications for Regional Tectonics and Seismic Hazard in the Santiago Area. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(15), 1985–1999.
- Armijo, R., Rauld, R., Thiele, R., Vargas, G., Campos, J., Lacassin, R., & Kausel, E. (2010). The West Andean Thrust, the San Ramón Fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile. *Tectonics*, 29(2).
- Axmark, D. & Widenius, M. (2023). *MySQL 8.0 Reference Manual*. Redwood Shores, CA: Oracle.
- Bapir, B., Abrahamczyk, L., Wichtmann, T., & Prada-Sarmiento, L. F. (2023). Soil-structure interaction: A state-of-the-art review of modeling techniques and studies

- on seismic response of building structures. *Frontiers in Built Environment*, 9, 2297–3362.
- Bielak, J., Loukakis, K., Hisada, Y., & Yoshimura, C. (2003). Domain Reduction Method for Three-Dimensional Earthquake Modeling in Localized Regions, Part I: Theory. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(2), 817–824.
- Chopra, A. K. (2020). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering* (Fifth ed.). Pearson.
- Dvorkin, E. N. & Bathe, K. (1984). A continuum mechanics based four-node shell element for general non-linear analysis. *Engineering Computations*, 1(1), 77–88.
- Easton, G. (2021). Santiago, territorio y amenaza de la Falla de San Ramón. *Revista Geohuellas*, (4), 18–23.
- Easton, G., Boroschek, R., Rebolledo, S., Inzulza, J., Ejsmentewicz, D., Vergara, P., & Giesen, E. (2022). La falla de San Ramón y la sostenibilidad del piedemonte de Santiago: recomendaciones para la política pública.
- Easton, G., Inzulza, J., Perez, S., Ejsmentewicz, D., & Jimenez, C. (2018). Misleading urbanization? The San Ramón fault as a new seismic risk scenario and the sustainability of Santiago, Chile. *Revista de Urbanismo*, (3).
- Estay, N. P., Yáñez, G., Carretier, S., Lira, E., & Maringue, J. (2016). Seismic hazard in low slip rate crustal faults, estimating the characteristic event and the most hazardous zone: study case San Ramón Fault, in southern Andes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(12), 2511–2528.
- Gaxiola, R. J. (2022). Diseño sísmico basado en desempeño - Revisión de una alternativa de diseño. In *XXIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Juriquilla, Querétaro, México. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, A.C.
- Hurtado, A. (2022). Modelamiento no lineal de la interacción suelo-estructura del edificio de ingeniería de la Universidad de los Andes. Memoria, Universidad de los Andes, Santiago de Chile.

INN (2012). Norma Chilena NCh433.Of2009 Mod. 2012: Diseño sísmico de edificios. Instituto Nacional de Normalización .

Jagota, V., Sethi, A., P. E., & Kumar, K. (2013). Finite Element Method: An Overview. *Walailak Journal Sci & Tech*, 10(1), 1–8.

Marcus, J. & Thiers, R. (2015). Control del daño sísmico estructural en pórticos prefabricados de hormigón and armado a través de uniones híbridas autocentrantes. *Obras y Proyectos*, (18), 46–55.

McKenna, F. (1997). *Object-Oriented Finite Element Programming: Frameworks for Analysis, Algorithms and Parallel Computing*. Phd thesis, Universidad de California, Berkeley.

McKenna, F. (2011). OpenSees: A Framework for Earthquake Engineering Simulation. *Computing in Science & Engineering*, 13(4), 58–66.

McKenna, F., Scott, M. H., & Fenves, G. L. (2010). Nonlinear Finite-Element Analysis Software Architecture Using Object Composition. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 24(1), 95–107.

Paulay, T. & Priestley M, J, N. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings* (First ed.). USA: John wiley & Sons, Inc.

Petrarca, M., Candeloro, F., & Camata, G. (2017). *STKO user manual* (Primera ed.). Pescara, Italy: ASDEA Software Technology.

Pinto, F. J., Ledezma, C., Astroza, R., & Abell, J. A. (2021). Modeling the Loss of Vibration Energy in Buildings to Elastic-waves Using High-fidelity FE Modeling and Absorbent Exterior Boundaries. *Journal of Earthquake Engineering*, 26(13), 6567–6584.

Rinche, Hancock, G, J., & Rasmussen K, J, R. (2016). Formulation & Implementation Of General Thin-Walled Open-Section Beam-Column Elements In Opensees. Research Report R961, The University of Sidney.

Saouma, E, V. & Hariri-Ardebili, A, M. (2021). Performance Based Earthquake Engineering. In *Aging, Shaking, and Cracking of Infrastructures: From Mechanics*

to Concrete Dams and Nuclear Structures (pp. 517–528). Cham, Suiza: Springer International Publishing.

Sato, A. & Ono, T. (2004). Evaluation of Deformation Capacity of H-Section Beam Considering Material Property. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, (3426).

Scarfone, R., Morigi, M., & RConti (2020). Assessment of dynamic soil-structure interaction effects for tall buildings: A 3D numerical approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 128, 105864.

Surendran, M., Natarajan, S., Bordas, S. P. A., & Palani, G. S. (2017). Linear smoothed extended finite element method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 112(12), 1733–1749.

Vargas, G., Klinger, Y., Rockwell, T. K., Forman, S. L., Rebolledo, S., Baize, S., Lacassin, R., & Armijo, R. (2014). Probing large intraplate earthquakes at the west flank of the Andes. *Geology*, 42(12), 1083–1086.

Vidal, F. (1994). Los terremotos y sus causas. In *El estudio de los terremotos en Almería* (pp. 17–38). Instituto de Estudios Almerienses.

Yoshimura, C., Bielak, J., Hisada, Y., & Fernández, A. (2003). Domain Reduction Method for Three-Dimensional Earthquake Modeling in Localized Regions, Part II: Verification and Applications. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(2), 825–840.

Zhu, L. & Rivera, L. A. (2002). A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media. *Geophysical Journal International*, 148(9), 619–627.

Apéndice A

Detalles Revisión Bibliográfica

A.1. Método de Frecuencia-Onda (F-K)

Se establece un sistema de coordenadas cilíndricas (e_r, e_θ, e_z) , donde e_z apunta hacia arriba. El desplazamiento en un medio heterogéneo en dirección vertical puede ser expresado en términos de tres vectores ortogonales. La demostración siguiente está basada en el documento de Zhu & Rivera (2002).

$$u(r, \theta, z, t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{m=0, \pm 1, \dots} \int e^{-i\omega t} d\omega \int_0^\infty k dk (U_z R_m^k + U_r S_m^k + U_\theta T_m^k), \quad (\text{A.1})$$

R_m^k , S_m^k y T_m^k se denominan armónicos vectoriales de superficie. Se pueden realizar expansiones similares para la tracción en el plano horizontal.

$$\sigma(r, \theta, z, t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{m=0, \pm 1, \dots} \int e^{-i\omega t} d\omega \int_0^\infty k^2 dk (T_z R_m^k + T_r S_m^k + T_\theta T_m^k). \quad (\text{A.2})$$

Se observa que un factor k es extraído de T_z , T_r y T_θ para simplificar las matrices derivadas posteriormente. Las ecuaciones A.1 y A.2 separan la variación en z del desplazamiento y la tensión de las variaciones en (r, θ) . Bajo esta expansión, la ecuación diferencial de segundo orden del movimiento

$$(\lambda + 2\mu) \nabla(\nabla \cdot u) - \mu \nabla \times \nabla \times u + \rho \omega^2 u = 0, \quad (\text{A.3})$$

se reduce a un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden en formato matricial.

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} U_r \\ U_z \\ T_z \\ T_r \\ U_\theta \\ T_\theta \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & \frac{1}{\mu} & 0 & 0 \\ 1 - 2\xi & 0 & \frac{\xi}{\mu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\rho(\frac{\omega}{k})^2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 4\mu\xi - \rho(\frac{\omega}{k})^2 & 0 & 1 - 2\xi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\mu} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu - \rho(\frac{\omega}{k})^2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_r \\ U_z \\ T_z \\ T_r \\ U_\theta \\ T_\theta \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{db(z)}{dz} = Mb(z) \quad (\text{A.5})$$

Aquí, ρ es la densidad; $\xi = \frac{\mu}{\lambda+2\mu}$; $\xi_1 = 1 - \xi$; λ, μ son las constantes de Lame. El vector b a menudo se llama vector de desplazamiento-estrés. Ten en cuenta que M se puede dividir en una submatriz de 4×4 que describe el movimiento en el plano (z, r) y una submatriz de 2×2 para el movimiento en la dirección θ . A menudo se les llama sistema P-SV y sistema SH. Nos concentraremos en el problema P-SV. Para un medio homogéneo, M es constante. En este caso, la solución general de (A.6) es:

$$b(z) = e^{zM} b_0. \quad (\text{A.6})$$

Para calcular la exponencial de una matriz, utilizamos la descomposición de Jordan de M :

$$M = EJE^{-1}, \quad (\text{A.7})$$

donde E es una matriz de similitud y J es la forma canónica de Jordan de M . Utilizando esta descomposición y la definición de la exponencial de una matriz, tenemos:

$$e^{zM} = Ee^{zJ}E^{-1}. \quad (\text{A.8})$$

A partir de (A.6) y la expresión anterior, el desplazamiento-estrés en cualquier z se puede expresar como:

$$b(z) = E\Lambda(z)w, \quad (\text{A.9})$$

donde

$$E(z) = e^{zJ}, \quad (\text{A.10})$$

y w es un vector constante que se determina mediante condiciones de borde.

Apéndice B

Validación de los MSE

B.0.1. Modelo de 20 pisos

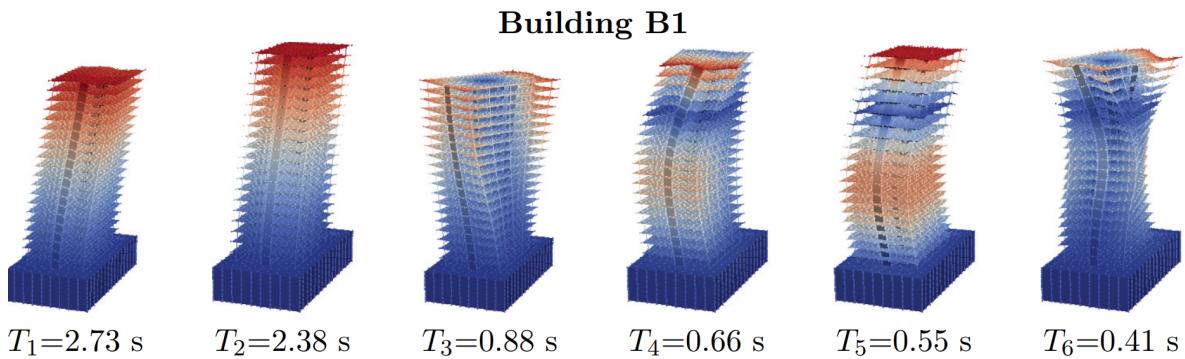


Figura B.1: Modos de base fija para el edificio B1.

Fuente: Pinto 2021

Se verificó que el drift entre pisos y el corte basal estuvieran dentro de los márgenes de la norma NCh433. Esto, mediante un análisis transciente que tomó como input sísmico los registros de dos terremotos: Ranco-1985 y Talca-2010. En las Tabla B.1 y B.2 se especifican los resultados del análisis transciente y en las Figuras B.2 y B.3 se muestra la gráfica que verifican el drift entre pisos menor a $0,002 \cdot 3,5 = 0,007$.

Con estos gráficos se validan los modelos de 55 pisos. Al poseer misma estructuración y solo variar la cantidad de pisos, los análisis con base fija no influencian mucho bla bla bla

Parámetro	Magnitud	Unidad
Peso Estructura	223.674,72	kN
Corte Basal X [Max]	7.743,05	kN
Corte Basal Y [Max]	8.245,83	kN
Corte Basal Z [Max]	4.196,79	kN
Coeficiente Basal X	0,03	-
Coeficiente Basal Y	0,04	-
Coeficiente Basal Z	0,02	-

Tabla B.1: Resultado de análisis transiente de Ranco 1985 (Mw=7.9).

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Magnitud	Unidad
Peso Estructura	223.674,72	kN
Corte Basal X [Max]	49.453,23	kN
Corte Basal Y [Max]	49.969,98	kN
Corte Basal Z [Max]	32217,9	kN
Coeficiente Basal X	0,22	-
Coeficiente Basal Y	0,22	-
Coeficiente Basal Z	0,14	-

Tabla B.2: Resultado de análisis transiente de Talca 2010 (Mw=8.8).

Fuente: Elaboración propia.

Terremoto 1985, estación Ranco, Magnitud 7.9Mw

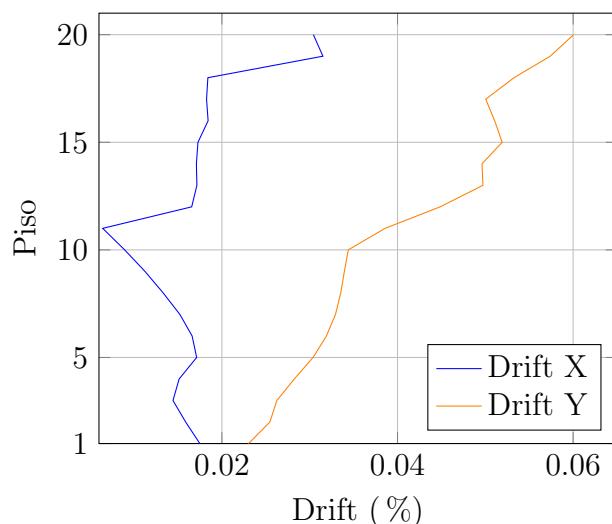


Figura B.2: Drift de modelo de 20 pisos y 4 subterráneos para Ranco 1985.

Fuente: Elaboración propia.

Terremoto 2010, estación Talca, Magnitud 8.8Mw

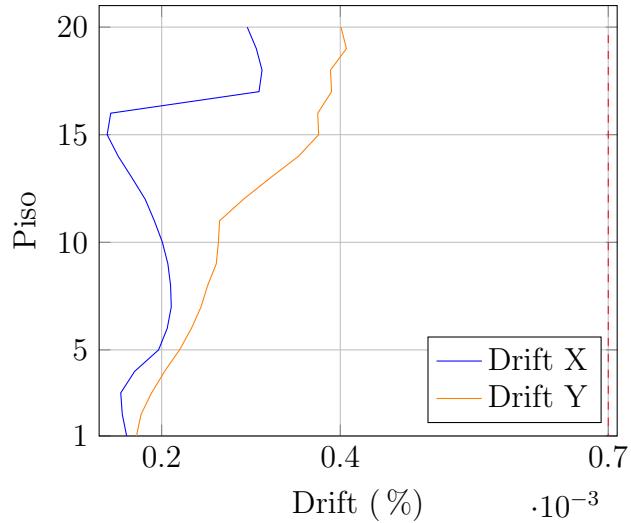


Figura B.3: Drift de modelo de 20 pisos y 4 subterráneos para Talca 2010.
Fuente: Elaboración propia.

B.0.2. Modelo de 55 pisos

Se repitió el mismo análisis y metodología de verificación y validación que en la Sección B.0.1 En las Tabla ?? y ?? se especifican los resultados del análisis transiente y en las Figuras ?? y ?? se muestra la gráfica que verifican el drift entre pisos menor a 0,007.

Apéndice C

Base de datos MySQL

La base de datos se diseñó para el almacenamiento de la información y resultados de los modelos y simulaciones de las estructuras utilizadas en esta tesis. Entre las principales tablas, están `model_specs_box`, `model_specs_global` y `model_specs_structure`, las cuales contienen las especificaciones de los modelos estructurales. Estas incluyen el número de nodos, elementos, particiones y la estructuración de la malla.

Por otro lado, las tablas `simulation`, `simulation_model` y `simulation_sm_input` administran la configuración y los parámetros de las simulaciones. Estas almacenan información crucial como la etapa de simulación, las opciones de simulación y los datos de entrada para la simulación.

Finalmente, la tabla `model_structure_perfdomance` registra los resultados de las simulaciones mediante otras tablas específicas que se pueden ver en la Figura C.1. Estos resultados, incluyen métricas de desempeño como las aceleraciones absolutas, el corte basal y los drift entre pisos.

Los datos fueron cargados a la base de datos mediante un programa de python que se movía entre las distintas carpetas que contenían los resultados en formato dataset, por el cual mediante la herramienta pandas se fueron procesando y cargando a esta. La base se hostea desde Google Cloud SQL y la trata de la información se pudo hacer desde BigQuery y MySQL Workbench 8.0.

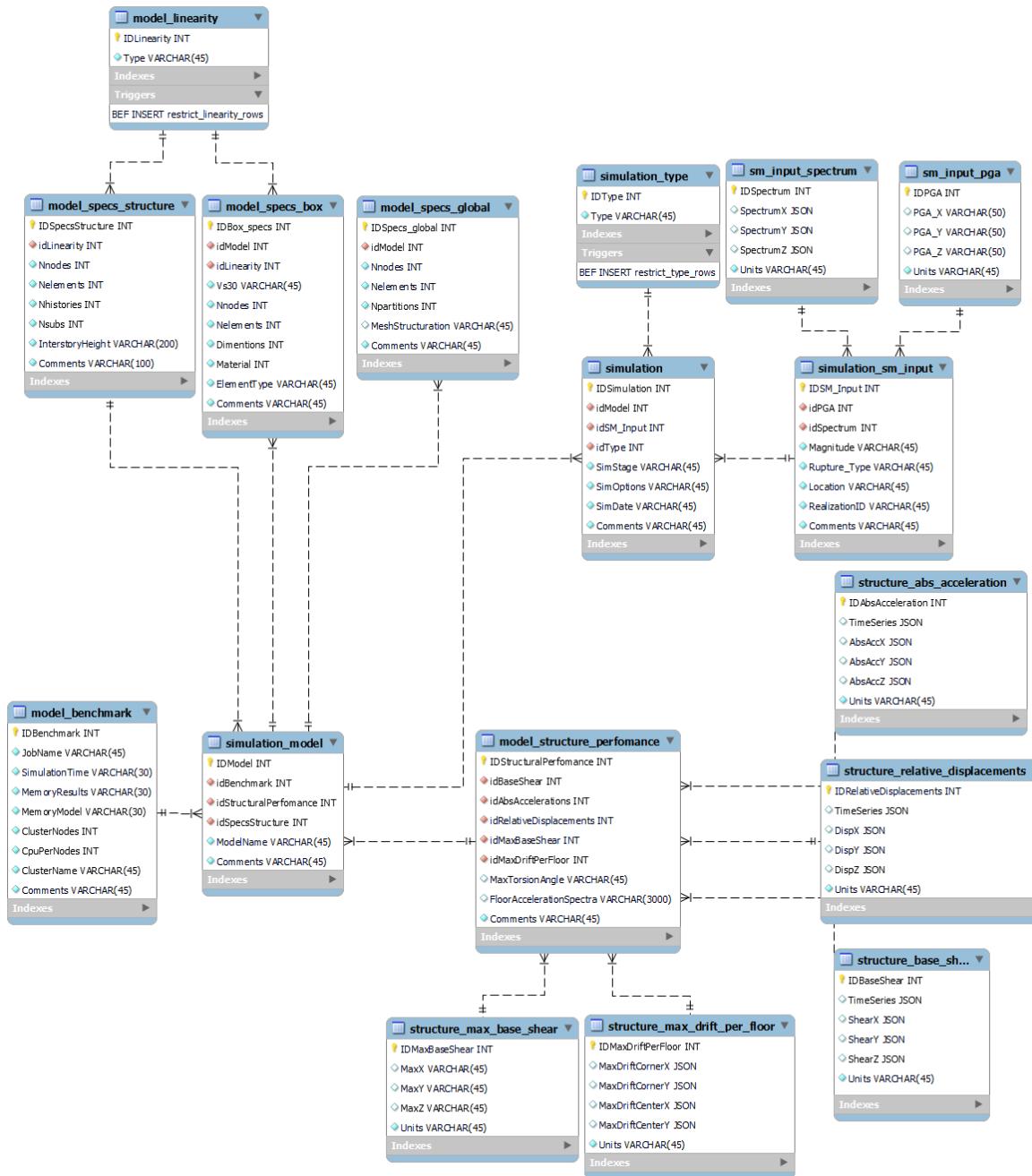


Figura C.1: Base de datos MySQL relacional usada para almacenar y extraer los resultados.

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice D

Benchmark del servidor HPC Clúster