

SEDE SANTIAGO FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGIA ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Cálculo del espectro de respuesta elástico para la Falla San Ramón

Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil

Alumno: Tomás Mir Fernández Profesor Guía: Andrés Vito Bahamondes

Santiago, Chile Diciembre, 2016



SEDE SANTIAGO FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGIA ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Cálculo del espectro de respuesta elástico para la Falla San Ramón

Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil

Alumno: Tomás Mir Fernández Profesor Guía: Andrés Vito Bahamondes

Santiago, Chile Diciembre, 2016

CALIFICACIÓN DE LA MEMORIA

En Santiago	o, el	de	de, I	os al	bajo	firmante	es dejan col	nstand	cia q	ue el alum	no
				. de	la	carrera	Ingeniería	Civil	ha	aprobado	la
memoria pa	ra opta	ar al t	ítulo			Co	on una nota	de			

Profesor:	Profesor:
Firma:	Firma:

Profesor:
Firma:

Santiago, Chile Diciembre, 2016

Para mis padres, Hermanos Y en especial a mi hija

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por todo el apoyo durante estos largos años, mis hermanos y a Agustina por ser el motor de este proceso.

A todos mis amigos que estuvieron en todo este largo proceso ayudándome directa o indirectamente a pasar todos los obstáculos.

Y en especial a Antonia Manzi quien me ayudo a en las correcciones y me entrego el apoyo necesario para terminar este proceso.

RESUMEN

Debido a que Chile es un país de alta actividad sísmica, es necesario un constante control de fuentes sismogénicas presentes en nuestro país. Una de éstas, es la Falla San Ramón que pertenece a la categoría de fallas corticales inversas. Esta investigación aporta una propuesta para ingeniería básica del espectro de respuesta elástico para aceleraciones, extrapolando datos de una serie de fallas a nivel mundial que tengan características semejantes a la Falla San Ramón.

La Falla de San Ramón, está ubicada en el frente precordillerano de la región Metropolitana de un largo aproximado de 35 kilómetros, la cual tiene una aceleración estimada de 0.7g (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2012). La metodología en primera instancia, se basa en caracterizar la Falla San Ramón. En segunda instancia, buscar fallas similares a nivel internacional, para luego, a través de la integrada de Duhamel, resolver los espectros de respuesta de cada uno de los registros. Por último, se finaliza haciendo un estudio estadístico de los resultados.

Una vez obtenidos los primeros resultados, a través de un análisis estadístico, se puede obtener el espectro de respuesta de la Falla San Ramón con amortiguamientos entre 2-10%, para suelos tipos B, C y D. Para posteriormente compararlos con la normativa vigente en Chile, la cual indica que la región Metropolitana se encuentra en zona 2 y 3, lo que equivale a 0.3g y 0.4g de aceleración respectivamente.

Palabras Clave: Falla San Ramón, Espectro de respuesta, sismo, aceleración, falla cortical, otros.

ABSTRACT

Due to Chile's high seismic activity, it is necessary a constant control of seismogenic sources present in our country. One of these is the San Ramón Fault that belongs to the category of reverse cortical faults. This research provides a proposal for basic engineering of the elastic response spectrum for accelerations, using data from a series of global faults that have similar characteristics to the San Ramón Fault.

The San Ramón Fault is located in the pre mountain range of the Metropolitan region and is approximate 35 kilometers long, having an estimated acceleration of 0.7g (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2012). In first instance, the methodology is based on characterizing the San Ramón Fault. In second instance, looking for similar faults at an international level, and then, through Duhamel's integrated, solve the response spectra of each of the registers. Finally, it is concluded by making a statistical study of the results.

Once obtained the first results, through a statistical analysis, the response spectrum of the San Ramón Fault can be obtained with dampings between 2% and 10%, for types B, C and D soils. Following a comparison with the current Chilean regulations, which indicates that the Metropolitan region is in seismic zones 2 and 3, which is equivalent to an acceleration of 0.3g and 0.4g respectively.

Keywords: San Ramón Fault, response spectrum, earthquake, acceleration, cortical failure, others.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUM	ENVI
ABSTRA	ACTVII
TABLA I	DE CONTENIDOS VIII
INDICE	DE ILUSTRACIONXI
INDICE	DE TABLASXVII
1. INTI	RODUCCIÓN1
1.1.	OBJETIVOS2
1.2.	ALCANCE
2. MAF	RCO TEÓRICO4
2.1.	Introducción4
2.2.	Fallas superficiales7
2.3.	Análisis de riesgo sísmico11
2.4.	Espectros de respuesta y de diseño12
3. MET	TODOLOGIA17
3.1.	Resumen17
3.2.	Caracterización Falla San Ramón18
3.2.1.	Caracterización geométrica de la Falla San Ramón18
3.2.2.	Caracterización sísmica de la Falla San Ramón19
3.3.	Búsqueda de fallas similares19
3.3.1.	Fallas con registro de aceleración20
3.3.2.	Factores de semejanza con la Falla San Ramón

3.3.3. Factor de proximidad a la Falla San Ramón	21
3.4. Ajuste de registros de aceleración	21
3.4.1. Factor de corrección por magnitud y aceleración máxima del suelo	22
3.4.2. Factor de corrección por distancia al acelerógrafo	23
3.5. Cálculo de espectro de respuesta elástico para aceleración	23
3.6. Análisis estadístico	25
3.7. Función propuesta para espectro de respuesta elástico	26
4. RESULTADOS	28
4.1. Caracterización Falla San Ramón	28
4.1.1. Caracterización geométrica de la Falla San Ramón	28
4.1.2. Caracterización sísmica de la Falla San Ramón	31
4.2. Búsqueda de fallas Similares	32
4.2.1. Que cuenten con registro de aceleración	32
4.2.2. Que cumplan los factores de semejanza a la Falla San Ramón	32
4.2.3. Que cumplan los factores de semejanza a la Falla San Ramón	34
4.3. Factores de corrección	33
4.4. Espectros de respuesta	37
4.5. Análisis estadístico	55
4.6. Función propuesta para espectro de respuesta elástico	62
5. CONCLUSIONES	65
5.1. TRABAJO FUTURO	67
BIBLIOGRAFÍA	68
ANEXOS	71
A. ANEXO 1	71
A.1. Datos históricos de sismos en Chile	71

В.	ANEXO 2	74
B.1.	Código MATLAB para un registro típico	74
B.2.	Código MATLAB para función SDOF	75

INDICE DE ILUSTRACION

Ilustración 1. Diagrama típico de interacción entre las diferentes fuentes
sismogénicas (Astroza & Astroza, 2008)2
Ilustración 2. Interacción típica de la placa Sudamericana (a la derecha) y la placa
de nazca (a la izquierda) (Centro Sismológico Nacional)
Ilustración 3. Gráfico histórico de sismos categorizados por nivel de ocurrencia
(Centro Sismológico Nacional)5
Ilustración 4. Digrama de origen sísmico (Leyton, Ruiz, & Sepúlveda, 2010)6
Ilustración 5. Características geométricas de una falla genérica. (Open Seismic
Hazard Analysis , 2010)8
Ilustración 6. (Instituo Nacional de Prevención Sísmica, Argentina, s.f.) Diagrama de
interacción de una falla normal9
Ilustración 7. (Instituo Nacional de Prevención Sísmica, Argentina, s.f.) Diagrama de
interacción de una falla inversa10
Ilustración 8. (Instituo Nacional de Prevención Sísmica, Argentina, s.f.) Diagrama de
interacción de una falla de rumbo10
Ilustración 9. Descripción de proceso de creación de un espectro de respuesta
(Francisco & Villafañe, 2002)14
Ilustración 10. Estructura general de la metodología usada
Ilustración 11. Plano de falla y sus ángulos (Universidad de Concepción, Geofísica).
Ilustración 12. Espectro de respuesta elástico para diferentes tipos de suelo para un
sismo de magnitud 5.5 a 10 kilómetros de distancia (Elnashai & Di Sarno, 2008).19
Ilustración 13. Ley de atenuación para distintos tipos de suelos para sismo corticales
(Ambraseys & Douglas, 2002)23
Ilustración 14. Ubicación de Falla San Ramón (Armijo, y otros, 2010)29
Ilustración 15. Ley de atenuación para distintos tipos de suelos para sismo corticales
(Ambraseys & Douglas, 2002)

Ilustración 16. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 17. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 18. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 19. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 20. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 21. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 22. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 23. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 24. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 25. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center,

Ilustración 26. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 27. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 28. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 29. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 30. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 31. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 32. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 33. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 34. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 35. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center,

Ilustración 36. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 37. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 38. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 39. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 40. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 41. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 42. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.)......51 Ilustración 43. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 44. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 45. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center,

Ilustración 46. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 47. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 48. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 49. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, Ilustración 50. Espectro de respuesta elástico de pseudo-aceleración para amortiguamiento de 2% en valores de [m/s^2].55 Ilustración 51. Espectro de respuesta elástico de pseudo-aceleración para amortiguamiento de 3% en valores de [m/s^2].56 Ilustración 52. Espectro de respuesta elástico de pseudo-aceleración para Ilustración 53. Espectro de respuesta elástico de pseudo-aceleración para amortiguamiento de 5% en valores de [m/s^2].57 Ilustración 54. Espectro de respuesta con amortiguación del 2% comparado con las Ilustración 55. Espectro de respuesta con amortiguación del 3% comparado con las desviaciones estándar......58 Ilustración 56. Espectro de respuesta con amortiguación del 5% comparado con las desviaciones estándar......59 Ilustración 57. Espectro de respuesta con amortiguación del 10% comparado con Ilustración 58. Espectro de respuesta elástico de pseudo-aceleraciones para la Falla San Ramón basado en diferentes grados de amortiguación.60

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de suelo según Decreto Supremo 61 (Ministerio de Vivienda y
Urbanismo, 2011)
Tabla 2. Caracterización geométrica Falla San Ramón, basado en datos de
(Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2012)
Tabla 3. Aceleraciones máximas (PGA) (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2012)
Tabla 4. Descripción de perfiles de suelo adaptado de datos de (Uniform Building Cada)
Code)
Tabla 5. Tabulación de datos de sismos aplicados a Falla San Ramon, adaptada de
datos otorgados por (Strong Motion Center, s.f.)
Tabla 6. Resumen de sismos por su cercanía a la falla basado en datos de (Strong
Motion Center, s.f.)
Tabla 7. Comparación entre eventos mundiales y la Falla San Ramón, basado en
datos de (Strong Motion Center, s.f.) y (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2012).
Tabla 8. Valores para factor de corrección para diferentes rangos de distancia
basado en (Ambraseys & Douglas, 2002)
Tabla 9. Tabla resumen Chi Chi Taiwán basado de datos de (Strong Motion Center,
s.f.)
Tabla 10. Tabla resumen para Cape Mendocino-Petrolia California basado en datos
de (Strong Motion Center, s.f.)
Tabla 11. Tabla resumen para North Palm Spring California basado en datos de
(Strong Motion Center, s.f.)
Tabla 12. Tabla resumen Sierra Madre California basado en datos de (Strong Motion
Center, s.f.)
Tabla 13.tabla resumen para Whittier Aftershock California basado en datos de
(Strong Motion Center, s.f.)
Tabla 14. Tabla resumen corrección para Whittier Narrows California basado en
(Strong Motion Center, s.f.)

Tabla 15. Valores máximos de los espectros de la Falla San Ramón basado en s	u
grado de amortiguación6	1
Tabla 16. Zonificación de la región metropolitana por comuna. (Instituto Nacional d	е
Normalización, 2003)6	6
Tabla 17. Aceleraciones en porcentaje de la aceleración de gravedad de acuerdo	а
la zona sísmica (Instituto Nacional de Normalización, 2003)6	6
Tabla 18. Historia de sismicidad en Chile a lo largo de su historia (Centr	0
Sismológico Nacional)	1

1. INTRODUCCIÓN

Chile es un país de una alta actividad sísmica, esto debido a que se encuentra junto a la unión de dos placas tectónicas, placa sudamericana y placa de nazca, las cuales han sido ampliamente estudiadas y consideradas para la normativa de diseño sismo resistente de nuestro país, pero dentro de los últimos años, se ha puesto foco también en las fallas superficiales ((Armijo, y otros, 2010) (Leyton, Ruiz, & Sepúlveda, 2010) entre otros) esto debido a que son fallas que están insertas en zonas urbanizadas con profundidades menores a 30 kilómetros (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2012) las cuales pueden generar grandes desastres, como lo hizo el terremoto de las Melosas en San José del Maipo en 1958 (Astroza & Astroza, 2008), el cual según prensa de esa época como El Mercurio destaca graves fallas estructurales en la zona de las Melosas. Es por esto la importancia de entender en primer lugar si las fallas geológicas que tenemos en la región Metropolitana se encuentra activas, que según el estudio de (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2012) lo está y cuál es el impacto de esta sobre la zona urbana, siendo imprescindible hacer una comparación con la normativa vigente, para saber si esta está actualizada a las solicitaciones que una falla, como la Falla San Ramón, puede provocar en Santiago.

Para entender mejor esto hay que comprender como funciona la actividad sísmica en Santiago y cuáles son los focos que pueden provocar sismos, ya que en nuestro País existen varias fuentes sismogénicas como se ilustra en la Ilustración 1, que serán detallados más adelante.



Ilustración 1. Diagrama típico de interacción entre las diferentes fuentes sismogénicas (Astroza & Astroza, 2008).

Para entender mejor esto, la Fallas San Ramón pertenece a la categoría de falla cortical, esto quiere decir que su profundidad es menor a 30 kilómetros y puede generar un sismo de grado 7 (Armijo, y otros, 2010), según estudios (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2012) la Falla San Ramón puede generar un movimiento de magnitud entre 6.8 y 7.4, a lo cual se hace necesario una comprensión más profunda de como esto puede afectar a las estructuras aledañas a la falla.

En esta tesis se propondrá un espectro de respuesta elástico para la Falla San Ramón, el cual tiene como objetivo mejorar los diseños de ingeniería básica de obras civiles. Se basara en registros de aceleraciones de fallas corticales que se asemejen a la Falla San Ramón, además de tomar los antecedentes propuesto en estudios previos ((Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2012), (Armijo, y otros, 2010), (Ambraseys & Douglas, 2002), entre otros), como son las características geométricas de la falla y su riesgo sísmico.

1.1. OBJETIVOS

El objetivo general es el desarrollo de un espectro de respuesta sísmica, producido por una posible ruptura en la Falla San Ramón y que pueda ser usado para el diseño de ingeniería básica en las proximidades de la falla Dentro de los objetivos específicos se contemplan:

- Desarrollo de un procedimiento a nivel de ingeniería básica para obtener un espectro de respuesta elástico en la zona de la Falla San Ramón.
- La creación de un espectro de respuesta elástico para la Falla San Ramón.
- Una comparación con la normativa ya existente en términos de aceleraciones máximas producidas por la falla y lo que dicta la normativa chilena sobre diseño de elementos sismo resistentes.

1.2. ALCANCE

En esta tesis se hará una investigación sobre la falla superficial denominada Falla San Ramón, y sus posibles efecto en estructuras en las proximidades de la falla. Dentro del alcance de esta tesis está el formular una propuesta de diseño de espectro de respuesta sísmico producido por la falla superficial, ubicada en la cuenca de Santiago, denominada San Ramón, tomando como referencia registros sísmicos de fallas de características semejantes de diferentes lugares del mundo. La atenuación de la aceleración producido por un sismo en la Falla San Ramón no se considerará, ya que el objetivo es el estudio en la cercanía inmediata a esta. En esta tesis el espectro de respuesta de interés, será el elástico, ya que los diseños sismo resistentes .que requiere la norma solo usan este rango, ya que no trabajan en la zona plástica.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción

Dentro de la cultura de Chile está inserto al palabra sismo, y claramente se debe a que somos uno de los países con los movimientos telúricos más importantes en la historia, esto es debido a que Chile, casi en su totalidad, se encuentra sobre la placa Sudamericana y próximo a su costa se encuentra la placa de Nazca, que interactúa de forma subductiva, esto quiere decir que la placa de Nazca se subyace bajo la placa Sudamericana (Ilustración 2). Hacia el sur sucede el mismo efecto con la placa Antártica.

En la historia de Chile, ha habido grandes terremotos, con resultados como se muestra en la Ilustración 3.



Ilustración 2. Interacción típica de la placa Sudamericana (a la derecha) y la placa de nazca (a la izquierda) (Centro Sismológico Nacional).



Ilustración 3. Gráfico histórico de sismos categorizados por nivel de ocurrencia (Centro Sismológico Nacional)

Los sismos son reacciones debido a la liberación de energía que proviene del movimiento de la corteza terrestre y la actividad magmática, sus origines tienen siempre una falla geológica por la cual los dos bloques al reacomodarse debido a los movimientos de la corteza liberan energía acumulada. Su origen se puede subdividir en las siguientes categorías.

a) Sismo Interplaca o Tipo Thrust; "La fuerza de roce entre las placas traba el movimiento entre las placas, las que se pueden mover relativamente sólo cuando la fuerza neta en la zona interplaca es mayor que la fuerza de roce entre ellas. Cada vez que logre moverse, ocurre un terremoto interplaca. El tamaño del terremoto (magnitud), es proporcional al área de la zona que logró moverse y a cuánto se movió. Si durante el movimiento (terremoto), se desplaza el fondo oceánico verticalmente, se genera una ola sobre la zona de ruptura que al propagarse en el océano se llama "tsunami". Estos son los sismos de mayor magnitud, siendo ejemplos de estos sismos el terremoto de Valdivia de 1960 (Mw=9.5), y el terremoto del Maule de 2010 (Mw=8.8)" (Centro Sismológico Nacional).

- b) <u>Sismo de profundidad intermedia;</u> Es aquel producido dentro de la placa subductada, en este caso placa de Nazca, teniendo una profundad desde los 60 kilómetros o más, teniendo como epicentro bajo el continente sudamericano, las magnitudes esperadas pueden llegar hasta el orden de 8 (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2012).
- c) <u>Sismo corticales o superficiales</u>; Son sismos originados por fallas geológicas ubicadas en la superficie de la placa, de profundidades menores a 30 kilómetros, con una magnitud del orden de 7, normalmente son destructivos en la zona cercana al epicentro y se atenúan rápidamente, en este estudio se analizara este tipo de sismo (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2012).
- d) <u>Sismos outer-rise</u>; Se produce por una flexión de la placa de Nazca, ya que no se produce la subducción (fuerza de roce mayor que la fuerza aplicada), produciendo sismos de magnitud del orden menor a 8 (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2012).

En la llustración 4, se puede ver el esquema de sismos ocurridos y como es su ubicación dentro de un perfil transversal típico,



Ilustración 4. Digrama de origen sísmico (Leyton, Ruiz, & Sepúlveda, 2010)

2.2. Fallas superficiales

Los fuertes movimientos que genera un sismo cercano de gran magnitud a una estructura, son los que mayor daño produce a esta. Sin embargo, en el pasado debido a la falta de datos de sismos cercanos de gran magnitud, las ecuaciones para estimar los espectros de respuesta eran usando principalmente registros de sismos intermedio y lejanos. En la década pasada se tomaron registros de suficientes sismos cercanos, lo cual hizo posible estimar ecuaciones para espectros de respuesta sísmicos (Ambraseys & Douglas, 2002). Es por esto la importancia de entender el funcionamiento de las fallas superficiales y sus principales características, tanto geométricas como sísmicas, para así poder desarrollar conexiones entre estas y derivaciones de comportamientos similares.

Falla es una fractura planar a lo largo de la cual la roca se ha desplazado según una dirección que es generalmente paralela al plano de ruptura, como consecuencia de la aplicación de una tensión de cizalle, puede ser una falla activa ha presentado algún sismo dentro de los últimos 10.000 años, o puede ser inactiva, que ya no tiene deslizamiento dentro de los últimos 10.000 años (Instituo Nacional de Prevención Sísmica, Argentina, s.f.).

Cuando existe una discontinuidad en una roca, a lo largo de un segmento, esto quiere decir que exista un desplazamiento de un segmento de roca con respecto a la roca a continuación, y este es mayor a los 0,5 milímetros, podemos considerar que entra en el parámetro de falla, estas pueden tener largos de algunos metros hasta cientos de kilómetros como es la falla de Antofagasta (1000 km aprox.), o la falla Liquiñe-Ofqui (1200 km).

Dentro de las características importantes de una falla podemos encontrar los siguientes elementos de interés:

• Rumbo: es la dirección en la cual los dos bloques de la falla se desplazan en relación con el norte, este ángulo se le conoce como Strike.

- Buzamiento o inclinación: como el nombre indica, es el ángulo de inclinación que hace el plano de falla con respecto a la horizontal, este ángulo se le denomina Dip.
- Labios de falla: son las secciones de rocas que están separadas por el plano de falla, la sección superior se denomina bloque colgante (hanging wall) y el bloque inferior bloque yaciente (foot wall).
- Salto: es la distancia vertical de un bloque con respecto al otro
- Rake: es el ángulo que forma el vector de desplazamiento del bloque colgante con respecto al vector director del plano de falla.



Ilustración 5. Características geométricas de una falla genérica. (Open Seismic Hazard Analysis , 2010)

En la Ilustración 5 podemos apreciar de manera gráfica como las características geométricas de una falla interactúan, dando pie a la clasificación de fallas en tres grandes grupos, los cuales son:

 Falla normal: son falla en las cuales el movimiento de los bloques principalmente vertical, en el cual el bloque que se encuentra sobre el plano de falla baja, y el que se encuentra sobre el plano de falla, sube; normalmente generan salientes rocosos en el piso ya que la interacción de las dos partes se genera a través de dilataciones entre ambas como se puede observar en



Ilustración 6, tienen ángulos de buzamiento alto (en promedio dip = 60°).



Ilustración 6. (Instituo Nacional de Prevención Sísmica, Argentina, s.f.) Diagrama de interacción de una falla normal.

 Falla inversa: falla en la cual se producen esfuerzos de compresión horizontal, tienen ángulos de buzamiento menor a 45° en general su dip es de 30°, el bloque colgante sube mientras que el piso subyace bajo el techo, generando compresión entre las rocas, generando grandes deformaciones en la corteza terrestre como se muestra en la Ilustración 7.



Ilustración 7. (Instituo Nacional de Prevención Sísmica, Argentina, s.f.) Diagrama de interacción de una falla inversa.

Falla de rumbo: son fallas en generalmente ubicadas en los límites de la unión de placas tectónicas, también conocidas como falla de desgarre o fallas transversales, tienen planos de fallas generalmente verticales, y se dividen en dos subgrupos, dependiendo del movimiento relativo, pueden ser dextral, si el bloque se mueve a la derecha con respecto al observador, o pueden ser sinestral, si el bloque se mueve a la izquierda de acuerdo al punto de vista del observador, en ambos casos ocurre que un bloque se mueve de forma horizontal y paralelo al rumbo de la falla como se aprecia en la llustración 8.



Ilustración 8. (Instituo Nacional de Prevención Sísmica, Argentina, s.f.) Diagrama de interacción de una falla de rumbo.

2.3. Análisis de riesgo sísmico

"El peligro sísmico de un sitio está definido como la estimación cuantitativa de la vibración más posible del suelo en el sitio" (Datta, 2010). Esta se puede obtener de manera determinística o probabilística la vibración puede estar representada de varias formas, como aceleración máxima (PGA), velocidad máxima (PGV) o desplazamiento máximo (PGD), independiente de como ese representada la vibración, el análisis de riesgo sísmico requiere información de varios factores importantes en las inmediaciones del sitio de interés. Se necesita información geológica de las fuentes sísmicas, actividad de la falla, largo de la ruptura de la falla, sismicidad histórica e instrumental entre otras.

Análisis determinístico de riesgo sísmico

El análisis determinístico de riesgo sísmico o DSHA por sus siglas en inglés, es un procedimiento que arroja como resultado la vibración en el peor escenario posible. Para estructuras especiales, ya sea reactores nucleares, represas u otras, DSHA puede ser usado como un diseño seguro. DSHA implica muchas decisiones subjetivas y no proporciona ninguna información sobre la probabilidad de fallo de la estructura en un periodo de tiempo dado, es por estas razones, que su aplicación solo está restringida a cuando no se suficiente información como para hacer una análisis probabilístico. DSHA consiste en 5 pasos (Datta, 2010):

- a) Identificar todas las fuentes sísmicas en el área, incluyendo su geometría.
- b) Evaluar la distancia más cercana entre el sitio de interés y la fuente sísmica.
- c) Identificar el máximo sismo expresado en magnitud u otro parámetro de vibración para cada fuente.
- d) Encontrar el peligro sísmico causado en el sitio debido a un sismo en cualquiera de las fuentes. Por ejemplo, se puede seguir la ecuación de (Cornell, Banon, & Shakal, 1979):

$$\ln PGA(gal) = 6.74 + 0.859m - 1.80\ln(r + 25)$$
 Ecuación 1.

Donde r es la distancia epicentral en kilómetros y m es la magnitud del sismo

 e) Determinar el peor caso para el sitio de interés debido a cada una de las fuentes.

Análisis probabilístico de riesgo sísmico

En análisis de riesgo probabilístico (PSHA por sus siglas en inglés) usa conceptos probabilísticos para predecir la posibilidad de ocurrencia de un sismo de cierta magnitud considerando la incertidumbre en el tamaño, locación y tasa de ocurrencia. PSHA se calcula siguiendo los pasos a continuación (Datta, 2010)

- a) El primer paso es identificar y caracterizar las fuentes del terremoto de forma probabilística. Esto implica asignar una probabilidad de ocurrencia de un terremoto en un punto dentro de la zona fuente
- b) El segundo paso es caracterizar la sismicidad de cada zona fuente. La sismicidad es especificada por una relación de recurrencia que indica la tasa media a la cual un terremoto de un tamaño determinado será excedido.
- c) En el tercer paso, se utiliza una relación predictiva para obtener un parámetro sísmico (como el PGA) en el sitio para una magnitud y distancia de la fuente al sitio para cada fuente sísmica. La incertidumbre inherente en la relación predictiva (ley de atenuación) se incluye en el análisis de PSHA.
- d) Por último, las incertidumbres en la ubicación del terremoto, el tamaño del terremoto y el parámetro de movimiento del suelo se combinan para obtener la probabilidad de que el parámetro de movimiento del terreno sea excedido durante un período de tiempo particular

2.4. Espectros de respuesta y de diseño

El espectro de respuesta es una herramienta obligatoria a tener en cuenta a la hora de hacer diseños sismo resistentes, debido a esta gran importancia es que muchos investigadores han estudiado este tema, siendo pionero Maurice Anthony Biot, durante el periodo 1932 y 1942 concibió y desarrollo el método de espectro de respuesta, creando las bases para otros investigadores como Newmark, Housner y otros pudieran mejorarlo (Crisafulli & Villafañe, 2002).

El espectro de respuesta en forma general podemos describirlo como la respuesta máxima de un suelo (en términos de desplazamiento, velocidad y/o aceleración) producido por una excitación en una estructura u oscilador de un grado de libertad. Para explicar en forma conceptual el procedimiento de construcción de un espectro de respuesta consideremos una serie de estructuras de un grado de libertad u osciladores simples con diferentes periodos de vibración, T, y con igual factor de amortiguamiento (ver Ilustración 9). Si sometemos todos estos osciladores a la acción de un mismo terremoto, utilizando un registro de aceleraciones (üg(t)), cada uno de ellos exhibirá una respuesta diferente, la cual puede representarse, por ejemplo, a través de la historia de desplazamientos, u(t). Una vez que hemos calculado la respuesta de los osciladores es posible determinar el máximo (en valor absoluto, dado que el signo no tiene importancia) de cada uno de ellos y describirlos en un gráfico en función del periodo de vibración, para obtener así un espectro de respuesta. Es decir, que la respuesta máxima de cada oscilador con periodo T representa un punto del espectro (Francisco & Villafañe, 2002).



Ilustración 9. Descripción de proceso de creación de un espectro de respuesta (Francisco & Villafañe, 2002)

En la Ilustración 9 se puede apreciar gráficamente como un nivel de excitación sobre elementos de un grado de libertad con diferentes periodos tienen una respuesta máxima, expresado en un punto en el gráfico de acuerdo a su periodo, y la totalidad de estos genera un función, denominada espectro de respuesta. Dentro de los espectros podemos identificar tres, espectro de respuesta elástico,

espectro de respuesta inelástico y espectro de diseño. Los cuales son tres herramientas que propuestas para objetivos diferentes,

- Espectro de respuesta elástica: Representan parámetros de respuesta máxima para un terremoto determinado y usualmente incluyen varias curvas que consideran distintos factores de amortiguamiento. Se utilizan fundamentalmente para estudiar las características del terremoto y su efecto sobre las estructuras. Las curvas de los espectros de respuesta presentan variaciones bruscas, con numerosos picos y valles, que resultan de la complejidad del registro de aceleraciones del terremoto.
- Espectro de respuesta inelástica; Son similares a los anteriores pero en este caso se supone que el oscilador de un grado de libertad exhibe comportamiento no-lineal, es decir que la estructura puede experimentar deformaciones en rango plástico por acción del terremoto. Este tipo de espectros son muy importantes en el diseño sismo resistente, dado que por razones prácticas y económicas la mayoría de las construcciones se diseñan bajo la hipótesis que incursionarán en campo plástico (no aplicado a nuestro país). Como ejemplo, podemos mencionar los espectros de ductilidad (recordemos que ductilidad de desplazamientos es la relación entre el desplazamiento máximo que experimenta la estructura y el desplazamiento de fluencia). Estos espectros representan la ductilidad requerida por un terremoto dado en función del periodo de vibración de la estructura y se grafican usualmente para distintos niveles de resistencia. También, se construyen espectros de aceleración, desplazamiento de fluencia o desplazamiento último de sistemas inelásticos, en donde se consideran distintos de ductilidad niveles 0 distintos tipos de comportamiento histerético de la estructura,
- Espectro de diseño: Las construcciones no pueden diseñarse para resistir un terremoto en particular en una zona dada, puesto que el próximo terremoto probablemente presentará características diferentes. Por lo tanto, los espectros de respuesta elástica o inelástica, descriptos previamente, no pueden utilizarse para el diseño sismo resistente. Por esta razón, el diseño o verificación de las construcciones sismo resistentes se realiza a partir de espectros que son suavizados (no tienen variaciones bruscas) y que

consideran el efecto de varios terremotos, es decir que representan una envolvente de los espectros de respuesta de los terremotos típicos de una zona. Los espectros de diseño se obtienen generalmente mediante procedimientos estadísticos (Crisafulli & Villafañe, 2002).

3. METODOLOGIA

3.1. Resumen

En este capítulo se expondrá la estructura teórica seguida para analizar y desarrollar los datos para obtener finalmente los objetivos propuestos, esta sucesión de datos está basado a estudios como (Leyton, Ruiz, & Sepúlveda, 2010), (Ambraseys & Douglas, 2002), (Ambraseys & Douglas, 2002), (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2012), entre otros.

La estructura de la metodología se puede ver en la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. La cual será explicada más adelante.



Ilustración 10. Estructura general de la metodología usada.

3.2. Caracterización Falla San Ramón

En este punto se analizará principalmente las características geométricas como sísmicas de la Falla San Ramón, esto se hará basado principalmente en el estudio de (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2012), donde se comprueba el peligro sísmico de esta falla sobre la región metropolitana

3.2.1. Caracterización geométrica de la Falla San Ramón

Se investigará todo lo que tenga relación con el plano de falla, las características de los ángulos (ver Ilustración 11), las cuales fueron explicadas en el capítulo de Fallas superficiales,



- \circ \hat{n} el vector normal al plano de la falla
- \bullet \hat{d} el vector de deslizamiento
- ϕ_f el rumbo (strike) de la falla que se mide en sentido horario desde el Norte (0 360°)
- \bullet δ el manteo/buzamiento (dip)
- λ el ángulo de deslizamiento (rake), entre el eje x_1 y \hat{d} en el plano de la falla (0 360°)

Ilustración 11. Plano de falla y sus ángulos (Universidad de Concepción, Geofísica).
Además se caracterizará por su tipo de falla (capítulo 2.2) ya que es parte de los filtros de búsqueda que incluiremos cuando hagamos la selección de fallas similares.

3.2.2. Caracterización sísmica de la Falla San Ramón

Se busca principalmente encontrar la aceleración máxima basado en un estudio del (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2012) de forma determinística. Otro factor importante es saber cómo se ubica geográficamente la falla ya que esto nos permite contextualizar el tipo de suelo, el tipo de suelo define en cómo la onda viaja y la atenuación de desplazamiento que esta tenga, este parámetro es parte de los filtros de búsqueda de registros para falla similares, es por eso la importancia de definir bien que suelo es el que está cerca de nuestra falla ver Ilustración 12.



Ilustración 12. Espectro de respuesta elástico para diferentes tipos de suelo para un sismo de magnitud 5.5 a 10 kilómetros de distancia (Elnashai & Di Sarno, 2008).

3.3. Búsqueda de fallas similares

Las fallas se pueden clasificar de muchas formas, es por esto que es necesario crear un cierto criterio a la hora de elegirlas, la importancia de este punto es que una vez que encontremos un catálogo de fallas similares podremos hacer extrapolaciones válidas para estudiar el comportamiento de la Falla San Ramón en

base a fallas similares, pudiendo simular los efectos de una posible actividad sísmica sobre las estructuras aledañas a la falla geológica en estudio.

3.3.1. Fallas con registro de aceleración

En primer lugar se buscara que tengan registros de una fuente confiable usando al fuente de datos de (Strong Motion Center, s.f.), solo interesando las aceleraciones horizontales de cada registro.

3.3.2. Factores de semejanza con la Falla San Ramón

Se filtrará también según sus características geométricas y sísmicas de las fallas, donde los aspectos importantes a considerar es que sean fallas superficiales inversas principalmente (también se tomó fallas inversas-oblicuas, las cuales son un derivado de la fallas inversas y de rumbo) y que el tipo de suelo sea, suelo rígido, suelo muy denso o roca suave. El Decreto Supremo 61 (en adelante DS 61) define diferentes categorías de suelos, en esta tesis supondremos que la región metropolitana solo tiene suelo tipo B, C o D (definidos en la Tabla 1**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), basado en el estudio de suelo para la Falla San Ramón (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2012), para que los espectros que elegimos sean compatibles con la Falla San Ramón.

	Suelo Tipo	Vs30
A	Roca, suelo cementado	>900
В	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	>500
С	Suelo denso o firme	>350
D	Suelo medianamente denso, o firme	>180
E	Suelo de compacidad, o consistencia mediana	<180

 Tabla 1. Descripción de suelo según Decreto Supremo 61 (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2011).

3.3.3. Factor de proximidad a la Falla San Ramón

Se tomaran todos los acelerógrafos que están a una distancia máxima de 16 kilómetros de la falla ya que según los estudios de (Ambraseys & Douglas, 2002), las leyes de atenuación de las aceleraciones horizontales para suelos a esa distancia tienden a ser 0.1g o menos (ver Ilustración 13).

3.4. Ajuste de registros de aceleración

La necesidad de hacer ajustes de los registros se debe que los registros de aceleraciones tienen características específicas, como distancia a la falla, magnitud máxima del sismo y aceleración máxima, es debido a estos factores que se deben corregir para extrapolar los datos a la Falla San Ramón.

3.4.1.Factor de corrección por magnitud y aceleración máxima del suelo

Uno de los factores a analizar que es de vital importancia es que la aceleración máxima de los registros sea la misma que la proyectada en la Falla San Ramón, es por esto que cada registro se debe multiplicar por un factor de corrección que cumpla con el supuesto anterior.

"Las cargas actuando en una estructura durante un terremoto son proporcionales a la aceleración instantánea debido a los movimientos de base impuestos" (Elnashai & Di Sarno, 2008), debido a esto generalmente los registros de suelo son escalado de acuerdo a su aceleración máxima (Peak Ground Aceleration (PGA)), es por esto que los registros se multiplicará por su factor de corrección definido como (Elnashai & Di Sarno, 2008):

$$Fc1 = \frac{PGA(proyectado en Falla San Ramón)}{PGA(de cada registro)}$$
Ecuación 2.

Otro de los factores de corrección de los registros de aceleración de importancia es el cual va a estar definido por la magnitud máxima del sismo en relación a la magnitud del sismo esperado en la Falla San Ramón, la cual se rige por la siguiente fórmula (Ruiz & Saragoni, 2007).

$$x = \frac{A * e^{B * M}}{(R + C)}$$
 Ecuación 3.

Donde x representa el máximo valor esperado del parámetro sísmico estudiado; M es la magnitud; R la distancia hipocentral; A, B y D son constantes a determinar y C es fijado a priori (Ruiz & Saragoni, 2007).

El coeficiente de corrección de datos va a estar dado entre la razón del máximo esperado para la Falla San Ramón y la falla de estudio, lo cual está representado por la siguiente ecuación (Ruiz & Saragoni, 2007):

Ecuación 4.

3.4.2. Factor de corrección por distancia al acelerógrafo

El factor de proximidad varía según la distancia epicentral al acelerógrafo como se ve en la Ilustración 13, ya que a medida que la distancia al acelerógrafo es mayor las aceleraciones se van atenuando, por eso usando las investigaciones de (Ambraseys & Douglas, 2002) es posible hacer una corrección a los datos del registro de aceleraciones para estimar como serian estas en una distancia igual a cero.



Ilustración 13. Ley de atenuación para distintos tipos de suelos para sismo corticales (Ambraseys & Douglas, 2002).

Siendo S suelos que tengan 180<V_{s30}<360 [m/s] (suelos suaves), A es para $360 < V_{s30} < 750$ [m/s] (suelos rígidos), R es para $V_{s30} > 750$ [m/s] (roca), todos estos valores para sismos de diferente magnitud.

3.5. Cálculo de espectro de respuesta elástico para aceleración

El espectro de respuesta está compuesto por la aceleración máxima, velocidad o desplazamiento sobre un sistema de un grado de libertad (SDOF) con varios periodos de naturales cuando está sometido a una excitación en su base.

Los espectros de respuesta elástico se derivan analíticamente evaluando la integral de Duhamel, la cual da como respuesta el desplazamiento total de un sistema SDOF, sujeto a una carga sísmica. Dado el principio de superposición, que indica que para sistemas elásticos los efectos de numerosas acciones aplicadas simultáneamente es equivalente a la suma de cada una de ellas analizadas separadamente. La ecuación de equilibrio dinámico para sistemas de estructuras linealmente elásticas con una masa *m*, rigidez *k* y amortiguamiento *c* es la siguiente (Elnashai & Di Sarno, 2008):

$$m \ddot{u} + c \dot{u} + k u = -m \ddot{u}_{g}$$
 Ecuación 5.

Donde el termino \ddot{u}_g es la aceleración del suelo. Así, la **Ecuación 5**. Expresa el equilibrio entre inercia $m\ddot{u}$, amortiguamiento *c*, fuerzas elásticas *ku* y las solicitaciones sísmicas $-m\ddot{u}_g$. La cual se puede demostrar usando los principios de estructuras dinámicas donde el valor máximo de desplazamiento S_d definido como desplazamiento espectral, es igual a (Elnashai & Di Sarno, 2008):

$$S_{\rm d} = [u(t)]_{\rm max} = \frac{\left[\int_{0}^{t} \ddot{u}_{\rm g} \ e^{-\xi \,\omega \,(t-\tau)} \sin[\omega_{\rm d}(t-\tau)] \mathrm{d}\tau\right]_{\rm max}}{\omega}$$

Ecuación 6.

En donde T es una variable de tiempo elegida arbitrariamente entre la duración del sísmo y ω es la frecuencia natural del sistema sin amortiguación. Es más, ω_d es la frecuencia circular amortiguada y está dada por (Elnashai & Di Sarno, 2008):

$$\omega_{\rm d} = \omega \sqrt{1 - \xi^2}$$
 Ecuación 7.

Mientras que ξ es el amortiguamiento viscoso del oscilador. Por otro lado la velocidad máxima S_v puede ser aproximado, asumiendo una oscilación armónica,

por el producto entre el espectro de desplazamiento S_d y la frecuencia fundamental del SDOF (Elnashai & Di Sarno, 2008):

$$S_v = \omega * S_d$$
 Ecuación 8.

Está definida como pseudo-velocidad debido a que no es el peak de velocidad real, pero es una aproximación valida a la aceleración real máxima.

Similarmente, para el espectro de pseudo-aceleración S_a la ecuación es la siguiente (Elnashai & Di Sarno, 2008):

$$S_a = \omega * S_V = \omega^2 * S_d$$
 Ecuación 9.

El valor de la pseudo-aceleración se obtiene multiplicando cada valor del desplazamiento por la frecuencia natural al cuadrado, para todo este proceso usaremos una software matemático llamado MATLAB, en el cual se puede programar los procedimientos matemáticos (ver Anexo A2) (Elnashai & Di Sarno, 2008).

3.6. Análisis estadístico

Una vez calculado todos los espectros de respuesta elástico para pseudo aceleración corregidos y categorizados por rango de distancia a la falla, generaremos para cada rango una envolvente, que en esencia es el promedio lineal de todos los espectros de cada uno de los rangos que fueron especificados anteriormente, por lo tanto para la función del espectro para la falla San Ramón corresponderá a la siguiente fórmula (Caballero, 1975):

$$F(x) = \frac{\sum_{i=1}^{n} f_i(h)}{n}$$
 Ecuación 10.

Siendo

F(x): Función del espectro de respuesta elástico para pseudo aceleración de la Falla San Ramón

*f*i(h): la función del espectro de respuesta elástico para pseudo aceleración calculado para cada registro en el rango

n: cantidad de funciones en el rango determinado.

Además de esto es necesario el cálculo de la desviación estándar de los datos para saber qué tan disperso es la muestra, está dado por la siguiente fórmula (Caballero, 1975):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma (X_i - \overline{x})^2}{N}}$$
 Ecuación 11.

 Aplicando esto en los datos encontrados de cada espectro de respuesta obtenemos las siguientes graficas que representan la desviación de los datos en cada uno de los puntos, para cada espectro elástico calculado para la Falla San Ramón. Función propuesta para espectro de respuesta elástico

3.7. Función propuesta para espectro de respuesta elástico

Desde 1985 se propuso un nuevo espectro de respuesta para la norma NCh 433 Of. 93 y se mantuvo en la norma NCh 433 Of. 96. El espectro en la normativa Chilena es el siguiente (Ruiz & Saragoni, 2008).

$$S_a = \frac{I * A_0 * \alpha}{R^*}$$
 Ecuación 12

Donde:

I= coeficiente asociado a la importancia y uso del edificio.

A₀= aceleración máxima efectiva, determinada según la zona sísmica.

 R^* = factor de reducción, está en función de los periodos de la estructura y el suelo. α = función dinámica de amplificación.

Consecuentemente el espectro elástico está dado por (Ruiz & Saragoni, 2008):

$$S(T_n) = A_0 * \alpha * (0.05/\xi)^{0.2}$$
 Ecuación 13

Donde α depende de las características del suelo y del periodo de la estructura y tiene la siguiente forma.

$$\alpha = \frac{1 + 4.5 \left(\frac{T_n}{T_0}\right)^p}{1 + \left(\frac{T_n}{T_0}\right)^3}$$
 Ecuación 14

Donde T_n = periodo de vibración del modo n de la estructura y T_0 , p = Parámetros de tipo de suelo de fundación.

4. RESULTADOS

En este capítulo aplicaremos la metodología anteriormente expuesta para poder analizar la investigación y recopilación de datos, y llegar a un espectro de respuesta elástico que caracterice a la Falla San Ramón.

4.1. Caracterización Falla San Ramón

La Falla San Ramón es una falla superficial inversa, esto quiere decir que su categoría corresponde a fallas con profundidad menor a 30 kilómetros, y además al ser inversa quiere decir que su plano de interacción de falla corresponde principalmente a manteo, es decir, que un plano sube (el que está por encima) y otro se subyace. El bloque que está por encima genera un efecto de bloque colgante (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2012).

4.1.1. Caracterización geométrica de la Falla San Ramón

Esta falla corresponde al sistema de fallas inversas cuaternarias que limita el sector oriente del valle de Santiago con el frente cordillerano (Rauld, 2002).

La Falla San Ramón define el límite entre la Depresión Central y la Cordillera Principal al este de Santiago. Evidencias morfológicas y estratigráficas indica que la Falla San Ramón es una falla inversa que ha tenido actividad reciente y es un factor de primer orden que controla la morfología del frente precordillerano. (Rauld, 2002)

En la Ilustración 14 podemos ver como se relacionan la falla con Depresión Central y la Cordillera Principal



Ilustración 14. Ubicación de Falla San Ramón (Armijo, y otros, 2010).

El Cerro San Ramón tiene una altura de 3249 metros en su pico más alto en su frente que da hacia Santiago y da el nombre a la falla que está a sus pies. (Armijo, y otros, 2010), la traza de San Ramón es fácilmente visible en el frente precordillerano.

El largo de la traza de la falla es de aproximadamente 35 kilómetros pasando desde el rio Mapocho hasta el rio Maipo, por los faldeos de las cordillera de los Andes, atravesando varias comunas de la ciudad. Lo importante de esta falla es que en su superficie se encuentra urbanizado en la gran mayoría de su extensión, lo que a un posible rompimiento es muy importante saber cómo afectaría en las cercanías a las estructuras y si estas a su vez están protegidas por su diseño de acuerdo a la normativa chilena antisísmica.

La Falla San Ramón puede caracterizarse por su geometría como se muestra en la Ilustración 11, dentro de lo más representativo de una falla inversa podemos destacar su ángulo de buzamiento (dip), el cual es la inclinación de la falla, slip y strike u orientación de la traza así poder hacer comparaciones con mejor asertividad con otras fallas, para poder estimar como se comportaría una falla según historial anterior de otra falla semejante. Los datos geométricos de la Falla San Ramón están representados por la Tabla 2.

	-, -,
Parámetros	Valor
Profundidad de la Traza	10 – 15 [km]
Largo de la Traza	35 [km]
Dip	30° - 40°
Rake	100° - 120°
Profundidad de Despegue (Clústeres de Sismos)	14 [km]

Tabla 2. Caracterización geométrica Falla San Ramón, basado en datos de (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2012)

La traza corresponde a una superficial inversa, ya que su profundidad es de 13 [km] aprox. Y en esta categoría el máximo de profundidad es de 30 [km] y tiene un ángulo de buzamiento de 35° promedio (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2012). La traza de la Falla San Ramón ha sido definida recientemente por (Armijo, y otros, 2010) al sur del río Mapocho, la traza principal de la Falla San Ramón se encuentra directamente a los pies de los cerros Calán y Apoquindo, con una dirección NNO-SSE (dirección norte noroeste hacia sur sureste). Hacia el oriente de este sector se encuentran fallas subsidiarias, cuyo mapeo se ha realizado en función de observaciones morfo estructurales. Al sur de la quebrada San Ramón la falla presenta una traza en dirección aproximada N-S (dirección norte-sur) hasta la quebrada Nido de Águila. Hacia el sur de esta última quebrada, la falla muestra un trazado más complejo que se caracteriza por dos trazas subparalelas, asociadas a un traspaso de segmentos, que continúan hacia la quebrada de Macul. Hacia el sur de esta zona la falla muestra complejidades interpretadas como una zona de traspaso de segmentos, con fallas de orientación NE (noreste), por ejemplo al sur de Lo Cañas. Hacia el sur la traza principal de la Falla San Ramón adquiere nuevamente una dirección NNO (norte noroeste) hasta el río Maipo (Armijo, y otros, 2010).

4.1.2. Caracterización sísmica de la Falla San Ramón

Dentro del peligro sísmico producido por la Falla San Ramón, hecho por (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2012), se estima las capacidades sismogénicas de ésta. Se utilizaron regresiones hechas con datos de todo el mundo, las cuales relacionan el largo de la ruptura observado en superficie, los desplazamientos promedios de la falla y la magnitud máxima esperada (Wells & Coppersmith, 1994). Considerando los datos de la Falla San Ramón se utilizó la magnitud máxima que se puede esperar (M= 7.4). Dado este valor se estimó las aceleraciones horizontales máximas (PGA) considerando el efecto de bloque colgante (Hanging Wall) hacia el este, como se puede ver en la Tabla 3.

Tabla 3. Aceleraciones maximas (PGA) (IV	linisterio de vivienda y Orbanismo, 2012)
Distancias hacia el oeste [km]	PGA (%g)
2.0	47.0
5.0	37.0
10.0	26.0
Distancia hacia el este [km]	PGA (%g)
2.0	70.0
7.9	47.0
11.5	37.0
14.7	26.0

----. . ----

Se puede ver en la Tabla 3 que por el efecto de Hanging Wall hacia el este las aceleraciones son significativamente mayores con un peak en el rango de hasta los dos kilómetros de 686.7 [cm/s^2] y que están disminuyen rápidamente como es de esperar en un sismo cortical.

Dentro de las características geométricas de la falla, en zonas muy cercanas a la falla (menos de dos kilómetros) las aceleraciones son mayores a las que indica la normativa chilena (NCh 433 of. 1969 y NCh 2369 of. 2006) con respecto a las aceleraciones máximas en la zona, estas proyectan que en la zona sísmica en que se ubica la falla (zona II) es de 0,3g, mientras que en el caso descrito en el estudio de (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2012), la zona tendría aceleraciones cercanas a 0.7g.

En relación al suelo de estudio los estudios del (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2012) catalogan la región metropolitana con un suelo tipo II, el cuál si lo llevamos a la equivalencia con el DS 61 es equivalente a un suelo tipo B, C o D con un rango de V_{s30} (que es la velocidad promedio de propagación de onda en los primeros 30 metros de suelo) mayores que 180 [m/seg^2] y menores a 900 [m/seg^2].

4.2. Búsqueda de fallas Similares

4.2.1. Que cuenten con registro de aceleración

Para encontrar los registros se recurrió a (Strong Motion Center, s.f.), el cual recoge los datos de CISN (California Integrated Seismic Network), AEC (Alaska Earthquake Center), COSMOS (Consortium of Organizations for Strong Motions Observation System), IRIS (Incorporated Research Insitutions for Seismology), ANSS (Advanced National Seismic System), PNSN (Pacific Northwest Seismic Networks).

Todos estos registros cuentan con información necesaria para discriminarlos más adelante por los filtros de búsqueda hablados en el capítulo 3, ya sea por sus características geométricas (distancia y tipo de falla) o sísmicas (tipo de suelo).

4.2.2.Que cumplan los factores de semejanza a la Falla San Ramón

Los criterios de búsqueda que se seleccionaron los eventos que tenían registros son los siguientes:

 Tipo de suelo: Que se asemejaran a los suelos de la región metropolitana, estos son tipo B, C o D, pero algunos vienen con la nomenclatura del código Uniform Building Code (UBC) en el cual, si hacemos la comparación según su V_{s30} corresponden a los tipos de suelo S_B , S_C y S_D como se encuentra tabulado en la Tabla 4.

A lo cual los motores de búsqueda ingresados en Strong Motion Center, al buscar registros asimilables con la Falla San Ramón, quedan comprobados que cumplen con el criterio de semejanza a los suelos tipo de La Región Metropolitana.

	UBC			DS 61	
Tipo de perfil de	Descripción genérica	Velocidad del V _{s30}	ge	Descripción nérica del tipo de	Velocidad del V _{s30}
suelo	del tipo de suelo	(m/s)		suelo	(m/s)
SA	Roca dura	>1500	Α	Roca Dura	>900
SB	Roca	760 a 1500	В	Roca Blanda	>500
Sc	Suelo muy denso y roca suave	360 a 760	С	Suelo denso	>350
Sd	Suelo rígido	180 a 360	D	suelo medianamente denso	>180
SE	Suelo suave	<180	E	suelo de consistencia mediana	<180

Tabla 4. Descripción de perfiles de suelo adaptado de datos de (Uniform Building Code)

 Semejanza geométrica: Necesariamente tiene que cumplir con semejanza geométrica con la Falla San Ramón esto quiere decir que, tiene que ser falla inversa y se agregó también falla reverso-oblicuo, debido a que la Falla San Ramón también tiene secciones que trabajan de esta manera (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2012).

Los resultados de los cuales cumplen con estas características anteriormente señaladas se muestran en la Tabla 5. Tabulación de datos de sismos aplicados a Falla San Ramón, adaptada de datos otorgados por Tabla 5.

Sismo	Región	Fecha	Profundidad	Mecanismo
Chi Chi	Taiwan	20-09-1999	6.8	Reverso-Oblicuo
Cape Macedonio/Petrolia	California	25-04-1991	9.6	Reverso
Sierra Madre	California	28-06-1991	12	Reverso
Whittier Aftershock	California	04-10-1987	13.3	Reverso-Oblicuo
Whittier Narrows	California	01-10-1987	14.6	Reverso-Oblicuo
North Palm Springs	California	08-07-1986	11	Reverso-Oblicuo
Falla San Ramón	Chile		13	Reverso

Tabla 5. Tabulación de datos de sismos aplicados a Falla San Ramón, adaptada de datos otorgados por (Strong Motion Center, s.f.)

4.2.3.Que cumplan los factores de semejanza a la Falla San Ramón

Dentro de estos sismos que se asemejan a la Falla San Ramón, se obtuvieron datos sísmicos y geométricos de cada uno de ellos, además de encontrar 34 diferentes registros de aceleraciones asociados a los sismos anteriormente descritos, cabe destacar la importancia del sismo ocurrido en Taiwán, ya que es una falla inversa que en zonas se comporta como reverso-oblicuo y que al igual que la Falla San Ramón, se encuentra urbanizada en su superficie.

Una vez comprobado que los parámetros de los registros cumplieran con lo supuesto en esta tesis, se procede a hacer discriminación por proximidad a la falla, como se registra en la Tabla 6.

Sismo	N° Registros	Rango [km]	0-5 [km]	5-10	10-16
				[km]	[km]
Chi Chi	23	1,1-15,2	7	9	7
Cape Macedonio/Petrolia	2	15,5-15,9			2
Sierra Madre	2	9,9-12,8		1	1
Whittier Aftershock	2	14,8-15,1			2
Whittier Narrows	3	13,9-15,5			3
North Palm Springs	2	6,8-9,3		2	

Tabla 6. Resumen de sismos por su cercanía a la falla basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).

En resumen, una vez definida si las fallas se asimilan con la Falla San Ramón, se presenta una tabla en la cual se caracteriza cada falla en la Tabla 7, permitiendo visualizar de mejor manera la semejanza que hay entre la Falla San Ramón y el resto de los eventos

Sismo	Regió	Fecha	Profundida	Mecanismo	Strike	Dip	Rake	Magni
	n		d (km)					tud
Chi Chi	Taiwá	20-09-	6.8	Reverso-	5	30	55	7.6
	n	1999		Oblicuo				
Cape	Califor	25-04-	9.6	Reverso	350	14	68	7.1
Macedonio/Petrolia	nia	1991						
Sierra Madre	Califor	28-06-	12	Reverso	242	50	82	5.6
	nia	1991						
Whittier Aftershock	Califor	04-10-	13.3	Reverso-	170	70	140	5.3
	nia	1987		Oblicuo				
Whittier Narrows	Califor	01-10-	14.6	Reverso-	280	30	150	5.9
	nia	1987		Oblicuo				
North Palm Springs	Califor	08-07-	11	Reverso-	287	46	150	6
	nia	1986		Oblicuo				
Falla San Ramón	Chile		13	Reverso		35	110	6.7-
								7.4

 Tabla 7. Comparación entre eventos mundiales y la Falla San Ramón, basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.) y (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2012).

Cabe destacar que el más representativo en cuanto a cantidad de registros y similitud con la Falla San Ramón, es la falla de Chi Chi Taiwán, ya que tiene un ángulo de buzamiento similar, la magnitud del sismo ocurrido es el mismo caso que la magnitud más desfavorable esperado por la Falla San Ramón. El otro que es muy similar es el sismo ocurrido en Whittier Narrows California, con un Dip igual a 30 y un rake de 150 grados, mientras que la Falla San Ramón tiene un dip promedio de 35 y un rake promedio de 110 grados, aunque el sismo esperado tiene un rango de 6.7 a 7.4 (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2012), la magnitud en el evento de Whittier Narrows es de 5.9.

4.3. Factores de corrección

Como se habló en el capítulo de metodologías, se subdividen en 2 principalmente, factor de corrección de los datos del registro por distancia a la falla, estos varían para cada registro según la función presentada en los trabajos de (Ambraseys & Douglas, 2002) (ver Ilustración 15).



Ilustración 15. Ley de atenuación para distintos tipos de suelos para sismo corticales (Ambraseys & Douglas, 2002)

El valor de corrección para los diferentes rangos se muestra en la Tabla 8

Dougias, 2002).								
Rango [km]	Formula	Factor de Corrección						
0-1	0.78/0.74	1.054						
1-2	0.78/0.70	1.114						
2-5	0.78/0.58	1.345						
5-10	0.78/0.45	1.733						
10-16	0.78/0.36	2.167						

Tabla 8. Valores para factor de corrección para diferentes rangos de distancia basado en (Ambraseys &Douglas, 2002).

El otro factor de corrección es el de aceleración máxima, el cual es único para cada registro, y se hace una excepción en el sismo de Chi Chi Taiwán, ya que debido a su alta magnitud y sus bajas aceleraciones se corrigen sus datos por un factor de magnitud, el cual basado en los datos de (Ruiz & Saragoni, 2007) se tomara B con un valor de 1.28.

Los resultados de los factores de corrección se muestran en las tablas a continuación.

	Chi Chi Taiwán									
Distancia	Aceleración	Periodo	Factor de	Factor de	A _{max}	A _{max}	tipo de			
a Falla	máxima	de A _{max}	Corrección	Corrección	Corregida	FSR	suelo			
[km]	[cm/seg^2]	[seg]	por	por	[cm/seg^2]	[cm/seg				
			Magnitud	Distancia		^2]				
1.1	310.557	30.26	0.774	1.054	253.39763	686.7	Sd			
1.2	167.477	32.36	0.774	1.054	136.65213	686.7	Sd			
3	-353.085	35.22	0.774	1.345	-367.6395	686.7	Sd			
3.3	-238.352	34.06	0.774	1.345	248.1771	686.7	Sd			
3.4	256.587	27.64	0.774	1.345	267.1637	686.7	Sd			
3.4	111.285	34.84	0.774	1.345	115.8722	686.7	Sc			
4.6	189.229	34	0.774	1.345	197.0292	686.7	Sd			
5.5	131.522	35.06	0.774	1.733	176.4483	686.7	Sd			
5.6	-208.109	19.12	0.774	1.733	-279.19654	686.7	Sd			
7	229.993	34.75	0.774	1.733	308.55586	686.7	Sd			

Tabla 9. Tabla resumen Chi Chi Taiwán basado de datos de (Strong Motion Center, s.f.)

8.1	-99.506	35.74	0.774	1.733	-133.49606	686.7	Sd
9.1	117.92	29.69	0.774	1.733	158.20006	686.7	Sc
9.1	-163.497	44.48	0.774	1.733	-219.34562	686.7	Sc
9.2	-255.69	40.53	0.774	1.733	-343.03064	686.7	Sd
9.8	139.444	39.57	0.774	1.733	187.0764	686.7	Sd
9.9	192.993	30.17	0.774	1.733	258.9171	686.7	Sc
12.5	132.178	40.89	0.774	2.167	221.73727	686.7	Se
13.2	494.813	36.7	0.774	2.167	830.08129	686.7	Sb
13.4	174.846	42.31	0.774	2.167	293.31564	686.7	Sc
14.5	351.835	33.856	0.774	2.167	590.22631	686.7	Sd
14.7	158.576	55.02	0.774	2.167	266.02165	686.7	Sd
15	-121.581	40.7	0.774	2.167	-203.96011	686.7	Se
15.2	242.816	37.53	0.774	2.167	407.33978	686.7	Sd

Tabla 10. Tabla resumen para Cape Mendocino-Petrolia California basado en datos de (Strong MotionCenter, s.f.)

Cape Mendocino-Petrolia California									
Distancia	aceleración	Period	Factor de	Factor de	A _{max}	A _{max}	tipo de		
a Falla	máxima	o de	Corrección	Correcció	Corregida	FSR	suelo		
[km]	[cm/seg^2]	A _{max}	por	n por	[cm/seg^2]	[cm/seg			
		[seg]	Magnitud	Distancia		^2]			
15.5	1468.297	3	1.468	2.167	4671.3445	686.7	Cretac		
							eus		
							Rock		
15.9	-578.135	3.42	1.468	2.167	1839.319	686.7	alluviu		
							m		

5.1.)										
North Palm Spring California										
Distancia	aceleración	Period	Factor de	Factor de	A _{max}	A _{max}	tipo de			
a Falla	máxima	o de	Corrección	Correcció	Corregida	FSR	suelo			
[km]	[cm/seg^2]	A _{max}	por	n por	[cm/seg^2]	[cm/seg				
		[seg]	Magnitud	Distancia		^2]				
6.8	293.955	2.76	6.001	1.733	3057.2794	686.7	deep			
							alluviu			
							m			
9.3	136.406	4.88	6.001	1.733	1418.6908	686.7	alluviu			
							m:			
							more			
							than			
							70m			

Tabla 11. Tabla resumen para North Palm Spring California basado en datos de (Strong Motion Center,

Tabla 12. Tabla resumen Sierra Madre California basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.)

Sierra Madre California							
Distancia	aceleración	Period	Factor de	Factor de	A _{max}	A _{max}	tipo de
a Falla	máxima	o de	Corrección	Correcció	Corregida	FSR	suelo
[km]	[cm/seg^2]	A _{max}	por	n por	[cm/seg^2]	[cm/seg	
		[seg]	Magnitud	Distancia		^2]	
9.9	270.633	2.46	10.014	1.733	4696.710	686.7	graniti
							c rock
12.5	-438.913	2.84	10.014	2.167	9524.711	687.7	alluviu
							m

S.T.)								
Whittier Aftershock California								
Distancia	aceleración	Period	Factor de	Factor de	A _{max}	A _{max}	tipo de	
a Falla	máxima	o de	Corrección	Correcció	Corregida	FSR	suelo	
[km]	[cm/seg^2]	A _{max}	por	n por	[cm/seg^2]	[cm/seg		
		[seg]	Magnitud	Distancia		^2]		
14.8	-174.979	2.6	14.702	2.167	-5574.789	686.7	alluviu	
							m	
15.1	193.359	2.22	14.702	2.167	6160.371	687.7	deep	
							alluviu	
							m fan	

Tabla 13.tabla resumen para Whittier Aftershock California basado en datos de (Strong Motion Center,

Tabla 14. Tabla resumen corrección para Whittier Narrows California basado en (Strong Motion Center,

Whittier Narrows								
Distancia	aceleración	Period	Factor de	Factor de	A _{max}	A _{max}	tipo de	
a Falla	máxima	o de	Corrección	Correcció	Corregida	FSR	suelo	
[km]	[cm/seg^2]	A _{max}	por	n por	[cm/seg^2]	[cm/seg		
		[seg]	Magnitud	Distancia		^2]		
13.9	286.159	3.02	6.821	2.167	4229.721	686.7	alluviu	
							m	
14.2	420.113	4.28	6.821	2.167	6209.697	687.7	alluviu	
							m	
15.5	183.824	2.92	6.821	2.167	2717.105	688.7	deep	
							alluviu	
							m fan	

4.4. Espectros de respuesta

Luego de definir los factores de corrección para cada uno de los registros, es necesario crear los espectros de respuesta para cada uno de los registros, para esto tendremos que apoyarnos en un programa llamado MATLAB.

A continuación se presentan los espectros de respuesta de pseudo aceleraciones, para cada registro de aceleraciones con diferentes grados de amortiguamiento de los eventos anteriormente descritos.



Ilustración 16. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 17. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 18. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 19. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 20. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 21. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 22. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 23. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 24. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 25. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 26. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 27. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 28. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 29. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 30. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 31. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 32. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 33. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 34. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 35. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 36. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 37. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 38. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 39. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 40. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 41. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 42. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 43. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).


Ilustración 44. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.)



Ilustración 45. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 46. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 47. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 48. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).



Ilustración 49. Espectro de Respuesta elástico para pseudo aceleración para diferentes niveles de amortiguamiento basado en datos de (Strong Motion Center, s.f.).

4.5. Análisis estadístico

Una vez aplicado el promedio y la desviación estándar tendremos los siguientes resultados, en primer lugar se muestra gráficamente como son los promedios según su grado de amortiguamiento en relación al total de registros del catálogo en estudio.



Ilustración 50. Espectro de respuesta elástico de pseudo-aceleración para amortiguamiento de 2% en valores de [m/s^2].



Ilustración 51. Espectro de respuesta elástico de pseudo-aceleración para amortiguamiento de 3% en valores de [m/s^2].



Ilustración 52. Espectro de respuesta elástico de pseudo-aceleración para amortiguamiento de 5% en valores de [m/s^2].



Ilustración 53. Espectro de respuesta elástico de pseudo-aceleración para amortiguamiento de 5% en valores de [m/s^2].

Los resultados muestran una desviación estándar muestran una forma muy parecida al gráfico que representan, teniendo desviaciones máximas en los máximos de aceleración de los espectros. Los espectros se asemejan en su forma geométrica, teniendo un peak de aceleración en los primeros segundo y luego disminuyendo rápidamente a medida que el tiempo transcurre, también cabe notar que debido a que las muestras son pequeñas, una pequeña variación en alguno de los espectros de estudio, puede generar un gran impacto en la desviación estándar del grupo, las variaciones de la desviación estándar la podemos observar en las siguientes imágenes.



Ilustración 54. Espectro de respuesta con amortiguación del 2% comparado con las desviaciones estándar.



Ilustración 55. Espectro de respuesta con amortiguación del 3% comparado con las desviaciones estándar.



Ilustración 56. Espectro de respuesta con amortiguación del 5% comparado con las desviaciones estándar.



Ilustración 57. Espectro de respuesta con amortiguación del 10% comparado con las desviaciones estándar.

Una vez determinado los promedios de los espectros, podemos hacer una comparación según su grado de amortiguación los cuales se expresaran en su valor numero en [m/s^2] y en porcentaje de la aceleración de gravedad, ya que así se publican en la norma chilena (Instituto Nacional de Normalización, 2003) como se muestra a continuación.



Ilustración 58. Espectro de respuesta elástico de pseudo-aceleraciones para la Falla San Ramón basado en diferentes grados de amortiguación.



Ilustración 59. Espectro de respuesta elástico de pseudo-aceleraciones para la Falla San Ramón basado en diferentes grados de amortiguación.

Resumiendo, los resultados los podemos agrupar en función de su aceleración máxima como se muestra en la Tabla 15.

Amortiguación	Valor máximo	
ξ	[m/s^2]	%g
0.02	8.48	0.86
0.03	8.27	0.84
0.05	7.78	0.79
0.1	6.81	0.69

Tabla 15. Valores máximos de los espectros de la Falla San Ramón basado en su grado de amortiguación.

4.6. Función propuesta para espectro de respuesta elástico

Para nuestros resultados y que la curva sea representativa de los resultados expuestos anteriormente fue necesario cambiar los parámetros a la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{0.2 + 2.3 \left(\frac{T_n}{0.15}\right)^1}{1 + \left(\frac{T_n}{0.15}\right)^{1.8}}$$

Ecuación 15

Obteniendo los siguientes resultados:



Ilustración 60. Propuesta de función de espectro de respuesta elástico para amortiguamiento del 2%.



Ilustración 61. Propuesta de función de espectro de respuesta elástico para amortiguamiento del 3%.



Ilustración 62. Propuesta de función de espectro de respuesta elástico para amortiguamiento del 5%.



Ilustración 63. Propuesta de función de espectro de respuesta elástico para amortiguamiento del 10%.

Donde la función propuesta en todos los casos es una forma conservadora y correcta de representar los espectros de respuesta elásticos para aceleración independiente de su amortiguamiento especifico. Los peaks de aceleración se muestran en la

Amortiguamiento	Aceleración máxima	Aceleración máxima
	[m/s^2]	[%g]
0.02	10.31	1.05
0.03	9.51	0.97
0.05	8.58	0.87
0.1	7.47	0.79

5. CONCLUSIONES

Es de real importancia el estudio de la Falla San Ramón, ya que es una falla superficial ubicada en una zona urbana de la región metropolitana, la cual no se ha tomado en cuenta en la normativa chilena para el diseño de elementos sismo resistentes, por lo cual es necesario estudiar un espectro de respuesta y hacer la comparación con lo que la norma respecta a la aceleraciones máximas en la zona de estudio y como este espectro puede afectar a la zona urbana de Santiago.

El estudio se basó principalmente en la selección de un grupo de sismos a nivel mundial que cumplían con las características de semejanza con la Falla San Ramón, tanto por características geométricas, como en características sísmicas, estos registros además fueron sometidos a factores de corrección tanto por proximidad a la falla como por aceleración o magnitud, luego se generaron los espectros de respuesta para cada elemento de este grupo, generando a través de un análisis estadístico un espectro de respuesta elástico para pseudo aceleración para la Falla San Ramón, los pros de este método es que podemos analizar y proyectar datos de la falla superficial en estudio, sin tener datos de aceleraciones efectivas de esta falla, los problemas que podemos encontrar es que las muestras al ser reducidas pueden generar problemas tener datos que se separen mucho del promedio, generando puntos no representativos a la función del espectro.

Primero, cabe resaltar que la falla se comporta como se predijo durante el desarrollo de esta tesis, teniendo un peak de aceleración muy marcado y luego atenuándose rápidamente. Otro punto a resaltar es que comparativamente las aceleraciones estimadas para la Falla San Ramón son mucho mayores a la impuesta por la norma Chilena para el diseño de elemento sismo resistentes, en NCh 2369 of. 06. Trata a la zona Metropolitana como Zona II y Zona III, como se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16. Zonificación de la región metropolitana por comuna. (Instituto Nacional de Normalización, 2003).

Teniendo como Zonas II y III aceleraciones en porcentaje de la aceleración de gravedad como se muestra en la Tabla 17

Tabla 17. Aceleraciones en porcentaje de la aceleración de gravedad de acuerdo a la zona sísmica (Instituto Nacional de Normalización, 2003).

Zona sismica	A_0
1	0,20 g
2	0,30 g
3	0,40 g

Como se ve en la Tabla 17 la región Metropolitana tiene aceleraciones máximas hasta de 0.4g, mientras que las aceleraciones proyectadas para la Falla San Ramón son estimadas en entre los rango 0.86g y 0.69g. Los valores estimados por esta investigación son mayores a lo establecido en la norma, por lo cual es

necesario hacer una investigación más profunda, con un sistema de redes de acelerógrafos en la falla para poder estudiar los movimientos de la falla, y reevaluar la norma chilena para poder hacer diseños considerando los efectos de la Falla San Ramón en la región metropolitana.

Por lo cual es de una gran importancia hacer hincapié a revisar y entender cómo se relacionan estas fallas corticales con respecto al diseño de estructuras y aplicación de la normativa vigente en Chile.

5.1. TRABAJO FUTURO

Los trabajos a seguir luego de este son los siguientes

- Evaluar las leyes de atenuación para la Falla San Ramón
- Determinar los espectros de diseño para diferentes estructuras importantes, que se encuentran cerca de la Falla San Ramón, como por ejemplo el reactor nuclear de la Reina o la Universidad Adolfo Ibáñez

BIBLIOGRAFÍA.

- Ambraseys, N. N., & Douglas, J. (2002). *Near-field horizontal and vertical earthquake ground motions.* Londres: Elsevier.
- Armijo, R., Rauld, R., Thiele, R., Vargas, G., Campos, J., Lacassin, R., & Kausel, E. (2010). The West Andean Thrust (WAT), the San Ramón Fault and the seismic hazard for Santiago (Chile).
- Astroza, M., & Astroza, R. (2008). Comparación de los daños producidos por terremotos chilenos con diferente fuente sismogénica. XXXIII Jornadas sudamericanas de ingenieria estructural, (pág. 6). Santiago. Obtenido de www.sismo24.cl.

Caballero, W. (1975). Introducción a la estadística. IICA.

Centro Sismológico Nacional. (s.f.).

- Chopra, A. (2002). *Dynamics of Structures: Thery and Application to Earthquake Enineering.* New Jersey: Practice Hall College Division.
- Cornell, C., Banon, H., & Shakal, A. (1979). *Earthquake engineering and structural dynamics.*
- Crisafulli, F., & Villafañe, E. (2002). Espectros de respuesta y diseño. Argentina.
- Datta, T. K. (2010). Seismic analysis of structures. Dheli: John Wiley & Sons.
- Elnashai, A. S., & Di Sarno, L. (2008). *Fundamentals of EARTHQUAKE* ENGINEERING . John Wiley & Sons, Ltd.

Francisco, C., & Villafañe, E. (2002). Espectro de Respuesta y de Diseño.

Instituo Nacional de Prevención Sísmica, Argentina. (s.f.). *contenidos inpres.* Obtenido de

http://contenidos.inpres.gov.ar/docs/Fallas%20Geol%C3%B3gicas.pdf

- Instituto Nacional de Normalización. (2003). NCh 2369 Of 2003. *Diseño Sismico de Estructuras e Instalaciones Industriales*. Santiago, Chile.
- Keller, G. S. (2004). *Guía de Campo para las Mejores Prácticas de Administración de Caminos Rurales.* México: Instituto Mexicano del Transporte.

Leyton, F., Ruiz, S., & Sepúlveda, S. (2010). Reevaluacion del Peligro Sísmico Probabilistico en Chile Central. *Andean Geology 37*, 455-472.

- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (13 de Diciembre de 2011). Decreto Supremo 61. Chile.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (Enero de 2012). Estudio "Riesgo y Modificación PRMS Falla San Ramón". *Informe Etapa 2*. Santiago, Chile.
- Open Seismic Hazard Analysis . (2010). *Glossary: OpenSHA*. Obtenido de http://www.opensha.org/glossary-strikeDipRake#dip.
- Rauld, R. A. (2002). Análisis morfoestructural del frente cordillerano: Santiago oriente entre río Mapocho y Qubrada de Macul, Memoria para optar al título de Geólogo.
- Ruiz, S. (2002). Formulas de atenuación para la subducción de Chile considerando los dos mecanismos principales de sismogénesis y efectos de suelo y las asperezas. Memoria para optar al título de Ingeniero civil, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, U. de Chile. Santiago.
- Ruiz, S., & Saragoni, G. (2007). Formulas de atenuación para la subducción de Chile considerando los dos mecanismos de sismogenesis y los efectos de suelo. Santiago.
- Ruiz, S., & Saragoni, R. (2008). TWO PEAKS RESPONSE SPECTRA (2PRS) FOR SUBDUCTION EARTHQUAKES CONISDERING SOIL AND SURFACE EFFECTS. *The 14° World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing.
- Strong Motion Center. (s.f.). *Strong-Motion Virtual Data Center*. Obtenido de strongmotioncenter.org.

Uniform Building Code. (s.f.). Volumen 2. 1997. Estados Unidos.

Universidad de Concepción, Geofísica. (s.f.). Sismología Aplicada y de Exploración.

Wells, D., & Coppersmith, K. (1994). NNew empirical relationships among Magnitude, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. Bulletin of the Seismological Society of America 84(4), 974-1002.

ANEXOS

A. ANEXO 1

A.1. Datos históricos de sismos en Chile

Tabla 18. Historia de sismicidad en Chile a lo largo de su historia (Centro Sismológico Nacional).

Fecha local	Latitud	Longitud	Magnitud Ms	Magnitud Mw
08/02/1570	-36.800	-73.000	8.3	-
17/03/1575	-33.400	-70.600	7.3	-
16/12/1575	-39.800	-73.200	8.5	-
24/11/1604	-18.500	-70.400	8.5	-
16/09/1615	-18.500	-70.350	8.8	-
13/05/1647	-35.000	-72.000	8.5	-
15/03/1657	-36.830	-73.030	8.0	-
10/03/1681	-18.500	-70.350	7.3	-
12/07/1687	-32.750	-70.730	7.3	-
08/07/1730	-33.050	-71.630	8.7	-
24/12/1737	-39.800	-73.200	7.7	-
25/05/1751	-36.830	-73.030	8.5	-
30/03/1796	-27.350	-70.350	7.7	-
11/04/1819	-27.350	-70.350	8.3	-
19/11/1822	-33.050	-71.630	8.5	-
26/09/1829	-33.050	-71.630	7.0	-
08/10/1831	-18.500	-71.000	7.8	-
18/09/1833	-18.500	-70.400	7.7	-
20/02/1835	-36.830	-73.030	8.5	-
07/11/1837	-39.800	-73.200	8.0	-
08/10/1847	-31.610	-71.180	7.3	-
17/12/1849	-29.950	-71.370	7.5	-
06/12/1850	-33.810	-70.220	7.3	-
02/04/1851	-33.320	-71.420	7.1	-
05/10/1859	-27.350	-70.350	7.6	-
13/08/1868	-18.500	-70.350	8.5	-
24/08/1869	-19.600	-70.230	7.5	-
05/10/1871	-20.200	-70.170	7.3	-
09/05/1877	-19.600	-70.230	8.5	-
23/01/1878	-20	-70,3	7.9	-
02/02/1879	-53.000	-70.670	7.3	-
15/08/1880	-31.620	-71.180	7.7	-
16-08-1906	-33.000	-72.000	7.9	8.2

08-06-1909	-26.500	-70.500	7.6	-
04-10-1910	-22.000	-69.000	7.3	-
15-09-1911	-20.000	-72.000	7.3	-
29-01-1914	-35.000	-73.000	8.2	-
14-02-1917	-30.000	-73.000	7.0	-
20-05-1918	-28.500	-71.500	7.9	-
04-12-1918	-26.000	-71.000	8.2	-
01-03-1919	-41.000	-73.500	7.2	-
02-03-1919	-41.000	-73.500	7.3	-
10-12-1920	-39.000	-73.000	7.4	-
07-11-1922	-28.000	-72.000	7.0	-
10-11-1922	-28.500	-70.000	8.39	8.5
04-05-1923	-28.750	-71.750	7.0	-
15-05-1925	-26.000	-71.500	7.1	-
28-04-1926	-24.000	-69.000	7.0	-
21-11-1927	-44.500	-73.000	7.1	-
20-11-1928	-22.500	-70.500	7.1	-
01-12-1928	-35	-72	8.3	-
19-10-1929	-23.000	-69.000	7.5	-
18-03-1931	-32.500	-72.000	7.1	-
23-02-1933	-20.000	-71.000	7.6	-
01-03-1936	-40.000	-72.500	7.1	-
13-07-1936	-24.500	-70.000	7.3	-
24-01-1939	-36.200	-72.200	8.3	-
18-04-1939	-27.000	-70.500	7.4	-
11-10-1940	-41.500	-74.500	7.0	-
08-07-1942	-24.000	-70.000	7.0	-
14-03-1943	-20.000	-69.500	7.2	-
06-04-1943	-30.750	-72.000	8.3	8.2
01-12-1943	-21.000	-69.000	7.0	-
13-07-1945	-33.250	-70.500	7.1	-
02-08-1946	-26.500	-70.500	7,9	-
19-04-1949	-38.000	-73.500	7.3	-
25-04-1949	-19.750	-69.000	7.3	-
29-05-1949	-22.000	-69.000	7.0	-
17-12-1949	-54.000	-71.000	7.8	-
17-12-1949	-54.000	-71.000	7.8	-
29-01-1950	-53.500	-71.500	7.0	-
09-12-1950	-23.500	-67.500	8,3	-
06-05-1953	-36.500	-72.600	7,6	-
06-12-1953	-22.100	-68.700	7.4	-

08-02-1954	-29	-70,5	7,7	-
19-04-1955	-30.000	-72.000	7.1	-
08-01-1956	-19.000	-70.000	7.1	-
17-12-1956	-25.500	-68.500	7.0	-
29-07-1957	-23.500	-71.500	7.0	-
13-06-1959	-20.420	-69.000	7.5	-
21-05-1960	-37.500	-73.500	7.3	-
22-05-1960	-37.500	-73.000	7.3	-
22-05-1960	-39.500	-74.500	8.5	9.5
19-06-1960	-38.000	-73.500	7.3	-
01-11-1960	-38.500	-75.100	7.4	-
13-07-1961	-41.700	-75.200	7.0	-
14-02-1962	-37.800	-72.500	7.3	-
03-08-1962	-23.300	-68.100	7.1	-
23-02-1965	-25.670	-70.630	7.0	-
28-03-1965	-32.418	-71.100	7.4	-
28-12-1966	-25.510	-70.740	7.8	-
13-03-1967	-40.120	-74.680	7.3	-
21-12-1967	-21.80	-70.00	7.5	-
17-06-1971	-25.402	-69.058	7.0	-
08-07-1971	-32.511	-71.207	7.5	-
18-08-1974	-38.453	-73.431	7.1	-
10-05-1975	-38.183	-73.232	7.7	-
29-11-1976	-20.520	-68.919	7.3	-
03-08-1979	-26.518	-70.664	7.0	-
16-10-1981	-33.134	-73.074	7.5	-
04-10-1983	-26.535	-70.563	7.3	-
03-03-1985	-33.240	-71.850	7.8	8.0
08-04-1985	-34.131	-71.618	7.5	-
05-03-1987	-24.388	-70.161	7.3	-
08-08-1987	-19.000	-70.000	7.1	-
30-07-1995	-23.360	-70.310	7.3	8.0
15-10-1997	-30.773	-71.315	-	7.1
13-06-2005	-19.895	-69.125	7.8	7.8
14-11-2007	-22.314	-70.078	7.5	7.7
27-02-2010	-36.290	-73.239	-	8.8
01-04-2014	-19.572	-70.908		8.2

B. ANEXO 2

B.1. Código MATLAB para un registro típico

```
clear all;clc;close all;
load registro tipo.txt
N = size(registro tipo, 1) *size(registro tipo, 2);
g1 = reshape(registro tipo', N, 1);
g1 = g1.*3.747*2.167/(100); % para que la aceleración de en m/s^2
xq1=[q1;zeros(499,1)];
epsi=0.02;
epsi2=0.03;
epsi3=0.05;
epsi4=0.1;
dt=0.01;
xo=0;vo=0;
T = [0.01:0.02:5];
m=length(T);
Sd=zeros(m,1);Sd2=zeros(m,1);Sd3=zeros(m,1);Sd4=zeros(m,1);
Sa=zeros(m,1);Sa2=zeros(m,1);Sa3=zeros(m,1);Sa4=zeros(m,1);
for i=1:m
    wn=2*pi/T(i);
    [x] = SDOF(T(i), epsi, xq1, dt, xo, vo);
    [ x2 ] = SDOF(T(i),epsi2,xg1,dt,xo,vo);
    [ x3 ] = SDOF(T(i),epsi3,xg1,dt,xo,vo);
    [ x4 ] = SDOF(T(i),epsi4,xg1,dt,xo,vo);
Sd(i,1) =max(abs(x));Sd2(i,1) =max(abs(x2));Sd3(i,1) =max(abs(x3));Sd4(i,1) =
max(abs(x4));
Sa(i,1)=wn^2*Sd(i,1);Sa2(i,1)=wn^2*Sd2(i,1);Sa3(i,1)=wn^2*Sd3(i,1);Sa4(i,
1) =wn^2*Sd4(i,1);
end
plot(T,Sa,'-r',T,Sa2,'-b',T,Sa3,'-g',T,Sa4,'-k')
set(gca, 'fontsize', 16);
title('registro tipokm');
xlabel('Periodo','fontsize',16);
ylabel('Aceleración[M/S^2]','fontsize',16);
grid on;
legend('0.02','0.03','0.05','0,1','fontsize',16);
A=[Sa Sa2 Sa3 Sa4];
save('nombre archivo.txt', 'A', '-ASCII');
```

B.2. Código MATLAB para función SDOF

```
function [ x1 ] = SDOF(T,epsi,xg,dt,xo,vo)
%UNTITLED Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
n=length(xg);
d=0.5;
b=0.25;
wn=2*pi/T;
x=zeros(3,n);
x(:,1)=[xo;vo;-xg(1,1)-2*epsi*wn*vo-wn^2*xo];
a=1+2*epsi*wn*d*dt+wn^2*b*dt^2;
y=2*epsi*wn*(1-d)*dt+wn^2*(0.5-b)*dt^2;
F=1/a*[a-wn^2*a*dt^2 dt-2*epsi*wn*b*dt^2-wn^2*b*dt^3 0.5*a*dt^2-
b*(a+y)*dt^2;...
       -wn^2*d*dt
                     a-2*epsi*wn*d*dt-wn^2*d*dt^2 a*dt-d*(a+y)*dt;...
       -wn^2
                    -2*epsi*wn-wn^2*dt
                                                     -y];
H=1/a*[b*dt^2;d*dt;1];
for i=1:n-1
    x(:,i+1) = F^*x(:,i) + H^*(-xg(i+1,1));
end
x1=x(1,:);
```