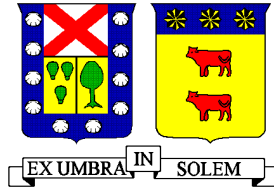


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO – CHILE



ESTUDIO DEL FENÓMENO DE INTERACCIÓN DINÁMICA SUELO – ESTRUCTURA
Y SU INFLUENCIA EN LA DEMANDA SISMICA ESTRUCTURAL

Memoria de titulación presentada por
MATHIAS JOSÉ CHRISTIE POFFAN

Como requisito parcial para optar al título de
Ingeniería Civil

Profesor Guía
Oscar Taiba
(Profesor Co-referente)
Gonzalo Suazo

Septiembre de 2017

RESUMEN

El presente trabajo de título pretende analizar la influencia de la interacción dinámica entre suelo y estructura en la demanda sísmica estructural. La motivación de este estudio se basa en investigaciones internacionales existentes, en donde se demuestra que el fenómeno de Interacción Dinámica Suelo-Estructura en la mayoría de los casos analizados resulta beneficioso para el rendimiento sísmico estructural.

Para llevar a cabo esta investigación se aplicarán dos tipos de modelaciones distintas; la primera con el método tradicional de dos pasos, en donde se analiza por separado la amplificación de la onda sísmica en el estrato de suelo desde la roca basal a la superficie, para luego aplicar esta onda amplificada a una estructura con base fija. En cambio, el otro modelo contempla un análisis en conjunto del estrato de suelo y la estructura unidas mediante un elemento de interacción.

Para analizar y comparar estos dos tipos de modelaciones se utilizarán 5 estratos de suelos de distintas zonas del país (Viña del Mar, Santiago y Concepción), una estructura tipo con 3 alturas distintas (5,10 y 15 pisos) y que serán sometidas a 8 registros de aceleraciones de roca basal correspondientes al sismo del 27 de Febrero de 2010.

Para las modelaciones se utilizarán los Software PLAXIS 2D y ETABS 2015. El primero para el análisis de elementos finitos del estrato de suelo mediante el modelo constitutivo Hardening Soil Small y el análisis de interacción suelo estructura bajo condición sísmica. El segundo, para el análisis de la estructura con base fija, la cual es sometida al registro de aceleraciones amplificado obtenido en la superficie del estrato. Como indicador de demanda estructural se utilizará el máximo desplazamiento de entre pisos de la estructura, de manera de analizar y comparar los resultados que se obtendrán de ambos tipos de modelaciones.

ABSTRACT

The present work of title tries to analyze the influence of the dynamic interaction between soil and structure in the structural seismic demand. The motivation of this study is based on existing international research, which demonstrate that the Dynamic Soil-Structure Interaction phenomenon in most of the cases analyzed is beneficial for structural seismic performance.

To carry out this research two different types of modeling will be applied; The first with the traditional two-step method, where the amplification of the seismic wave in the soil stratum from the basal rock to the surface is analyzed separately, and then apply this amplified wave to a fixed base structure. Instead, the other model contemplates an analysis of the soil stratum and structure together through an interaction element.

In order to analyze and compare these two types of modeling, 5 layers of soils from different areas of the country will be used (Viña del Mar, Santiago and Concepción), a typical structure with 3 different heights (5,10 and 15 floors) will be used and will be submitted to 8 records of basal rock accelerations corresponding to the earthquake of February 27, 2010.

For the modeling, the software PLAXIS 2D and ETABS 2015 will be used. The first one for the analysis of finite elements of the soil stratum using the Hardening Soil Small constitutive model and the analysis of interaction soil structure under seismic condition. The second, for the analysis of the structure with fixed base, which is subjected to the record of amplified accelerations obtained in the surface of the stratum. As a structural demand indicator, the maximum displacement between two consecutive floors of the structure will be used, in order to analyze and compare the results that will be obtained from both types of modeling.

Índice de Contenidos

RESUMEN	ii
ABSTRACT	iii
1. Introducción	1
1.1 Antecedentes y Alcances.....	1
1.2 Objetivo General del Estudio	2
1.3 Objetivos Específicos del Estudio	2
1.4 Metodología	2
1.5 Estructuración de la Memoria.....	3
2. Marco Teórico	4
2.1 Tectónica de Placas	4
2.2 Tipos de Fallas	5
2.3 Ondas Sísmicas	5
2.3.1 Ondas de Cuerpo.....	5
2.3.2 Ondas de Superficie.....	7
2.4 Interacción Suelo-Estructura y su Influencia en la Respuesta Estructural.....	8
2.5 Amortiguamiento	10
3. Casos de Estudio para la Modelación.....	13
3.1 Descripción de los Estratos	13
3.1.1 Estrato 1: Viña del Mar.....	13
3.1.2 Estratos 2, 3 y 4 de Santiago	14
3.1.3 Estrato 5: Concepción	16
3.2 Descripción de la Estructura.....	18
3.3 Registros Sísmicos	20
3.4 Modelación de Situaciones	23
4. PLAXIS 2D: Software utilizado para Modelación del Suelo e Interacción Suelo – Estructura... 25	25
4.1 Características Generales PLAXIS 2D.....	25
4.1.1 Sub Programas PLAXIS 2D	25
4.2 Método de Elementos Finitos con PLAXIS 2D	26
4.2.1 Implementación al Software	26
4.2.2 Tipos de Elementos Finitos.....	27
4.3 Modelos Constitutivos de Materiales	28
4.3.1 Modelo Mohr – Coulomb.....	28
4.3.2 Modelo Hardening Soil (Endurecimiento Isotrópico)	31
4.3.3 Modelo Hardening Soil Small	35
5. Modelación en PLAXIS 2D	37
5.1 Definición de Parámetros.....	37
5.1.1 Perfil de Velocidades de Ondas de Corte	37
5.1.2 Peso Saturado y No Saturado.....	38
5.1.3 Módulo de Corte para Pequeñas Deformaciones: G_0^{ref}	38
5.1.4 Deformación Unitaria para $0,7G_0$: $\gamma_{0,7}$	39
5.1.5 Módulo de Young de Referencia para Carga Triaxial: <i>E50ref</i>	40

5.1.6	Módulo de Young de Referencia para Carga Edométrica: <i>Eoedref</i> y Módulo de Young de Referencia para Carga/Descarga: <i>Eurref</i>	40
5.1.7	Poder: m	41
5.1.8	Cohesión: c	41
5.1.9	Angulo de Fricción Interna ϕ y Angulo de Dilatancia ψ	41
5.1.10	Parámetros Avanzados.....	41
5.1.11	Resumen.....	42
5.1.12	Amortiguamiento	44
5.2	Modelación.....	51
5.2.1	Geometría y Parámetros Generales del Modelo	51
5.2.2	Interfaz del Programa.....	52
5.2.3	Materiales	52
5.2.4	Estratigrafía del Depósito de Suelo	53
5.2.5	Condiciones de Borde	54
5.2.6	Elementos Estructurales.....	56
5.2.7	Malla de Elementos Finitos	58
5.2.8	Fases de Cálculo	59
6.	Modelación en ETABS 2015	62
6.1	Definición de Grilla y Pisos	62
6.2	Definición de Materiales	63
6.3	Definición de Elementos Estructurales	64
6.4	Tipo de Apoyo	66
6.5	Ingreso Registro Sísmico	66
7.	Resultados	69
7.1	Registros de Aceleraciones	69
7.2	Demanda Sísmica Estructural.....	74
8.	Comparación de 2 Métodos Utilizando PLAXIS 2D	84
9.	Conclusiones Generales	88
10.	Referencias.....	90
11.	ANEXO	92
11.1	Tablas de sección 7.1.....	92

Indice de Figuras

Figura 1. Zona de Subducción y Sismos Provocados (CSN U. de Chile, 2013).....	4
Figura 2. Falla Convergente (INPRES, 2015).....	5
Figura 3. Onda Primaria.....	6
Figura 4. Onda Secundaria	6
Figura 5. Onda Rayleigh.....	7
Figura 6. Onda Love.....	7
Figura 7. (a) Modificación del movimiento del campo libre considerando un cambio de aceleración (=a) mostrada en la gráfica de a versus t, y (b) una aceleración a^* que cambia debido a la presencia de estructuras (Soriano, 1989).....	8
Figura 8. Respuesta sísmica de estructura (a) cimentada en roca, (b) empotrada en suelo descansando en roca con campo libre. En esta figura A representa la cimentación rígida de la estructura, B a la roca, C y D son nodos en campo libre y, 0 es la cimentación en suelo flexible de la estructura (Wolf, 1994).....	9
Figura 9. Amortiguamiento de Rayleigh (modificada de Tsai et al., 2014).	11
Figura 10. Emplazamiento Geográfico Estrato Viña del Mar (Mancilla, 2013)	13
Figura 11. Emplazamiento Geográfico Estrato Concepción (Peña, 2014)	17
Figura 12. Planta Edificio Tipo	19
Figura 13. Registro Roca Convento Viejo	20
Figura 14. Registro Roca El Roble.....	21
Figura 15. Registro Roca Las Tórtolas.....	21
Figura 16. Registro Roca Melado	21
Figura 17. Registro Roca Puangue.....	22
Figura 18. Registro Roca Rapel.....	22
Figura 19. Registro Roca Santa Lucía.....	22
Figura 20. Registro Roca UTFSM	23
Figura 21. Representación Tipos de Modelación (Saez, 2009)	23
Figura 22. Modelación Tipo 1 en PLAXIS 2D.....	24
Figura 23. Modelación Tipo 2 en PLAXIS 2D y ETABS 2015.....	24
Figura 24. Representación de Modelo Elementos Finitos (Frias, 2004).....	26
Figura 25. Representación Modelos “Plain Strain” y “Axisymmetric” (Brinkgreve, 2010)	27
Figura 26. Tipos de Elementos Finitos PLAXIS 2D (Brinkgreve, 2010).....	27
Figura 27. Modelo Elastoplástico Perfecto (PLAXIS)	29
Figura 28. Superficie de Fluencia Modelo Mohr – Coulomb (PLAXIS)	30
Figura 29. Relación Hiperbólica Esfuerzo-Deformación para Ensayos Triaxiales (PLAXIS)	32
Figura 30. Representación Gráfica de Parámetro E_{oedref} (PLAXIS).....	33
Figura 31. Curva de Reducción de Rigidez en Suelos (PLAXIS).....	35
Figura 32. Curva de Razón de Corte (Seed & Idriss, 1970).....	39
Figura 33. Espectro Aceleraciones Convento Viejo.....	47
Figura 34. Espectro Aceleraciones El Roble	48
Figura 35. Espectro Aceleraciones Las Tórtolas	48
Figura 36. Espectro Aceleraciones Melado	48
Figura 37. Espectro Aceleraciones Puangue	49

Figura 38. Espectro Aceleraciones Rapel	49
Figura 39. Espectro Aceleraciones Santa Lucía	49
Figura 40. Espectro Aceleraciones UTFSM.....	50
Figura 41. Ingreso Geometría y Parámetros Generales con PLAXIS 2D	51
Figura 42. Ingreso Parámetros de Estratos en PLAXIS 2D	52
Figura 43. Ingreso Parámetros de Estratos en PLAXIS 2D	53
Figura 44. Definición Estratigrafía en PLAXIS 2D.....	53
Figura 45. Desplazamiento Prescrito en PLAXIS 2D	55
Figura 46. Ingreso Registros Sísmicos en PLAXIS 2D	56
Figura 47. Ingreso Parámetros Elementos Tipo Placa en PLAXIS 2D.....	57
Figura 48. Modelación Interacción Suelo – Estructura	58
Figura 49. Malla de Elementos Finitos en PLAXIS 2D.....	58
Figura 50. Elección de Puntos de Malla Roca Basal y Superficie.....	61
Figura 51. Elección de Puntos en Estructura.....	61
Figura 52. Definición Grilla ETABS 2015	62
Figura 53. Definición de Pisos ETABS 2015	62
Figura 54. Definición Material H-25 ETABS 2015	63
Figura 55. Definición Elemento Pilar 100x50 ETABS 2015	64
Figura 56. Definición Elemento Viga 50x60	64
Figura 57. Vista en Planta Modelo ETABS 2015	65
Figura 58. Elevación Modelo ETABS 2015.....	65
Figura 59. Registro Sísmico en Archivo de Nota	66
Figura 60. Ingreso Registro Sísmico en ETABS 2015	67
Figura 61. Aplicación del Registro Sísmico al Modelo en ETABS 2015.....	68
Figura 62. Coeficientes de Newmark Considerados.....	68
Figura 63. Registro Las Tórtolas Viña del Mar.....	69
Figura 64. Peaks de Aceleración Registros Suelo Concepción	70
Figura 65. Peaks de Aceleración Registros Suelo Santiago Maipú.....	70
Figura 66. Peaks de Aceleración Registros Suelo Santiago Peñalolén	70
Figura 67. Peaks de Aceleración Registros Suelo Santiago San Joaquín	71
Figura 68. Peaks de Aceleración Registros Suelo Viña del Mar	71
Figura 69. Factor de Amplificación Registros Suelo Concepción	72
Figura 70. Factor de Amplificación Registros Suelo Santiago Maipú	72
Figura 71. Factor de Amplificación Registros Suelo Santiago Peñalolén	72
Figura 72. Factor de Amplificación Registros Suelo Santiago San Joaquín	73
Figura 73. Factor de Amplificación Registros Suelo Viña del Mar.....	73
Figura 74. Esquema para Cálculo de Drift	75
Figura 75. Máximos Drifts Concepción Estructura 5 Pisos.....	75
Figura 76. Máximos Drifts Santiago Maipú Estructura 5 Pisos	76
Figura 77. Máximos Drifts Santiago Peñalolén Estructura 5 Pisos.....	76
Figura 78. Máximos Drifts Santiago San Joaquín Estructura 5 Pisos.....	76
Figura 79. Máximos Drifts Viña del Mar Estructura 5 Pisos	77
Figura 80. Máximos Drifts Concepción Estructura 10 Pisos.....	77
Figura 81. Máximos Drifts Santiago Maipú Estructura 10 Pisos	77

Figura 82. Máximos Drifts Santiago Peñalolén Estructura 10 Pisos.....	78
Figura 83. Máximos Drifts Santiago San Joaquín Estructura 10 Pisos.....	78
Figura 84. Máximos Drifts Viña del Mar Estructura 10 Pisos	78
Figura 85. Máximos Drifts Concepción Estructura 15 Pisos.....	79
Figura 86. Máximos Drifts Santiago Maipú Estructura 15 Pisos	79
Figura 87. Máximos Drifts Santiago Peñalolén Estructura 15 Pisos.....	79
Figura 88. Máximos Drifts Santiago San Joaquín Estructura 15 Pisos.....	80
Figura 89. Máximos Drifts Viña del Mar Estructura 15 Pisos	80
Figura 90. Comparación Según Altura de Estructura	81
Figura 91. Comparación Según Estrato de Suelo	81
Figura 92. Comparación Según Registro Sísmico	82
Figura 93. Modelación Estructura con Base Fija en PLAXIS 2D	84
Figura 94. Registros de Aceleraciones en Base y Superficie	85
Figura 95. Comparación de Máximos Drifts con Estructura de 5 Pisos	85
Figura 96. Comparación de Máximos Drifts con Estructura de 10 Pisos	86
Figura 97. Comparación de Máximos Drifts con Estructura de 15 Pisos	86

Indice de Tablas

Tabla 1. Estratificación Suelo Viña del Mar (Mancilla, 2013).....	14
Tabla 2. Parámetros Suelo Viña del Mar (Mancilla, 2013).....	14
Tabla 3. Estratificación Suelo Santiago Maipú (Neira, 2014).....	15
Tabla 4. Parámetros Suelo Santiago Maipú (Neira, 2014).....	15
Tabla 5. Estratificación Suelo Santiago Peñalolén (Neira, 2014).....	15
Tabla 6. Parámetros Suelo Santiago Peñalolén (Neira, 2014).....	16
Tabla 7. Estratificación Suelo Santiago San Joaquín (Neira, 2014).....	16
Tabla 8. Estratificación Suelo Santiago San Joaquín (Neira, 2014).....	16
Tabla 9. Parámetros Suelo Concepción (Peña, 2014).....	17
Tabla 10. Estratificación Suelo Concepción (Peña, 2014).....	18
Tabla 11. Información General Registros Sísmicos.....	20
Tabla 12. Parámetros Modelo Mohr – Coulomb.....	28
Tabla 13. Parámetros de Falla Modelo Mohr – Coulomb.....	31
Tabla 14. Parámetros de Rigidez Modelo Hardening Soil.....	31
Tabla 15. Parámetros Avanzados Modelo Hardening Soil.....	31
Tabla 16. Parámetros Modelo Hardening Soil.....	36
Tabla 17. Parámetros Incorporados por Modelo Hardening Soil Small.....	36
Tabla 18. Parámetros Modelo Hardening Soil Small para Modelación.....	37
Tabla 19. Velocidad Ondas de Corte Estratos de Suelo Concepción (Peña, 2014).....	38
Tabla 20. Peso Saturado y no Saturado Estratos de Suelo Concepción (Peña, 2014).....	38
Tabla 21. G_{max} Estratos de Suelo Concepción (Peña, 2014).....	38
Tabla 22. G_0^{ref} Estratos de Suelo Concepción (Peña, 2014).....	39
Tabla 23. E_{50ref} Estratos de Suelo Concepción (Peña, 2014).....	40
Tabla 24. E_{oedref} y E_{urref} Estratos de Suelo Concepción (Peña, 2009).....	40
Tabla 25. Angulos de Fricción y Dilatancia Estratos de Suelo Concepción (Peña, 2014).....	41
Tabla 26. Parámetros Avanzados de Suelo Concepción (Peña, 2014).....	41
Tabla 27. Parámetros Estratos de Suelo Concepción para Modelación (Peña, 2014).....	42
Tabla 28. Parámetros Estratos de Suelo Viña del Mar para Modelación (Mancilla, 2013).....	42
Tabla 29. Parámetros Estratos de Suelo Santiago Maipú para Modelación (Neira, 2014).....	43
Tabla 30. Parámetros Estratos de Suelo Santiago Peñalolén para Modelación (Neira, 2014).....	43
Tabla 31. Parámetros Estratos de Suelo Santiago San Joaquín para Modelación (Neira, 2014).....	44
Tabla 32. Período Fundamental Registros Sísmicos.....	50
Tabla 33. Parámetros de Rayleigh de Registros Sísmicos para Suelo Concepción.....	50
Tabla 34. Valores Parámetros Elementos Estructurales.....	57
Tabla 35. Parámetros Dinámicos de Registros Sísmicos para Modelación en PLAXIS 2D.....	60
Tabla 36. Peaks de Aceleración Registros Suelo Concepción.....	92
Tabla 37. Peaks de Aceleración Registros Suelo Santiago Maipú.....	92
Tabla 38. Peaks de Aceleración Registros Suelo Santiago Peñalolén.....	92
Tabla 39. Peaks de Aceleración Registros Suelo Santiago San Joaquín.....	93
Tabla 40. Peaks de Aceleración Registros Suelo Viña del Mar.....	93
Tabla 41. Factor de Amplificación Registros Suelo Concepción.....	93
Tabla 42. Factor de Amplificación Registros Suelo Santiago Maipú.....	94

Tabla 43. Factor de Amplificación Registros Suelo Santiago Peñalolén.....	94
Tabla 44. Factor de Amplificación Registros Suelo Santiago San Joaquín	94
Tabla 45. Factor de Amplificación Registros Suelo Santiago Viña del Mar	95

1. Introducción

1.1 Antecedentes y Alcances

Chile se caracteriza por ser uno de los países con mayor actividad sísmica en el mundo, por lo tanto, los estudios de ingeniería para el diseño sísmico de estructuras nunca dejan de avanzar. En el caso de esta memoria de título se investigarán los efectos que pueda ocasionar el fenómeno de interacción dinámica suelo-estructura en la demanda sísmica de estructuras.

En la práctica, el diseño sísmico de estructuras se hace a partir de un modelo estructural con base fija, al cual se le ingresa un registro sísmico con propiedades de acuerdo a la normativa vigente. La norma chilena de diseño sísmico NCh 433 considera un espectro de diseño, cuyas características dependen del tipo de suelo, tipo de estructura (materialidad) y zona en la que se ubica la estructura, pero no toma en cuenta criterios de diseño que incorporen el efecto de interacción suelo-estructura, como lo hace hoy en día el EUROCODE 8, por ejemplo, en donde si existen dichas consideraciones.

Para comprender de mejor manera a lo que apunta la presente memoria, es necesario comprender el concepto de Interacción Dinámica Suelo- Estructura (ISE), la que se define como el cambio en la respuesta estructural debido al movimiento del suelo, fenómeno que, bajo ciertas condiciones, debiese ser incorporado en el diseño estructural.

El diseño sísmico estructural actual considera parámetros de la estructura como los períodos fundamentales, masas asociadas, entre otros, los que son estimados suponiendo a la estructura sobre un apoyo fijo, que en la mayoría de las situaciones es empotrado. Por otro lado, el efecto de interacción suelo-estructura flexibiliza la base de apoyo, provocando un aumento en el periodo fundamental, así como en un aumento en el amortiguamiento del sistema en comparación con el modelo de base fija, que no considera al suelo de cimentación (García, 2006). Por ende, se genera una condición distinta a la de diseño. Es por esta situación, que el efecto ISE modificaría las condiciones de diseño estructural, lo que a la vez podría generar un cambio en la respuesta sísmica estructural.

La intención de este estudio es realizar una modelación que permita considerar el fenómeno ISE. Esto puede lograrse con el software PLAXIS 2D, el cual, mediante una modelación en 2 dimensiones, permite ingresar la estructura, la estratificación del suelo bajo ella y el registro sísmico en la roca basal. De esta forma podrá ser posible comparar los resultados que se obtengan entre este tipo de modelación y la que se utiliza por la mayoría de los calculistas en la actualidad. Para observar bajo qué circunstancias será más relevante las diferencias entre ambos métodos es que se proponen diversas situaciones que serán presentadas en la metodología de esta memoria.

La motivación de este estudio se basa principalmente en la investigación de Saez (2009), en donde se demuestra que el fenómeno de Interacción Dinámica Suelo-Estructura en la mayoría de los casos analizados resulta beneficioso para el rendimiento sísmico estructural. Este estudio en específico se realizó con estratificaciones de suelos y registros sísmicos europeos. Por lo tanto, la idea es realizar un estudio similar para suelos y registros sísmicos chilenos.

1.2 Objetivo General del Estudio

El objetivo de este estudio es demostrar que la modelación considerando interacción suelo-estructura, resulta beneficioso a la hora de evaluar la demanda sísmica estructural.

1.3 Objetivos Específicos del Estudio

- Elaborar un modelo sísmico elasto-plástico no lineal para los 5 depósitos de suelos, apoyándose en 3 memorias existentes, que cuentan con los parámetros necesarios para la modelación.
- Definir y llevar a cabo una modelación dinámica del comportamiento de los suelos en estudio mediante software PLAXIS, utilizando como input distintos registros sísmicos en roca y obtener la respuesta sísmica en superficie.
- Aplicar registros de aceleraciones obtenidos en superficie de los suelos modelados en PLAXIS 2D a modelo estructural con base fija en software ETABS 2015 para evaluación de demanda sísmica.
- Modelación de suelo, estructura y elemento de interacción con el software PLAXIS 2D y evaluar los efectos del fenómeno de Interacción Dinámica Suelo-Estructura y como éstos influyen en la demanda sísmica estructural.
- Comparar máximos desplazamientos de entrepiso de la estructura tipo para los dos tipos de modelaciones anteriormente mencionadas.

1.4 Metodología

Se utilizará como base de estudio 5 tipos de suelos (1 de Viña del Mar, 1 de Concepción y 3 de Santiago) utilizados en 3 memorias, las cuales cuentan con los parámetros necesarios para un análisis no-lineal del suelo mediante el software PLAXIS utilizando el modelo constitutivo Hardening Soil Small. Se ingresarán registros de roca basal de distintas estaciones provenientes del sismo ocurrido en Febrero del año 2010. Esto se realizará para estructuras simplificadas en 2 dimensiones de 3 alturas distintas (5,10 y 15 pisos).

Con lo anteriormente mencionado, se harán comparaciones entre dos tipos de modelaciones distintas; el tipo de modelación "2 Pasos", en donde se elabora un modelo de elementos finitos del suelo en PLAXIS (sin estructura), se ingresa registro de roca basal y se obtiene registro amplificado en la base. Este registro amplificado se ingresa a un modelo con una estructura típica con base fija en software ETABS 2015. En el otro tipo de modelación se elabora modelo de elementos finitos del suelo en PLAXIS junto con una estructura típica, en donde se ingresa registro de aceleraciones en la roca basal. Esta modelación se denomina método de elementos finitos con interacción suelo estructura (EF-ISE).

Como parámetro de comparación entre un modelo y otro para la demanda sísmica estructural, se utilizará el máximo desplazamiento entrepisos que sufre la estructura con el registro de

aceleraciones ingresado. Con esto podrá ser posible verificar si los resultados obtenidos en las investigaciones internacionales aplican para registros y suelos chilenos.

1.5 Estructuración de la Memoria

Este informe se dividirá en 8 capítulos. A continuación, se presenta una breve descripción general del contenido de cada uno de ellos:

1. **Introducción:** se presentan los alcances y motivación de este estudio. Además, se exponen el objetivo general y objetivos específicos de la presente investigación.
2. **Marco Teórico:** se detallan las bases teóricas que son necesarias para el correcto entendimiento de los temas a tratar en este estudio, tales como; la tectónica de placas, los tipos y características de ondas sísmicas, la amplificación sísmica, los modelos constitutivos de los suelos, los fundamentos matemáticos de la propagación unidimensional de ondas sísmicas y el fenómeno del amortiguamiento.
3. **Estratos, Estructuras y Registros Sísmicos para la Modelación:** en este capítulo se entrega información general de los 5 estratos de suelo, los 3 tipos de estructura y los 8 registros sísmicos a considerar para la modelación. Finalmente se presentan los dos tipos de modelaciones a utilizar para la comparación de la demanda sísmica estructural.
4. **PLAXIS 2D: Software utilizado para Modelación del Suelo e Interacción Suelo – Estructura:** se describe de manera general la estructuración del software, para luego explicar el método de elementos finitos que aplica y algunos de sus modelos constitutivos con sus respectivos parámetros necesarios para la modelación.
5. **Modelación en PLAXIS 2D:** se describen y calculan los distintos parámetros necesarios para la modelación. Además, se detallan los pasos para la creación del modelo.
6. **Modelación en ETABS 2015:** al igual que con PLAXIS 2D se describen y calculan los distintos parámetros necesarios para la modelación.
7. **Resultados:** se presentan tablas y gráficos con los resultados de los registros de aceleraciones obtenidos en superficie y los desplazamientos máximos de entre pisos de las estructuras para luego realizar un análisis comparativo de ellos.
8. **Comparación de Dos Métodos usando Plaxis 2D:** se analizan los dos métodos mencionados en los capítulos anteriores, pero en este caso solo se utiliza el software PLAXIS 2D, de forma de comparar los resultados obtenidos al utilizar un software para ambos métodos. Se aplica el análisis solo para una determinada cantidad de casos para evaluar a modo general.
9. **Conclusiones:** se exponen las conclusiones generales de este estudio.

2. Marco Teórico

2.1 Tectónica de Placas

Para poder comprender la dinámica de la Tierra, debemos comprender la teoría de la tectónica de placas. Mencionado esto, se sabe que la litósfera es la capa más superficial de la tierra sólida, la cual está constituida por unidades rígidas y comprende tanto la corteza como una parte del manto. Estas unidades rígidas se denominan placas tectónicas, las que se desplazan entre sí a lo largo de sus fronteras. Las placas tectónicas se encuentran en constante movimiento, cuyas velocidades circulan en el orden de [cm/año].

En el caso de Chile, se encuentra en la interacción entre las placas Nazca y Sudamericana, las que generan una zona de subducción. Esto debido a que la placa de Nazca se introduce bajo placa Sudamericana. La interacción entre estas dos placas genera grandes deformaciones, lo que acumula energía y de esta forma los terremotos se llevan a cabo producto de la liberación de alguna u otra manera de esta energía acumulada. Es de suma importancia mencionar, que la velocidad entre estas placas es la más grande comparado con el resto de las placas, lo que explica la alta sismicidad de nuestro país. La placa de Nazca, al ser más densa, penetra bajo la placa Sudamericana, provocando la subducción (CSN U. de Chile, 2013). La Figura 2 ilustra el tipo de interacción (subducción) entre las placas de Nazca y Sudamericana:



Figura 1. Zona de Subducción y Sismos Provocados (CSN U. de Chile, 2013)

2.2 Tipos de Fallas

Los tipos de falla se clasifican de acuerdo al desplazamiento relativo entre las placas que la conforman, lo que nos lleva a 3 tipos de fallas posibles, que corresponden a falla convergente, divergente y longitudinal (INPRES, 2015). Para el caso de Chile el tipo de falla presente es la convergente. Este tipo de falla se genera cuando las placas se aproximan entre sí, produciéndose la subducción de la litósfera oceánica en el manto. La porción superior al plano de falla desliza hacia arriba, mientras que la inferior desliza hacia abajo. Este tipo de falla ocurre en el territorio chileno, lo cual provoca que sea una de las zonas de mayor actividad sísmica en el planeta.

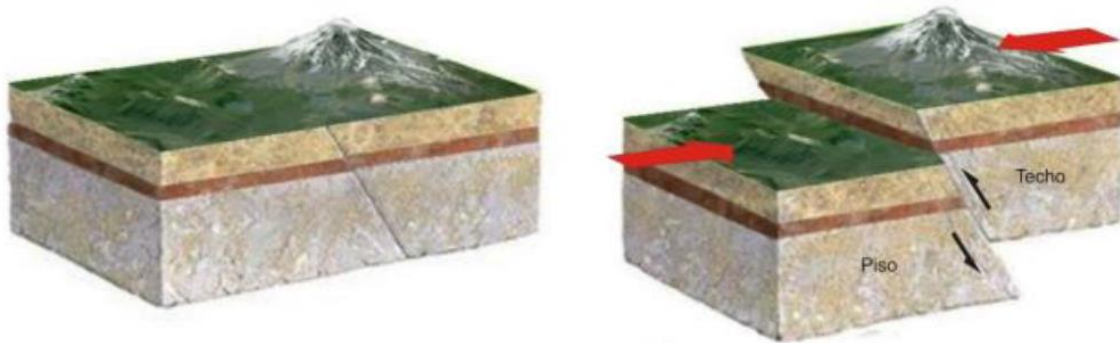


Figura 2. Falla Convergente (INPRES, 2015)

2.3 Ondas Sísmicas

Las ondas sísmicas corresponden a vibraciones de distintas características que se propagan a través del suelo, que van en distintas direcciones y provienen de la fuente sísmica. La ruptura y movimiento de las placas son las que generan estas ondas sísmicas, las que se encargan de transmitir el movimiento. Hipocentro se denomina al punto en donde se origina la ruptura, mientras que a la proyección de este punto en la superficie se conoce como epicentro del sismo. Las ondas sísmicas se clasifican en dos tipos según su naturaleza, las ondas de cuerpo y las ondas superficiales.

2.3.1 Ondas de Cuerpo

Las ondas de cuerpo son aquellas que viajan por el interior de la tierra y tienen origen en la fuente sísmica. Se dividen en dos tipos:

2.3.1.1 Ondas P

Ondas primarias y también conocidas como ondas longitudinales o de compresión. Éstas se trasladan en la misma dirección de propagación de la onda, es decir, oscilan longitudinalmente. La velocidad de propagación es más rápida que la de las ondas secundarias y son capaces de atravesar materiales sólidos y líquidos.

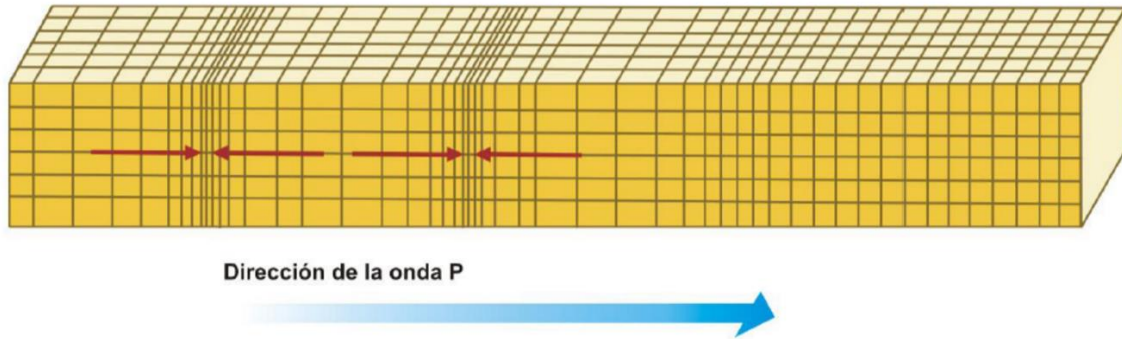


Figura 3. Onda Primaria

Fuente: <http://antisismos.blogspot.cl/2015/06/antecedentes-generales-chile-se.html>

2.3.1.2 Ondas S

Se les denomina ondas Secundarias, Transversales o de Corte. A diferencia de las ondas primarias, éstas oscilan transversalmente, es decir, se trasladan en dirección perpendicular al desplazamiento. Son más lentas que las ondas primarias y además son de gran importancia a la hora de analizar un sismo, ya que son las ondas que generan oscilaciones durante el movimiento sísmico y las que producen la mayor parte de los daños generados.

Es importante mencionar que las ondas secundarias (de corte) cumplen un rol esencial en este estudio, debido a que conforman un parámetro importante en la modelación de cada estrato de los suelos que se analizarán en este estudio. Por otra parte, este tipo de onda es considerado como parámetro de diseño de la norma sísmica chilena para la clasificación de los suelos.

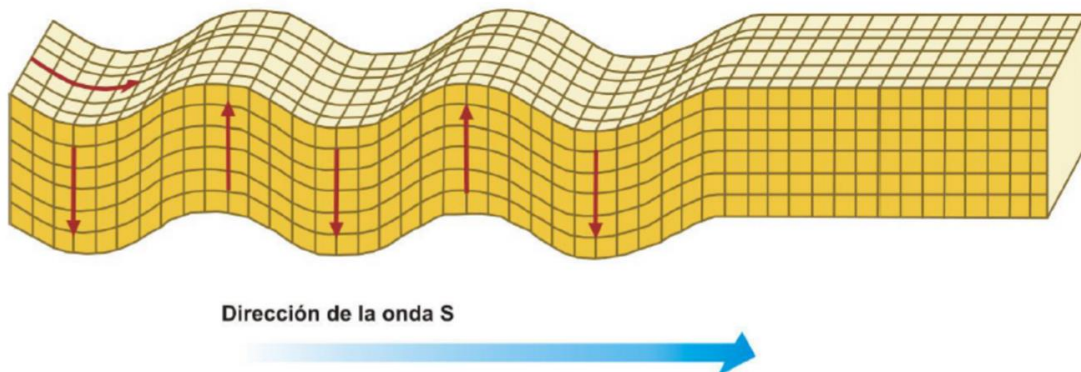


Figura 4. Onda Secundaria

Fuente: <http://antisismos.blogspot.cl/2015/06/antecedentes-generales-chile-se.html>

2.3.2 Ondas de Superficie

Las ondas de superficie, como los dice su nombre, se propagan solamente por la superficie del suelo, provocando distorsiones superficiales sin verse involucrado el suelo bajo ellas. Por sus características, este tipo de ondas son más destructivas que las de cuerpo. Se dividen en dos tipos:

2.3.2.1 Ondas Rayleigh

Se caracterizan por ser una mezcla de desplazamientos de partículas provocados por ondas primarias y secundarias, que resultan en movimientos elipsoidales en un plano vertical.

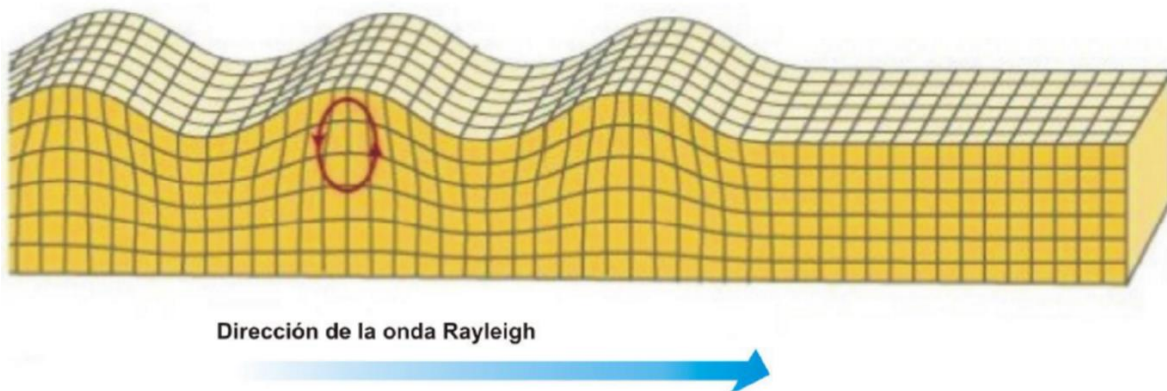


Figura 5. Onda Rayleigh

Fuente: <http://antisismos.blogspot.cl/2015/06/antecedentes-generales-chile-se.html>

2.3.2.2 Ondas Love

Corresponden a ondas de corte con movimiento ortogonal horizontal al sentido de propagación. La velocidad de las ondas Love es levemente superior a la de las ondas Rayleigh.

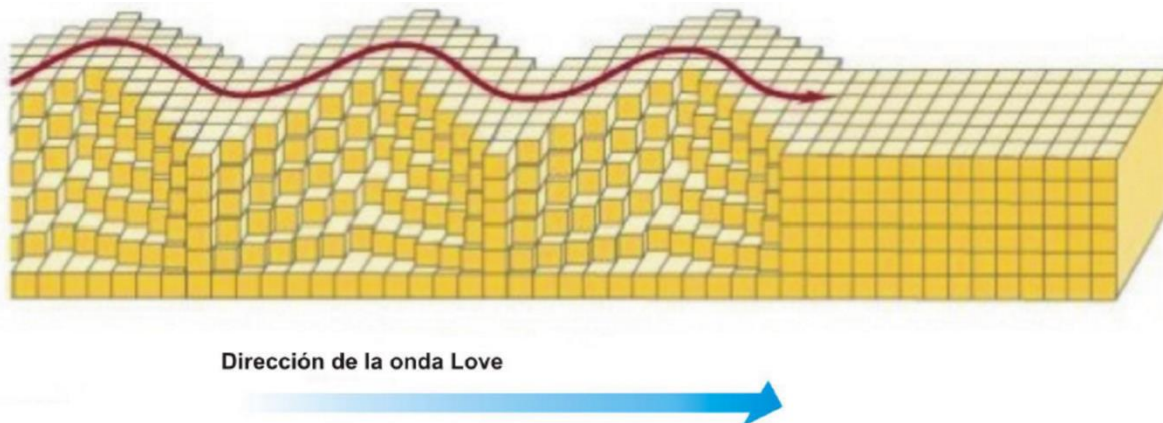


Figura 6. Onda Love

Fuente: <http://antisismos.blogspot.cl/2015/06/antecedentes-generales-chile-se.html>

2.4 Interacción Suelo-Estructura y su Influencia en la Respuesta Estructural

El efecto de interacción suelo-estructura (ISE) es el mecanismo por el que la presencia de la estructura influye en el movimiento del estrato de suelo bajo ella (Soriano, 1989) y consiste en la diferencia entre la respuesta de un punto donde está ubicada una estructura y la respuesta que debería experimentar ese punto si la estructura no existiera (Espinoza, 1999). Esta situación se demuestra en la figura 7 donde sí difieren los movimientos en el punto A, debido al fenómeno de interacción suelo-estructura (Rosenblueth, 1992).

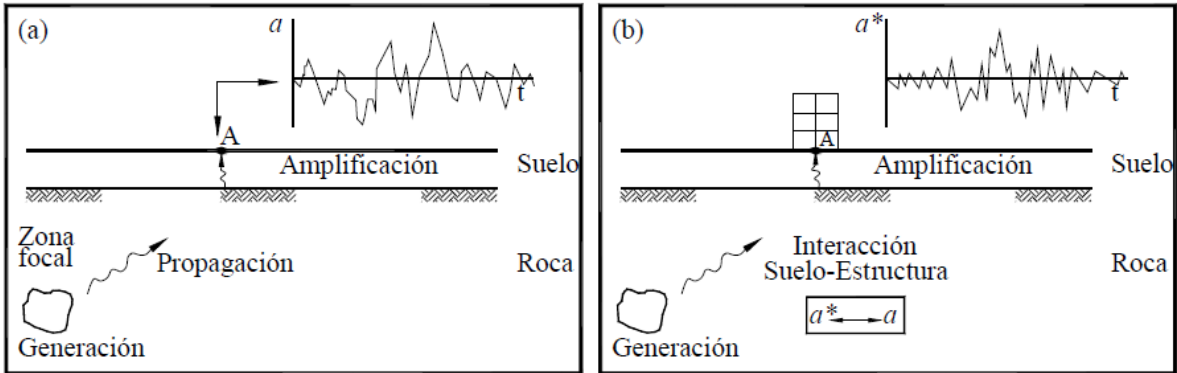


Figura 7. (a) Modificación del movimiento del campo libre considerando un cambio de aceleración (a) mostrada en la gráfica de a versus t , y (b) una aceleración a^* que cambia debido a la presencia de estructuras (Soriano, 1989).

El efecto ISE es muy evidente en el cálculo de estructuras y generalmente se considera beneficioso al sistema estructural sometido a cargas sísmicas (Khalil et al., 2007), debido a que influye en el comportamiento dinámico de la estructura aumentando su periodo fundamental y el amortiguamiento del sistema en comparación con el modelo de base fija (García, 2006). Como se mencionó anteriormente, la investigación de Saez (2009) demuestra que para la mayoría de los casos estudiados el efecto ISE reduce los esfuerzos que ocurren en estructuras de edificaciones, por lo tanto, el no tomar en cuenta tal efecto conducirá en general a un proyecto conservador. Hay situaciones en las que el fenómeno ISE es desfavorable, como lo es el aumento en la separación entre edificios contiguos para que no colisionen durante el sismo (Soriano, 1989). Estudios recientes y las observaciones postsísmicas proponen que la ISE pudiese ser perjudicial y no considerar su influencia podría llevar a un diseño inseguro para la superestructura y la fundación, especialmente para las estructuras fundadas sobre suelo blando (Khalil et al., 2007).

Cuando la onda sísmica se propaga a través de un estrato de suelo blando, provoca que ésta se atenúe o se amplifique respecto al suelo firme, como resultado de fenómenos de difracción múltiple. En el momento en que la onda sísmica alcanza la base de la estructura, produce en el sistema suelo-cimentación un efecto de interacción dinámico (Botero et al., 2004), el cual consiste en una serie de efectos cinemáticos e inerciales generados en la estructura y el suelo como resultado de la capacidad de deformación de éste ante la excitación sísmica (Avilés y Pérez-Rocha, 2004).

Para representar los aspectos más relevantes de la interacción suelo-estructura se presenta a continuación la explicación de Wolf (1994). En la figura 8 se ilustra la respuesta sísmica de una estructura fundada sobre roca y se compara con la misma estructura de base rígida empotrada en suelo blando que de igual manera se encuentra sobre roca. Las ondas sísmicas incidentes con movimiento horizontal (denominadas movimiento de control) con propagación vertical en la roca

son las mismas en los dos casos. Los movimientos longitudinales que se muestran como flechas sólidas son proporcionales a la excitación sísmica.

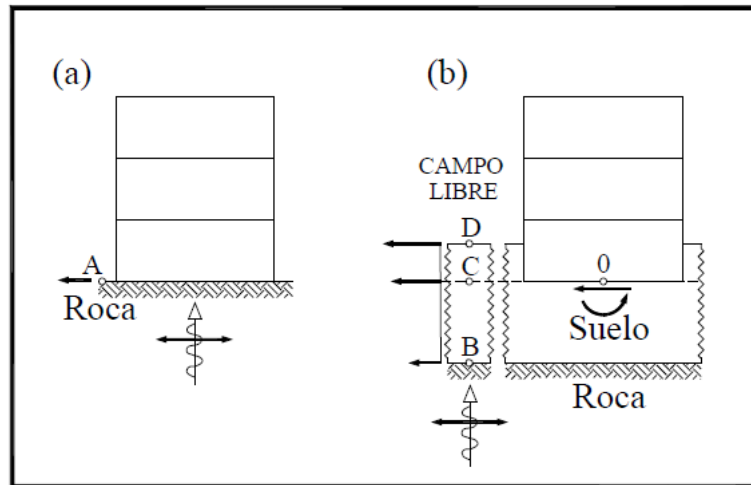


Figura 8. Respuesta sísmica de estructura (a) cimentada en roca, (b) empotrada en suelo descansando en roca con campo libre. En esta figura A representa la cimentación rígida de la estructura, B a la roca, C y D son nodos en campo libre y, 0 es la cimentación en suelo flexible de la estructura (Wolf, 1994).

Para la estructura fundada sobre la roca (Figura 8.a), el movimiento de control en el punto A puede aplicarse directamente a la base de la estructura. La aceleración resultante de entrada al aplicarse cargas horizontales inerciales será constante a lo largo de la altura de la estructura. Durante el terremoto, se provocará un momento de volcante y una fuerza cortante transversal que actúa en la base. Como se supone que la roca es rígida, estos dos esfuerzos resultantes no generarán deformaciones adicionales en la base. El desplazamiento horizontal aplicado en la base es igual al movimiento de control sísmico por lo que no surgirá el efecto de volcamiento en la estructura.

Para la estructura fundada en el suelo flexible (Figura 8.b) el movimiento de la base de la estructura en el punto 0 es distinto al movimiento de control. Para obtener la información necesaria sobre la forma en que el suelo afecta a la respuesta dinámica de la estructura, es importante distinguir entre los siguientes tres efectos. Primero, la respuesta del movimiento del sitio cuando no se encuentra presente la estructura y en ausencia de cualquier excavación, será diferente de la respuesta del movimiento de control. Si no existiera un estrato de suelo en la parte superior de la roca en el punto B, el movimiento ficticio en esta roca sería igual a la del movimiento de control. La presencia del suelo sobre la roca reducirá el movimiento en el punto B. Las correspondientes ondas se propagan verticalmente a través del estrato de suelo, por ende, los movimientos en los puntos C y D difieren del movimiento en el punto B. Los puntos C y D son nodos en el campo libre que posteriormente se encuentran en la estructura de suelo cuando la estructura se ha construido. En general, en función de su contenido de frecuencia, el movimiento es amplificado, lo que genera desplazamientos horizontales hacia la superficie libre del sitio. Segundo, la excavación y la colocación de la base rígida en el sitio modifica el movimiento. La base sufrirá algún desplazamiento horizontal promedio y un volcamiento, llamado movimiento de entrada efectiva a la fundación (interacción cinemática) (Espinoza, 1999). Este movimiento provoca aceleraciones diferentes a las aceleraciones aplicadas en el caso de una estructura fundada sobre roca. Tercero, las fuerzas inerciales aplicadas a la estructura conducirán a un momento volcante y a una fuerza cortante transversal que actúa en el punto 0 que producirán deformaciones en el suelo (interacción inercial) (Espinoza, 1999) y, por este motivo, una vez más, modificarán el movimiento en la base.

La interacción inercial está controlada por la diferencia en las rigideces de la estructura y el suelo y la cinemática depende de la geometría de la fundación, la estratigrafía del subsuelo y la naturaleza de la excitación sísmica y para fines prácticos es recomendable que ambos efectos de interacción se traten de forma independiente (Avilés y Pérez-Rocha, 2004). El aumento del periodo fundamental de vibración, el incremento o reducción del amortiguamiento, la modificación de la demanda de ductilidad estructural, son provocados por la interacción inercial debido fundamentalmente a la inercia y elasticidad del sistema acoplado (Botero et al., 2004). Si la fundación es bastante rígida, la interacción cinemática se manifiesta en una reducción de los movimientos de traslación de la fundación (filtrado de los componentes de alta frecuencia de la excitación sísmica), así como la generación de volcamiento y torsión de la cimentación (Avilés y Pérez-Rocha, 2004).

La interacción suelo-estructura modifica las propiedades dinámicas relevantes que tendría la estructura supuesta con base indeformable, así como las características del movimiento del terreno alrededor de la fundación (Avilés y Pérez-Rocha, 2004). El volcamiento introducido en la base afectará la respuesta, especialmente en la parte superior de una estructura alta reduciendo los valores de las fuerzas laterales (Espinoza, 1999), en el cortante basal y en los momentos volcantes calculados para la estructura, e incrementará los desplazamientos laterales (Botero et al., 2004).

2.5 Amortiguamiento

El amortiguamiento es un fenómeno bastante importante si se quiere evaluar un correcto y real comportamiento de la onda transmitida a través del suelo en estudio. Si bien se considera como caso ideal que las ondas viajan a través del suelo sin cambiar su amplitud, esto no se da en la realidad, ya que las ondas tienden a atenuar su amplitud conforme van ganando distancia. El protagonista de este efecto es el fenómeno del amortiguamiento, el cual incurre además en una pérdida de energía en el espacio y tiempo.

En el análisis dinámico no lineal, la pérdida o disipación de energía mencionada anteriormente puede provenir de diversas fuentes, que en general, corresponden al amortiguamiento por radiación y al amortiguamiento del material. El amortiguamiento por radiación está asociado a la propagación de energía a través de un gran volumen de material, y por otra parte, el amortiguamiento del material puede ser de tipo viscoso o histerético. En el caso del tipo viscoso, éste se debe a la viscosidad de los fluidos al interior de los poros. El amortiguamiento histerético es originado por el comportamiento no lineal del suelo, lo cual se debe a los ciclos de carga y descarga, dependiendo del número de ciclos y el nivel de deformación (Kontoe, 2006).

El que se lleva la mayor parte de la disipación de energía del material es el amortiguamiento histerético del suelo y este puede ser incluido con un correcto uso de modelos constitutivos no lineales para definir el comportamiento del suelo. Los modelos plásticos que proporciona el software PLAXIS 2D son capaces de generar deformaciones irreversibles, las que podrían representar de alguna forma el amortiguamiento, pero aun así, este comportamiento no es suficiente para representar de forma correcta el modelamiento del amortiguamiento a los que se ve sometido un depósito de suelo. Por este motivo integraremos un amortiguamiento adicional para representar de la manera más real posible el comportamiento del suelo.

Por lo tanto, para la modelación se utilizará el amortiguamiento tipo Rayleigh, ya que PLAXIS 2D acepta el ingreso de los parámetros en el modelo constitutivo que se empleará. Amortiguamiento tipo Rayleigh consiste en que la matriz global de amortiguamiento es proporcional a la matriz de masa y de rigidez como sigue:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K]$$

Donde los parámetros α y β pueden ser obtenidos resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/\omega_m & \omega_m \\ 1/\omega_n & \omega_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \xi_m \\ \xi_n \end{Bmatrix}$$

En el que ω_m y ω_n son las dos frecuencias angulares que comandan la forma del amortiguamiento, y ξ_m y ξ_n corresponden a las razones de amortiguamiento. Lo anterior se representa con la Figura 9:

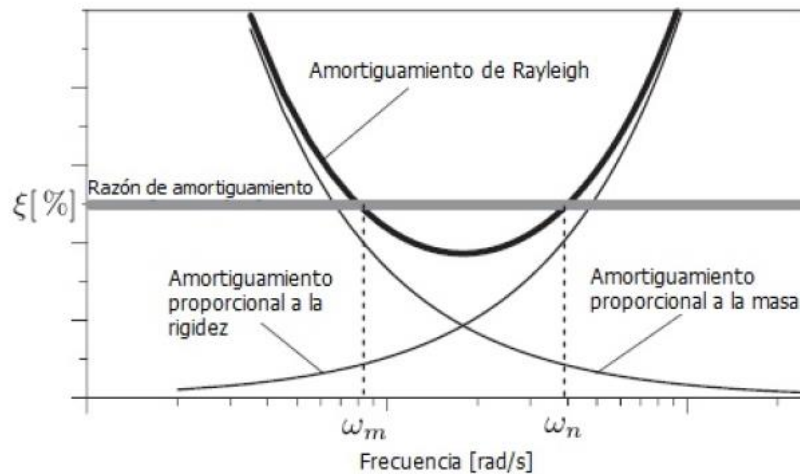


Figura 9. Amortiguamiento de Rayleigh (modificada de Tsai et al., 2014).

Resolviendo el sistema de ecuaciones se llega a la solución:

$$\alpha = 2\omega_m\omega_n \left(\frac{\omega_m\xi_n - \omega_n\xi_m}{\omega_m^2 - \omega_n^2} \right)$$

$$\beta = 2 \left(\frac{\omega_m\xi_m - \omega_n\xi_n}{\omega_m^2 - \omega_n^2} \right)$$

Luego, suponiendo que la razón de amortiguamiento ξ es independiente de la frecuencia, la solución se puede reducir a:

$$\alpha = 2\xi \left(\frac{\omega_m\omega_n}{\omega_m + \omega_n} \right)$$

$$\beta = 2\xi \left(\frac{1}{\omega_m + \omega_n} \right)$$

Según la teoría, para considerar el amortiguamiento en pequeñas deformaciones se recomienda utilizar una razón de amortiguamiento dentro de un rango de 1,5 – 4% (Youssef et al., 2002) o 1 – 5% (Tsai et al., 2014).

A pesar de todas las investigaciones que se han realizado en el campo de la dinámica, no es mucho lo que se ha logrado en el desarrollo de un método aceptado para la determinación de estos parámetros. De todas maneras, existen algunos métodos recomendados por ingenieros. En el documento de Tsai et al. (2014) se propone un criterio para poder obtener de la manera más óptima posible los valores de las frecuencias ω_m y ω_n . La evaluación del desempeño de estos parámetros se realizó comparando las respuestas obtenidas mediante el análisis en el dominio del tiempo, con las que se obtuvieron del análisis en el dominio de la frecuencia, cuyo amortiguamiento es independiente de la frecuencia, buscando que se ajustaran estas últimas.

Con los resultados obtenidos de este análisis, se propone el siguiente criterio:

- Cuando se trata de movimiento armónicos, el valor más apropiado para asignar a ω_m corresponde a la frecuencia principal o predominante del movimiento, utilizando un amortiguamiento de Rayleigh simplificado (solo proporcional a la matriz de rigidez).
- Si se utiliza un registro sísmico para el análisis y además se trata de un depósito de suelo poco profundo (donde la frecuencia fundamental del suelo es mayor a la predominante del sismo), el valor más conveniente para ω_m viene dado por la frecuencia fundamental del suelo y para ω_n un valor de $5\omega_m$.
- Si se utiliza un registro sísmico para el análisis y además se trata de un depósito de suelo profundo (donde la frecuencia fundamental del suelo es menor a la predominante del sismo), el valor más conveniente para ω_m viene dado por la frecuencia fundamental del suelo y para ω_n se utiliza el máximo valor entre la frecuencia predominante o fundamental del sismo y $5\omega_m$.

En el siguiente capítulo se presentarán los estratos de suelo, los tipos de estructura y los registros sísmicos a utilizar para llevar a cabo el análisis comparativo entre los dos tipos de modelaciones que también serán explicadas en dicho acápite.

3. Casos de Estudio para la Modelación

Dado a que esta investigación busca encontrar resultados bajo distintas circunstancias del fenómeno de interacción suelo-estructura bajo condiciones dinámicas, es que se empleará para la modelación 5 tipos de suelos, 3 alturas distintas para una estructura tipo simplificada y 8 registros sísmicos de roca basal. Esta investigación está motivada en el trabajo realizado por Saez (2009), en donde realizan un profundo análisis bajo distintas condiciones para evaluar las diferencias en las demandas sísmicas estructurales entre dos tipos de modelaciones que se aclararán más adelante en esta sección.

3.1 Descripción de los Estratos

Como se mencionó anteriormente, para esta investigación se utilizarán 5 tipos de estratos de 3 distintas localidades de nuestro país; Viña del Mar, Santiago y Concepción. Se eligieron estos suelos, ya que fueron utilizados por 3 memoristas; Mancilla (2013), Neira (2014) y Peña (2014). Ellos estudiaron el efecto de la amplificación de la onda sísmica a través de estos suelos. Por lo tanto, se tomará como base las geometrías y parámetros utilizados para estudiar en esta investigación los efectos de interacción suelo-estructura bajo condiciones sísmicas.

Para efectos de esta investigación sólo se presentará una descripción general de los suelos utilizados, por lo que si se requiere de información más detallada se deberá acceder a las memorias de Mancilla (2013) para Viña del Mar, Neira (2014) para Santiago y Peña (2014) para Concepción.

3.1.1 Estrato 1: Viña del Mar

El estrato de suelo de Viña del Mar estudiado por Mancilla (2013) corresponde al que se encuentra bajo el edificio Cruciani, ubicado en Calle Viana 273. A continuación, se presenta en la Figura 10 el emplazamiento geográfico del estrato en cuestión:



Figura 10. Emplazamiento Geográfico Estrato Viña del Mar (Mancilla, 2013)

En base al informe de mecánica de suelos se extrae la información necesaria para la estratificación del suelo, que se representa en las tablas siguientes con el resumen de la información.

Estratificación Suelo Viña del Mar			
Estrato	Desde [m]	Hasta [m]	Clasificación USCS
H1	0	2	SC(CL)
H2	2	4	SL
H3	4	8,5	SW-SM
H4	8,5	11	SM y SC
H5	11	14,5	SM(ML)
H6	14,5	17,5	SP
H7	17,5	19,3	SM(ML)
H8	19,3	22,32	SM y SC
Roca	22,32	-	

Tabla 1. Estratificación Suelo Viña del Mar (Mancilla, 2013)

Parámetros Suelo Viña del Mar		
Estrato	Densidad [T/m^3]	Vs [m/s]
H1	1,7	169
H2	1,7	169
H3	1,8	213
H4	1,9	213
H5	1,9	213
H6	1,9	447
H7	2,0	379
H8	2,0	379

Tabla 2. Parámetros Suelo Viña del Mar (Mancilla, 2013)

3.1.2 Estratos 2, 3 y 4 de Santiago

Se utilizarán para este estudio 3 suelos de la región metropolitana, de las localidades de Maipú, Peñalolén y San Joaquín. En las siguientes tablas se presenta una breve descripción de la estratificación de cada uno de los 3 suelos, obtenida del informe “Caracterización Geotécnica estación de acelerógrafos de la Universidad de Chile” o por informes de mecánica de suelos de obras cercanas. Además, se incluye una segunda tabla con información de parámetros de importancia que servirán para la modelación de estos suelos.

Estratificación Suelo Santiago Maipú			
Estrato	Desde [m]	Hasta [m]	Descripción del Material
H1	0	0,9	Suelo Orgánico.
H2	0,9	8,40	Grava pobremente graduada de tamaño máximo 3", contos redondeados, sin recuperación de matriz. Se observa una arna arcillosa en el retorno del agua.
H3	8,40	27,40	Arena limosa (Pumacita) color café, humedad media, consistencia media a alta y plasticidad baja a nula
H4	27,40	30,45	Arena limosa (Pumacita) color café claro, humedad alta, consistencia alta y plasticidad nula.

Tabla 3. Estratificación Suelo Santiago Maipú (Neira, 2014)

Parámetros Suelo Santiago Maipú		
Estrato	Densidad [T/m³]	Vs [m/s]
H1	-	-
H2	2,2	526
H3	1,8	449,1
H4	1,8	449,1

Tabla 4. Parámetros Suelo Santiago Maipú (Neira, 2014)

Estratificación Suelo Santiago Peñalolén			
Estrato	Desde [m]	Hasta [m]	Descripción del Material
H1	0	23,95	Arcilla color café, consistencia media a alta, humedad media y plasticidad baja. Presencia variable de gravas de cantos angulares y sub-granulares, tamaño máximo 1 1/2".
H2	23,95	26,00	Grava de cantos angulares y sub-angulares, tamaño máximo 2", sin recuperación de matriz. Se observa arena gruesa de color negro en el retorno de agua.
H3	26,00	27,45	Arcilla color café, consistencia media y plasticidad baja. Presencia variable de gravas de cantos angulares y sub-angulares, tamaño máximo 1/2".
H4	27,45	28,45	Arena limosa color rosado, compacidad alta, humedad media y plasticidad nula.
H5	28,45	31,00	Grava de cantos angulares y sub-angulares, tamaño máximo 2", sin recuperación de matriz. Se observa arena gruesa de color negro en el retorno de agua y un lente de arcilla al comienzo del estrato.

Tabla 5. Estratificación Suelo Santiago Peñalolén (Neira, 2014)

Parámetros Suelo Santiago Peñalolén		
Estrato	Densidad [T/m³]	Vs [m/s]
H1	1,7	250
H2	2,2	479,1
H3	2,2	479,1
H4	2,2	479,1
H5	2,2	479,1

Tabla 6. Parámetros Suelo Santiago Peñalolén (Neira, 2014)

Estratificación Suelo Santiago San Joaquín			
Estrato	Desde [m]	Hasta [m]	Descripción del Material
H1	0	0,30	Relleno.
H2	0,30	3,50	Arcilla color café.
H3	3,50	30,00	Grava con arena, color gris café. Partículas gruesas de hasta 7". Finos de plasticidad media a baja. A la profundidad de 23 metros aparece un estrato o lente de 50 cm de espesor, de arena limpia.

Tabla 7. Estratificación Suelo Santiago San Joaquín (Neira, 2014)

Parámetros Suelo Santiago San Joaquín		
Estrato	Densidad [T/m³]	Vs [m/s]
H1	-	-
H2	-	-
H3	2,2	875

Tabla 8. Estratificación Suelo Santiago San Joaquín (Neira, 2014)

3.1.3 Estrato 5: Concepción

La zona de la localidad de Concepción, en donde se ubica el estrato de suelo a utilizar se encuentra aproximadamente entre los meridianos 73° 00' y 73° 04' y los paralelos 36° 47' y 36° 51'. La Figura 11 representa la ubicación:

Para conocer la estratigrafía de esta zona se recurre a un sondaje realizado por un grupo de investigación de la Universidad de Chile en el centro de Concepción. Se presentan en las siguientes tablas la información de los estratos y algunos parámetros importantes del suelo.

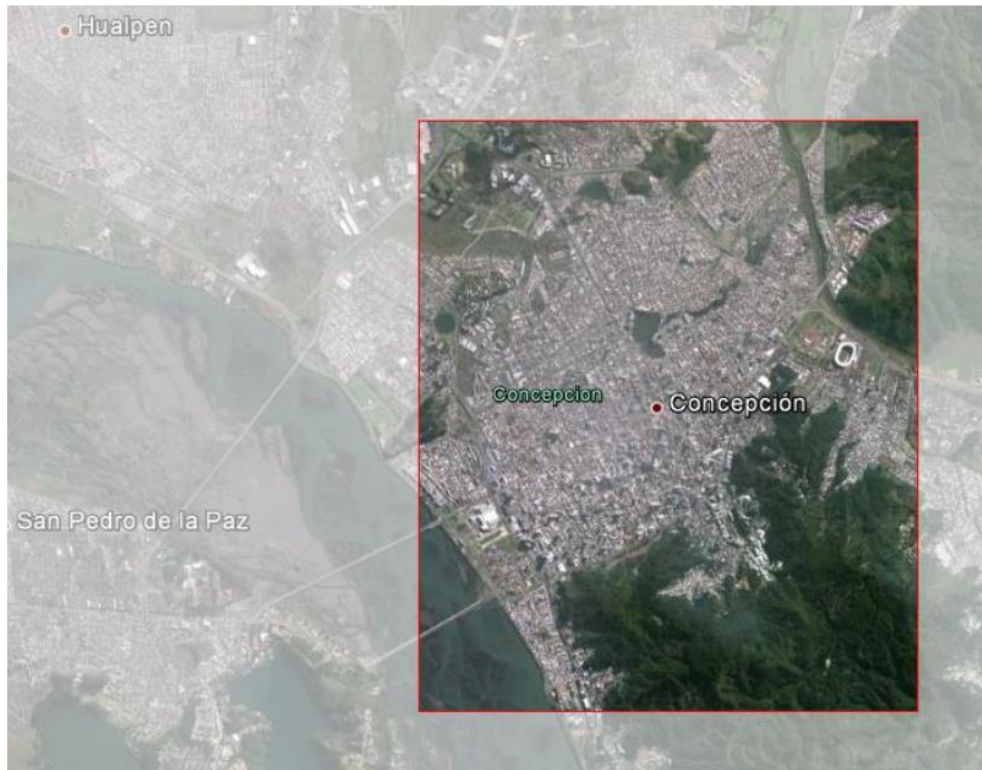


Figura 11. Emplazamiento Geográfico Estrato Concepción (Peña, 2014)

Parámetros Suelo Concepción				
Estrato	Desde [m]	Hasta [m]	Densidad [T/m ³]	Vs [m/s]
H1	0	18	1,65	210
H2	18	24,9	2,0	207
H3	24,9	34,4	1,7	348
H4	34,4	40	2,1	262
H5	40	45,8	2,1	264
H6	45,8	51	2,1	267
H7	51	55,6	2,1	314
H8	55,6	75,1	2,1	308
H9	75,1	85	1,9	317
H10	85	102,5	1,9	565
H11	102,5	130	1,9	379
H12	130	Roca	-	-

Tabla 9. Parámetros Suelo Concepción (Peña, 2014)

Estratificación Suelo Concepción			
Estrato	Desde [m]	Hasta [m]	Descripción del Material
H1	0	0,8	Relleno de escombros.
H2	0,8	3,5	Arena media a fina, limosa; suelta.
H3	3,5	4,7	Arena media, algo limosa; muy compacta.
H4	4,7	9,4	Arena fina a muy fina, compacidad media.
H5	9,4	12	Limo arenoso compacto.
H6	12	24,9	Arena media, algo limosa; compacta.
H7	24,9	27,5	Limo de alta compresibilidad, plástico, algo orgánico; consistencia media.
H8	27,5	31,9	Arena muy fina, limosa; muy compacta (cementada).
H9	31,9	32,5	Limo muy consistente.
H10	32,5	34,4	Arena media, algo limosa; densa.
H11	34,4	36,5	Arcilla de mediana plasticidad, consistencia media a alta.
H12	36,5	43,1	Limo arenoso y arena limosa; muy compacta.
H13	43,1	45,8	Limo de baja compresibilidad, muy consistente
H14	45,8	55,6	Arena fina interestratificada con limo; muy compacta.
H15	55,6	59,6	Limo arenoso.
H16	59,6	62,8	Limo de compresibilidad media, algo orgánico.
H17	62,8	66,1	Arena muy fina, limosa.
H18	66,1	75,1	Limo arenoso y arena con capas; a 69,0 metros limo muy blando.
H19	75,1	85	Limo de alta compresibilidad, inorgánico, plástico.
H20	85	107	Horizonte interestratificado de arena fina Bío Bío, gruesa, cuarzosa y limo. Abundan los elementos minerales no-Bío Bío.
H21	107	133,7	Ripio grueso y bolones predominantes graníticos.
H22	133,7	-	Roca Granítica.

Tabla 10. Estratificación Suelo Concepción (Peña, 2014)

3.2 Descripción de la Estructura

Para evaluar la demanda sísmica se utilizará como sistema estructural un edificio simplificado compuesto de marcos (pilares y vigas). A modo de comparación se proponen 3 tipos de estructuras cada uno con una altura distinta, pero con la misma configuración estructural en planta. La Figura 12 muestra la planta tipo utilizada para esta investigación:

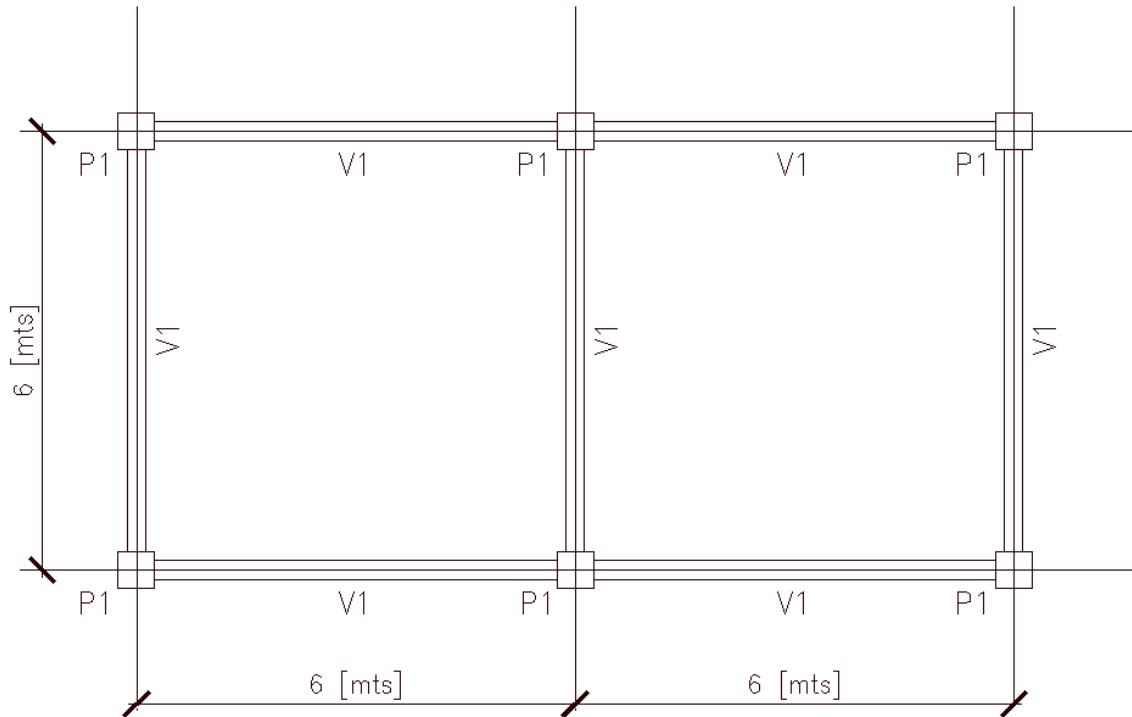


Figura 12. Planta Edificio Tipo

En donde P1 corresponde a un pilar cuadrado de hormigón armado de lados 50[cm] y V1 a una viga de hormigón armado de 25 [cm] de ancho y 60 [cm] de alto, cuyas propiedades se presentan en la siguiente tabla:

Elemento	Material	E [kgf/cm ²]	Inercia [m ⁴]	Area [m ²]
V1	H-25	213.546	4,5x10 ⁻³	0,15
P1	H-25	213.546	5,21x10 ⁻³	0,25

En donde E corresponde al módulo de elasticidad del hormigón H-25 que se obtiene con la relación:

$$E = 15100\sqrt{f'_c} \left[\frac{kgf}{cm^2} \right]$$

Siendo f'_c la resistencia a la compresión de una probeta cilíndrica de hormigón, el cual para un hormigón de calidad H-25 corresponde 200 [kgf/cm²].

Continuando con la estructura, como se mencionó anteriormente se modelarán 3 tipos de estructuras de baja, mediana y alta altura. La altura de entrepiso será de 3 metros, por lo tanto, se tiene:

Tipo Estructura	Cantidad de Pisos	Altura [m]
Baja	5	15
Mediana	10	30
Alta	15	45

Es importante mencionar que para efectos de este estudio se llevarán a cabo modelaciones en dos dimensiones, por lo que se modelará una estructura equivalente en dos dimensiones condensando las propiedades de los elementos considerando vigas y pilares equivalentes. Esta condensación se llevará a cabo con más detalle en la sección de modelación.

3.3 Registros Sísmicos

Otro dato de entrada importante para esta investigación son los registros sísmicos que se aplicarán a la roca basal de cada uno de los 5 suelos presentados anteriormente. Se utilizarán 8 registros de aceleraciones en roca del sismo del 27 de Febrero de 2010. Es importante que los registros provengan de la roca, ya que el objetivo es amplificar/atenuar la onda sísmica desde la roca a la superficie para luego evaluar el fenómeno de interacción suelo-estructura. Cabe mencionar que cada una de las 8 estaciones registran las aceleraciones del sismo en dirección Norte-Sur y Este-Oeste, pero para este estudio solo se utilizará la componente Norte-Sur de los registros. La siguiente tabla presenta un resumen de los registros de las estaciones:

Estación	Componente	Duración [s]	Peak Aceleración [m/s ²]	Paso [s]
Convento Viejo	Norte-Sur	299,97	1,83	0,01
El Roble	Norte-Sur	199,97	1,78	0,01
Las Tórtolas	Norte-Sur	299,985	1,71	0,005
Melado	Norte-Sur	84,98	1,38	0,005
Puangue	Norte-Sur	191,96	0,90	0,01
Rapel	Norte-Sur	87,96	1,94	0,01
Santa Lucia	Norte-Sur	148,92	3,13	0,01
UTFSM	Norte-Sur	72	2,35	0,005

Tabla 11. Información General Registros Sísmicos

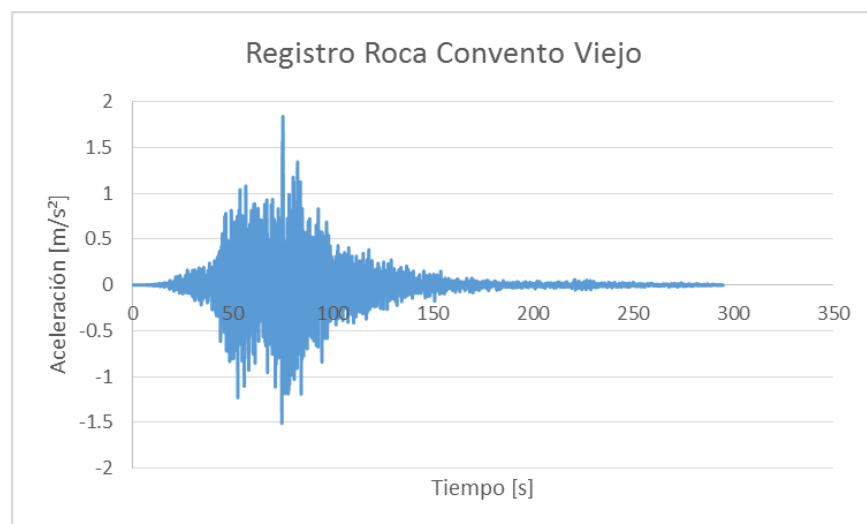


Figura 13. Registro Roca Convento Viejo

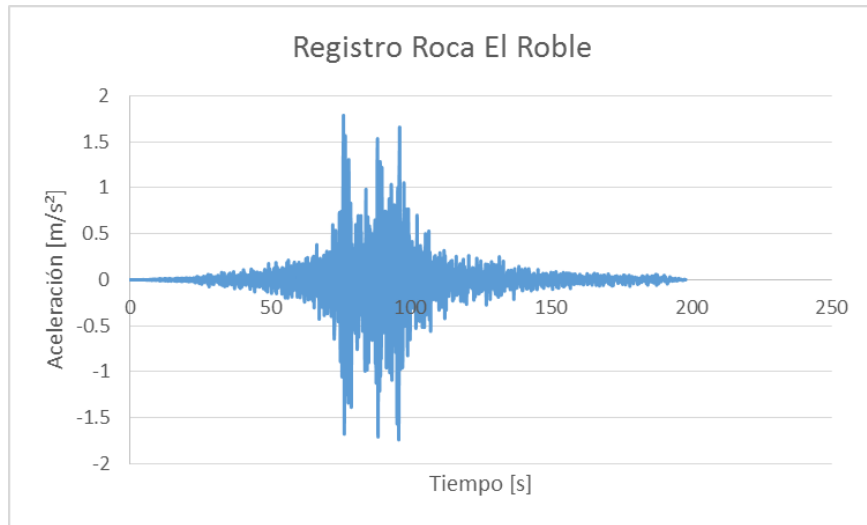


Figura 14. Registro Roca El Roble

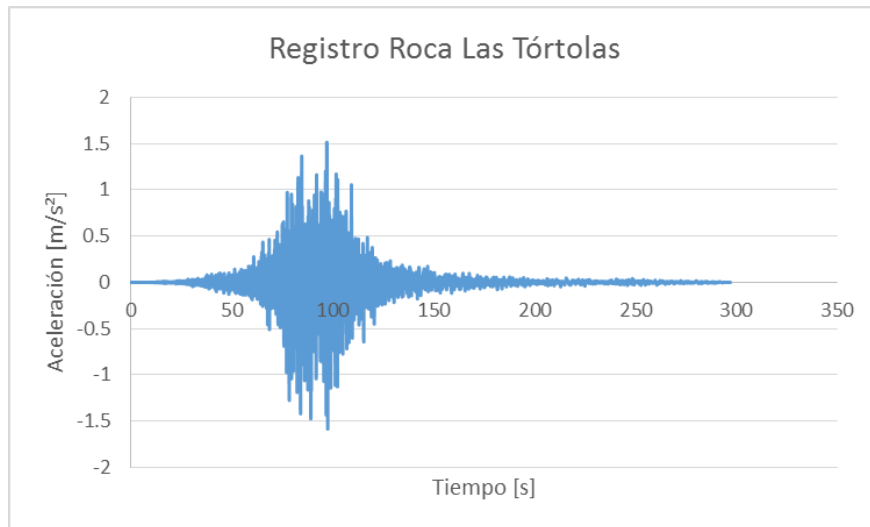


Figura 15. Registro Roca Las Tórtolas

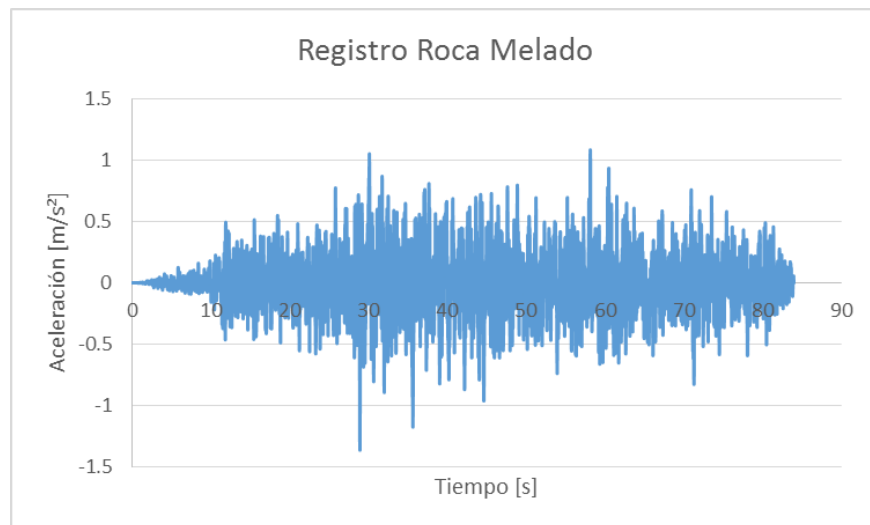


Figura 16. Registro Roca Melado

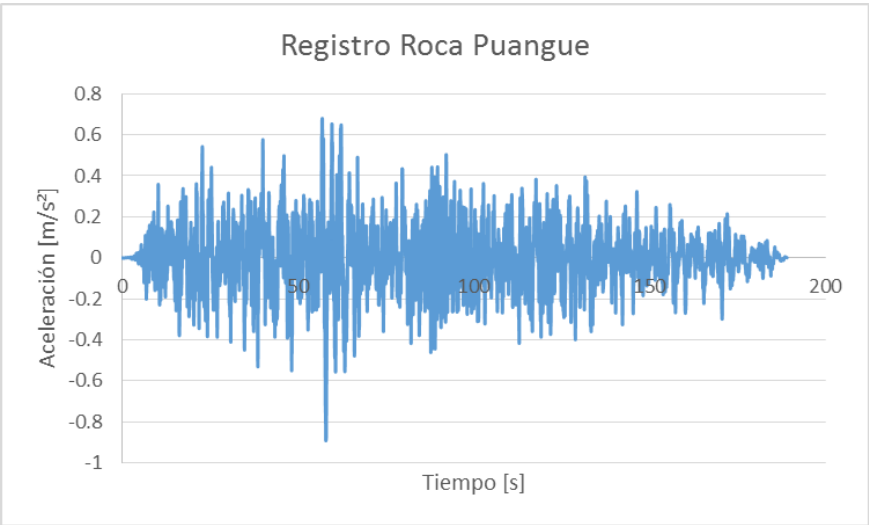


Figura 17. Registro Roca Puangue

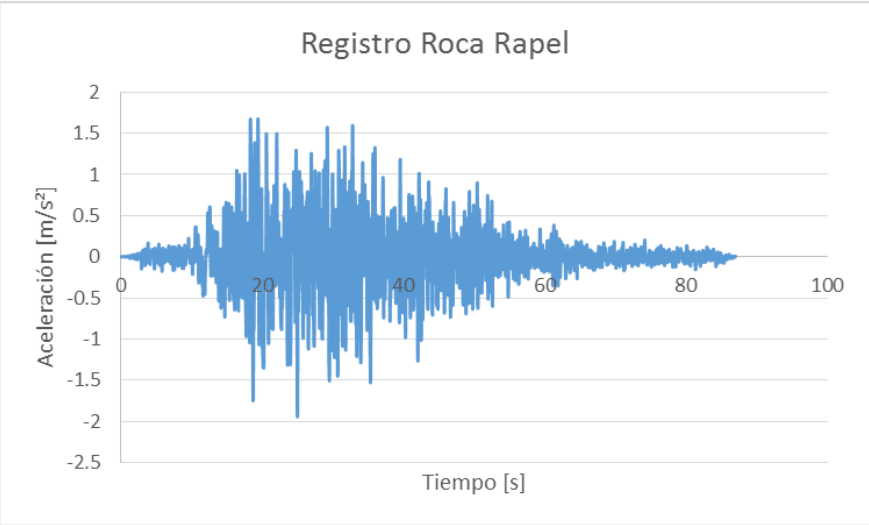


Figura 18. Registro Roca Rapel

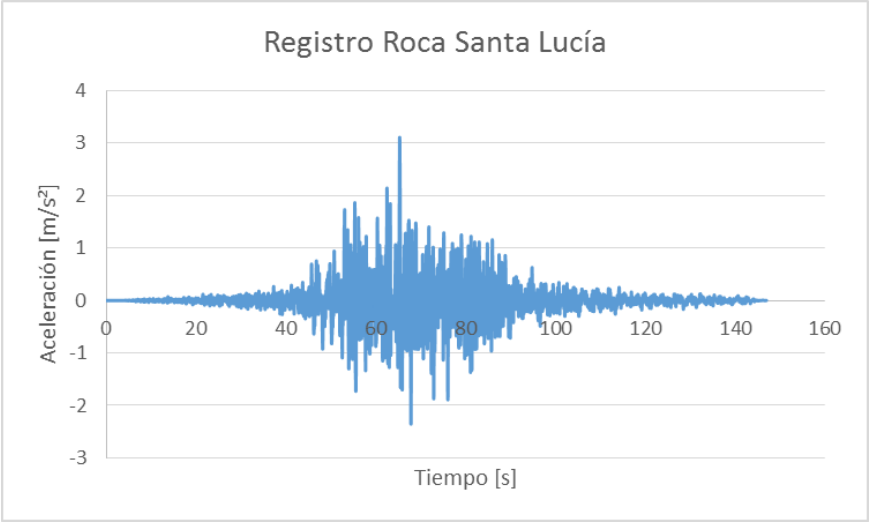


Figura 19. Registro Roca Santa Lucía

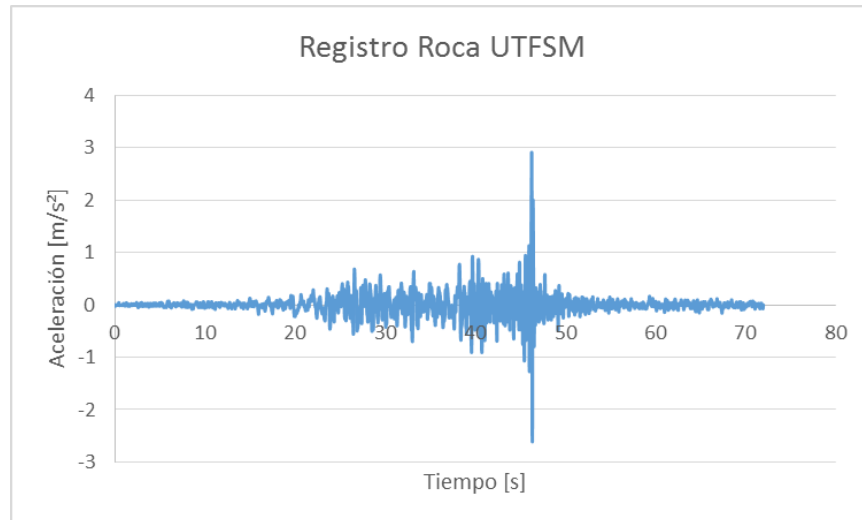


Figura 20. Registro Roca UTFSM

3.4 Modelación de Situaciones

Como se ha mencionado a lo largo de este informe, la finalidad de este estudio es evaluar el fenómeno de interacción suelo-estructura bajo los efectos de solicitaciones sísmicas y ver como esto se refleja en la demanda sísmica estructural. Para ello se realiza la comparación entre dos tipos de modelaciones: Elementos Finitos con Interacción Suelo Estructura (EF-ISE) y una modelación de “2 Pasos” que considera inicialmente la modelación de propagación de onda sísmica de la roca basal a la superficie para luego aplicar el registro amplificado a una estructura con base fija. Ambos tipos de modelaciones son representados en la Figura 21.

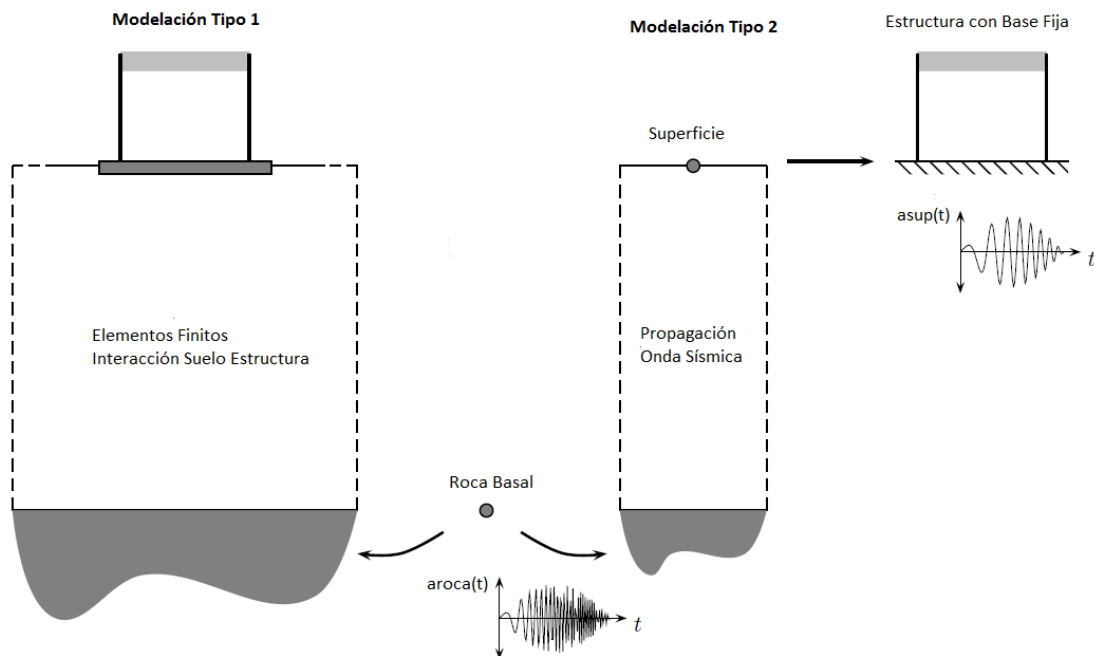


Figura 21. Representación Tipos de Modelación (Saez, 2009)

Para llevar a cabo las modelaciones se hará uso de dos softwares que permiten el análisis de elementos finitos y la utilización de registros sísmicos; PLAXIS 2D y ETABS 2015. Se utilizan estos dos softwares, debido a los recursos disponibles, pero de todas formas ambos resultan ser bastante efectivos para analizar en cada uno lo que es requerido para esta investigación en cuanto al área geotécnica (PLAXIS 2D) y al área estructural (ETABS 2015). PLAXIS 2D corresponde a un software de elementos finitos que permite la modelación suelos y además implementar elementos estructurales con elementos tipo placa y un elemento de interacción entre ellos. ETABS 2015 también corresponde a un software de elementos finitos, pero enfocado en el análisis estructural. Por lo tanto, para la Modelación Tipo 1 (EF-ISE) se utilizará el software PLAXIS 2D representado en la Figura 22, de la siguiente forma:

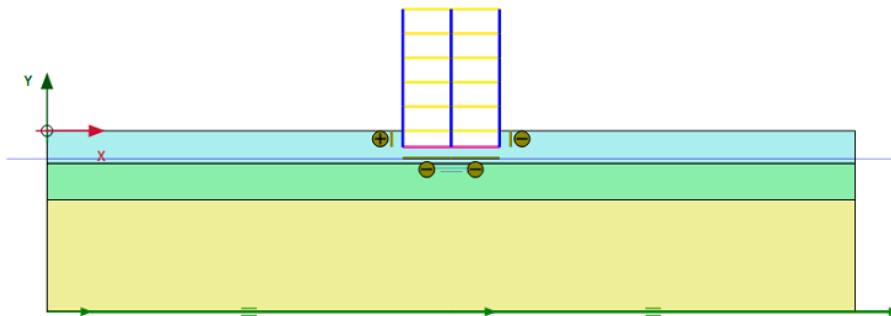


Figura 22. Modelación Tipo 1 en PLAXIS 2D

Y para la Modelación Tipo 2 (2 Pasos), se utilizará inicialmente el software PLAXIS 2D para obtener el registro amplificado en la superficie del suelo. Luego mediante el software ETABS 2015 se ingresará este registro amplificado a la estructura con base fija. La Figura 23 presenta el proceso de la modelación “2 Pasos” con los softwares a utilizar:

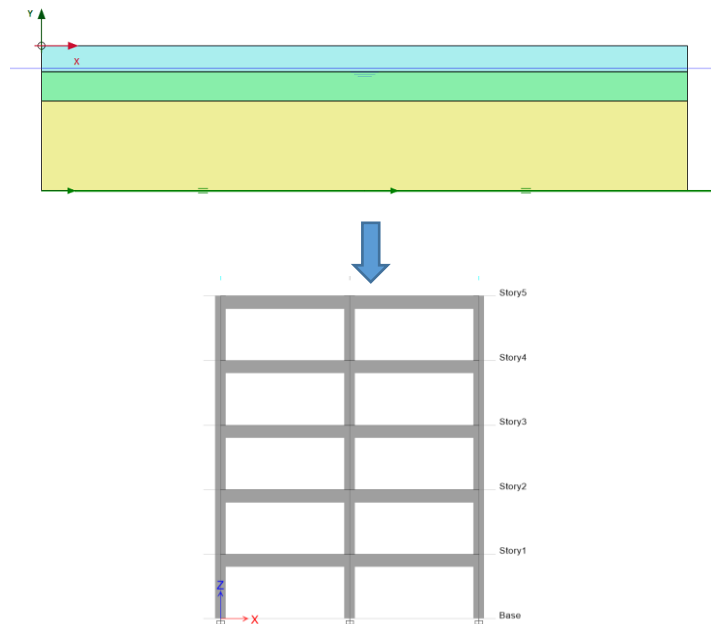


Figura 23. Modelación Tipo 2 en PLAXIS 2D y ETABS 2015

4. PLAXIS 2D: Software utilizado para Modelación del Suelo e Interacción Suelo – Estructura

4.1 Características Generales PLAXIS 2D

PLAXIS 2D es un software de elementos finitos diseñado para analizar distintos tipos de problemas geotécnicos, mediante la modelación en dos dimensiones de materiales y su comportamiento en distintos escenarios.

El programa implementa una interfaz gráfica en la cual el usuario puede definir un modelo geométrico con una serie de propiedades y elementos secundarios y un mallado de elementos finitos para el análisis.

Como es de interés para este estudio, el software permite además la modelación de elementos estructurales (tipo placa) para la evaluación de deformaciones, debido a las vibraciones ingresadas por el usuario al suelo.

4.1.1 Sub Programas PLAXIS 2D

El software se descompone en dos sub programas para la modelación:

- PLAXIS 2D Input (Datos de Entrada): Se usa para definir el modelo geométrico, la malla de elementos finitos, condiciones de borde y condiciones iniciales de la situación a analizar. Además, permite el ingreso de registros sísmicos, fases de carga, entre otros.
- PLAXIS 2D Output (Entrega de Resultados): Para generara tablas y/o gráficos de resultados provenientes de las fases de cálculo asignadas al modelo. Como gráficos permite generar curvas de relación entre distintas variables a disposición del interés del usuario.

Para el presente estudio se utiliza el subprograma “Input” para definir las características generales del modelo, tales como propiedades geométricas, tipo de cálculo, parámetros, estructura y para el ingreso del registro de aceleraciones en la roca basal. Una vez teniendo esto definido, se procede a calcular los resultados y mediante el subprograma “Output” es posible obtener los acelerogramas de respuesta en la superficie para cada caso, así como los desplazamientos de cada piso de la estructura para la evaluación de la demanda sísmica transmitida a la misma.

4.2 Método de Elementos Finitos con PLAXIS 2D

El software PLAXIS 2D trabaja con análisis de elementos finitos, como fue mencionado anteriormente. Este método es considerado como una herramienta muy poderosa para la resolución de problemas geotécnicos, el cual tuvo sus orígenes en el año 1966 con el análisis de esfuerzos y deformaciones en tanques de tierra y túneles en roca. Este método consiste en tomar un medio continuo y subdividirlo en una serie de elementos geométricos unidos entre sí, acoplándose en base ecuaciones algebraicas que otorgan continuidad al sistema global. De esta forma se permite pasar el problema desde un sistema continuo a uno discreto, el cual es mucho más preciso a la hora de obtener resultados en la posición donde se requiera y además conservando la fidelidad de los resultados si se aplica de forma correcta.

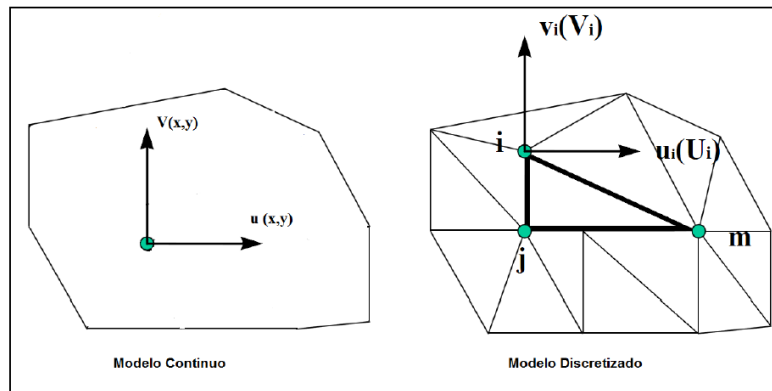


Figura 24. Representación de Modelo Elementos Finitos (Frias, 2004).

4.2.1 Implementación al Software

La implementación del sistema de elementos finitos en PLAXIS 2D puede ser de dos formas. La primera, "Plane Strain", es recomendada para casos con geometría de sección transversal relativamente uniforme y siguiendo el supuesto que las propiedades permanecen constantes en dirección perpendicular al plano de la sección transversal. Al utilizar esta función, los desplazamientos en esta dirección perpendicular se mantienen nulos, pero no así los esfuerzos que si son considerados en ella (Brinkgreve, 2010). Por otra parte, la segunda forma, "Axisymmetric", se basa en el mismo concepto general, pero para casos cuya sección transversal se mantenga constante de manera radial. La Figura 25 representa las dos formas descritas:

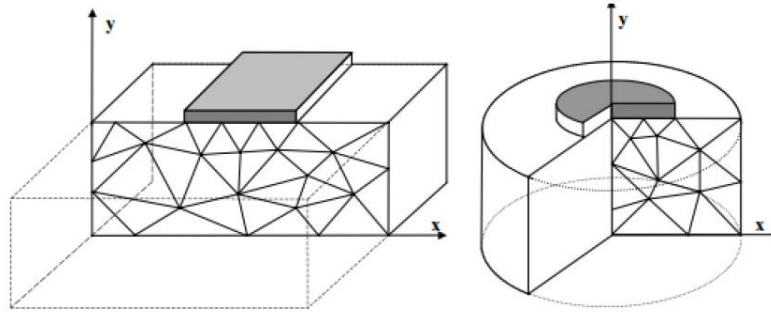


Figura 25. Representación Modelos "Plain Strain" y "Axisymmetric" (Brinkgreve, 2010)

4.2.2 Tipos de Elementos Finitos

Los elementos finitos asignados por el software son del tipo triangular, los que pueden ser de 6 o 15 nodos, según la precisión que se requiera. En los elementos de 6 nodos se tiene una interpolación de segundo orden para los desplazamientos y la integración numérica implica tres puntos de Gauss (puntos donde se evalúan las tensiones). Mientras que, en los elementos de 15 nodos, la interpolación es de cuarto orden y la integración numérica implica doce puntos de Gauss (Brinkgreve, 2010). De esta forma queda claro que el triángulo de 15 nodos lleva a resultados más exactos, por esta razón es que se implementará este tipo de elemento para la obtención de resultados en este estudio.

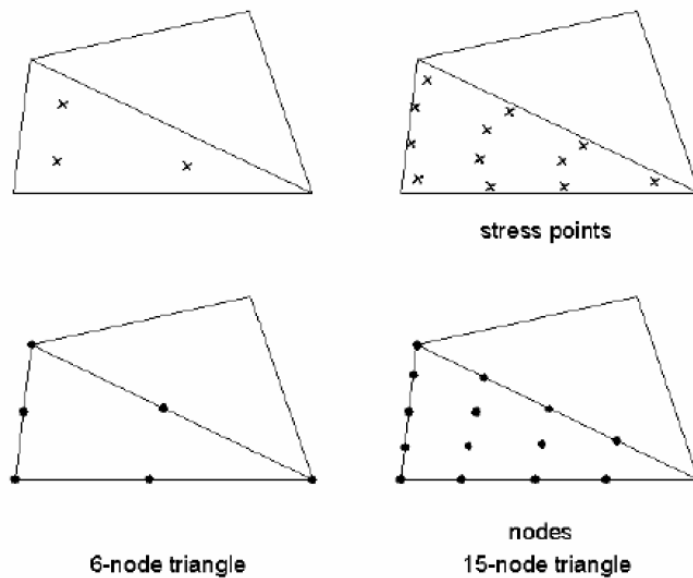


Figura 26. Tipos de Elementos Finitos PLAXIS 2D (Brinkgreve, 2010).

4.3 Modelos Constitutivos de Materiales

PLAXIS 2D permite la asignación de varios tipos de modelos constitutivos para los materiales, dentro de los cuales se definen los siguientes 3, que permiten definir el modelo a utilizar en este estudio:

- Mohr – Coulomb
- Hardening Soil
- **Hardening Soil Small**

Para el estudio se utilizará el modelo Hardening Soil Small, pero es necesario describir los 3 modelos presentados para justificar su formulación. Se utiliza como referencia el documento “PLAXIS: Material Models Manual” para la descripción de los modelos.

4.3.1 Modelo Mohr – Coulomb

El modelo Mohr-Coulomb es un modelo con comportamiento elastoplástico perfecto del material. Este modelo entrega resultados de “primer orden”, por lo que es utilizado para presentar un primer análisis de algún caso en estudio. Considera una rigidez promedio constante para cada estrato y es definido por 5 parámetros básicos.

El modelo complementa la plasticidad con el desarrollo de deformaciones irreversibles, introduciendo para ello una función de fluencia “ f ”, la cual evalúa si la plasticidad llega a llevarse a cabo. Es posible representar este fenómeno en el espacio con una superficie de fluencia, que en el caso del modelo Mohr-Coulomb se encuentra fija, quedando definida completamente por los parámetros requeridos para el modelo y no dependiente del nivel de esfuerzo y deformación instantáneos. Los puntos que representan los estados de esfuerzos permanecen dentro del rango elástico siempre y cuando se encuentren dentro de la superficie de fluencia.

4.3.1.1 Parámetros del Modelo

El modelo requiere de la asignación de los siguientes parámetros básicos:

Simbología	Parámetro	Unidades
E	Módulo de Young	[kN/m ²]
ν	Razón de Poisson	[-]
φ	Ángulo de Fricción Interna	[°]
c	Cohesión	[kN/m ²]
ψ	Ángulo de Dilatancia	[°]

Tabla 12. Parámetros Modelo Mohr – Coulomb

4.3.1.2 Formulación del Modelo

El concepto básico de un modelo elastoplástico puede ser representado con el siguiente esquema:

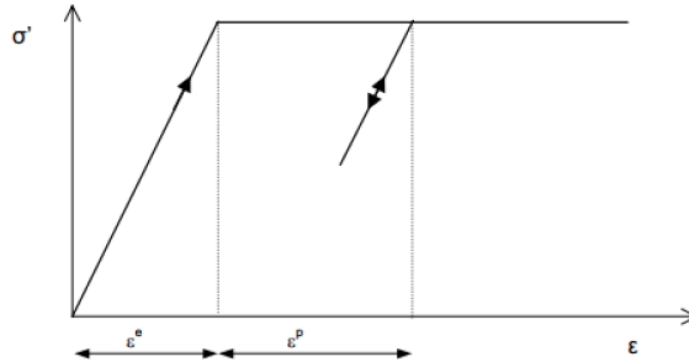


Figura 27. Modelo Elastoplástico Perfecto (PLAXIS)

El principio básico consiste en que las deformaciones y sus razones de cambio se conforman de una parte elástica y una plástica.

$$\underline{\varepsilon} = \underline{\varepsilon}^e + \underline{\varepsilon}^p \quad \underline{\dot{\varepsilon}} = \underline{\dot{\varepsilon}}^e + \underline{\dot{\varepsilon}}^p$$

Considerando la Ley de Hook para la componente elástica:

$$\underline{\dot{\sigma}}' = D^e \underline{\dot{\varepsilon}}^e = D^e (\underline{\dot{\varepsilon}} - \underline{\dot{\varepsilon}}^p)$$

De acuerdo a la teoría de la plasticidad, las razones de deformación unitaria plástica son proporcionales a la derivada de la función de fluencia con respecto a los esfuerzos, por lo que pueden ser representadas como vectores perpendiculares a la superficie de fluencia (PLAXIS).

El modelo define una segunda función g para asociar la dilatancia. Las deformaciones unitarias plásticas son descritas con la siguiente expresión:

$$\underline{\dot{\varepsilon}}^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma'}$$

Donde λ es el multiplicador plástico que toma el valor de cero para comportamiento plástico.

$$\lambda = 0 \quad \rightarrow \quad f < 0$$

$$\lambda > 0 \quad \rightarrow \quad f = 0$$

El modelo se formula mediante 6 funciones de fluencia f en esfuerzos principales:

$$f_{1a} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3)\text{sen}(\varphi) - c \cos(\varphi) \leq 0$$

$$f_{1b} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_2)\text{sen}(\varphi) - c \cos(\varphi) \leq 0$$

$$f_{2a} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1)\text{sen}(\varphi) - c \cos(\varphi) \leq 0$$

$$f_{2b} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3)\text{sen}(\varphi) - c \cos(\varphi) \leq 0$$

$$f_{3a} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_2)\text{sen}(\varphi) - c \cos(\varphi) \leq 0$$

$$f_{3b} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_1)\text{sen}(\varphi) - c \cos(\varphi) \leq 0$$

Donde σ'_1 , σ'_2 y σ'_3 corresponden a los esfuerzos principales, φ corresponde al ángulo de fricción interna y c corresponde a la cohesión.

Estas funciones representan un cono hexagonal en el espacio de los esfuerzos principales como se muestra a continuación:

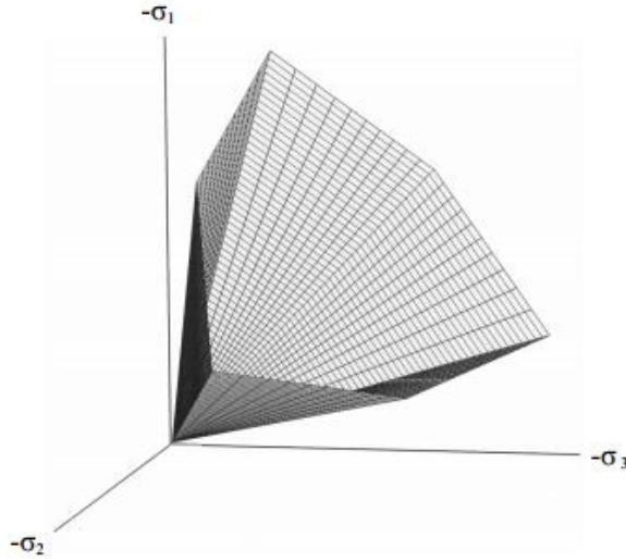


Figura 28. Superficie de Fluencia Modelo Mohr – Coulomb (PLAXIS)

Además de las funciones de fluencia, se definen seis funciones potenciales para el modelo:

$$g_{1a} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3)\text{sen}(\psi)$$

$$g_{1b} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_2)\text{sen}(\psi)$$

$$g_{2a} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1)\text{sen}(\psi)$$

$$g_{2b} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3)\text{sen}(\psi)$$

$$g_{3a} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_2)\text{sen}(\psi)$$

$$g_{3b} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_1)\text{sen}(\psi)$$

Donde ψ corresponde al ángulo de dilatancia. Este parámetro es necesario para modelar la dilatancia, consistente en incrementos plásticos de la deformación unitaria volumétrica.

4.3.2 Modelo Hardening Soil (Endurecimiento Isotrópico)

Hardening Soil es considerado un modelo avanzado para la modelación del comportamiento del suelo. De la misma forma que el modelo Mohr-Coulomb, se guía por parámetros como la cohesión c y los ángulos de fricción interna φ y dilatación ψ . Se diferencia del anterior modelo, en que la rigidez del suelo se define de forma más precisa, utilizando 3 parámetros: la rigidez bajo cargas del tipo Edométricas E_{oed} , la rigidez bajo cargas del tipo Triaxial E_{50} y la rigidez para ciclos de carga/descarga E_{ur} . Adicionalmente, el modelo incorpora la variabilidad del valor de la rigidez mediante la dependencia del estado instantáneo de esfuerzos. Por esta razón, las rigideces mencionadas son introducidas como valores constantes referenciales, para un esfuerzo ingresado por el usuario.

4.3.2.1 Parámetros del Modelo

El modelo de endurecimiento isotrópico Hardening Soil se define mediante algunos parámetros del modelo Mohr-Coulomb y además incorpora parámetros adicionales. Los parámetros son los siguientes.

Parámetros de falla del Modelo Mohr-Coulomb:

Simbología	Parámetro	Unidades
φ	Ángulo de Fricción Interna	[°]
c	Cohesión	[kN/m ²]
ψ	Ángulo de Dilatación	[°]

Tabla 13. Parámetros de Falla Modelo Mohr – Coulomb

Parámetros Básicos de Rigidez

Simbología	Parámetro	Unidades
E_{oed}^{ref}	Módulo de Young de Referencia para Carga Edométrica	[kN/m ²]
E_{50}^{ref}	Módulo de Young de Referencia para Carga Triaxial	[kN/m ²]
E_{ur}^{ref}	Módulo de Young de Referencia para Carga/Descarga	[kN/m ²]

Tabla 14. Parámetros de Rigidez Modelo Hardening Soil

Parámetros Avanzados

Simbología	Parámetro	Unidades
ν_{ur}	Razón de Poisson para Carga/Descarga (defecto $\nu_{ur} = 0.2$)	[-]
p_{ref}	Esfuerzo de Referencia para Rigidez (defecto $p_{ref} = 100$)	[kN/m ²]
K_0^{nc}	Valor para Consolidación Normal (defecto $K_0^{nc} = 1 - \text{sen}\varphi$)	[-]

Tabla 15. Parámetros Avanzados Modelo Hardening Soil

Dos tipos de endurecimiento (Hardening) son considerados por el modelo: uno de corte por efecto de las deformaciones plásticas causadas por cargas del tipo edométricas primarias y otro de compresión debido a deformaciones plásticas causadas por cargas del tipo triaxial.

Módulos para esfuerzo Triaxial:

El modelo genera una relación hiperbólica triaxial para el material entre la deformación unitaria vertical y el esfuerzo desviatorio, denominado q bajo carga triaxial primaria. Lo anteriormente mencionado queda expresado mediante la siguiente relación:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_i} \frac{q}{1 - \frac{q}{q_a}} \quad ; \quad q < q_f$$

Donde,

E_1 : Rigidez Inicial

q_f : Esfuerzo de Falla

q_a : Valor Asintótico de la Hipérbola

Este último parámetro describe el comportamiento del material, como se muestra en la siguiente Figura:

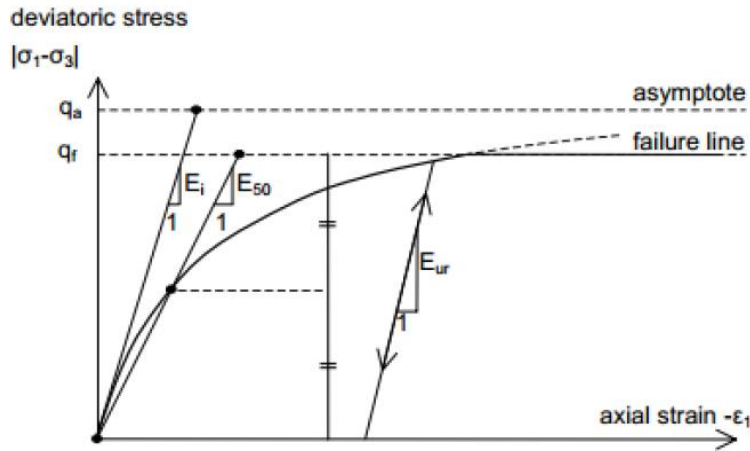


Figura 29. Relación Hiperbólica Esfuerzo-Deformación para Ensayos Triaxiales (PLAXIS)

Para relacionar la rigidez inicial y la rigidez de referencia E_{50}^{ref} , el modelo utiliza la siguiente expresión:

$$E_i = \frac{2E_{50}}{2 - R_f}$$

Donde R_f es considerado por el modelo con un valor de 0.9 por defecto, pero de todas formas es un parámetro que puede ser ajustado por el usuario.

El parámetro E_{50} es asignado al módulo del material cuando éste ha alcanzado el 50% del esfuerzo de falla, y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cos\varphi + \sigma'_3 \text{sen}\varphi}{c \cos\varphi + p^{ref} \text{sen}\varphi} \right)^m$$

En donde E_{50}^{ref} corresponde al módulo triaxial de referencia del software para el esfuerzo de referencia p^{ref} . Como ya se había aclarado para expresiones anteriores, los parámetros c y φ corresponden a la cohesión y ángulo de fricción respectivamente.

Continuando con los parámetros de importancia del modelo en cuestión, se tiene el módulo de carga/descarga E_{ur} . La expresión que lo define viene dada por:

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cos\varphi + \sigma'_3 \text{sen}\varphi}{c \cos\varphi + p^{ref} \text{sen}\varphi} \right)^m$$

En donde E_{ur}^{ref} corresponde al módulo de carga/descarga de referencia del software para el esfuerzo de referencia p^{ref} .

Con respecto al módulo de corte, se permite el uso de la siguiente relación:

$$E_{ur} = 2(1 + \nu)G_{ur}$$

Donde G_{ur} corresponde al módulo de corte elástico. Esta relación es posible utilizarla, ya que la rigidez de carga/descarga corresponde a una rigidez elástica. No así para la rigidez E_{50} , la cual es una rigidez no elástica, por lo tanto, no es posible relacionar mediante una conversión simple los parámetros E_{50} y G_{50} .

Módulo Edométrico:

El modelo constitutivo en cuestión utiliza la siguiente expresión para el material en condiciones de carga/descarga del tipo edométrica:

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(-\frac{\sigma'_1}{p^{ref}} \right)^m$$

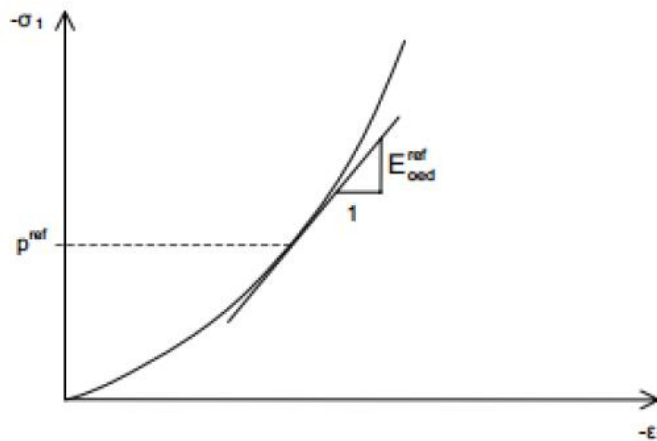


Figura 30. Representación Gráfica de Parámetro E_{oed}^{ref} (PLAXIS)

4.3.2.2 Formulación del Modelo

El modelo de Hardening Soil consiste en una variante elastoplástica del hiperbólico, y a diferencia del modelo Mohr-Coulomb (elastoplástico perfecto), la superficie de fluencia no es fija en el espacio. Estos pueden expandirse debido a deformaciones plásticas y en función del esfuerzo de pre-consolidación.

El programa define la siguiente función de fluencia, con la cual se evalúa si la fluencia llega a ocurrir:

$$f = \bar{f} - \gamma^p$$

Donde,

\bar{f} : Función que depende de los esfuerzos considerados y de los parámetros relacionados con la rigidez del suelo.

γ^p : Función que depende de las deformaciones plásticas.

Estas dos funciones quedan definidas por las siguientes expresiones:

$$\bar{f} = \frac{2}{E_i} \frac{q}{1 - \frac{q}{q_a}} - \frac{2q}{E_{ur}}$$

$$\gamma^p = -(2\varepsilon_1^p - \varepsilon_v^p)$$

En la segunda expresión, el término ε_v^p corresponde a los cambios plásticos de volumen, los que usualmente toman valores despreciables. Por lo tanto, se puede llegar a lo siguiente:

$$\gamma^p \approx -2\varepsilon_1^p$$

Luego, si se considera la condición de fluencia ($f = 0$), se tiene una se llega a una relación para la deformación unitaria plástica ($\bar{f} = \gamma^p$), es decir:

$$\varepsilon_1^p = \frac{1}{E_i} \frac{q}{1 - \frac{q}{q_a}} - \frac{q}{E_{ur}}$$

Por otro lado, para la deformación unitaria elástica se tiene:

$$\varepsilon_1^e = \frac{q}{E_{ur}} \quad -\varepsilon_2^e = -\varepsilon_3^e = \nu_{ur} \frac{q}{E_{ur}}$$

Donde,

ν_{ur} : Coeficiente de Poisson de carga/descarga.

Finalmente, para la etapa de carga desviatoria del ensayo triaxial, la deformación unitaria total corresponderá a la suma de sus componentes elástica y plástica, por lo tanto se tiene:

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_1^e - \varepsilon_1^p = \frac{1}{E_i} \frac{q}{1 - \frac{q}{q_a}}$$

4.3.3 Modelo Hardening Soil Small

El modelo Hardening Soil Small a diferencia del Hardening Soil, hace un comportamiento más completo del suelo, ya que agrega un par de propiedades y parámetros adicionales a su modelación. Si consideramos el modelo Hardening Soil original, éste se basa en un comportamiento elástico del material durante el proceso de carga/descarga, pero es importante tener presente que el rango en que los suelos pueden considerarse realmente elásticos es bastante pequeño. Como se muestra en la Figura 31, a medida que aumenta la deformación unitaria del suelo su rigidez decae de manera no lineal:

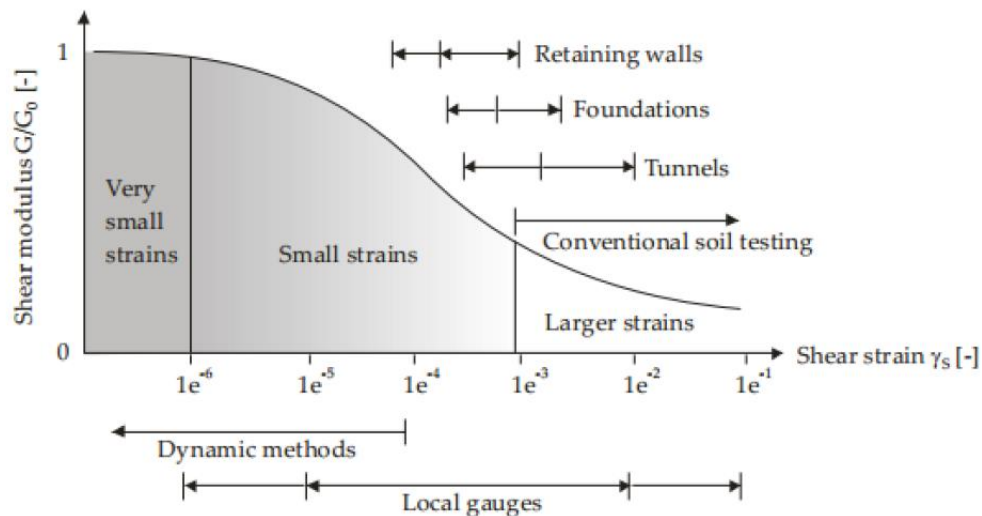


Figura 31. Curva de Reducción de Rigidez en Suelos (PLAXIS)

Una importante característica que no considera el modelo Hardening Soil original es la elevada rigidez de los suelos a pequeñas deformaciones. Se menciona esto, debido a que las rigideces medidas en ensayos de laboratorio (Triaxial y Edométricos) usados para determinar los parámetros de rigidez del modelo Hardening Soil, se ven disminuidas a más de la mitad de su valor inicial. Por ende, el modelo Hardening Soil Small se basa en el modelo Hardening Soil y agrega la capacidad de considerar el aumento de rigidez cuando las deformaciones son bajas.

4.3.3.1 Parámetros del Modelo

El modelo Hardening Soil Small utiliza los mismos parámetros que el modelo Hardening Soil y agrega dos adicionales para hacer la modelación más completa. Las siguientes tablas muestran los parámetros involucrados.

Parámetros de Modelo Hardening Soil:

Simbología	Parámetro	Unidades
φ	Ángulo de Fricción Interna	[°]
c	Cohesión	[kN/m ²]
ψ	Ángulo de Dilatancia	[°]
E_{oed}^{ref}	Módulo de Young de Referencia para Carga Edométrica	[kN/m ²]
E_{50}^{ref}	Módulo de Young de Referencia para Carga Triaxial	[kN/m ²]
E_{ur}^{ref}	Módulo de Young de Referencia para Carga/Descarga	[kN/m ²]
ν_{ur}	Razón de Poisson para Carga/Descarga (defecto $\nu_{ur} = 0.2$)	[-]
p_{ref}	Esfuerzo de Referencia para Rigidez (defecto $p_{ref} = 100$)	[kN/m ²]
K_0^{nc}	Valor para Consolidación Normal (defecto $K_0^{nc} = 1 - \text{sen}\varphi$)	[-]

Tabla 16. Parámetros Modelo Hardening Soil

Parámetros Incorporados por Modelo Hardening Soil Small:

Simbología	Parámetro	Unidades
G_0^{ref}	Módulo de Corte para Pequeñas Deformaciones	[kN/m ²]
$\gamma_{0.7}$	Nivel de Deformación Unitaria para el cual G se ha reducido al 70% del valor de G_0	[kN/m ²]

Tabla 17. Parámetros Incorporados por Modelo Hardening Soil Small

Al igual que los parámetros de rigidez del modelo Hardening Soil, a dependencia de la rigidez del estado de esfuerzos está dada por la ley de poder:

$$G_0 = G_0^{ref} \left(\frac{c \cos\varphi + \sigma_3' \text{sen}\varphi}{c \cos\varphi + p^{ref} \text{sen}\varphi} \right)^m$$

No así para el parámetro $\gamma_{0.7}$, que es independiente del estado de esfuerzos.

4.3.3.2 Formulación del Modelo

Como se mencionó anteriormente, el modelo Hardening Soil Small se basa en la misma modelación del modelo Hardening Soil e incorpora el comportamiento de la rigidez a muy pequeñas deformaciones, por lo tanto, la formulación del modelo es la misma, exceptuando este último punto.

El comportamiento de la rigidez a bajas deformaciones viene dado por la relación hiperbólica propuesta por Santos & Correa (PLAXIS), que se muestra a continuación:

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + a \left| \frac{\gamma}{\gamma_{0.7}} \right|} \quad \text{con } a = \frac{3}{7}$$

5. Modelación en PLAXIS 2D

Debido a la presencia de 5 suelos para este estudio es que para esta sección solo se detallará el proceso de la obtención de parámetros y la modelación para el suelo de Concepción. Al final se adjuntarán las tablas de resumen con todos los parámetros de cada suelo utilizados para la modelación. Para todos los suelos se utilizará la misma estructura compuesta de los mismos materiales y propiedades geométricas de sus elementos, por lo que la modelación de ésta es válida para los 5 suelos.

5.1 Definición de Parámetros

Se definen y calculan los parámetros necesarios para utilización del modelo constitutivo Hardening Soil Small, descrito en la sección 4.3.3 de este informe para su ingreso al software PLAXIS 2D. Los parámetros del modelo a utilizar son los siguientes:

Simbología	Parámetro	Unidades
γ_{unsat}	Peso No Saturado	[kN/m ³]
γ_{sat}	Peso Saturado	[kN/m ³]
E_{50}^{ref}	Módulo de Young de Referencia para Carga Triaxial	[kN/m ²]
E_{oed}^{ref}	Módulo de Young de Referencia para Carga Edométrica	[kN/m ²]
E_{ur}^{ref}	Módulo de Young de Referencia para Carga/Descarga	[kN/m ²]
m	Nivel de dependencia Rigidez/Esfuerzo	-
c	Cohesión	[kN/m ²]
φ	Ángulo de Fricción Interna	[°]
ψ	Ángulo de Dilatancia	[°]
G_0^{ref}	Módulo de Corte para Pequeñas Deformaciones	[kN/m ²]
$\gamma_{0.7}$	Nivel de Deformación Unitaria para el cual G se ha reducido al 70% del valor de G_0	[kN/m ²]
α	Factor de Masa para Amortiguamiento de Rayleigh	-
β	Factor de Rigidez para Amortiguamiento de Rayleigh	-

Tabla 18. Parámetros Modelo Hardening Soil Small para Modelación

5.1.1 Perfil de Velocidades de Ondas de Corte

Dado a que la estratigrafía del suelo de concepción presenta muchos estratos y además a la similitud de la velocidad de ondas de corte entre algunos de ellos, es que para la modelación se simplifica la estratigrafía considerando solo 5 estratos. En la siguiente tabla se presenta la estratigrafía y velocidades de ondas de corte a considerar:

Estrato	Desde [m]	Hasta [m]	Vs [m/s]
H1	0	24,9	209
H2	24,9	34,4	348
H3	34,4	85	296
H4	85	102,5	565
H5	102,5	130	379

Tabla 19. Velocidad Ondas de Corte Estratos de Suelo Concepción (Peña, 2014)

5.1.2 Peso Saturado y No Saturado

A medida de simplificación se asume el mismo peso para el suelo en estado saturado y no saturado, ya que estos valores no varían significativamente. Se consideran los valores presentados en la sección 3.1.3 y utilizando valores ponderados para los estratos propuestos para la modelación.

Estrato	Desde [m]	Hasta [m]	γ_{unsat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]
H1	0	24,9	19,12	19,12
H2	24,9	34,4	19,51	19,51
H3	34,4	85	19,73	19,73
H4	85	102,5	18,62	18,62
H5	102,5	130	18,62	18,62

Tabla 20. Peso Saturado y no Saturado Estratos de Suelo Concepción (Peña, 2014)

5.1.3 Módulo de Corte para Pequeñas Deformaciones: G_0^{ref}

Para obtener el módulo de corte para pequeñas deformaciones se utiliza la siguiente forma:

$$G_{max} = \rho V_s^2$$

Siendo ρ la densidad del suelo y V_s la velocidad de ondas de corte. Por lo tanto, se tiene:

Estrato	Desde [m]	Hasta [m]	Vs [m/s]	ρ [kf/m ³]	G_{max} [kN/m ²]
H1	0	24,9	209	1951	85359
H2	24,9	34,4	348	1991	241061
H3	34,4	85	296	2013	176325
H4	85	102,5	565	1900	606528
H5	102,5	130	379	1900	272918

Tabla 21. G_{max} Estratos de Suelo Concepción (Peña, 2014)

Luego,

$$G_0^{ref} = 0,7 * G_{max}$$

Estrato	Desde [m]	Hasta [m]	G_{max} [kN/m ²]	G_0^{ref} [kN/m ²]
H1	0	24,9	85359	59751
H2	24,9	34,4	241061	168742
H3	34,4	85	176325	123428
H4	85	102,5	606528	424570
H5	102,5	130	272918	191043

Tabla 22. G_0^{ref} Estratos de Suelo Concepción (Peña, 2014)

5.1.4 Deformación Unitaria para $0,7G_0$: $\gamma_{0,7}$

Para obtener este parámetro de deformación unitaria, se hace uso de las curvas de amortiguamiento y razón de corte obtenidos por Seed & Idriss (1970). De estas curvas se puede extraer el valor que toma la deformación cuando el módulo de corte decae en un 30% con respecto al máximo. Se presenta a continuación la curva para arena:

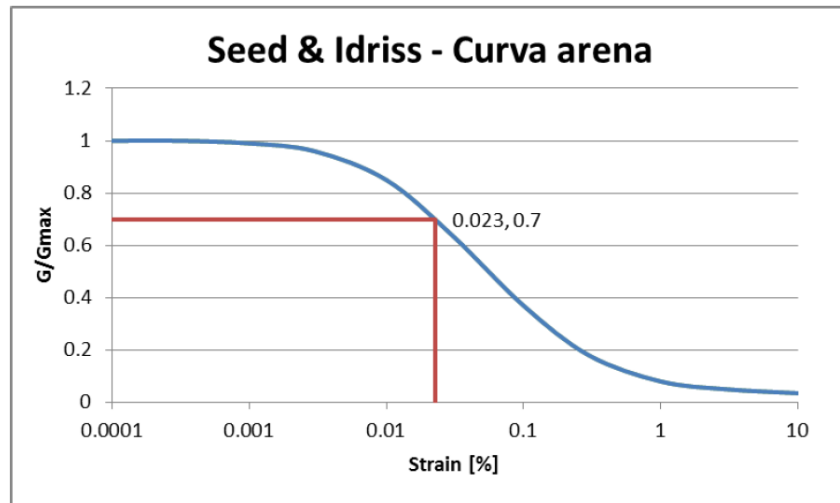


Figura 32. Curva de Razón de Corte (Seed & Idriss, 1970)

Como se observa en el gráfico el valor que toma la deformación unitaria para un decaimiento del 30% del módulo de corte con respecto al máximo es de $\gamma_{0,7} = 0,023$, el cual aplica para todos los estratos.

5.1.5 Módulo de Young de Referencia para Carga Triaxial: E_{50}^{ref}

Debido a que no se cuenta con la información necesaria sobre los ensayos triaxiales en el suelo del centro de Concepción, se asigna el valor propuesto por Waterman (2012) para arenas densas. Se aplica el valor de 37000 [kN/m²] para el primer estrato y dado a que la rigidez es proporcional a la velocidad de ondas de corte para pequeñas deformaciones, se utiliza el valor proporcional para los estratos siguientes. Se tiene:

Estrato	Desde [m]	Hasta [m]	E_{50}^{ref} [kN/m ²]
H1	0	24,9	37000
H2	24,9	34,4	61558
H3	34,4	85	52352
H4	85	102,5	99943
H5	102,5	130	67042

Tabla 23. E_{50}^{ref} Estratos de Suelo Concepción (Peña, 2014)

5.1.6 Módulo de Young de Referencia para Carga Edométrica: E_{oed}^{ref} y Módulo de Young de Referencia para Carga/Descarga: E_{ur}^{ref}

Dado a que para los parámetros de Carga Edométrica y Carga/Descarga tampoco se cuenta con información de sus ensayos asociados, es que nos vemos en la necesidad de obtener sus valores a partir de la información que entrega el ensayo triaxial. De esta forma se utilizan las siguientes relaciones:

$$E_{oed}^{ref} = E_{50}^{ref}$$

$$E_{ur}^{ref} = 3 \cdot E_{50}^{ref}$$

Se aplican estas relaciones en base a lo propuesto por Brinkgreve, R. (2010, Referencia 1), quien realiza estimaciones para los 3 valores de módulos elásticos del suelo para el modelo constitutivo en arenas. Además, PLAXIS 2D también utiliza las mismas relaciones por defecto en caso de ingresar uno de los valores de los módulos elásticos. Por lo tanto, se tiene:

Estrato	Desde [m]	Hasta [m]	E_{50}^{ref} [kN/m ²]	E_{oed}^{ref} [kN/m ²]	E_{ur}^{ref} [kN/m ²]
H1	0	24,9	37000	37000	111000
H2	24,9	34,4	61558	61558	184674
H3	34,4	85	52352	52352	157057
H4	85	102,5	99943	99943	299830
H5	102,5	130	67042	67042	201125

Tabla 24. E_{oed}^{ref} y E_{ur}^{ref} Estratos de Suelo Concepción (Peña, 2009)

5.1.7 Poder: m

En el caso del nivel de dependencia rigidez/esfuerzo, el manual de Plaxis 2D explica que según estudios se pueden adoptar valores que varían entre 0,5 y 1. Para el caso de las arenas se propone un valor de 1, pero para este estudio se considera un valor de 0.9.

5.1.8 Cohesión: c

Al tratarse de un suelo granular la cohesión corresponde a un valor nulo. Sin embargo, los desarrolladores del programa recomiendan un valor de al menos 0.2 para evitar complicaciones en los procesos iterativos (PLAXIS), por lo que se usa un valor de $c=0.2$.

5.1.9 Angulo de Fricción Interna φ y Angulo de Dilatancia ψ

Para determinar el ángulo de fricción a utilizar para la modelación se utiliza como referencia los rangos especificados para arenas densas y muy densas en el libro "Ingeniería Geológica" (González de Vallejo et al., 2002), donde se especifica un rango entre $\varphi = 26^\circ$ y $\varphi = 41^\circ$ para arenas densas y valores mayores para arenas muy densas. Entendiendo que bajo un análisis de sensibilidad pequeñas variaciones del ángulo de fricción no generan cambios en los resultados obtenidos, especialmente cuando hay amortiguamiento, se utiliza el rango de $38^\circ < \varphi < 42^\circ$, utilizando el valor menor para los estratos de menor rigidez y el mayor para los de mayor rigidez.

Con respecto al ángulo de dilatancia ψ , se utiliza la siguiente expresión:

$$\psi = \varphi - 30^\circ$$

Se tiene:

Estrato	Desde [m]	Hasta [m]	φ [°]	ψ [°]
H1	0	24,9	38	8
H2	24,9	34,4	40	10
H3	34,4	85	40	10
H4	85	102,5	42	12
H5	102,5	130	40	10

Tabla 25. Angulos de Fricción y Dilatancia Estratos de Suelo Concepción (Peña, 2014)

5.1.10 Parámetros Avanzados

Como se mencionó en la sección 4.3.3.1 se aplica lo siguiente:

ν_{ur}	Razón de Poisson para Carga/Descarga (defecto $\nu_{ur} = 0.2$)	[-]
p_{ref}	Esfuerzo de Referencia para Rigidez (defecto $p_{ref} = 100$)	[kN/m ²]
K_0^{nc}	Valor para Consolidación Normal (defecto $K_0^{nc} = 1 - \text{sen}\varphi$)	[-]

Tabla 26. Parámetros Avanzados de Suelo Concepción (Peña, 2014)

5.1.11 Resumen

En esta sección se muestra una tabla resumen de los parámetros a utilizar en el modelo constitutivo para el suelo de concepción que se detallaron anteriormente. Además, se incorporan las tablas para el resto de los suelos a utilizar para este estudio.

- Suelo Concepción

Estrato	H1	H2	H3	H4	H5
Desde [m]	0	24,9	34,4	85	102,5
Hasta [m]	24,9	34,4	85	102,5	130
γ_{unsat} [kN/m ³]	19,12	19,51	19,73	18,62	18,62
γ_{sat} [kN/m ³]	19,12	19,51	19,73	18,62	18,62
E_{50}^{ref} [kN/m ²]	37000	61558	52352	99943	67042
E_{oed}^{ref} [kN/m ²]	37000	61558	52352	99943	67042
E_{ur}^{ref} [kN/m ²]	111000	184674	157057	299830	201125
m	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
c	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
φ [°]	38	40	40	42	40
ψ [°]	8	10	10	12	10
$\gamma_{0,7}$	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023
G_0^{ref} [kN/m ²]	59751	168743	123428	424570	191043

Tabla 27. Parámetros Estratos de Suelo Concepción para Modelación (Peña, 2014)

- Suelo Viña del Mar

Estrato	H1	H2	H3
Desde [m]	0	4	8,5
Hasta [m]	4	8,5	22,32
γ_{unsat} [kN/m ³]	17	18	19
γ_{sat} [kN/m ³]	17	18	19
E_{50}^{ref} [kN/m ²]	6000	37000	37000
E_{oed}^{ref} [kN/m ²]	3000	29600	29600
E_{ur}^{ref} [kN/m ²]	12000	90000	90000
m	1	0,5	0,5
c	5	0	0
φ [°]	30	36	40
ψ [°]	0	6	10
$\gamma_{0,7}$	0,08	0,02	0,02
G_0^{ref} [kN/m ²]	34681	58058	140161

Tabla 28. Parámetros Estratos de Suelo Viña del Mar para Modelación (Mancilla, 2013)

- Suelo Santiago Maipú

Estrato	H1	H2	H3	H4
Desde [m]	0	0,9	8,4	27,4
Hasta [m]	0,9	8,4	27,4	30,45
γ_{unsat} [kN/m ³]	-	22	18	18
γ_{sat} [kN/m ³]	-	22	18	18
E_{50}^{ref} [kN/m ²]	-	46000	37000	37000
E_{oed}^{ref} [kN/m ²]	-	45000	29600	29600
E_{ur}^{ref} [kN/m ²]	-	139000	90000	90000
m	-	0,5	0,5	0,5
c	-	23	0	0
φ [°]	-	45	38	38
ψ [°]	-	15	8	8
$\gamma_{0,7}$	-	0,02	0,02	0,02
G_0^{ref} [kN/m ²]	-	434000	259000	259000

Tabla 29. Parámetros Estratos de Suelo Santiago Maipú para Modelación (Neira, 2014)

- Suelo Santiago Peñalolén

Estrato	H1	H2	H3	H4	H5
Desde [m]	0	23,95	26	27,45	28,45
Hasta [m]	23,95	26	27,45	28,45	31
γ_{unsat} [kN/m ³]	17	22	22	22	22
γ_{sat} [kN/m ³]	17	22	22	22	22
E_{50}^{ref} [kN/m ²]	6000	46000	46000	46000	46000
E_{oed}^{ref} [kN/m ²]	3000	45000	45000	45000	45000
E_{ur}^{ref} [kN/m ²]	12000	139000	139000	139000	139000
m	1	0,5	0,5	0,5	0,5
c	5	23	23	23	23
φ [°]	30	45	45	45	45
ψ [°]	0	15	15	15	15
$\gamma_{0,7}$	0,08	0,02	0,02	0,02	0,02
G_0^{ref} [kN/m ²]	75815	360000	360000	360000	360000

Tabla 30. Parámetros Estratos de Suelo Santiago Peñalolén para Modelación (Neira, 2014)

- Santiago San Joaquín

Estrato	H1	H2	H3
Desde [m]	0	0,3	3,5
Hasta [m]	0,3	3,5	30
γ_{unsat} [kN/m ³]	22	22	22
γ_{sat} [kN/m ³]	22	22	22
E_{50}^{ref} [kN/m ²]	46000	46000	46000
E_{oed}^{ref} [kN/m ²]	45000	45000	45000
E_{ur}^{ref} [kN/m ²]	139000	139000	139000
m	0,5	0,5	0,5
c	23	23	23
φ [°]	45	45	45
ψ [°]	15	15	15
$\gamma_{0,7}$	0,02	0,02	0,02
G_0^{ref} [kN/m ²]	1200000	1200000	1200000

Tabla 31. Parámetros Estratos de Suelo Santiago San Joaquín para Modelación (Neira, 2014)

5.1.12 Amortiguamiento

En el caso de este parámetro que juega un rol crucial en la transmisión de la onda sísmica a lo largo del suelo, se hará el cálculo de los coeficientes α y β para los 5 suelos que se utilizarán para este estudio.

Como se mencionó en la sección 2.5 del presente trabajo, el uso de amortiguamiento es necesario para un correcto comportamiento dinámico de los suelos, por lo tanto, se incorporan los parámetros de Rayleigh dentro de la modelación de cada suelo. En este caso los registros de la roca basal solo serán registros sísmicos del terremoto del 2010 en 8 estaciones distintas. Por lo tanto, solo resta separar los estratos entre profundo y poco profundo para obtener los parámetros de Rayleigh que se utilizarán para la modelación.

- Depósitos poco profundos: Viña del Mar / Santiago – Maipú / Santiago – Peñalolén / Santiago – San Joaquín.
- Depósitos profundos: Concepción.

Para obtener los parámetros de Rayleigh, primero es importante calcular los períodos fundamentales de cada suelo, y con ello poder obtener la frecuencia fundamental que es importante para el cálculo de alpha y beta.

Para calcular el período fundamental de un suelo, se necesita conocer la profundidad del depósito (H) y la velocidad de onda de corte (V_s), utilizando la siguiente expresión:

$$T = \frac{4H}{V_s}$$

Esto para el caso de un depósito de suelo homogéneo, que para efectos de esta investigación solo aplica a uno de los 5 depósitos de suelo. Por otra parte, se cuenta con 4 tipos de suelos compuestos de estratos con distintas características, por ende, distintas alturas y velocidades de ondas de corte, para los cuales se utiliza la siguiente expresión para calcular el período fundamental:

$$T_i = \frac{4H_i}{V_{s_i}}$$

Donde T_i , H_i y V_{s_i} corresponden al período, la profundidad y velocidad de onda de corte del estrato i respectivamente. Luego para obtener el período fundamental del depósito completo, basta con sumar los períodos de cada estrato de la siguiente forma.

$$T_{deposito} = \sum_{i=1}^n T_i$$

Con estas expresiones es posible obtener el período fundamental de cada depósito, y luego los parámetros alpha y beta de Rayleigh aplicando las fórmulas presentadas en la sección 2.5. Además es importante mencionar que para cada estrato se utilizará un valor de razón de amortiguamiento promedio dentro del rango presentado, por lo tanto se utilizará para este parámetro un valor de 3%.

5.1.12.1 Amortiguamiento Viña del Mar (3 Estratos)

Estrato	Profundidad [m]	Vs [m/s]	Período Fund. [s]
E1	4	169	0,095
E2	4,5	213	0,085
E3	13,82	321	0,172

Con esto se tiene:

$$T_{viña} = 0,352 [s] \quad \rightarrow \quad f_{viña} = 2,841 [Hz]$$

Luego,

$$\omega_m = 2,841 [Hz] \quad ; \quad \omega_n = 14,205 \quad ; \quad \xi = 0,03$$

Finalmente,

$$\alpha = 0,142 \quad ; \quad \beta = 0,0035$$

5.1.12.2 Amortiguamiento Santiago Maipú (2 Estratos)

Estrato	Profundidad [m]	Vs [m/s]	Período Fund. [s]
E1	7,5	526	0,057
E2	22,05	449,1	0,196

Con esto se tiene:

$$T_{maipu} = 0,253 [s] \rightarrow f_{maipu} = 3,95 [Hz]$$

Luego,

$$\omega_m = 3,95 [Hz] ; \omega_n = 19,75 ; \xi = 0,03$$

Finalmente,

$$\alpha = 0,198 ; \beta = 0,0025$$

5.1.12.3 Amortiguamiento Santiago Peñalolen (2 Estratos)

Estrato	Profundidad [m]	Vs [m/s]	Período Fund. [s]
E1	23,95	250	0,383
E2	6,05	479,1	0,051

Con esto se tiene:

$$T_{peñalolen} = 0,434 [s] \rightarrow f_{peñalolen} = 2,304 [Hz]$$

Luego,

$$\omega_m = 2,304 [Hz] ; \omega_n = 11,52 ; \xi = 0,03$$

Finalmente,

$$\alpha = 0,115 ; \beta = 0,0043$$

5.1.12.4 Amortiguamiento Santiago San Joaquín (1 Estrato)

Estrato	Profundidad [m]	Vs [m/s]	Período Fund. [s]
E1	26,50	875	0,121

Con esto se tiene:

$$T_{sjoaquin} = 0,121 [s] \rightarrow f_{sjoaquin} = 8,264 [Hz]$$

Luego,

$$\omega_m = 8,264 [Hz] ; \omega_n = 41,32 ; \xi = 0,03$$

Finalmente,

$$\alpha = 0,413 ; \beta = 0,0012$$

5.1.12.5 Amortiguamiento Concepción (5 Estratos)

Estrato	Profundidad [m]	Vs [m/s]	Período Fund. [s]
E1	24,9	209	0,477
E2	9,5	348	0,109
E3	50,6	296	0,684
E4	17,5	565	0,124
E5	27,5	379	0,290

Con esto se tiene:

$$T_{conce} = 1,684 [s] \rightarrow f_{conce} = 0,594 [Hz]$$

Luego,

$$\omega_m = 0,594 [Hz] ; \xi = 0,03$$

Como el depósito de Concepción se trata de un depósito profundo, para obtener el valor de ω_n hay que utilizar el mayor valor entre la frecuencia predominante del registro y 5 veces ω_m . Para obtener la frecuencia predominante del registro, se genera el espectro de aceleraciones de cada registro y la frecuencia asociada a la mayor aceleración se considerará como la frecuencia predominante del sismo. En este caso se generará el espectro en función del período, con el que luego es posible obtener la frecuencia. Se presentan los espectros:

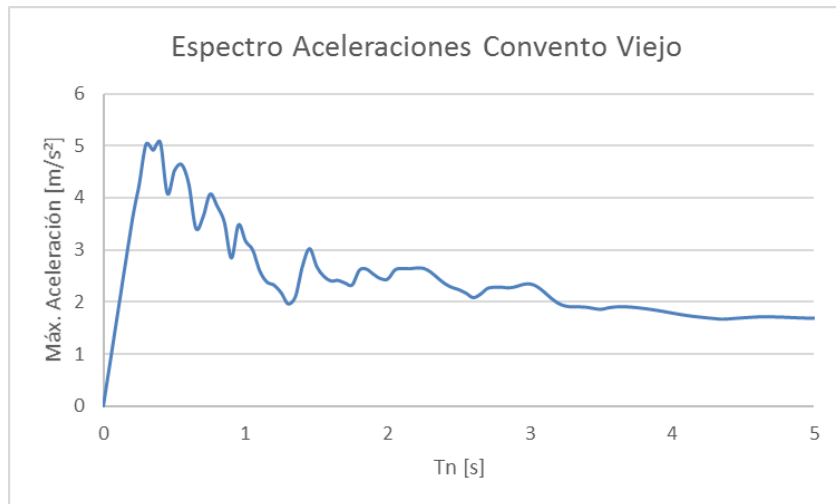


Figura 33. Espectro Aceleraciones Convento Viejo

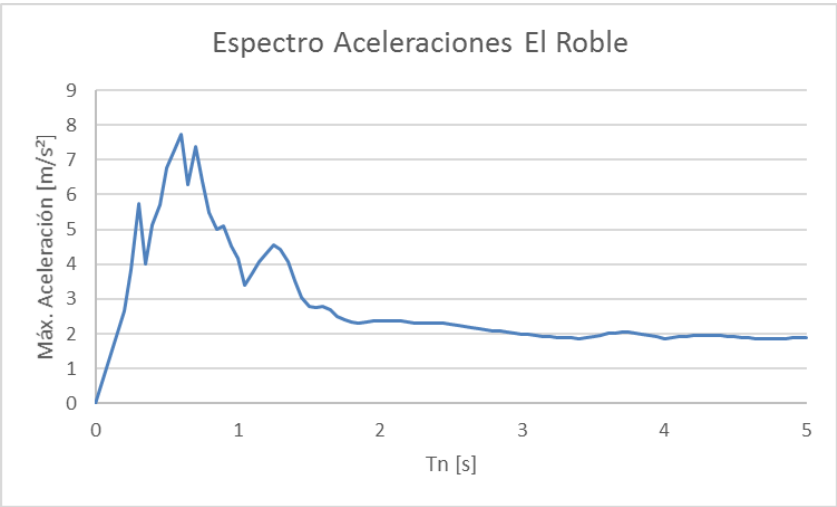


Figura 34. Espectro Aceleraciones El Roble

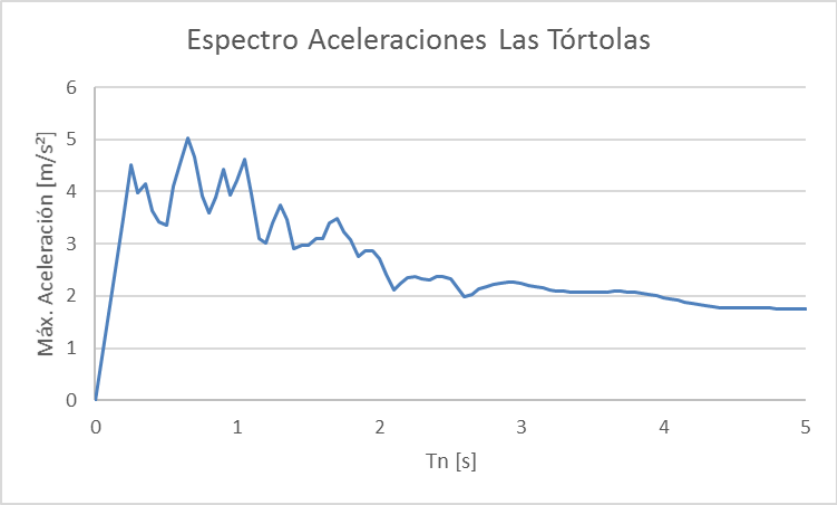


Figura 35. Espectro Aceleraciones Las Tórtolas

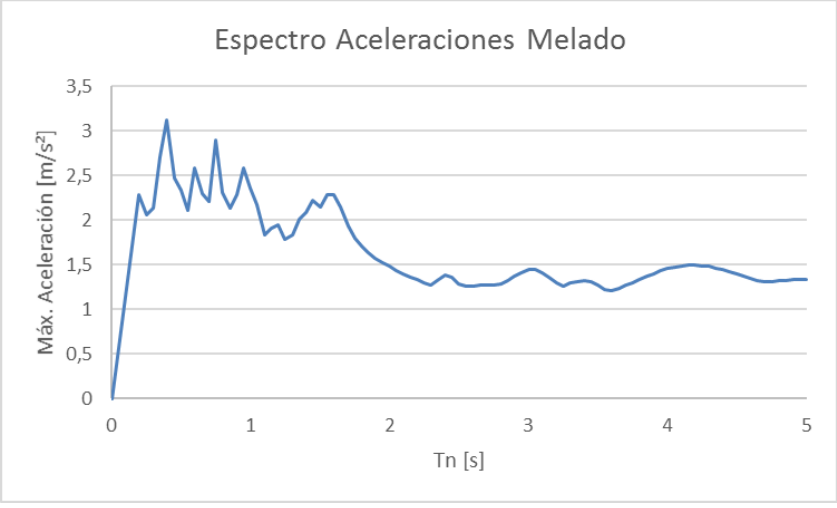


Figura 36. Espectro Aceleraciones Melado

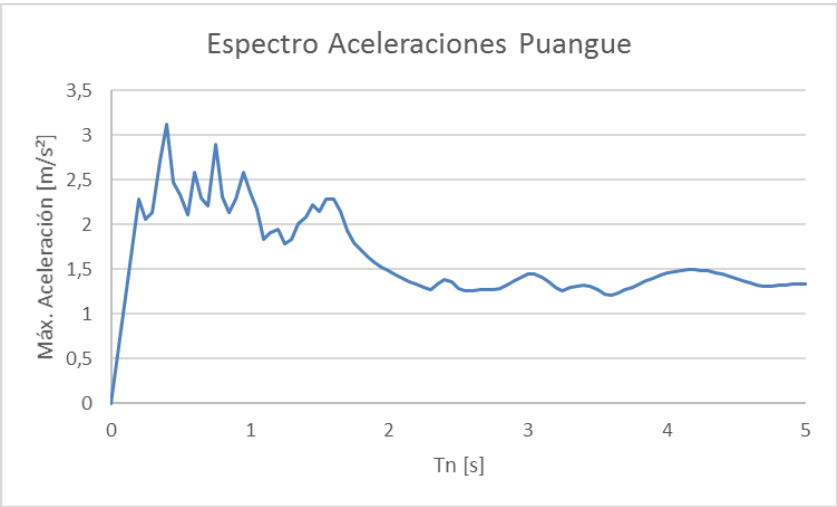


Figura 37. Espectro Aceleraciones Puangue

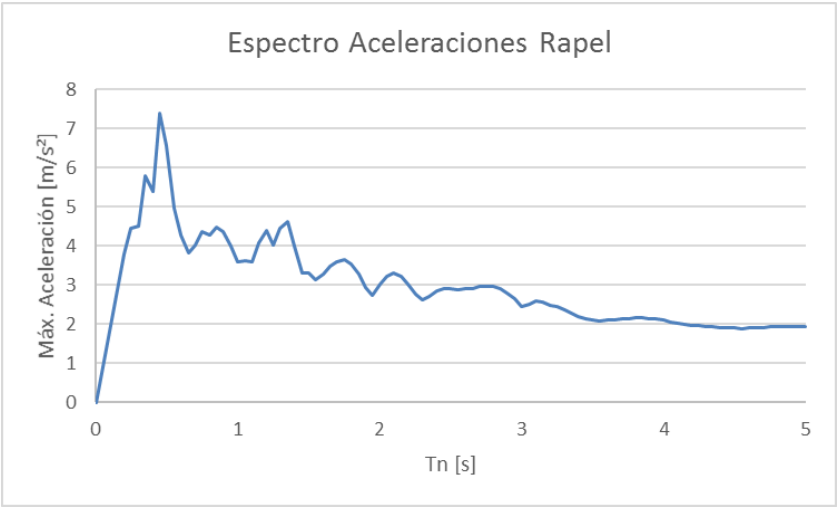


Figura 38. Espectro Aceleraciones Rapel

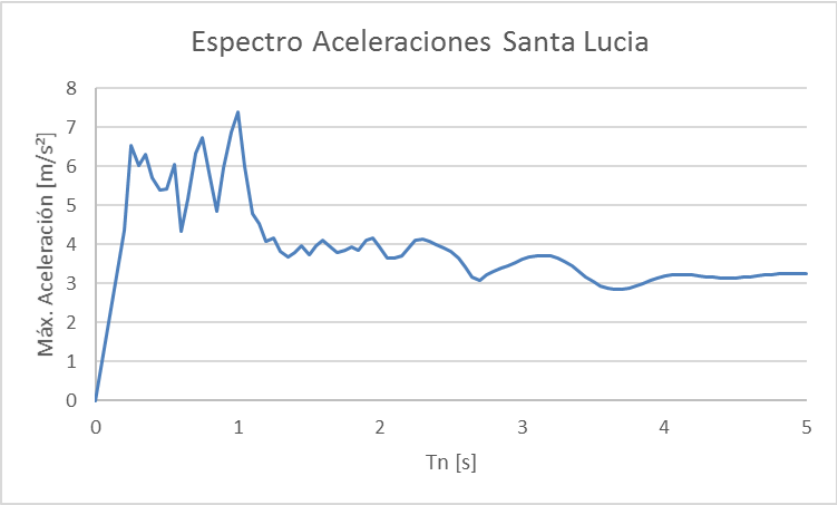


Figura 39. Espectro Aceleraciones Santa Lucía

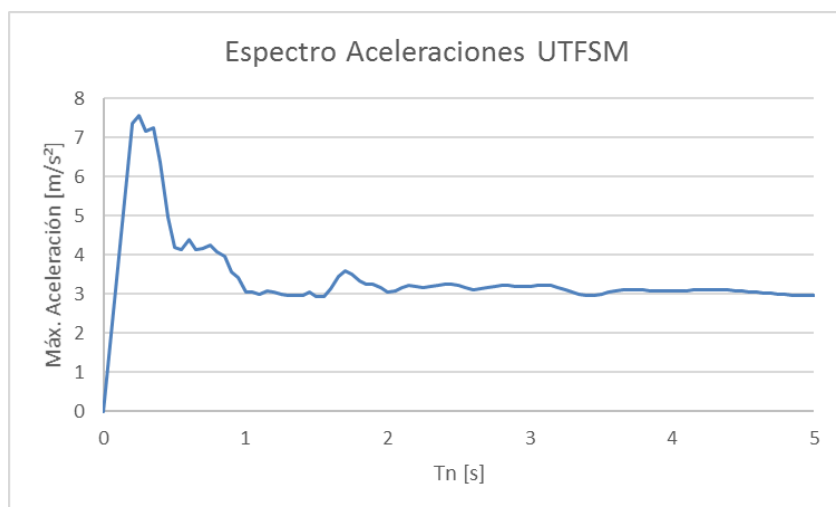


Figura 40. Espectro Aceleraciones UTFSM

De los espectros presentados, se obtienen los siguientes resultados:

Registro	Período Fundamental [s]	Frecuencia Fundamental [Hz]
Convento Viejo	0,3	3,33
El Roble	0,6	1,67
Las Tórtolas	0,65	1,54
Melado	0,4	2,5
Puangue	2,8	0,357
Rapel	0,45	2,22
Santa Lucía	1,0	1
UTFSM	0,25	4

Tabla 32. Período Fundamental Registros Sísmicos

Estos valores de frecuencia fundamental de cada registro se deben comparar con el valor de 5 veces la frecuencia fundamental del suelo que corresponde a $5\omega_m = 2,97 [Hz]$ y utilizar el mayor como valor para asignar al parámetro ω_n . Por ende, se tiene:

Registro	$\omega_n [Hz]$	α	β
Convento Viejo	3,33	0,0302	0,0153
El Roble	2,97	0,0297	0,0168
Las Tórtolas	2,97	0,0297	0,0168
Melado	2,97	0,0297	0,0168
Puangue	2,97	0,0297	0,0168
Rapel	2,97	0,0297	0,0168
Santa Lucía	2,97	0,0297	0,0168
UTFSM	4,0	0,0310	0,0131

Tabla 33. Parámetros de Rayleigh de Registros Sísmicos para Suelo Concepción

5.2 Modelación

Como se mencionó anteriormente en la presentación del software PLAXIS 2D, éste se divide en dos sub-programas; PLAXIS 2D Input y Output. La modelación se genera en PLAXIS 2D Input, que se utiliza para la definición completa del modelo. Para la obtención de resultados se recurre a PLAXIS 2D Output, en donde se pueden generar tablas y gráficos.

5.2.1 Geometría y Parámetros Generales del Modelo

Al comenzar la modelación, PLAXIS 2D Input requiere de la información geométrica de la grilla del modelo y algunos parámetros generales.

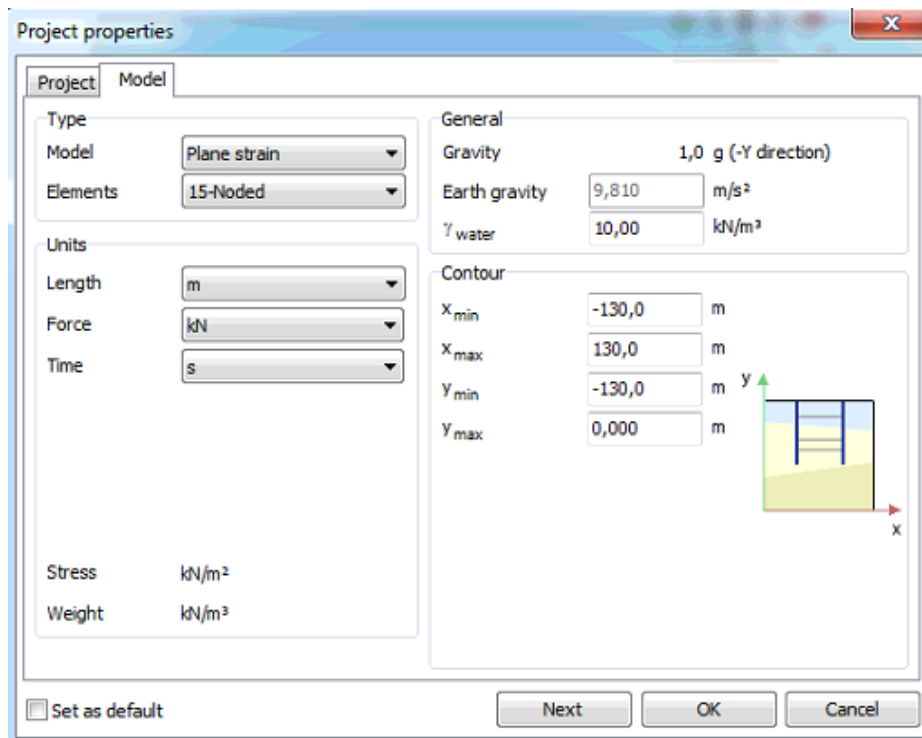


Figura 41. Ingreso Geometría y Parámetros Generales con PLAXIS 2D

Como se aclaró en la sección 4 de este informe, se utilizará un modelo tipo “Plane Strain” y seleccionando elementos finitos asociados de 15 nodos. Para la geometría de los estratos de suelo se selecciona una profundidad de 130 metros, de acuerdo a la estratigrafía especificada en la sección 3. En cuanto al ancho se selecciona un ancho tal de tener una relación ancho/altura mayor o igual que dos, por lo que se da un tamaño de 260 metros. Se utiliza esta relación ancho/altura, debido a los resultados obtenidos por Sharahi (1986), quien demuestra que bajo esta condición geométrica se observa una atenuación de ondas de alta frecuencia y predominan las de baja frecuencia, además de obtenerse mayores desplazamientos laterales. Dado a que los sismos generalmente son generados por ondas de baja frecuencia y llevan consigo desplazamientos laterales de magnitud considerable, es que se selecciona esta relación como la óptima para la modelación.

5.2.2 Interfaz del Programa

El subprograma PLAXIS 2D Input sigue una secuencia para ir definiendo todos los aspectos del modelo, presentando las siguientes pestañas:

- **Soil:** En esta pestaña se definen los distintos estratos que conforman el depósito de suelo, los materiales de cada uno de ellos y la napa freática.
- **Structures:** Se utiliza para la modelación de la estructura mediante elementos tipo placa y el ingreso del registro sísmico.
- **Mesh:** Es utilizada para generar la malla de elementos finitos del depósito de suelo.
- **Flow Conditions:** Esta pestaña no es utilizada en este estudio, ya que no aplican los flujos de agua en ninguno de los suelos a estudiar.
- **Stage Construction:** Se utiliza para definir las fases de cálculo, las condiciones de borde y los parámetros asociados al análisis dinámico.

5.2.3 Materiales

Utilizando el botón “Materials”, es posible definir el material de cada estrato del depósito de suelo y los valores de los parámetros asociados al tipo de modelo constitutivo considerado (Hardening Soil Small). Los valores ingresados corresponden a los mostrados en las tablas de la sección 5.1.11. Se selecciona material drenado para todos los estratos. A continuación, se muestra la forma de ingreso de los parámetros:

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		H1
Material model		HS small
Drainage type		Drained
Colour		RGB 161, 226, 232
Comments		
General properties		
Y _{unsat}	kN/m ³	19,12
Y _{sat}	kN/m ³	19,12
Advanced		
Void ratio		
Dilatancy cut-off		<input type="checkbox"/>
e _{init}		0,5000
e _{min}		0,000
e _{max}		999,0
Damping		
Rayleigh α		0,03020
Rayleigh β		0,01530

Figura 42. Ingreso Parámetros de Estratos en PLAXIS 2D

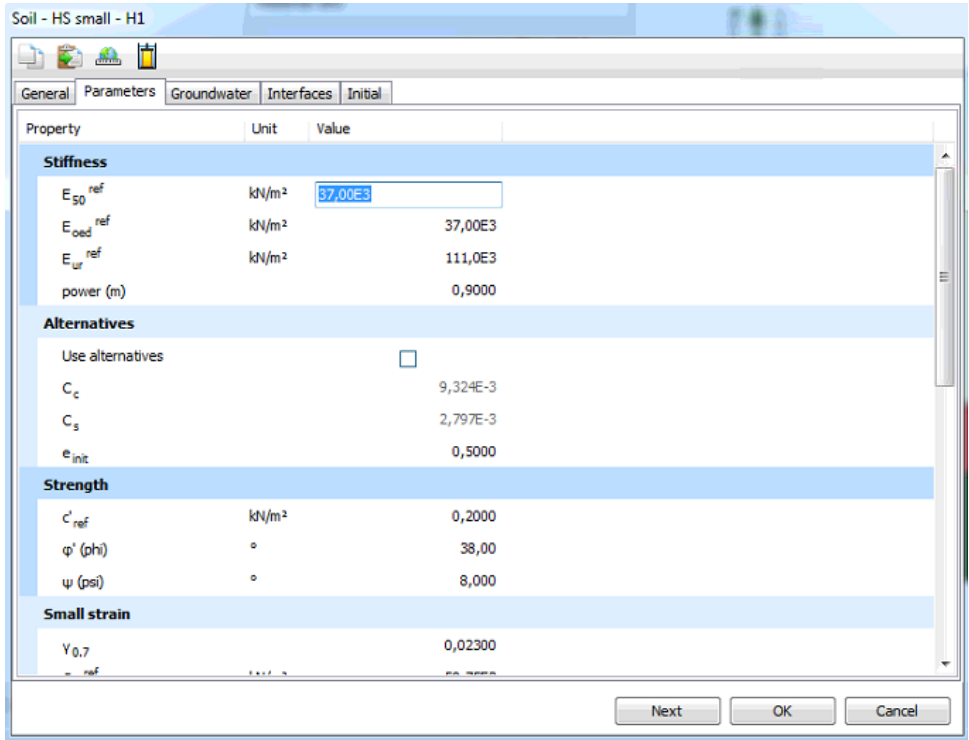


Figura 43. Ingreso Parámetros de Estratos en PLAXIS 2D

5.2.4 Estratigrafía del Depósito de Suelo

Para la estratigrafía del depósito, se define un elemento “Borehole” en el modelo geométrico, en donde se ingresan las profundidades de cada estrato, el material de cada uno de ellos y el nivel freático (Tipo Head), el cual se encuentra a 6,5 metros de profundidad con respecto a la superficie.

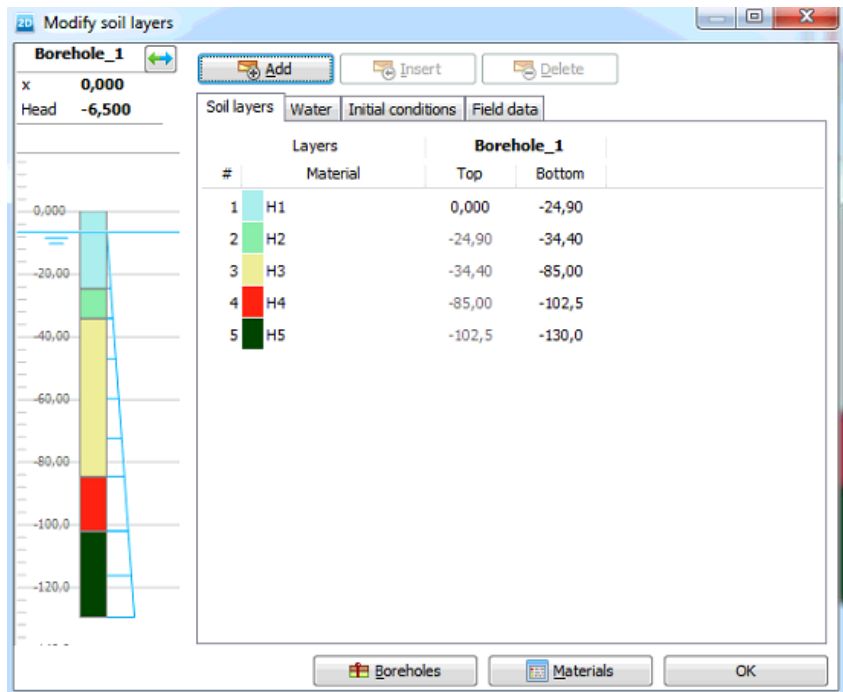


Figura 44. Definición Estratigrafía en PLAXIS 2D

5.2.5 Condiciones de Borde

Las condiciones de borde son de suma importancia para la modelación, ya que ellas entregan las propiedades necesarias a los contornos verticales y horizontal inferior del modelo. Las propiedades asociadas son las que definen la absorción, la fijación y los desplazamientos asociados al registro sísmico. Se procede a definir las tres propiedades definidas:

5.2.5.1 Condición de Borde: Absorción

El software PLAXIS 2D es capaz de proporcionar bordes absorbentes, esto para proporcionar continuidad en la refracción de las ondas sísmicas a través de las paredes verticales. Estos bordes absorbentes corresponden a amortiguadores viscosos, los cuales son definidos con dos parámetros: C_1 y C_2 . Estos parámetros son los encargados de controlar la disipación de las ondas, siendo C_1 el que disipa en dirección normal al borde y C_2 en dirección tangencial. Para efectos de este estudio se utilizan los valores que entrega el programa por defecto para estos parámetros ($C_1 = 1$ y $C_2 = 1$). A pesar de los valores utilizados para estos parámetros, es importante mencionar que para la relación geométrica ancho/altura mayor o igual a 2 que se utiliza, éstos no influyen de manera trascendental en los resultados obtenidos.

5.2.5.2 Condición de Borde: Fijación

La versión utilizada de PLAXIS 2D (versión 2015), proporciona de manera automática las condiciones de borde asociadas a la fijación, que son las siguientes:

- **Bordes Verticales:** Se les asigna fijación en el desplazamiento horizontal ($u_x = 0$).
- **Borde Horizontal Inferior:** Se le asigna una fijación completa, vale decir fijación en el desplazamiento horizontal y vertical ($u_x = u_y = 0$).

Cabe decir que estas condiciones de borde pueden ser editadas en la sección “Model Conditions” cuando se está trabajando en la pestaña “Stage Construction”. Para este estudio se utilizan las condiciones estándar implementados por el programa.

5.2.5.3 Condición de Borde: Desplazamiento Sísmico

Para poder ingresar el sismo en el modelo, se debe asignar al borde horizontal inferior un desplazamiento prescrito horizontal de valor unitario. Se coloca un valor unitario, ya que PLAXIS 2D trabaja con multiplicadores de carga, por lo tanto, se ingresa el registro sísmico como multiplicar a esta carga unitaria asignada al fondo del depósito. De esta forma, en las propiedades del desplazamiento prescrito, se debe asignar un desplazamiento horizontal de valor 1 metro y un valor nulo para el desplazamiento vertical, como se muestra en la siguiente imagen:

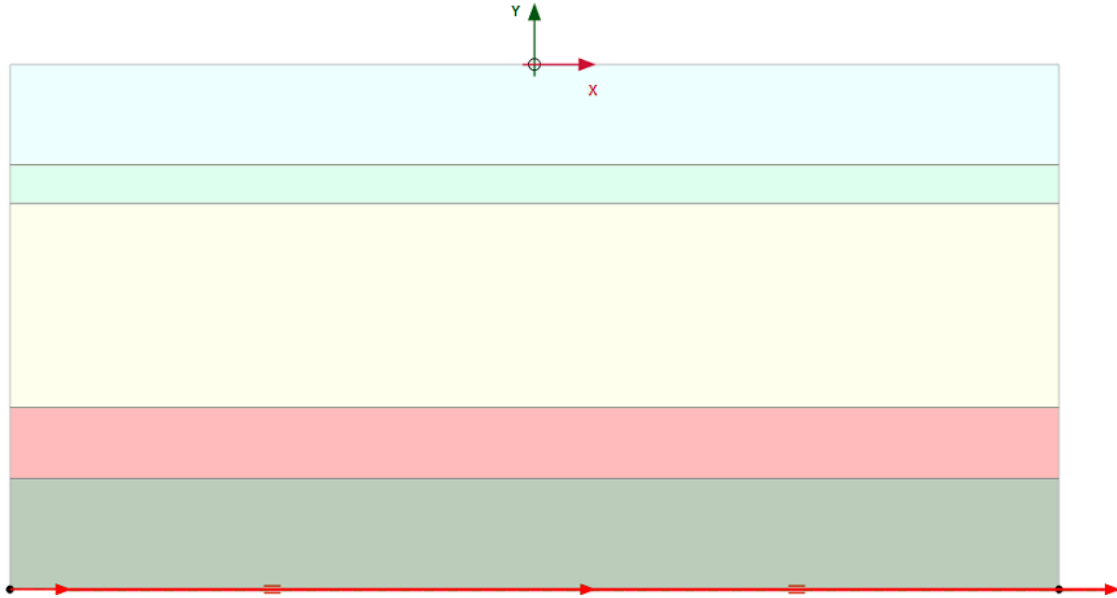


Figura 45. Desplazamiento Prescrito en PLAXIS 2D

Luego, el sismo funciona como multiplicador dinámico. Es importante ingresar el registro sísmico en las unidades que fueron definidas al inicio de la modelación, es decir, el tiempo en segundos y los desplazamientos en metros, por lo tanto, el registro sísmico de aceleraciones debe ser ingresado en m/s^2 .

Para poder asignar un registro sísmico como multiplicador dinámico, debe definirse el registro en la ventana de multiplicadores dinámicos. Como los registros están guardados en archivos de notas como tabla se debe seleccionar una señal tipo "Table" y como llevan información de las aceleraciones, se debe seleccionar como tipo de datos "Accelerations". No es necesario aplicar corrección de deriva, ya que todos los registros sísmicos a utilizar en los modelos comienzan en tiempo igual a cero. Las siguientes imágenes muestran el ingreso de los registros y el uso del amplificador dinámico.

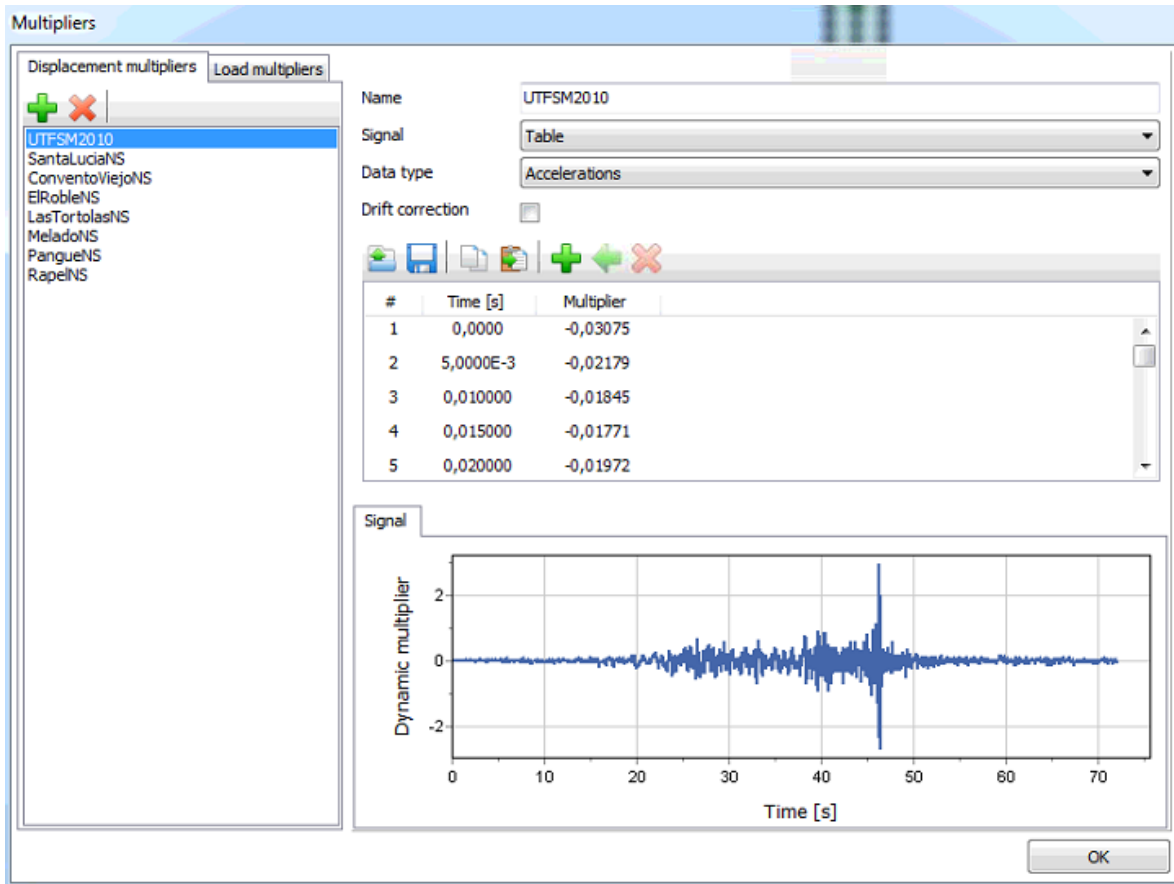


Figura 46. Ingreso Registros Sísmicos en PLAXIS 2D

5.2.6 Elementos Estructurales

En la pestaña “Structures” de PLAXIS 2D, podemos modelar los elementos estructurales necesarios para la estructura tipo especificada en la sección 3.2. Los elementos estructurales son modelados como tipo placa (plate) y para la interacción se genera un elemento de interacción “interface” en la zona del subterráneo. Se definen 3 tipos de elementos; pilar, viga y losa fundación. Es importante adicionar un subterráneo (no mencionado en la sección 3.2) que se modela de 2 metros de altura, para poder modelar el elemento de interacción entre el suelo y la estructura.

PLAXIS 2D, como lo menciona su nombre, trabaja con modelos de dos dimensiones, por lo tanto, se debe realizar una simplificación de la estructura tipo especificada en la sección 3.2. Por ende, para ingresar las propiedades de los elementos tipo pilar y viga al software, se utilizará el doble de la geometría especificada anteriormente. Para la viga se utilizará una geometría de 25 centímetros de ancho y 60 de alto, mientras que para el pilar se utilizará una geometría de 50 centímetros en la dirección longitudinal a las vigas y de 1 metro en dirección perpendicular al plano. Como elemento base del subterráneo se utiliza una losa de fundación de 40 centímetros de espesor. A continuación, se presenta una imagen del ingreso de datos al software y una tabla con los parámetros utilizados para cada elemento.

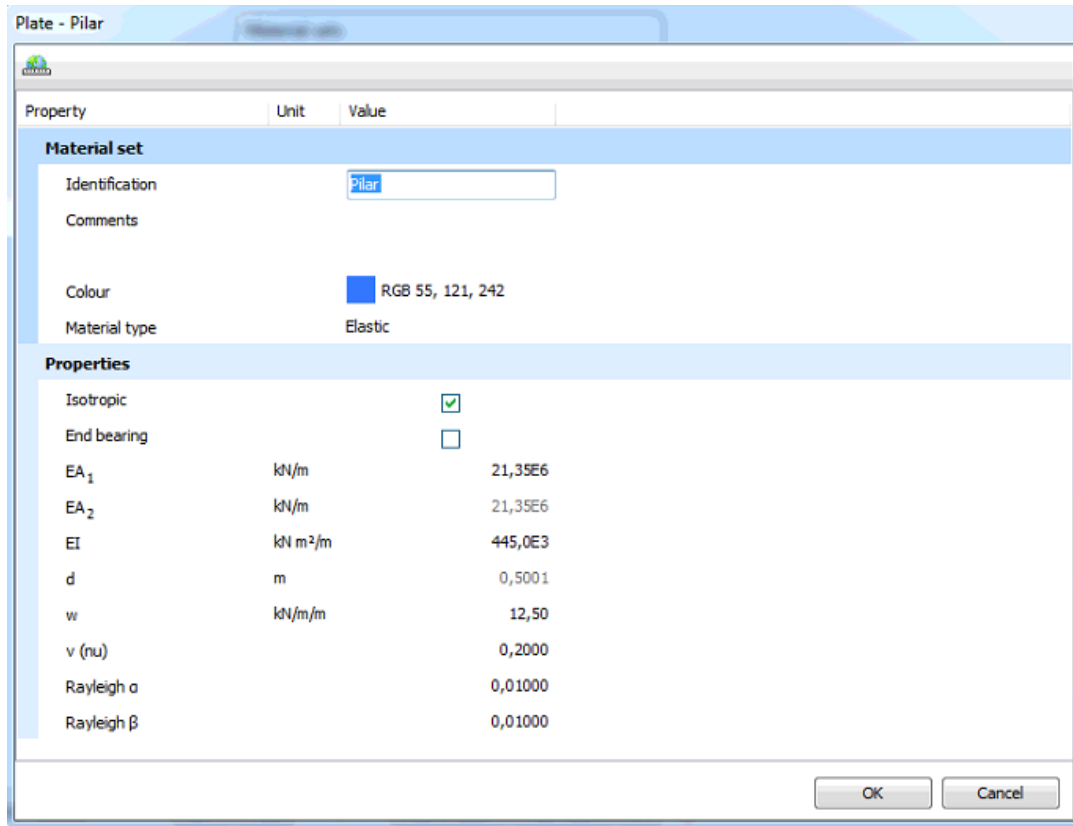


Figura 47. Ingreso Parámetros Elementos Tipo Placa en PLAXIS 2D

	Viga	Pilar	Losa Fundación
EA [kN-m ² /m]	25625520	21354600	8541840
EI [kN-m ² /m]	768766	445030	113892
Peso (w) [kN/m/m]	15	12,5	10
Módulo Poisson (ν)	0,2	0,2	0,2
α de Rayleigh	0,01	0,01	0,01
β de Rayleigh	0,01	0,01	0,01

Tabla 34. Valores Parámetros Elementos Estructurales

Teniendo definidos los elementos, se procede a dibujar los elementos en el modelo donde ya tenemos la estratigrafía del suelo, asignando los elementos que correspondan según sea viga, pilar o losa de fundación. Para modelar la interacción suelo estructura se debe seleccionar el elemento estructural tipo “interface” y se dibuja sobre pilares y losa de fundación. Es importante que el sentido de este elemento quede con la interacción hacia fuera de la estructura. Se mantienen las definiciones que entrega el programa por defecto para este elemento.

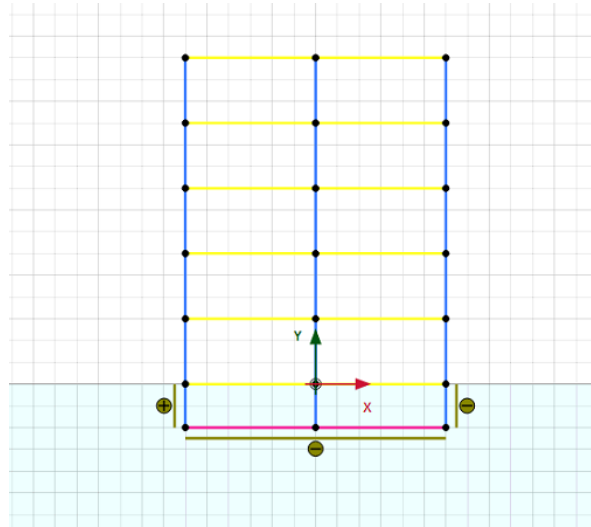


Figura 48. Modelación Interacción Suelo – Estructura

5.2.7 Malla de Elementos Finitos

Para generar la malla de elementos finitos hay que dirigirse a la pestaña “Mesh”, en donde podemos seleccionar el tipo de malla que deseamos utilizar. Para este estudio, seleccionamos para todos los suelos utilizados la opción “Very Fine” para el mallado, con el motivo de obtener resultados más precisos. Además, como se modelará la interacción entre el suelo y la estructura, es de suma importancia generar una continuidad óptima en la transferencia de desplazamientos entre ambos.

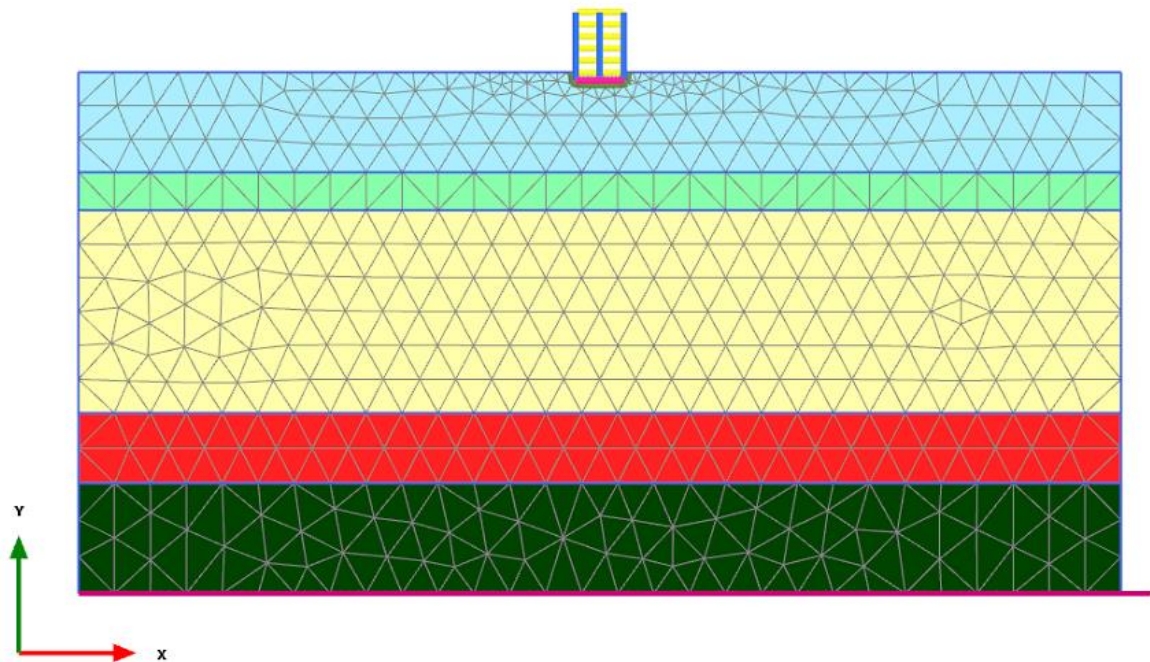


Figura 49. Malla de Elementos Finitos en PLAXIS 2D

5.2.8 Fases de Cálculo

Las fases de cálculo y los parámetros dinámicos para el cálculo son definidos en la pestaña “Stage Construction”. PLAXIS 2D Input realiza el cálculo por fases progresivas, las cuales son definidas en esta sección por el usuario. En este estudio se cuenta con dos tipos de modelos que fueron explicadas anteriormente.

Para el caso de la modelación de “2 Pasos”, no se cuenta con la estructura en el modelo de PLAXIS, por lo que solo es necesario definir dos fases: una primera fase definida por defecto por el programa, que representa la situación inicial del depósito según lo ingresado en las pestañas anteriores. Los cálculos obtenidos en esta primera fase sirven como datos de partida para los cálculos de la segunda fase, que corresponde al sismo. La primera fase es instantánea, por lo que no tiene duración, no así la segunda fase que durará lo que dure el registro sísmico.

Para el otro tipo de modelación en que sí se considera la estructura dentro de la modelación, se consideran 3 fases, agregando una fase intermedia a las mencionadas anteriormente para el otro tipo de modelación. Por lo tanto, la fase 1 y la 3 corresponden a la fase inicial del programa y a la fase sísmica respectivamente. La fase dos corresponde a la construcción de la estructura, por lo que se activan los elementos estructurales y la interacción suelo-estructura.

5.2.8.1 Tipos de Análisis

- **Fase de Construcción Estructura:** Para esta fase se dejan los parámetros que trae el programa por defecto, es decir, se utiliza un tipo de análisis plástico. En la ventana de “Phases” se debe seleccionar “Reset displacements to zero” de la sección “Deformation control parameters”, esto para resetear los desplazamientos a cero al iniciar esta fase.
- **Fase de Registro Sísmico:** Para esta fase el tipo de análisis que se selecciona es el “Dynamic Analysis”, cuyos parámetros se definen a continuación.

5.2.8.2 Parámetros Fase Dinámica

Para esta fase dinámica se deben seleccionar los pasos adicionales en la sección “Numerical Control Parameters”. Para poder ingresar los parámetros en esta sección se debe seleccionar la opción de ingreso manual. De esta forma podemos ingresar los pasos adicionales “Max Steps”, que corresponden a los puntos que el software va tomando del registro sísmico ingresado para el cálculo. De esta forma cada punto almacenará distintos tipos de información correspondientes a un instante del sismo, por lo tanto, cuando se generen los desplazamientos o aceleraciones de respuesta posteriores al análisis, éstos tendrán una cantidad de puntos igual a la cantidad de pasos adicionales.

Cabe mencionar que todos los registros sísmicos a utilizar cuentan con una cantidad bastante grande de puntos y PLAXIS 2D es capaz de almacenar información para un máximo de 10000 pasos. Para estas situaciones se cuenta con los sub pasos dinámicos, que corresponden a la cantidad de intervalos en el que se divide el intervalo entre un paso adicional y el siguiente. Esta operación se

utiliza para poder tomar todos los puntos del registro. Es por esta razón que se recomienda que el producto entre los sub pasos dinámicos y los pasos adicionales sea igual a la cantidad de puntos que tenga el registro. En caso contrario el programa interpolará, lo que podría provocar posibles incongruencias en la obtención de resultados, y además que esto genera mayor demanda computacional, por ende, mayor tiempo de duración del análisis. La siguiente tabla muestra la cantidad de pasos adicionales y sub pasos dinámicos utilizados para cada registro en la modelación:

Estación	Duración Ajustada [s]	Pasos Adicionales (Max Steps)	Sub Pasos Dinámicos
Convento Viejo	295	5900	5
El Roble	198	6600	3
Las Tórtolas	297	6600	9
Melado	84	5600	3
Puangue	189	6300	3
Rapel	87	2900	3
Santa Lucia	147	4900	3
UTFSM	72	7200	2

Tabla 35. Parámetros Dinámicos de Registros Sísmicos para Modelación en PLAXIS 2D

Para el resto de los parámetros se utilizan los valores por defecto que trae el software.

5.2.8.3 Selección de Puntos de la Malla

Antes de realizar el cálculo de las fases, es importante seleccionar los puntos de importancia de la grilla, de los cuales se va requerir información.

Para el caso de modelación “2 Pasos” se requerirá la información de la aceleración en la superficie, por lo tanto, seleccionamos ese punto previo al análisis. Se selecciona además la proyección de este punto en la roca basal, de forma de poder generar un gráfico comparativo entre las dos aceleraciones y poder apreciar eventuales amplificaciones o atenuaciones del registro de aceleraciones aplicado en la roca basal.

Por otra parte, para la modelación de interacción suelo estructura, se requerirán los mismos dos puntos especificados anteriormente, además de puntos en el eje central de la estructura en cada piso. Esto debido a que para el análisis de resultados se utilizará el desplazamiento entre pisos como indicador de demanda sísmica estructural, esto será detallado más claramente en la sección 7 de resultados.

PLAXIS 2D permite obtener información de puntos de la malla previos al cálculo (pre-calc) y posterior al cálculo (post-calc). La diferencia entre estos tipos es que sólo para los puntos asignados previos al cálculo es posible obtener información de cada paso adicional del sismo, mientras que para los puntos seleccionados posteriores al cálculo solo se puede extraer información al comienzo y final de cada fase de cálculo. El software permite la selección de máximo 10 puntos previos al análisis, por lo tanto, para la modelación con la estructura de 5 pisos bastará solo con una corrida del software para obtener la información de los 8 puntos seleccionados (roca basal, 2 puntos de superficie y uno para cada piso). En cambio, para las estructuras de 10 y 15 pisos se requerirá de

dos corridas del software para poder obtener la información requerida, lo que demanda una mayor cantidad de tiempo computacional. En las Figuras 50 y 51 se muestra un esquema de la sección de puntos previos al análisis.

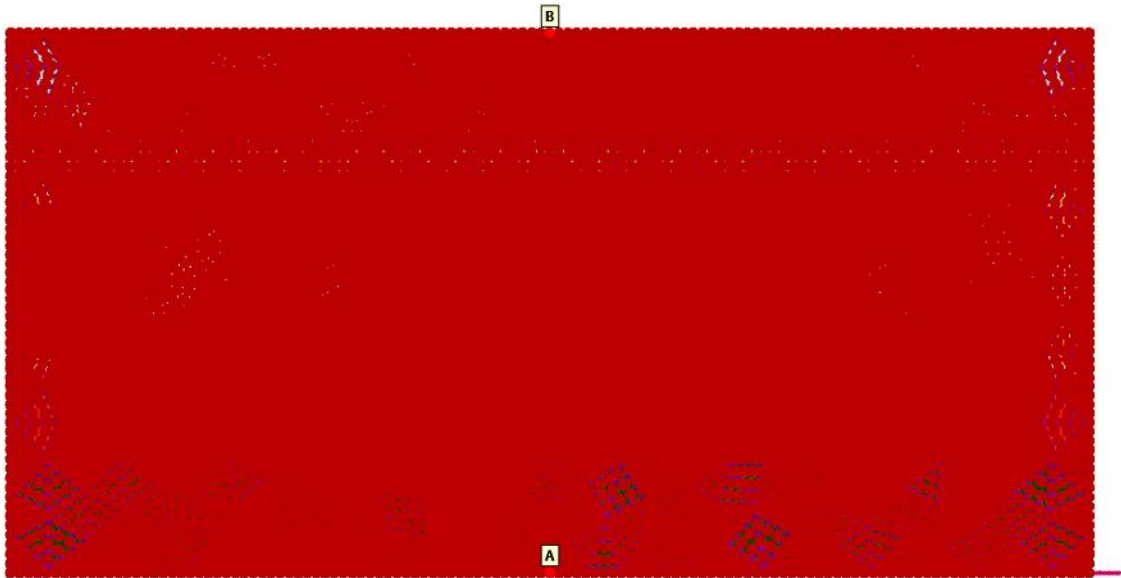


Figura 50. Elección de Puntos de Malla Roca Basal y Superficie

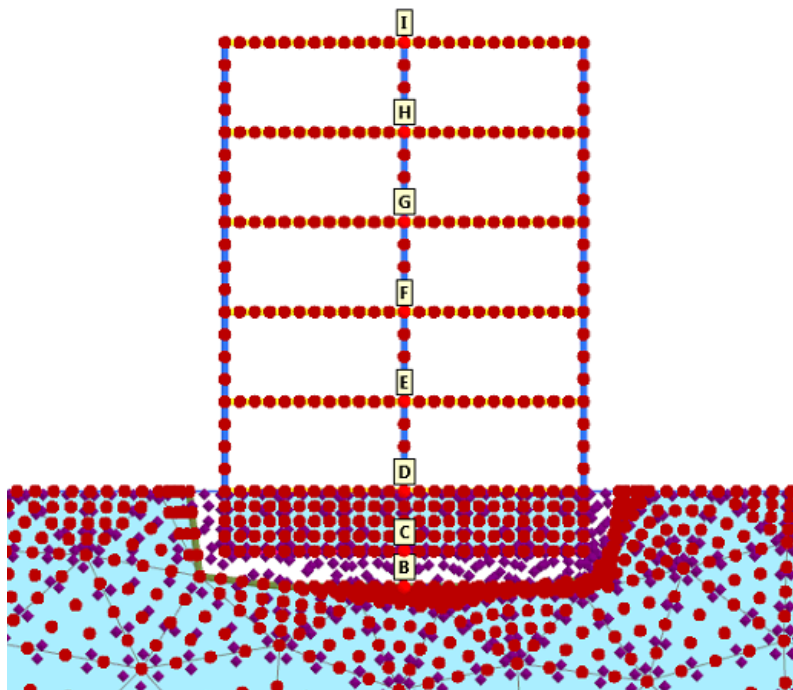


Figura 51. Elección de Puntos en Estructura

6. Modelación en ETABS 2015

Como se mencionó anteriormente se utilizarán dos tipos de modelaciones, y el software ETABS 2015 se utilizará para el tipo de modelación que analiza la estructura con base fija y el ingreso del registro amplificado en la superficie. El método de trabajo con este software será de ingresar mediante un registro tiempo-historia (time-history), que provienen del registro amplificado en los 5 suelos utilizados en este estudio. Esto se aplicará a una estructura tipo de 5, 10 y 15 pisos de altura. Se procede a detallar los pasos para la modelación en el software ETABS 2015.

6.1 Definición de Grilla y Pisos

Como información inicial, el programa requiere de una grilla para una mayor comodidad en la modelación de los elementos estructurales a utilizar.

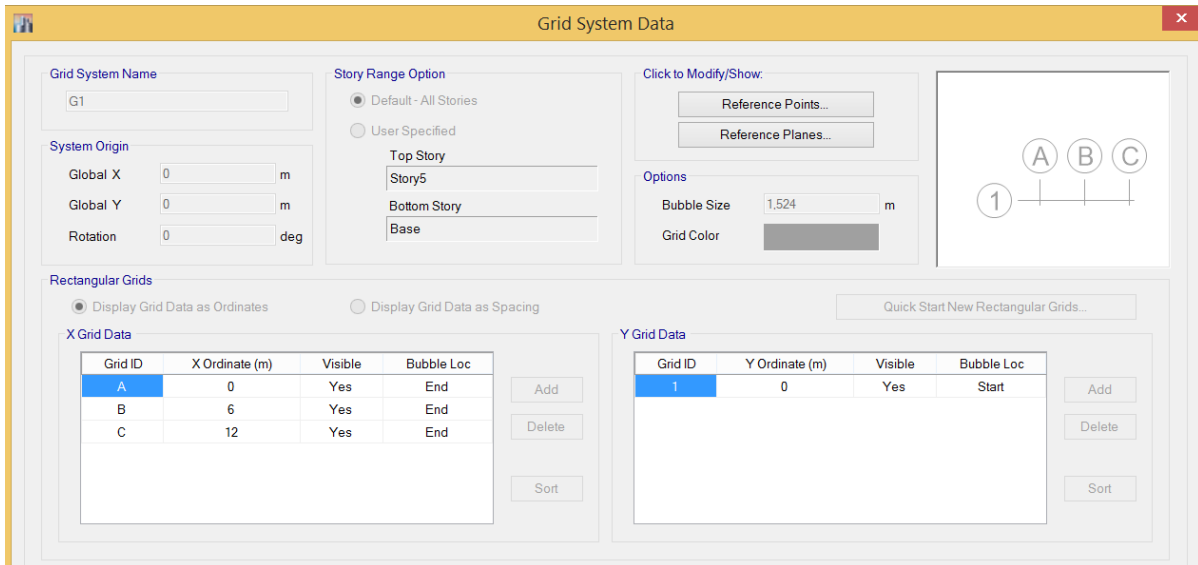


Figura 52. Definición Grilla ETABS 2015

Como se realizará una simplificación de la estructura definida en la sección 3.2 a una modelación en dos dimensiones, se define una coordenada para el eje Y y 3 coordenadas para el eje X para la ubicación de los pilares; en 0, 6 y 12 metros.

Story	Height m	Elevation m	Master Story	Similar To	Splice Story	Splice Height m	Story Color m
Story5	3	15	Yes	None	No	0	Blue
Story4	3	12	No	Story5	No	0	Green
Story3	3	9	No	Story5	No	0	Cyan
Story2	3	6	No	Story5	No	0	Red
Story1	3	3	No	Story5	No	0	Magenta
Base		0					

Figura 53. Definición de Pisos ETABS 2015

Se ingresa la cantidad de pisos de la estructura y la altura de cada uno de ellos que corresponde a 3 metros como se mencionó en la sección 3.2.

6.2 Definición de Materiales

Para la estructura a analizar sólo será necesaria la definición del material de hormigón H-25 para los pilares y columnas. Las distintas propiedades se definieron en la sección 3.2 y se ingresan en el software como sigue:

Section	Property	Value	Unit
General Data	Material Name	H25	
	Material Type	Concrete	
	Directional Symmetry Type	Isotropic	
	Material Display Color	Cyan	
	Material Notes		
Material Weight and Mass	Weight per Unit Volume	2500	kgf/m³
	Mass per Unit Volume	254.929	kgf-s²/m⁴
Mechanical Property Data	Modulus of Elasticity, E	2135000000	kgf/m²
	Poisson's Ratio, U	0.2	
	Coefficient of Thermal Expansion, A	0.0000099	1/C
	Shear Modulus, G	889583333	kgf/m²
Design Property Data	Modify/Show Material Property Design Data...		
Advanced Material Property Data	Nonlinear Material Data...		
	Material Damping Properties...		
	Time Dependent Properties...		

Figura 54. Definición Material H-25 ETABS 2015

6.3 Definición de Elementos Estructurales

La estructura a estudiar se compone de marcos con elementos tipo viga y columna (frame). Como se trata de una simplificación a un modelo en dos dimensiones, se adaptarán las geometrías de estos elementos al doble, de tal forma de conservar las propiedades como si fueran dos elementos. Por lo tanto, para la viga se modelará con geometría de 50 centímetros de ancho y 60 centímetros de alto y para el pilar una geometría de 50 centímetros en el eje longitudinal a las vigas y de 1 metro en el eje transversal al plano. Se definen estos elementos de la siguiente forma:

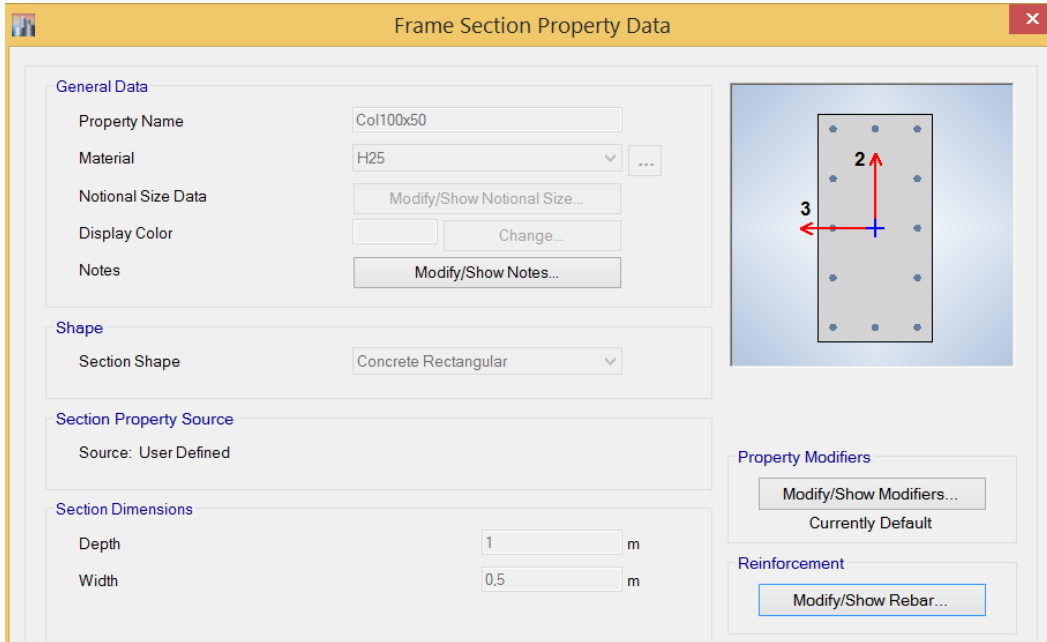


Figura 55. Definición Elemento Pilar 100x50 ETABS 2015

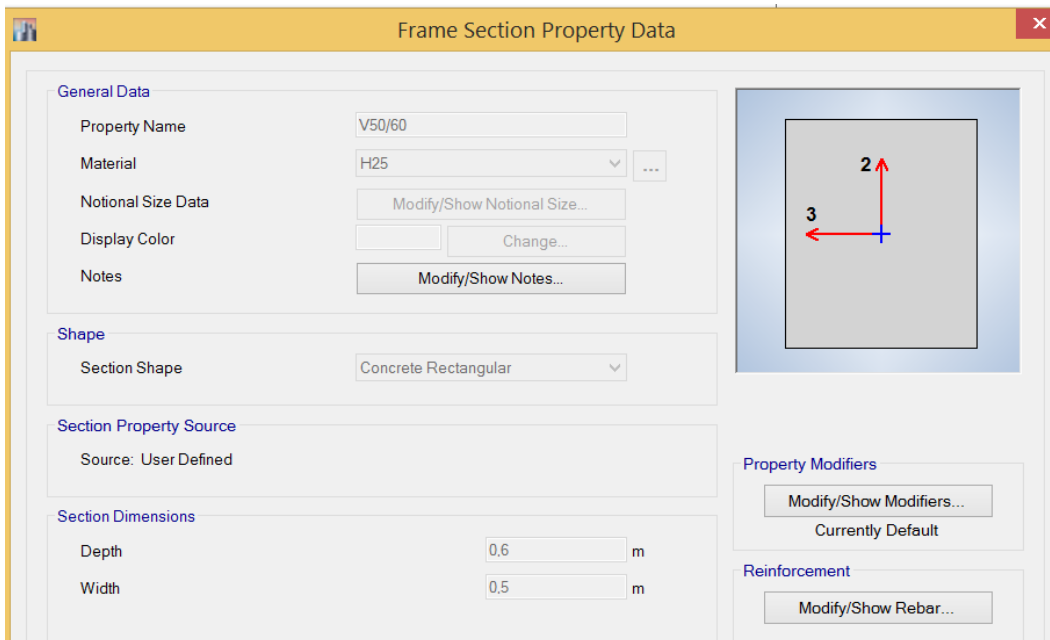


Figura 56. Definición Elemento Viga 50x60

Se selecciona la viga como elemento tipo viga para que al efectuar el diseño sea solo considerando momentos entorno al eje 3 (sentido gravitacional) según se ve en el esquema de la viga; esto en el caso que se requiera que el programa calcule la armadura necesaria para la viga. En el caso de la columna, se define como tipo columna para que en los esfuerzos se consideren cargas axiales y momentos entorno a los dos ejes, de tal forma de poder general el diagrama de interacción del elemento.

Al tener los elementos definidos se procede a dibujar los elementos con ayuda de las grillas, quedando planta y elevación de la siguiente forma.

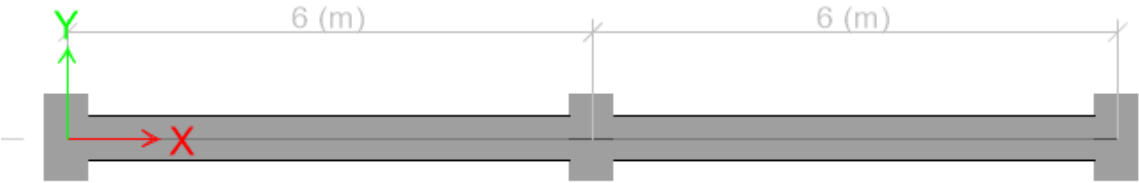


Figura 57. Vista en Planta Modelo ETABS 2015

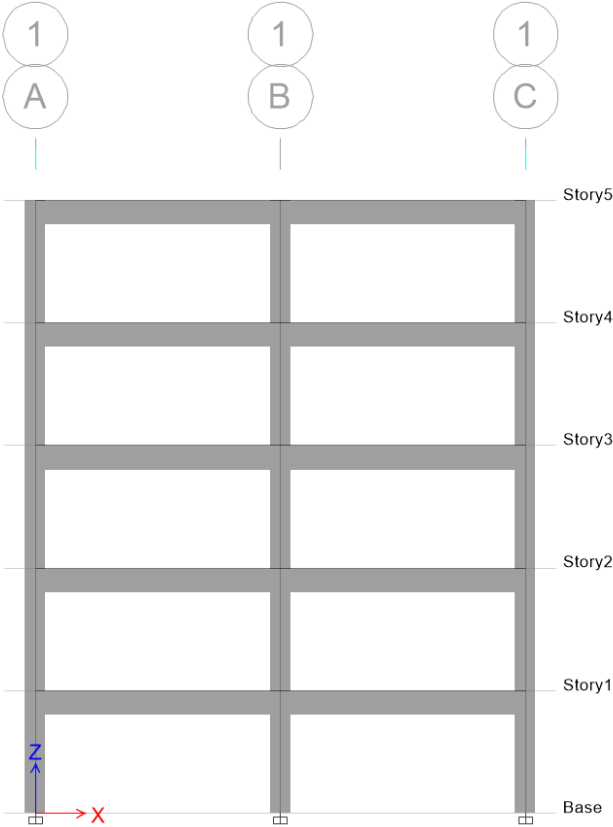


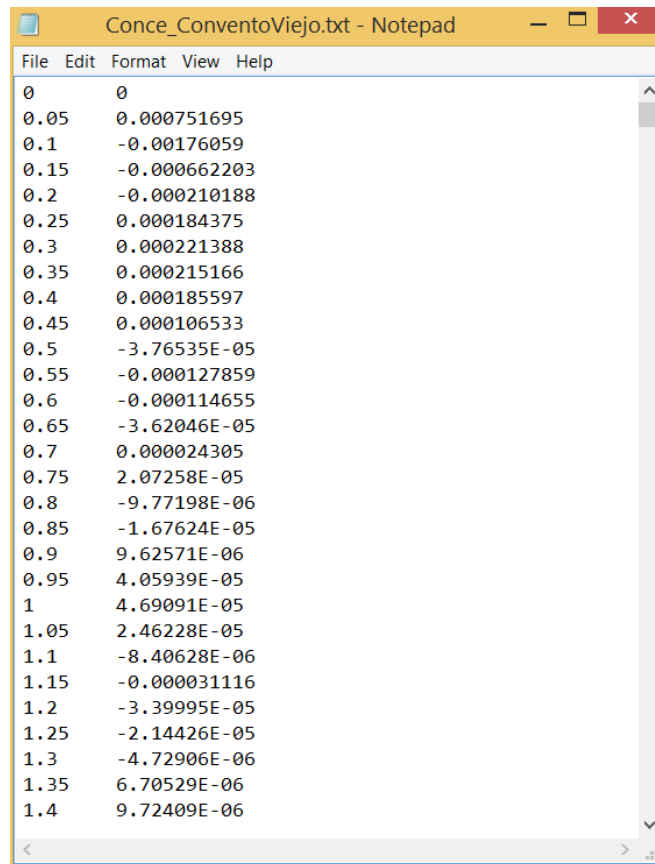
Figura 58. Elevación Modelo ETABS 2015

6.4 Tipo de Apoyo

Para los apoyos de los elementos columna, se considera empotramiento en la base, esto debido a que las fundaciones utilizadas para los elementos de hormigón armado proveen la rigidez necesaria siempre y cuando se realice un correcto detallamiento del anclaje de la armadura de los pilares a la fundación. Para ingresar el empotramiento en la base de las columnas se debe seleccionar los puntos de la base y asignar un “Joint Restraints” haciendo click en el tipo de apoyo que se requiere.

6.5 Ingreso Registro Sísmico

Para el ingreso del registro sísmico basal al modelo, se utiliza el método de análisis de tiempo-historia. Se cuenta con 40 registros amplificados en la superficie, considerando las 8 estaciones y los 5 suelos estudiados. Para poder ingresar el registro en el software se debe crear un archivo de notas con dos columnas, en donde una de ellas debe tener el tiempo y la otra las aceleraciones. De esta forma, de cada uno de los registros amplificados obtenidos del software PLAXIS 2D, se genera un archivo de nota, como sigue:



Time	Acceleration
0	0
0.05	0.000751695
0.1	-0.00176059
0.15	-0.000662203
0.2	-0.000210188
0.25	0.000184375
0.3	0.000221388
0.35	0.000215166
0.4	0.000185597
0.45	0.000106533
0.5	-3.76535E-05
0.55	-0.000127859
0.6	-0.000114655
0.65	-3.62046E-05
0.7	0.000024305
0.75	2.07258E-05
0.8	-9.77198E-06
0.85	-1.67624E-05
0.9	9.62571E-06
0.95	4.05939E-05
1	4.69091E-05
1.05	2.46228E-05
1.1	-8.40628E-06
1.15	-0.000031116
1.2	-3.39995E-05
1.25	-2.14426E-05
1.3	-4.72906E-06
1.35	6.70529E-06
1.4	9.72409E-06

Figura 59. Registro Sísmico en Archivo de Nota

Teniendo el archivo de notas con el registro, es posible ingresarlo al software ETABS 2015 en la sección de funciones tiempo-historia. Se toma la opción “from file” para ingresar el archivo de notas y luego se selecciona la opción “Convert to User Define” para que no tenga que llamar al archivo y el registro quede guardado dentro del modelo.

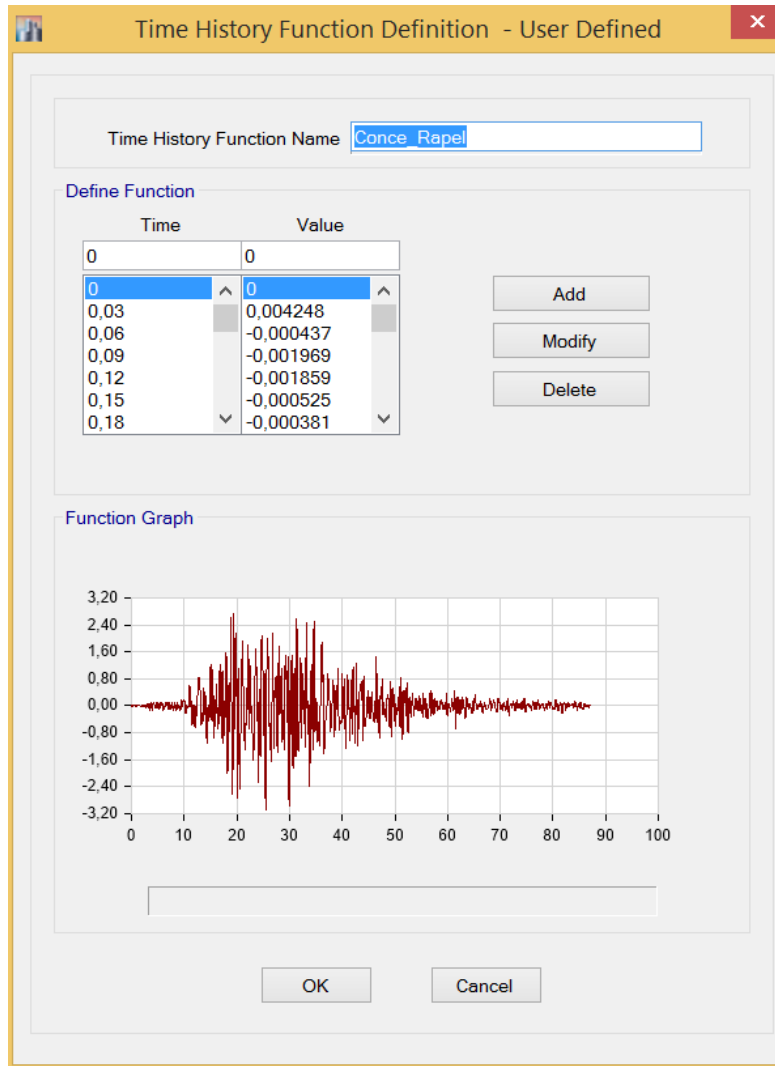


Figura 60. Ingreso Registro Sísmico en ETABS 2015

Una vez definida la función, hay que definir el “Load Case”, en donde se define la forma de aplicación del registro en el modelo. Como se ve en la Figura --, se define el tipo de “Load Case” como tiempo-historia con integración lineal directa, ya que no se considerarán efectos no lineales en el análisis, al igual como se definió en los elementos estructurales en PLAXIS 2D. Se asigna el registro correspondiente en dirección U1 que corresponde a la dirección en el eje X, con un factor de amplificación igual a 1, ya que el registro ya viene en unidades de m/s^2 . Finalmente se ingresa la cantidad de pasos dinámicos, el tamaño en tiempo de cada paso y el método de integración de tiempo. Se utiliza el mismo método de integración que en PLAXIS 2D, que es Newmark con los valores por defecto que trae el software para sus parámetros, que corresponden a los mismos valores que usa por defecto PLAXIS 2D. Además, se ingresan los mismos parámetros de

amortiguamiento usados en PLAXIS 2D, que corresponden a 0,01 para el coeficiente asociado a la masa y 0,01 para el coeficiente asociado a la rigidez. La Figura 61 muestra el ingreso de datos.

Load Case Data

General

Load Case Name: Conce_ConventoViejo

Load Case Type/Subtype: Time History / Linear Direct Integration

Exclude Objects in this Group: Not Applicable

Mass Source: MsSrc1

P-Delta/Nonlinear Stiffness

Use Preset P-Delta Settings: None

Use Nonlinear Case (Loads at End of Case NOT Included)

Nonlinear Case:

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U1	Conce_ConventoVi...	1

Other Parameters

Number of Output Time Steps: 5901

Output Time Step Size: 0,05 sec

Proportional Damping: Mass: 0,01; Stiff: 0,01

Time Integration: Newmark

Figura 61. Aplicación del Registro Sísmico al Modelo en ETABS 2015

Time Integration Parameters

Method

Newmark: Gamma = 0,5, Beta = 0,25

Wilson: Theta

Collocation: Gamma, Beta, Theta

Hilber-Hughes-Taylor: Gamma, Beta, Alpha

Chung and Hulbert: Gamma, Beta, Alpha, Alpha-m

Figura 62. Coeficientes de Newmark Considerados

7. Resultados

7.1 Registros de Aceleraciones

En esta primera sección de los resultados obtenidos del análisis se hace una comparación de los registros de aceleraciones obtenidos en superficie extraídos del software PLAXIS 2D. Del sub programa PLAXIS 2D Output se extrae el registro de aceleraciones en la superficie para 4 casos de cada registro aplicado en cada suelo; para suelo sin estructura, suelo con estructura de 5 pisos, suelo con estructura de 10 pisos y suelo con estructura de 15 pisos. A modo de ejemplo se muestra en la Figura 63 los registros de los distintos casos y además se incluye el registro de la roca basal, para el registro de Las Tórtolas en el suelo de Viña del Mar.

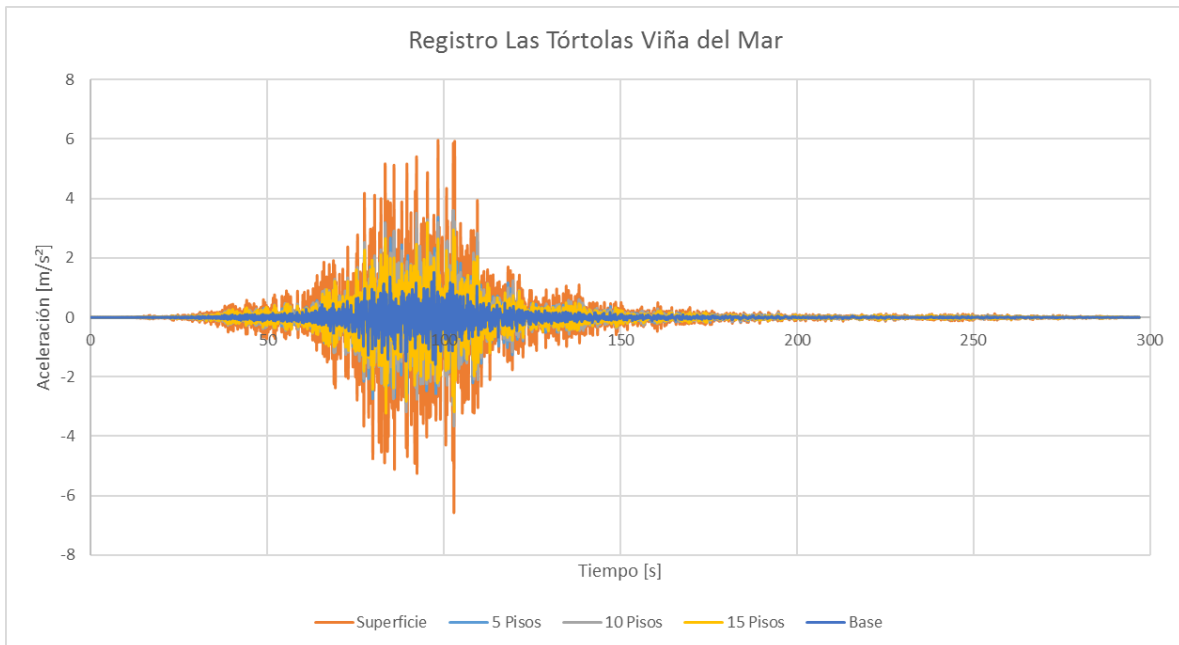


Figura 63. Registro Las Tórtolas Viña del Mar

Como se cuenta con 40 casos de este tipo ilustrado en la imagen anterior, resulta más cómodo comparar los resultados en formato de gráficos separados por suelo, en donde se muestran los peaks de aceleraciones para cada caso. En el capítulo 11 de anexos se presentan las tablas con los valores numéricos más precisos. Se presentan los gráficos mencionados a continuación:

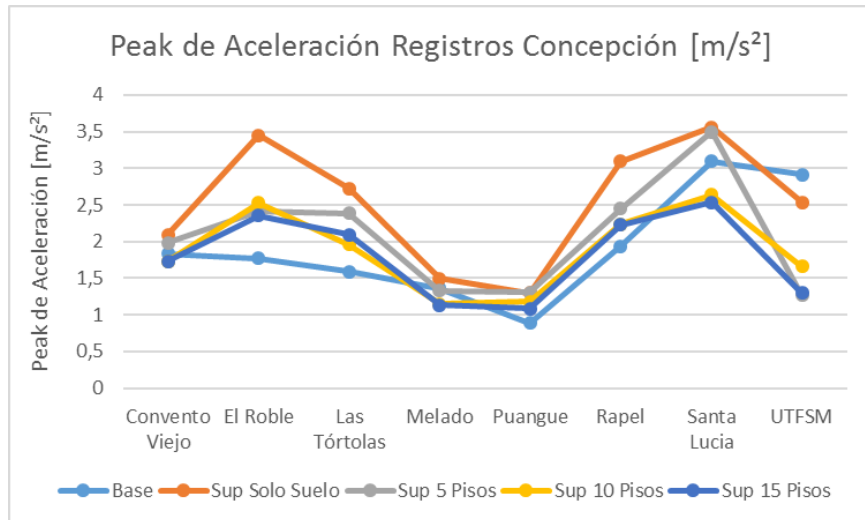


Figura 64. Peaks de Aceleración Registros Suelo Concepción

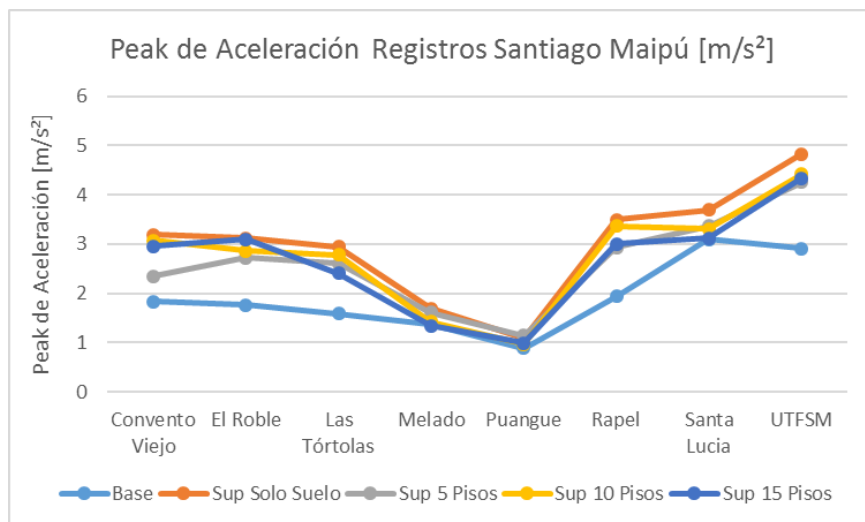


Figura 65. Peaks de Aceleración Registros Suelo Santiago Maipú

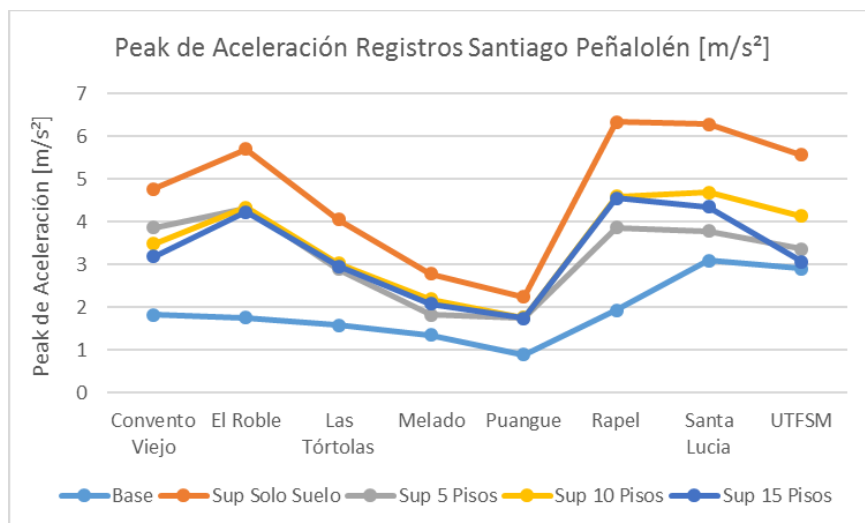


Figura 66. Peaks de Aceleración Registros Suelo Santiago Peñalolén

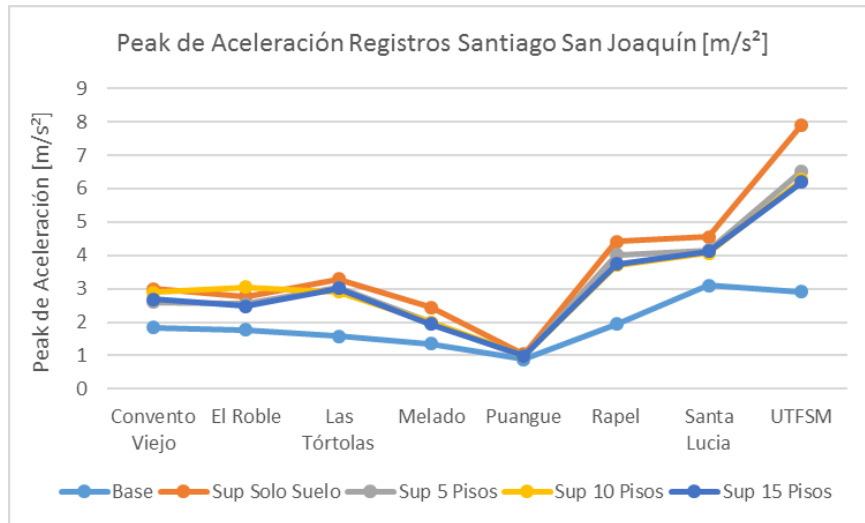


Figura 67. Peaks de Aceleración Registros Suelo Santiago San Joaquín

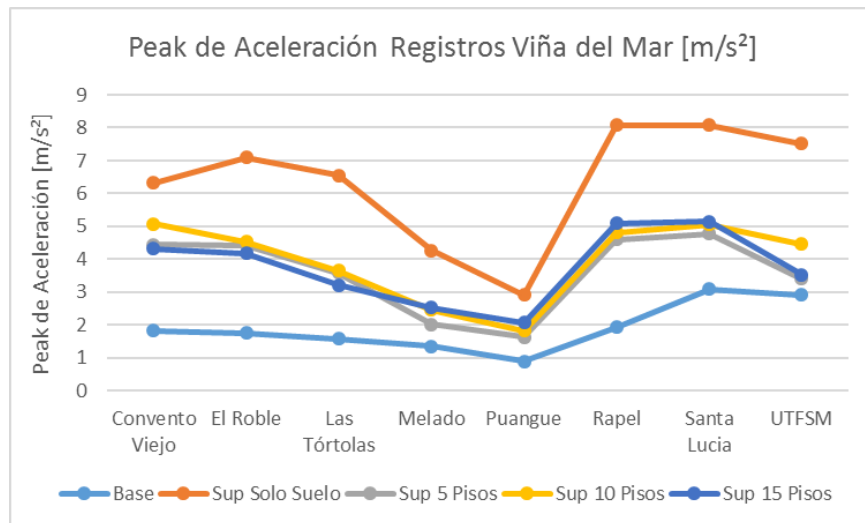


Figura 68. Peaks de Aceleración Registros Suelo Viña del Mar

Ahora bien, para poder tener un indicador un poco más estandarizado para poder realizar comparaciones más directas, se propone el Factor de Amplificación del registro sísmico calculado de la siguiente forma:

$$\text{Factor Amplificación} = \frac{\text{Peak Aceleración Base}}{\text{Peak Aceleración Superficie}}$$

De esta forma se generan los siguientes gráficos filtrados también por suelo (valores numéricos más precisos en Capítulo 11 de anexos).

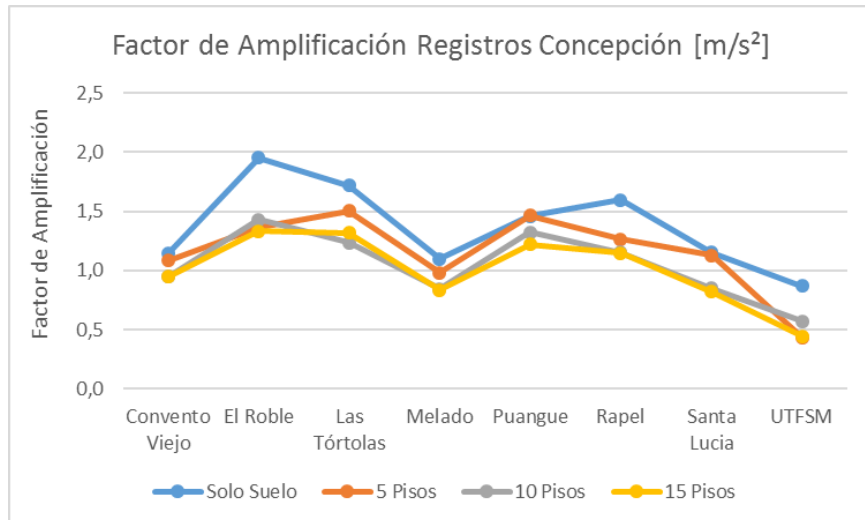


Figura 69. Factor de Amplificación Registros Suelo Concepción

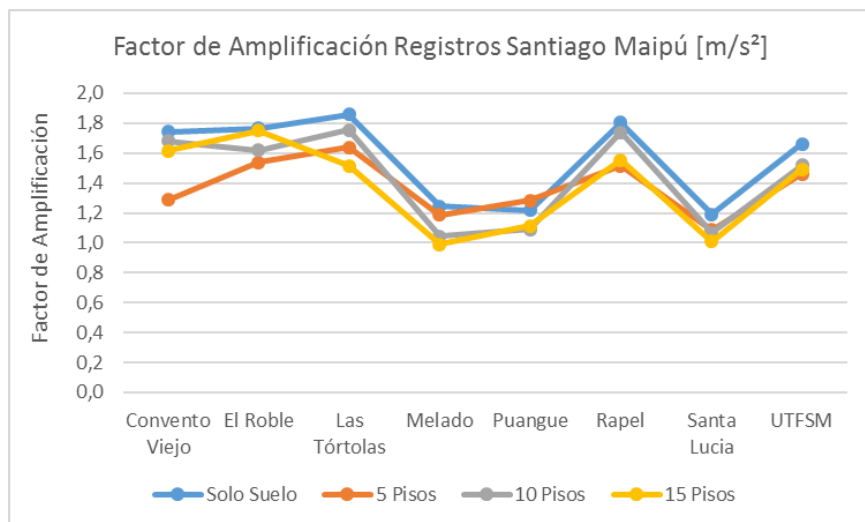


Figura 70. Factor de Amplificación Registros Suelo Santiago Maipú

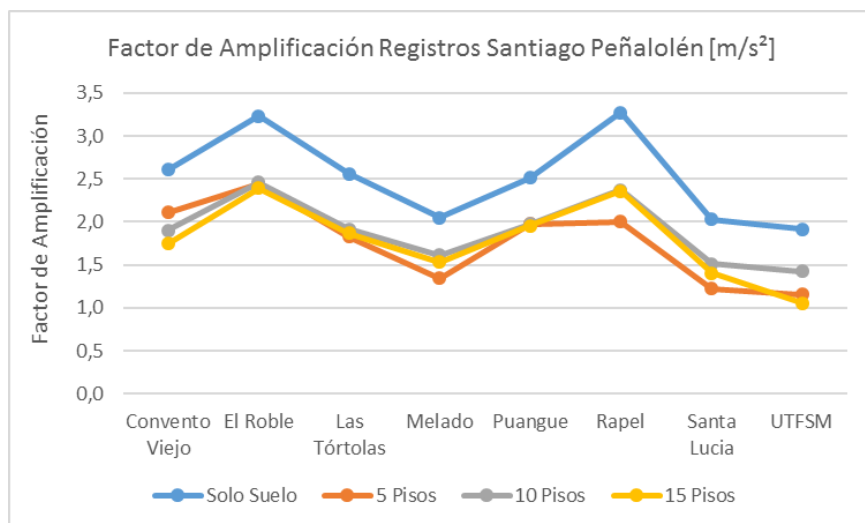


Figura 71. Factor de Amplificación Registros Suelo Santiago Peñalolén

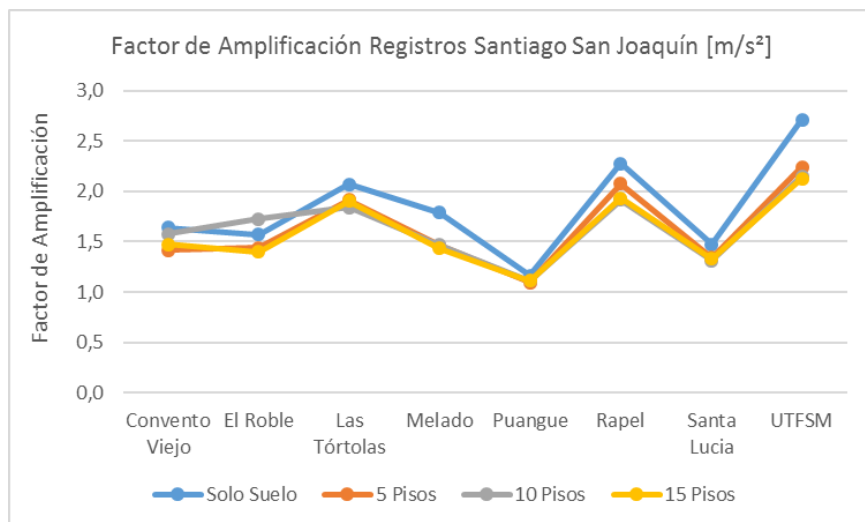


Figura 72. Factor de Amplificación Registros Suelo Santiago San Joaquín

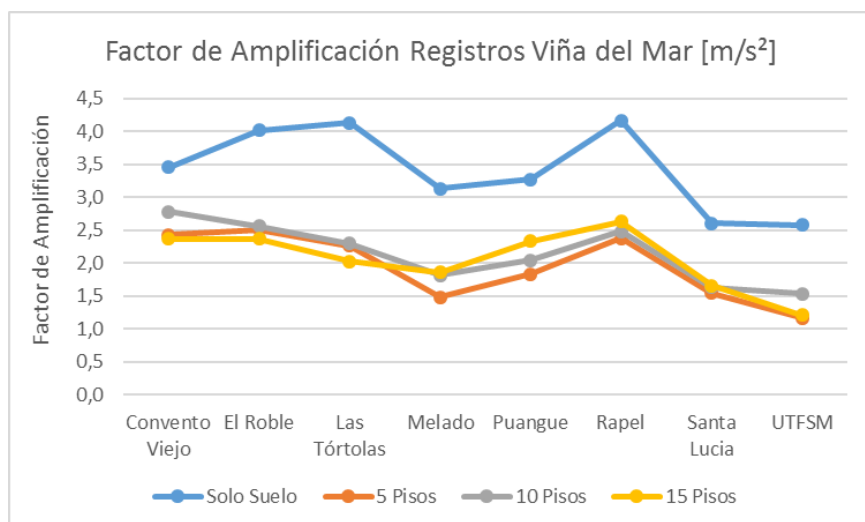


Figura 73. Factor de Amplificación Registros Suelo Viña del Mar

Observando los peaks de aceleraciones obtenidos en la superficie, podemos observar una amplificación de la onda sísmica desde la roca base a la superficie en prácticamente todos los casos. En solo 12 de los 160 casos se observa una atenuación de la onda sísmica hacia la superficie, de los cuales 11 corresponden al suelo de Concepción y 1 al suelo de Santiago Maipú. Si bien no existe una tendencia clara de acuerdo a los resultados obtenidos, la atenuación de la onda sísmica para los 11 casos del suelo de Concepción puede deberse a su período fundamental alto con respecto al resto de los suelos que no presentan esta situación. Además, los parámetros de amortiguación de Rayleigh dependen del período fundamental del suelo, por lo tanto, podemos apreciar que dependiendo de su valor se puede provocar una atenuación de la onda sísmica, y por ello, la importancia de considerarlos en la modelación. De todas formas, el motivo de este estudio nos es analizar el fenómeno de amplificación/atenuación de la onda sísmica, si no que evaluar las diferencias cuando se considera la interacción suelo-estructura bajo condiciones de comportamiento dinámico.

De esta forma, comparando los resultados obtenidos, podemos observar una reducción en los peaks de aceleraciones en superficie obtenidos en los modelos que consideran la estructura dentro del modelo con respecto a los modelos que solo consideran el depósito de suelo. Solo 3 casos de los 120 no coinciden con esta situación y se presentan; uno en el suelo de Concepción con el registro sísmico de la estación de Puangue y con la estructura de 5 pisos, el segundo en el suelo de Santiago Maipú con el registro sísmico de la estación de Puangue y con la estructura de 5 pisos, finalmente el tercero en el suelo de Santiago San Joaquín con el registro sísmico de la estación de El Roble y la estructura de 10 pisos. En general, se puede concluir que al considerar la estructura dentro de la modelación se provoca una reducción en las aceleraciones de la onda sísmica obtenidas en la superficie de los suelos analizados. Esto puede deberse a que con la presencia de la estructura se genera una compactación en el suelo, y considerando lo estudiado en las memorias de Mancilla (2013) y Peña (2014), que para estratos de suelo poco densos y poco rígidos se genera mayor amplificación de la onda sísmica desde la roca basal a la superficie. En el siguiente análisis veremos si esta reducción genera una ayuda en la demanda sísmica estructural, que corresponde a lo que se busca evaluar en este estudio.

7.2 Demanda Sísmica Estructural

Los resultados obtenidos en la sección anterior con respecto a la amplificación de la onda sísmica desde la roca basal a la superficie, ya fue analizado de cierta forma por los memoristas, de los cuales recopilamos información para poder realizar este estudio (Mancilla, 2016) (Neira, 2014) (Peña, 2014). El aporte de este informe comienza en esta sección al observar las diferencias en las demandas sísmicas estructurales comparando los dos tipos de modelaciones especificados en las secciones anteriores.

Como debemos comparar resultados provenientes de los softwares PLAXIS 2D y ETABS 2015, se debe utilizar un indicador de comparación que sea posible obtener de ambos. ETABS 2015 es un software bastante más desarrollado para el análisis estructural que PLAXIS 2D, por lo tanto, debemos seleccionar un indicador que nos permita medir demanda estructural a partir de la información que sea capaz de entregar el programa PLAXIS 2D.

Esta investigación está motivada a partir del estudio realizado por Saez (2009) para su grado de doctorado en dinámica de suelos. En su investigación utiliza como indicador de demanda sísmica estructural el máximo desplazamiento de entre pisos (drift) de la estructura. Plaxis 2D puede entregar los desplazamientos para cada paso adicional en los puntos seleccionados del eje central de la estructura modelada, por lo tanto, este indicador resulta ser el adecuado para esta investigación. Además de esta forma podremos comparar los resultados obtenidos en este estudio y el de Saez, comparando suelos y registros sísmicos provenientes de distintos continentes.

El desplazamiento de entre pisos se obtiene bajo el concepto del esquema demostrado en la Figura 74, y utilizando las siguientes relaciones:

$$Drift\ Piso\ 1 = \frac{|\Delta_1|}{H_1}$$

$$Drift\ Piso\ 2 = \frac{|\Delta_2 - \Delta_1|}{H_2}$$

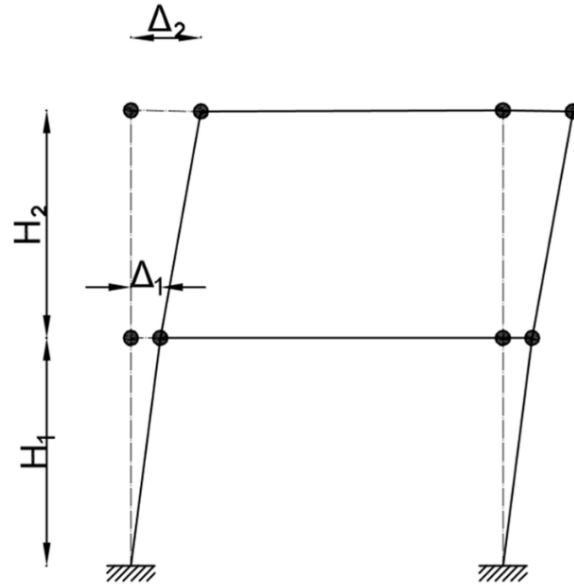


Figura 74. Esquema para Cálculo de Drift

Teniendo este concepto claro, se obtienen los desplazamientos de cada piso para cada paso adicional del registro sísmico en cada software y con esta información se puede calcular el desplazamiento entre pisos de cada estructura. Luego, lo que se debe extraer es el máximo desplazamiento de entre pisos del registro sísmico, el cual será nuestro indicador de demanda sísmica estructural. De esta forma podremos hacer las comparaciones pertinentes de cada caso.

Se presentan a continuación los máximos drifts, comparando los dos tipos de modelaciones; 2 Pasos y EF-ISE.

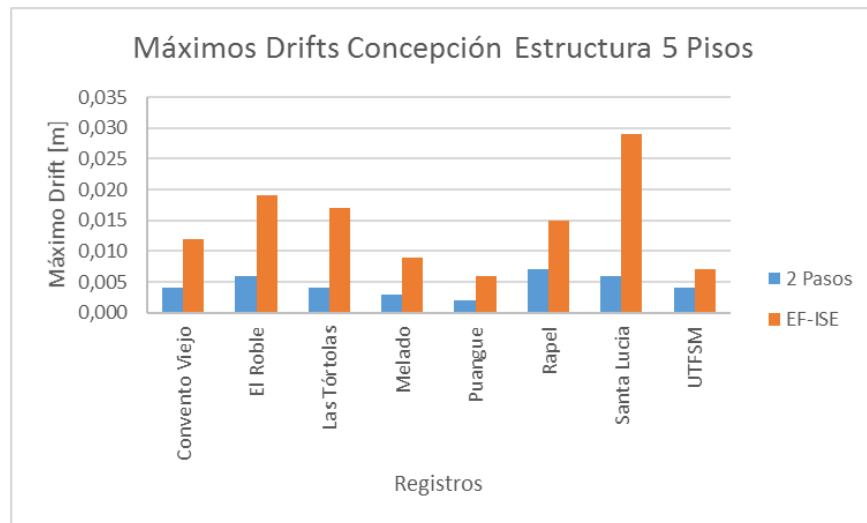


Figura 75. Máximos Drifts Concepción Estructura 5 Pisos

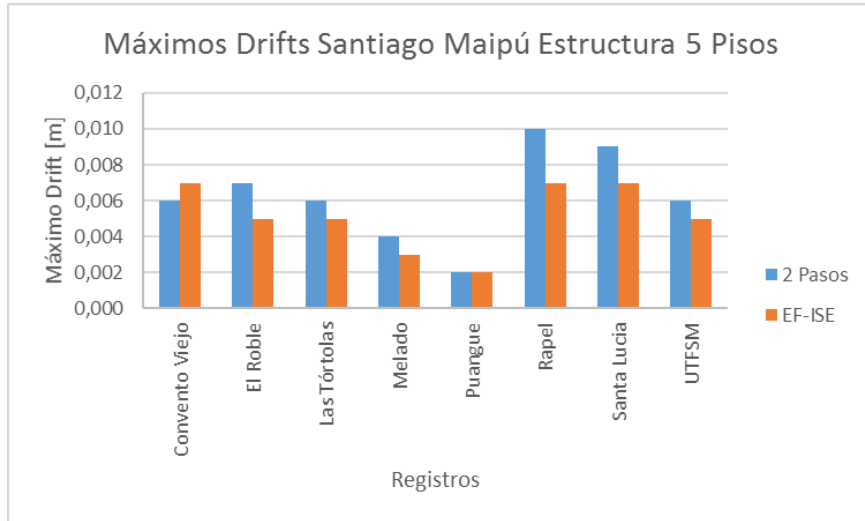


Figura 76. Máximos Drifts Santiago Maipú Estructura 5 Pisos

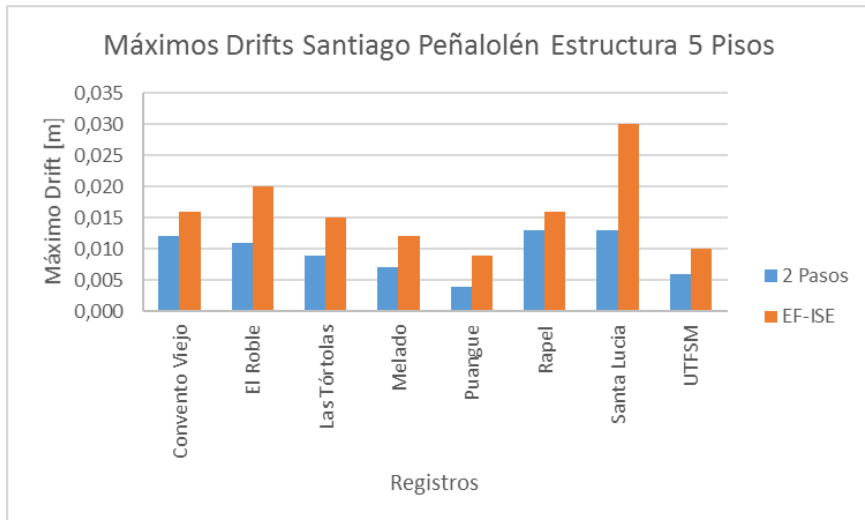


Figura 77. Máximos Drifts Santiago Peñalolén Estructura 5 Pisos

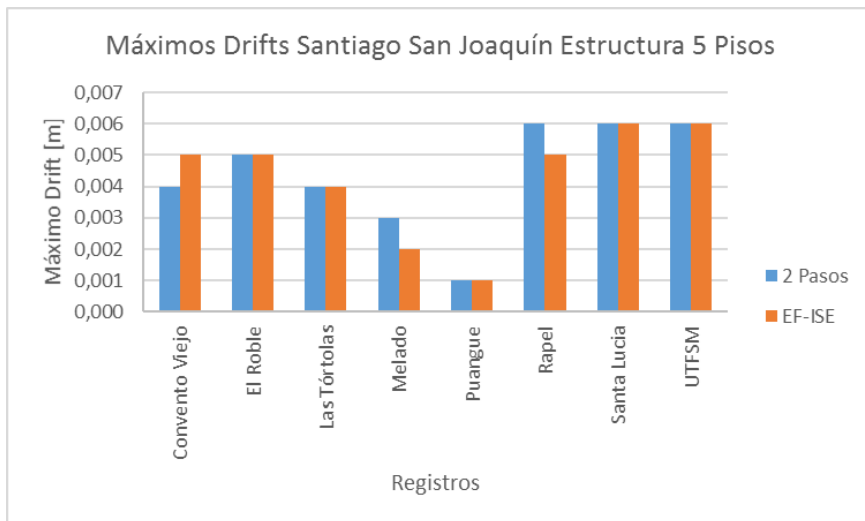


Figura 78. Máximos Drifts Santiago San Joaquín Estructura 5 Pisos

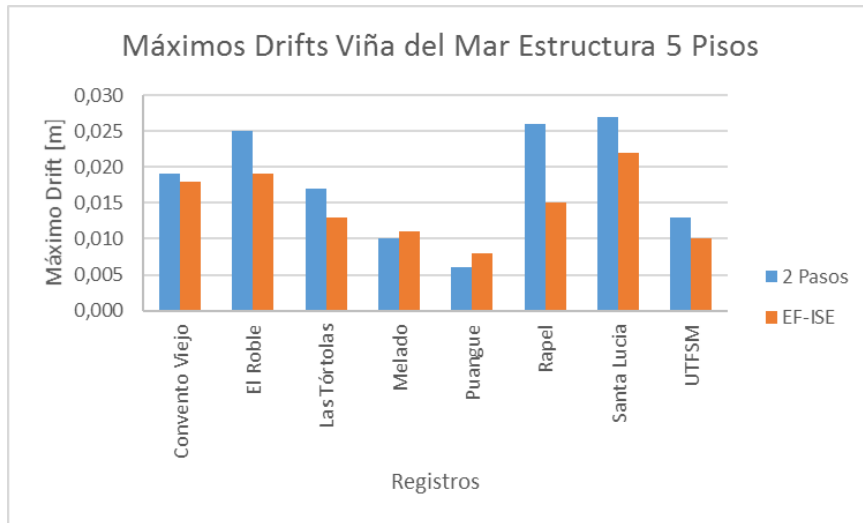


Figura 79. Máximos Drifts Viña del Mar Estructura 5 Pisos

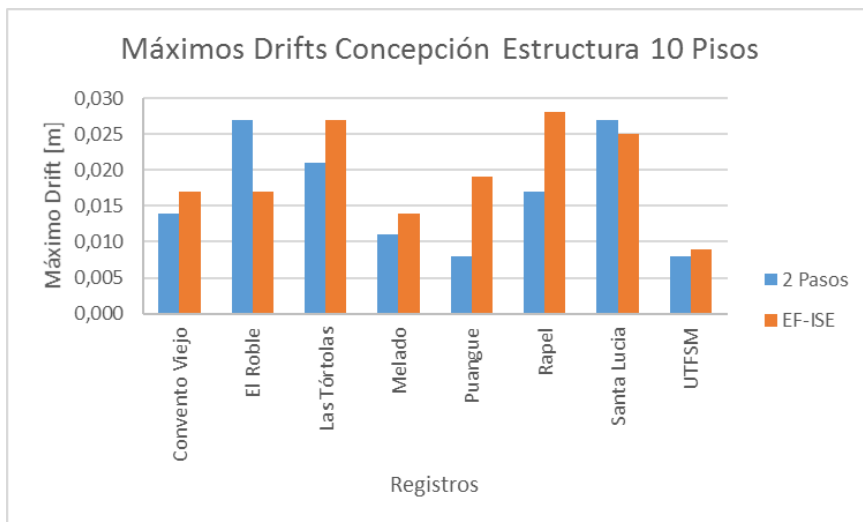


Figura 80. Máximos Drifts Concepción Estructura 10 Pisos

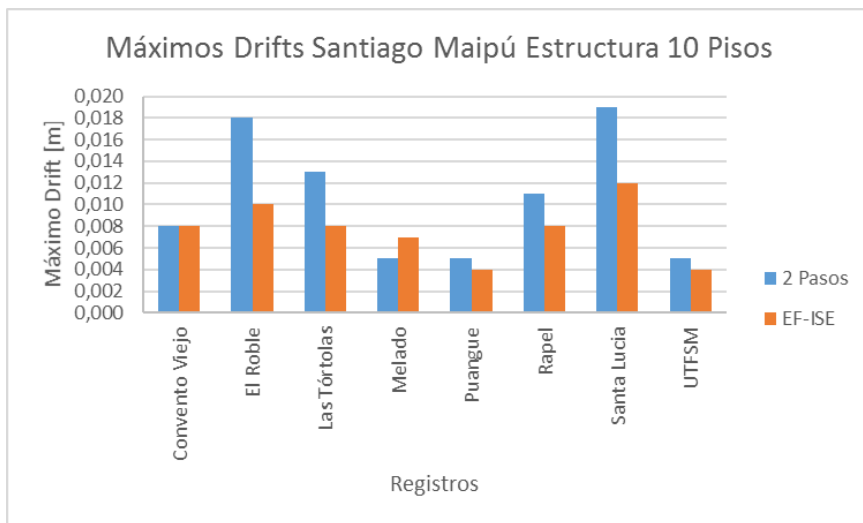


Figura 81. Máximos Drifts Santiago Maipú Estructura 10 Pisos

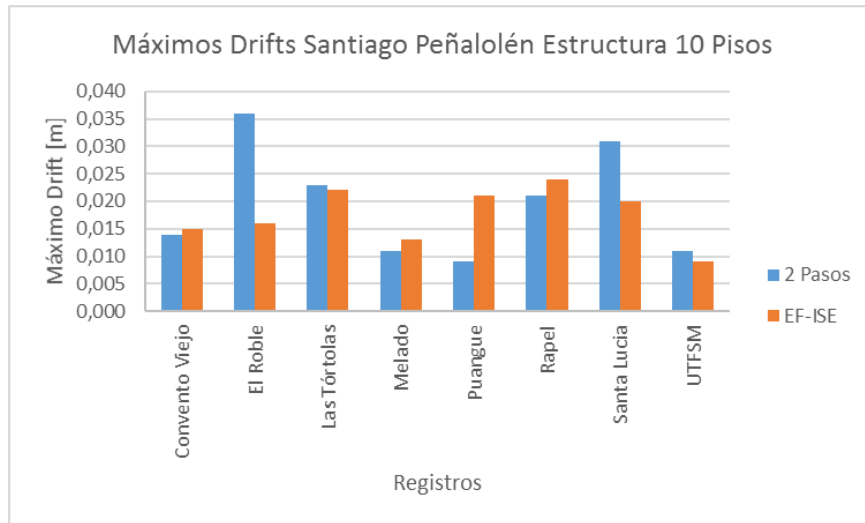


Figura 82. Máximos Drifts Santiago Peñalolén Estructura 10 Pisos

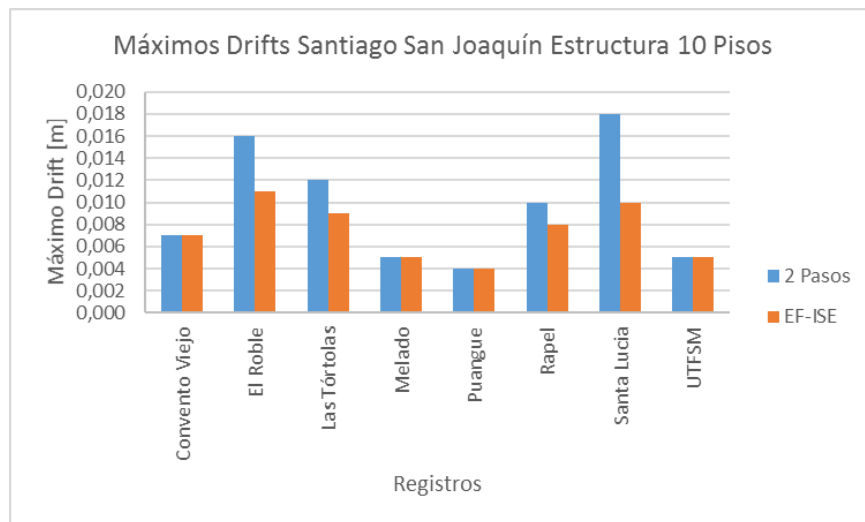


Figura 83. Máximos Drifts Santiago San Joaquín Estructura 10 Pisos

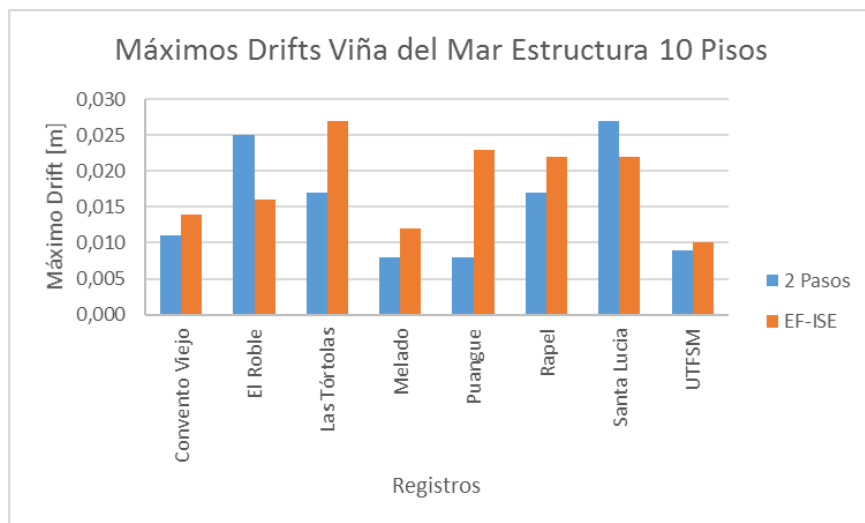


Figura 84. Máximos Drifts Viña del Mar Estructura 10 Pisos

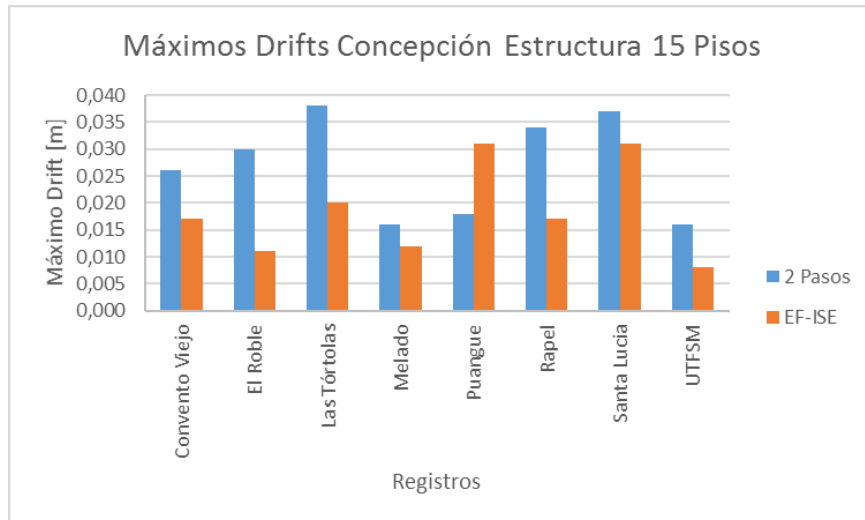


Figura 85. Máximos Drifts Concepción Estructura 15 Pisos

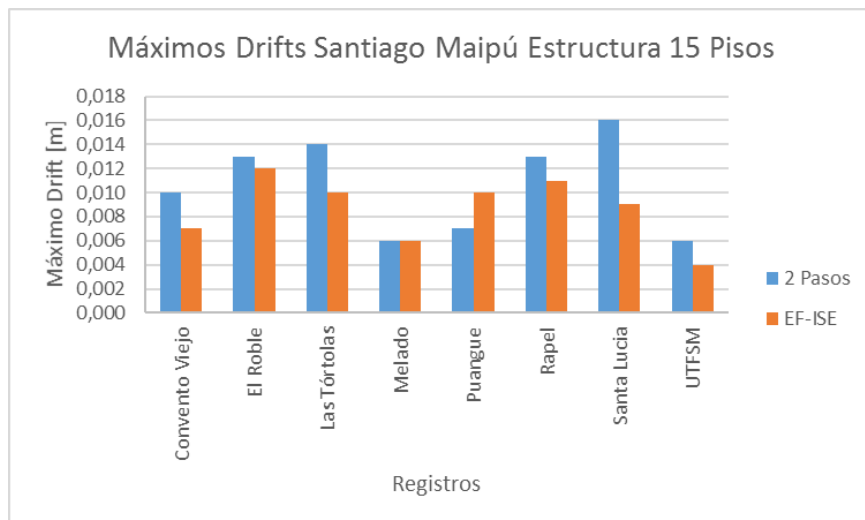


Figura 86. Máximos Drifts Santiago Maipú Estructura 15 Pisos

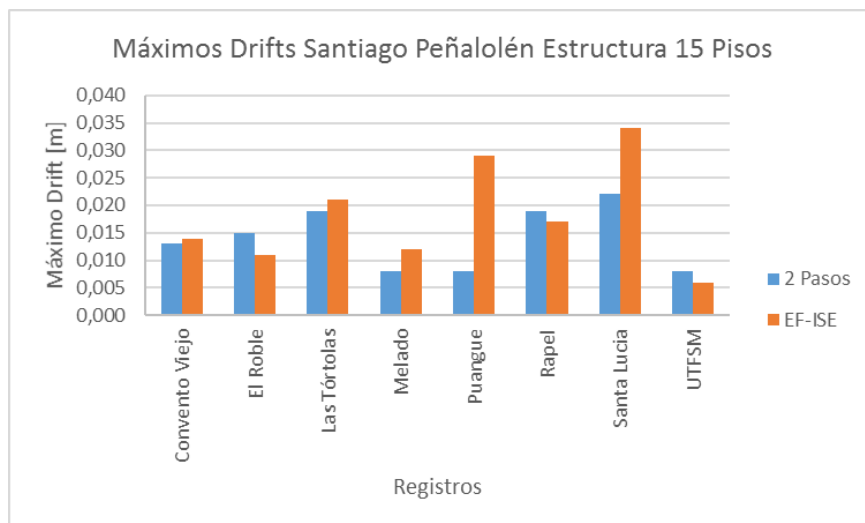


Figura 87. Máximos Drifts Santiago Peñalolén Estructura 15 Pisos

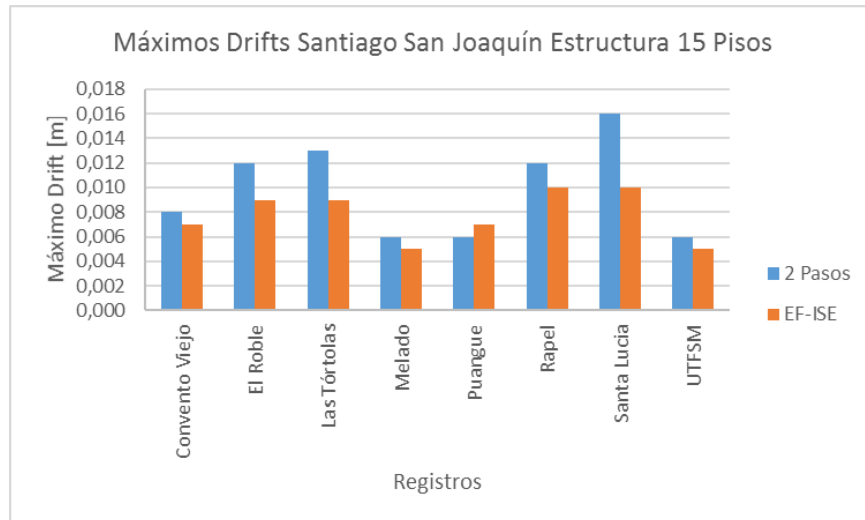


Figura 88. Máximos Drifts Santiago San Joaquín Estructura 15 Pisos

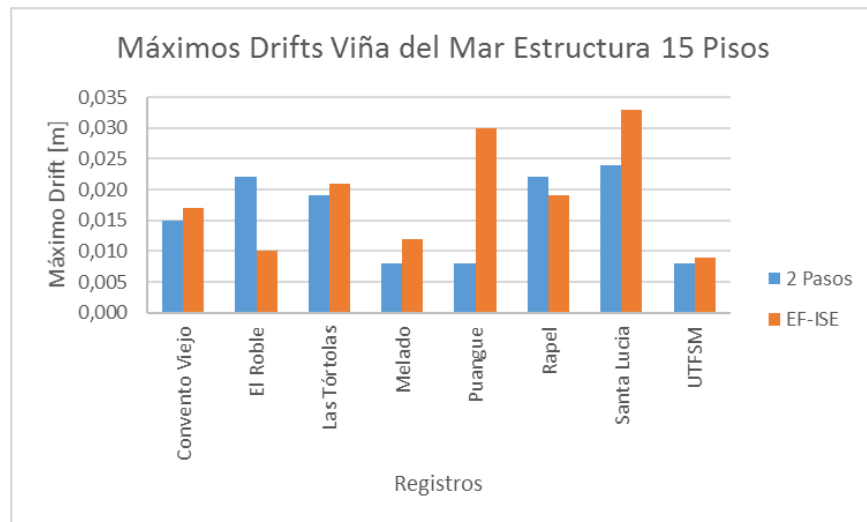


Figura 89. Máximos Drifts Viña del Mar Estructura 15 Pisos

Analizando los resultados obtenidos de manera global, no se aprecia una tendencia clara que demuestre cuál de los dos métodos genera desplazamientos de entre piso más grandes. De los 120 casos analizados, 57 logran el comportamiento que se buscaba en que el método de dos pasos posea un desplazamiento máximo de entre pisos mayor al que se produzca mediante el método EF-ISE. Por lo tanto, no se puede concluir de manera general que utilizando el método EF-ISE se genera una menor demanda sísmica estructural, ya que menos del 50% de todos los casos lo cumple. Con estos resultados se responde de cierta forma la duda que se formuló al término del capítulo anterior con respecto a los factores de amplificación obtenidos. No necesariamente al obtener un factor de amplificación menor de la onda sísmica en los modelos EF-ISE, genera una menor demanda sísmica estructural que la modelación 2 pasos, considerando que este tipo de modelación poseía factor de amplificación más altos en la mayoría de los casos estudiados.

Debido al porcentaje obtenido anteriormente en el análisis global, se realizará una comparación de manera local, para apreciar bajo qué circunstancias se alcanza un porcentaje mayor de casos que permita concluir que el método EF-ISE favorece la demanda sísmica estructural.

Se presentan a continuación 3 gráficos, en los que se realiza una comparación más localizada. Se comienza con la comparación según la altura de la estructura, que es la que considera más casos por división (40). Luego se continúa con la comparación entre estratos de suelo que considera 24 casos por suelo, y finalmente se analizan las diferencias según registro sísmico que considera 15.

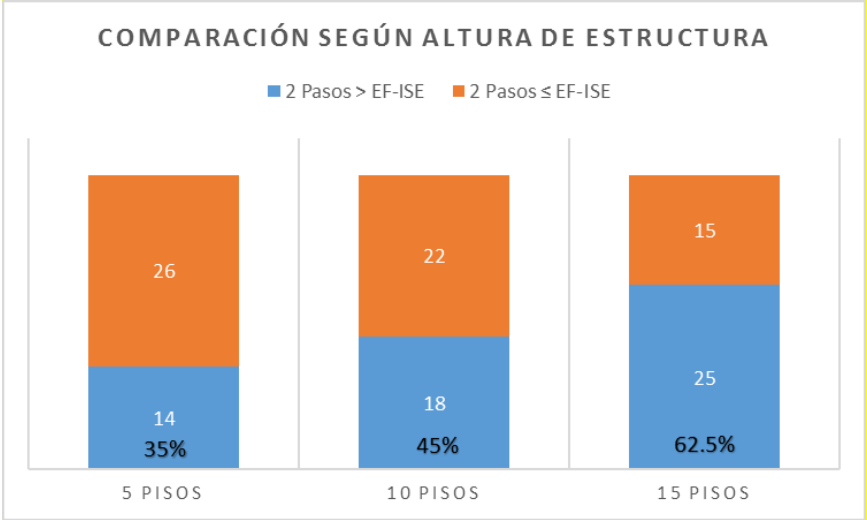


Figura 90. Comparación Según Altura de Estructura

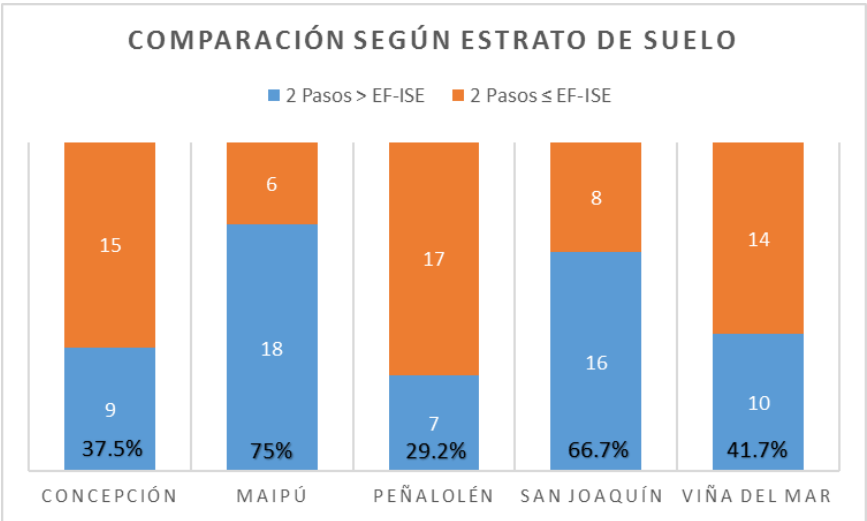


Figura 91. Comparación Según Estrato de Suelo

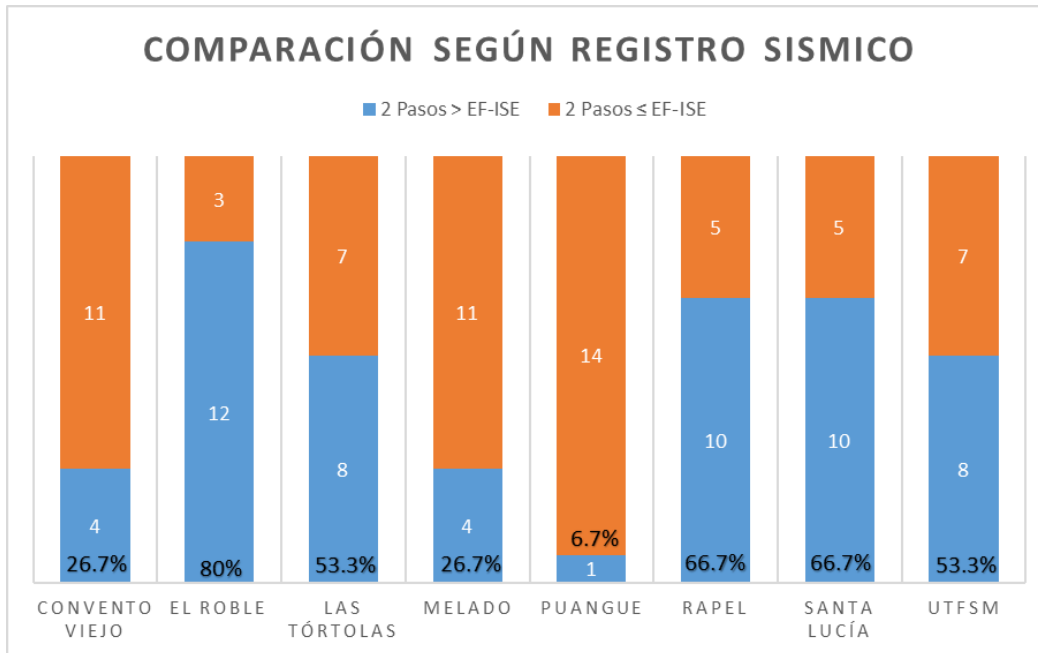


Figura 92. Comparación Según Registro Sísmico

Iniciando con el análisis que se compara según altura de estructura, es la más alta la que logra un mayor porcentaje de casos que cumplen con la condición esperada. De todas formas, continúa siendo un valor de porcentaje bajo para comprobar que para estructuras altas se genera mayor demanda estructural con el método de dos pasos que el método EF-ISE. Si bien en estudios, de los cuales está basada y motivada esta investigación, se comprueba que para estructuras bajas (frecuencia de la estructura mayor a la frecuencia del suelo) se logran menores desplazamientos de entre pisos para el modelo de EF-ISE que el método de dos pasos. Para el caso de este informe aplicado a suelos y registros chilenos, se concluye que para estructuras altas se genera menor demanda sísmica estructural. Es importante mencionar que, por efectos de recursos de tiempo, se optó por adoptar un comportamiento lineal para la estructura, a diferencia de la investigación de Esteban Saez, en que se modelan rotulas plásticas en los extremos de las vigas llegando a los pilares para que trabajen en el rango plástico. Es por este motivo que no se podrá llegar a las mismas conclusiones de dicho, ya que las conclusiones de la presente memoria aplican para estructuras que trabajan en el rango lineal.

Pasando a la comparación según estrato de suelo, que abarca menos casos (24) por cada uno de ellos, 2 de los 5 tipos logran un porcentaje mayor a 50%. Si consideramos un 75% ya como un valor aceptable para concluir una tendencia, solo el estrato de suelo de Maipú genera en la estructura, independiente de la altura de ésta, una menor demanda sísmica estructural. Los dos suelos que logran los mayores porcentajes de casos, son los que tienen menor período fundamental, por lo tanto, se puede concluir que, para suelos con período fundamental pequeño, hay una mayor probabilidad de que se generen mayores daños sísmico en una estructura que se construya sobre ellos.

Finalmente analizamos las diferencias en los máximos drifts según registro sísmico, que por cada uno existen 15 casos. Para esta situación son 5 los registros que llegan a más del 50% de casos que sufren una mayor deformación de entre piso para el método de 2 pasos. Pero al igual que para la comparación según estrato de suelo, solo uno de los registros sísmicos posee un porcentaje que permite deducir una tendencia, ya que alcanza un 80% de los casos. Este registro corresponde a la estación de El Roble. Las estaciones de Melado y Puangue que son las que tienen los porcentajes más bajos son a su vez los que tienen los peaks de aceleración más bajos en comparación con el resto de los registros. Como el registro de El Roble no es el que posee el peak de aceleración más alto, no se puede concluir que a medida que más alto sea el peak de aceleración será más alta la probabilidad de que el método EF-ISE genere una menor demanda sísmica. De todas maneras, 4 de los 5 casos que poseen un porcentaje mayor de 50%, son los que tienen los peaks de aceleración más altos.

8. Comparación de 2 Métodos Utilizando PLAXIS 2D

El propósito de esta sección es analizar las diferencias entre los dos métodos utilizados anteriormente, pero en este caso, utilizando el mismo software. La idea surge, debido a que, al utilizar dos softwares distintos, existe la posibilidad que ocurran diferencias en la obtención de los desplazamientos de entre piso.

Por este motivo es que se comparará los máximos drifts del modelo EF-ISE con el método de dos pasos, pero en esta sección se utilizará PLAXIS 2D para ambos modelos. Si bien PLAXIS 2D no es capaz de modelar una estructura aislada (sin suelo) con base fija como se modeló anteriormente en ETABS 2015, se busca adaptar un estrato de suelo de dimensión y propiedades que lo permitan.

Para llevar a cabo la modelación de la estructura con base fija, mediante PLAXIS 2D, se utiliza como estrato el suelo H3 del suelo de Concepción, manteniendo las mismas propiedades. El modelo del estrato consiste en una profundidad de 1 metro y ancho de 200 metros, llegando a esta geometría luego de varias iteraciones, buscando que el registro sísmico de aceleraciones no se viera alterado al propagarse de la base a la superficie. Por otra parte, la estructura ya no es modelada con un subterráneo y elementos de interacción en los pilares y base que se contactan con el suelo. La Figura 87 muestra la modelación mencionada.

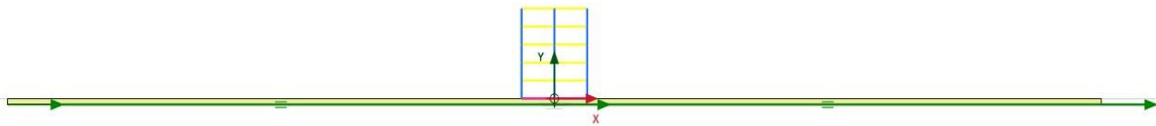


Figura 93. Modelación Estructura con Base Fija en PLAXIS 2D

Además, la figura 88 muestra el registro de aceleraciones en base (color rojo) y superficie (color azul) que muestra prácticamente el mismo registro, demostrando que éste no se ve alterado al propagarse de la base a la superficie.

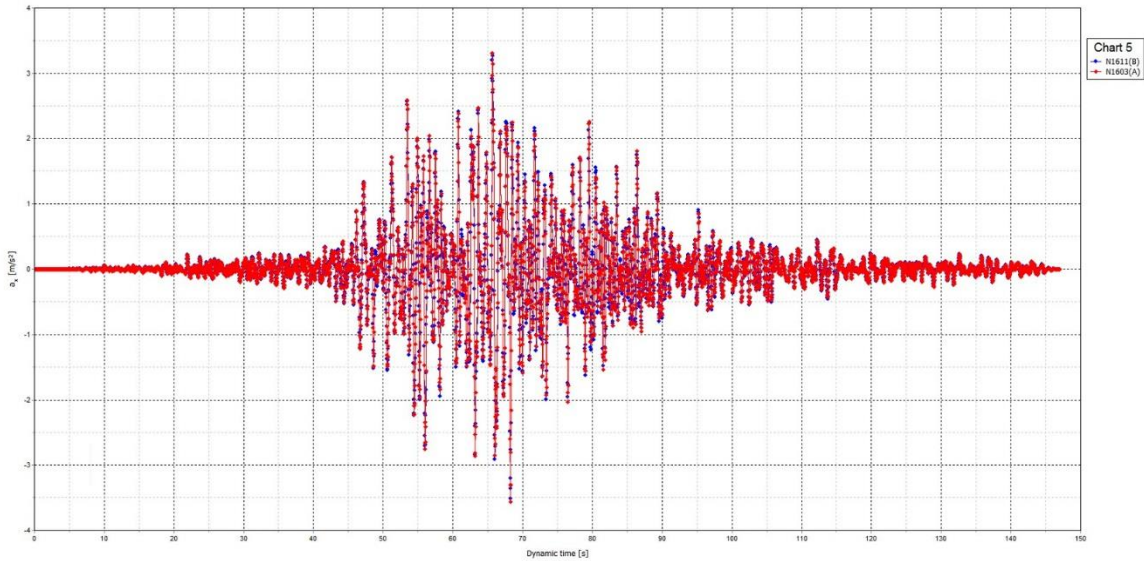


Figura 94. Registros de Aceleraciones en Base y Superficie

Para este análisis se realiza la comparación de solo 6 casos a modo de tener una visión global. El registro de aceleraciones a utilizar es el de la estación de Santa Lucía. De esta forma, se aplica el registro obtenido en la superficie de los suelos de Concepción y Maipú a las estructuras de 5, 10 y 15 pisos.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de los máximos drifts, comparando los dos métodos utilizando PLAXIS 2D v/s PLAXIS 2D y PLAXIS 2D v/s ETABS 2015.

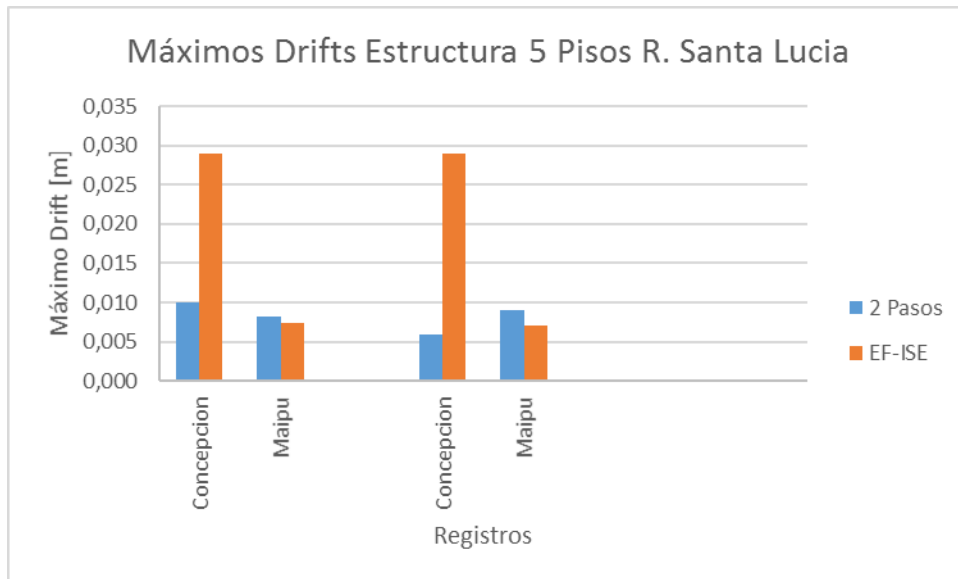


Figura 95. Comparación de Máximos Drifts con Estructura de 5 Pisos

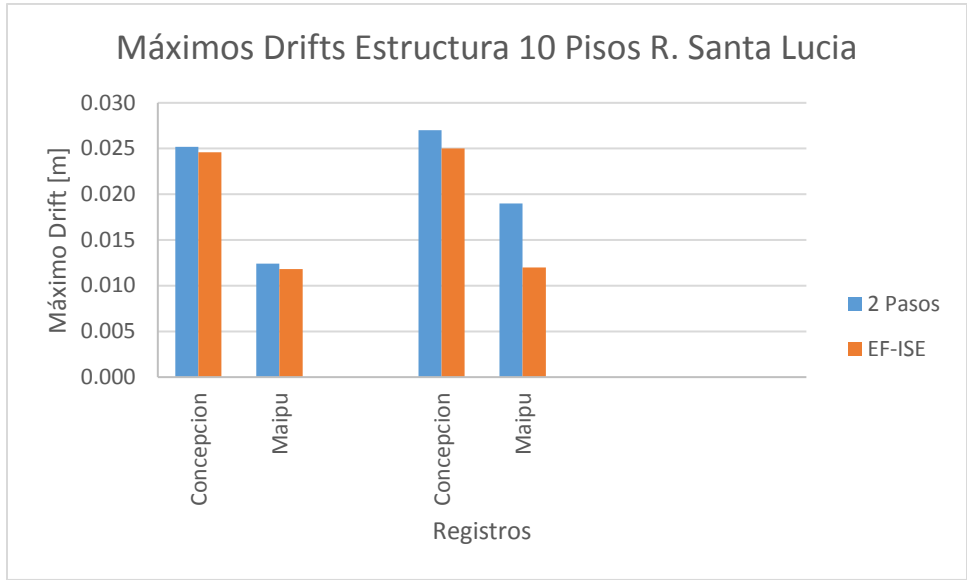


Figura 96. Comparación de Máximos Drifts con Estructura de 10 Pisos

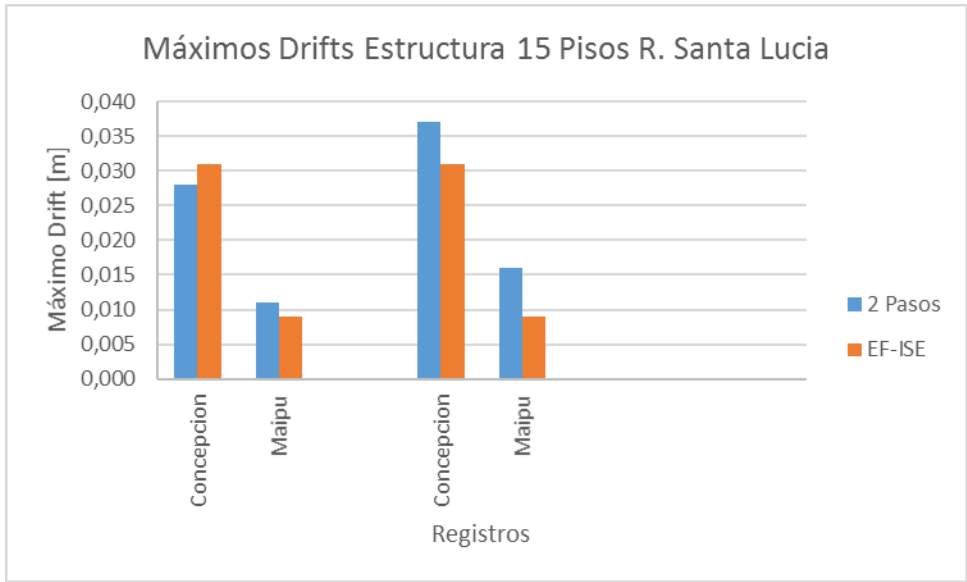


Figura 97. Comparación de Máximos Drifts con Estructura de 15 Pisos

Los gráficos de la izquierda corresponden a la comparación entre los dos tipos de modelos, considerando PLAXIS 2D para ambos, mientras que los de la derecha corresponden a la comparación hecha anteriormente entre ambos modelos, utilizando PLAXIS 2D para EF-ISE y ETABS 2015 para el 2 Pasos. Si bien se observan algunas diferencias en los resultados obtenidos de ambos programas, no son de gran magnitud, por lo que puede deducirse que la modelación fue replicada de manera correcta entre un software y otro.

Las diferencias existentes pueden deberse a la manera en que la estructura se encuentra fijada en la base, en donde el software ETABS 2015 es capaz de modelar un apoyo empotrado para cada uno de los pilares, mientras que en PLAXIS 2D se intentó simular el empotramiento de los pilares a la base modelando una losa de fundación. Por otra parte, pueden ocurrir estos contrastes en los resultados, debido a que PLAXIS 2D modela en dos dimensiones y el ingreso de datos de las propiedades de rigidez de las vigas y pilares se debe llevar al plano. ETABS 2015 modela en 3 dimensiones y el ingreso de datos de las propiedades de rigidez es directo. Por lo tanto, puede que se esté generando una diferencia en las geometrías de las secciones de los pilares y vigas modeladas.

Continuando la observación de los resultados, se aprecia que de las 6 situaciones analizadas, 5 conservan el valor mayor en el máximo desplazamiento de entre pisos para el método de 2 pasos. Sólo el caso de la estructura de 15 pisos sobre el estrato de suelo de Concepción tiene un resultado distinto al evaluar que método genera mayor demanda sísmica estructural. Por motivos de tiempo no se realiza el análisis para los 120 casos, pero de todas formas se deja abierto este aspecto a una futura investigación que compare los resultados de los máximos desplazamientos utilizando un mismo software que permita modelar de manera correcta los dos métodos mencionados en este informe.

9. Conclusiones Generales

De esta memoria se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Al realizar el análisis de la propagación de la onda sísmica, se puede comprobar que en prácticamente todos los casos se genera una amplificación de ésta desde la roca basal a la superficie, por lo tanto, se deja en evidencia la importancia de realizar un estudio de la amplificación sísmica que puede sufrir un depósito de suelo, independiente de sus características estratigráficas y la altura de la estructura que se construirá sobre éste.
- Comparando los resultados obtenidos de los peaks de aceleraciones obtenidos en la superficie de los suelos estudiados, se verifica que el tipo de modelación de “2 Pasos” genera amplificaciones más grandes de la onda sísmica con respecto a la modelación EF-ISE. Por lo tanto, la presencia de la estructura en la modelación provoca una atenuación de la onda sísmica proveniente desde la roca basal.
- Al evaluar la demanda sísmica estructural de manera global, independiente del depósito de suelo, la altura de la estructura y el registro sísmico, se llega a menos del 50% de los casos con la diferencia esperada. Esto se refiere a que la demanda sísmica estructural sea mayor en el método de 2 Pasos que el modelo EF-ISE. De esta forma, fue necesario realizar una comparación más localizada.
- El análisis local permitió concluir a grandes rasgos en qué casos es más probable obtener una menor demanda sísmica estructural al realizar la modelación EF-ISE. Esto ocurre con mayor tendencia en estructuras altas, que estén construidas sobre suelos con período fundamental bajo y sometidas a un registro sísmico con un peak de aceleración alto.
- En este informe no fue posible obtener los resultados obtenidos de la manera en que se esperaba, ya que no se logró obtener una cantidad de casos aceptable que permitiese concluir de manera clara que la modelación EF-ISE genera menor demanda sísmica estructural. La diferencia con las investigaciones en las que está motivada esta memoria, es que se realiza el análisis con un mismo software y además se analiza la estructura en el rango no lineal, lo cual no fue posible realizar en esta investigación debido a los recursos de tiempo y las limitaciones de los softwares con los que se contaba.
- Se propone continuar esta investigación, realizando el análisis con un software único que permita realizar los dos tipos de modelaciones de manera correcta y en un mismo campo de dimensiones, ya sea en 2 o 3 dimensiones, dependiendo de los recursos de tiempo y limitaciones que pudiese generar el software que se seleccione. Además, queda pendiente en este informe incorporar el comportamiento no lineal de los elementos estructurales, lo que podría ser motivo de por qué no fue posible obtener una clara tendencia favor de la modelación EF-ISE.

- Es importante mencionar que este informe se basa en resultados cualitativos, lo cual no nos permite evaluar el cumplimiento o no de las estructuras modeladas con la norma sísmica chilena NCh433. Lo primordial de este trabajo es mencionar la importancia de la modelación incluyendo la interacción suelo estructura en el análisis dinámico, y con esto se propone incluir este fenómeno en futuras normativas de diseño mediante algún método de diseño. Esto nos permitiría comparar cuantitativamente ambos métodos y así poder evaluar si la estructura cumple con la normativa, lo cual no fue posible verificar en esta investigación.

10. Referencias

1. Avilés J., Pérez-Rocha L.E. (2004). Bases para las Nuevas Disposiciones Reglamentarias sobre Interacción Dinámica Suelo-Estructura. Revista de Ingeniería Sísmica, No. 71, México, junio, pp. 1-36.
2. Botero C., Jaramillo D., Rochel R. (2004). Evaluación de los Efectos Inerciales de Interacción Dinámica Suelo-Estructura Para Edificaciones Ubicadas en Medellín. Revista Universidad EAFIT, Colombia, No. 134 pp. 90-104.
3. Brinkgreve R. (2004). Manual de referencia Plaxis, Versión 8.
4. CSN, Universidad de Chile (2013). Sismicidad y Terremotos en Chile.
5. Espinoza F. (1999). Determinación de Características Dinámicas de Estructuras. Tesis Doctoral de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos y Puertos Universidad Politécnica de Cataluña, España, 170 pp.
6. Frias E (2004). Tesis doctoral: "Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación de los elementos finitos"
7. García A. (2006). Interacción Suelo-Estructura en el Análisis y Diseño Sísmico de Estructuras de Mampostería no Reforzada. Memorias del XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural en Jalisco, México.
8. González de Vallejo L. (2002). Ingeniería Geológica.
9. Instituto Nacional de Prevención Sísmica, Argentina (2015). Sección Docentes: Fallas geológicas.
10. Khalil L., Sadek M. y Shahrour I. (2007). Influence of the Soil-structure Interaction on the Fundamental Period of Building. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Volumen 36, pp. 2445-2453.
11. Kontoe S. (2006). Development of time integration schemes and advanced boundary conditions for dynamic geotechnical analysis. (Ph.D. Thesis). Imperial College of Science, Technology and Medicine. London, England.
12. Mancilla C. (2013). Respuesta Sísmica del Suelo en el Centro de Viña del Mar. Memoria de Universidad Técnica Federico Santa María, Viña del Mar, Chile.
13. Neira V. (2014). Respuesta Sísmica del Suelo en la Ciudad de Santiago. Memoria de Universidad Técnica Federico Santa María, Viña del Mar, Chile.

14. Peña R. (2014). Respuesta Sísmica del Suelo en el Centro de Concepción. Memoria de Universidad Técnica Federico Santa María, Viña del Mar, Chile.
15. PLAXIS. Material Models Manual, Version 8.
16. Rosenblueth E. (1992). Diseño de Estructuras Resistentes a Sismos. IMCYC Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C, México, 420 pp.
17. Saez E. (2009). Dynamic nonlinear soil-structure interaction. Other. Ecole Centrale Paris.
18. Seed & Idriss (1970). Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses, Technical Report EERRC-70-10, University of California, Berkley.
19. Sharahi M. (1986). The Effect of Geometry Dimensions on the Earthquake Response of the Finite Element Method.
20. Soriano A. (1989). Interacción Suelo-Estructura, Modificación del Movimiento. Revista Física de la Tierra, No. 1 pp. 287-308. Ed. Univ. Compl. Madrid, España.
21. Tsai Ch., Park D., Chen Ch. (2014). Selection of the optimal frequencies of viscous damping formulation in nonlinear time-domain site response analysis. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 67, 353-358.
22. Waterman D. (2012). Curso de Geotecnia Computacional PLAXIS. Pontificia Universidad Católica de Chile.
23. Youssef M.A., Hashash, Park D. (2002). Viscous damping formulation and high frequency motion propagation in non-linear site response analysis. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22, 611-624.
24. Wolf J. P. (1994). Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models. Editorial Prentice Hall, New Jersey, Estados Unidos de América, 445 pp.

11. ANEXO

11.1 Tablas de sección 7.1

Peaks de Aceleración Registros Concepción [m/s ²]					
	Base	Superficie			
Registro	-	Solo Suelo	5 Pisos	10 Pisos	15 pisos
Convento Viejo	1,83	2,094	1,982	1,729	1,730
El Roble	1,767	3,448	2,418	2,529	2,350
Las Tórtolas	1,586	2,725	2,387	1,960	2,093
Melado	1,361	1,493	1,333	1,151	1,134
Puangue	0,892	1,302	1,307	1,181	1,089
Rapel	1,937	3,094	2,450	2,235	2,226
Santa Lucia	3,098	3,562	3,494	2,638	2,536
UTFSM	2,911	2,532	1,264	1,657	1,298

Tabla 36. Peaks de Aceleración Registros Suelo Concepción

Peaks de Aceleración Registros Santiago Maipú [m/s ²]					
	Base	Superficie			
Suelo	-	Solo Suelo	5 Pisos	10 Pisos	15 pisos
Convento Viejo	1,83	3,192	2,354	3,075	2,953
El Roble	1,767	3,122	2,721	2,863	3,095
Las Tórtolas	1,586	2,946	2,601	2,780	2,403
Melado	1,361	1,696	1,615	1,421	1,348
Puangue	0,892	1,085	1,144	0,971	0,994
Rapel	1,937	3,498	2,933	3,371	3,009
Santa Lucia	3,098	3,690	3,362	3,310	3,123
UTFSM	2,911	4,833	4,251	4,415	4,340

Tabla 37. Peaks de Aceleración Registros Suelo Santiago Maipú

Peaks de Aceleración Registros Santiago Peñalolén [m/s ²]					
	Base	Superficie			
Suelo	-	Solo Suelo	5 Pisos	10 Pisos	15 pisos
Convento Viejo	1,83	4,773	3,865	3,485	3,197
El Roble	1,767	5,709	4,316	4,345	4,232
Las Tórtolas	1,586	4,058	2,899	3,037	2,966
Melado	1,361	2,790	1,826	2,195	2,087
Puangue	0,892	2,245	1,762	1,763	1,744
Rapel	1,937	6,346	3,874	4,595	4,563
Santa Lucia	3,098	6,289	3,785	4,690	4,353
UTFSM	2,911	5,571	3,366	4,146	3,073

Tabla 38. Peaks de Aceleración Registros Suelo Santiago Peñalolén

Peaks de Aceleración Registros Santiago San Joaquín [m/s ²]					
	Base	Superficie			
Suelo	-	Solo Suelo	5 Pisos	10 Pisos	15 pisos
Convento Viejo	1,83	2,996	2,593	2,889	2,690
El Roble	1,767	2,775	2,540	3,044	2,471
Las Tórtolas	1,586	3,283	3,033	2,918	3,016
Melado	1,361	2,437	1,988	1,993	1,946
Puangue	0,892	1,037	0,975	0,990	0,992
Rapel	1,937	4,411	4,016	3,711	3,742
Santa Lucia	3,098	4,560	4,155	4,060	4,118
UTFSM	2,911	7,899	6,533	6,261	6,189

Tabla 39. Peaks de Aceleración Registros Suelo Santiago San Joaquín

Peaks de Aceleración Registros Viña del Mar [m/s ²]					
	Base	Superficie			
Registro	-	Solo Suelo	5 Pisos	10 Pisos	15 pisos
Convento Viejo	1,83	6,326	4,451	5,085	4,326
El Roble	1,767	7,098	4,423	4,525	4,188
Las Tórtolas	1,586	6,549	3,591	3,648	3,214
Melado	1,361	4,265	2,014	2,464	2,532
Puangue	0,892	2,916	1,636	1,824	2,078
Rapel	1,937	8,074	4,603	4,814	5,097
Santa Lucia	3,098	8,077	4,776	5,052	5,138
UTFSM	2,911	7,514	3,403	4,462	3,529

Tabla 40. Peaks de Aceleración Registros Suelo Viña del Mar

Factor de Amplificación Registros Concepción				
Registro	Solo Suelo	5 Pisos	10 Pisos	15 pisos
Convento Viejo	1,144	1,083	0,945	0,945
El Roble	1,951	1,368	1,431	1,330
Las Tórtolas	1,718	1,505	1,236	1,320
Melado	1,097	0,979	0,846	0,833
Puangue	1,459	1,465	1,324	1,221
Rapel	1,597	1,265	1,154	1,149
Santa Lucia	1,150	1,128	0,852	0,819
UTFSM	0,870	0,434	0,569	0,446

Tabla 41. Factor de Amplificación Registros Suelo Concepción

Factor de Amplificación Registros Santiago Maipú				
Registro	Solo Suelo	5 Pisos	10 Pisos	15 pisos
Convento Viejo	1,744	1,286	1,680	1,614
El Roble	1,767	1,540	1,620	1,751
Las Tórtolas	1,857	1,640	1,753	1,515
Melado	1,246	1,187	1,044	0,990
Puangué	1,217	1,282	1,089	1,115
Rapel	1,806	1,514	1,741	1,554
Santa Lucía	1,191	1,085	1,068	1,008
UTFSM	1,660	1,460	1,517	1,491

Tabla 42. Factor de Amplificación Registros Suelo Santiago Maipú

Factor de Amplificación Registros Santiago Peñalolén				
Registro	Solo Suelo	5 Pisos	10 Pisos	15 pisos
Convento Viejo	2,608	2,112	1,904	1,747
El Roble	3,231	2,443	2,459	2,395
Las Tórtolas	2,558	1,828	1,915	1,870
Melado	2,050	1,341	1,613	1,534
Puangué	2,517	1,976	1,976	1,955
Rapel	3,276	2,000	2,372	2,356
Santa Lucía	2,030	1,222	1,514	1,405
UTFSM	1,914	1,156	1,424	1,056

Tabla 43. Factor de Amplificación Registros Suelo Santiago Peñalolén

Factor de Amplificación Registros Santiago San Joaquín				
Registro	Solo Suelo	5 Pisos	10 Pisos	15 pisos
Convento Viejo	1,637	1,417	1,579	1,470
El Roble	1,571	1,437	1,723	1,398
Las Tórtolas	2,070	1,912	1,840	1,902
Melado	1,791	1,461	1,464	1,430
Puangué	1,162	1,093	1,110	1,113
Rapel	2,277	2,073	1,916	1,932
Santa Lucía	1,472	1,341	1,311	1,329
UTFSM	2,714	2,244	2,151	2,126

Tabla 44. Factor de Amplificación Registros Suelo Santiago San Joaquín

Factor de Amplificación Registros Viña del Mar				
Registro	Solo Suelo	5 Pisos	10 Pisos	15 pisos
Convento Viejo	3,457	2,432	2,779	2,364
El Roble	4,017	2,503	2,561	2,370
Las Tórtolas	4,130	2,264	2,300	2,026
Melado	3,133	1,480	1,810	1,860
Puangué	3,269	1,835	2,045	2,330
Rapel	4,168	2,376	2,485	2,632
Santa Lucía	2,607	1,542	1,631	1,659
UTFSM	2,581	1,169	1,533	1,212

Tabla 45. Factor de Amplificación Registros Suelo Santiago Viña del Mar