

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Hipótesis de trabajo y Objetivos	3
1.2. Metodología	4
2. Marco Geológico y Sismológico	6
2.1. Ubicación	6
2.2. Marco Geológico	7
2.3. Régimen Tectónico	12
2.4. Marco Sismológico	14
2.4.1. Actividad Sísmica Local	15
2.4.2. Actividad Sísmica en la Zona de Estudio	18
3. Campaña de Terreno	22
3.1. Litología	22
3.2. Propiedades Mecánicas	25
3.3. Datos estructurales	33
3.4. Caracterización Sísmica	35
4. Modelamiento en UDEC	39
4.1. Método de Elementos Discretos	39
4.2. UDEC	39
5. Análisis de Validación	43
5.1. Modelo de Bloque Horizontal	43
5.2. Resistencia a la Compresión Simple	47
5.3. Resistencia a la Tracción	48
5.4. Análisis de Amplificación	50
6. Desarrollo del Modelo	54
6.1. Topografía	54
6.2. Geometría	57

6.3. Discontinuidades Abiertas y Puentes de Roca	58
6.4. Parámetros del Modelo y Condiciones de Borde	59
7. Resultados	60
7.1. Análisis Estático	60
7.2. Análisis Dinámico	63
7.2.1. Amplificación Estacionaria	64
7.2.2. Amplificación con Impulsos Únicos	75
7.2.3. Análisis de Señales Reales	81
7.2.4. Análisis Dinámico de Sensibilidad	98
8. Discusión	101
8.1. Modelos de Validación	101
8.2. Amplificación con Señal Periódica	102
8.3. Amplificación con Impulsos Únicos	102
8.4. Sismos Reales	103
8.5. Análisis Estadístico	107
8.5.1. Análisis de Sensibilidad	107
8.5.2. Parámetros Sísmicos	109
8.6. Presencia de Fluidos	111
9. Conclusiones y Recomendaciones	112
9.1. Conclusiones	112
Bibliografía	116

Índice de figuras

1.	Zona de estudio, mapa de acceso a la zona y superficie de la remoción. (a) Vista hacia el sur del talud estudiado (b) Ubicación en Sudamérica de la región (c) Mapa con respecto a la ciudad de Santiago (d) Vista en planta de la vía de acceso, talud y depósito.	6
2.	Mapeo litológico de la zona, modificado de Gonzalez (2010), mostrando las unidades principales y la zona de estudio.	7
3.	Focos de sismicidad asociados a distintas fuentes en la zona de estudio. La zona de estudio se indica con el círculo verde (Modificado de Barrientos, 2004).	16
4.	Curvas de atenuación para roca en función del radio de ruptura, considerando los modelos de Sadigh, Idriss y Ambraseys. La línea roja indica la distancia hipocentral y la línea negra la distancia epicentral.	21
5.	Talud con la posición de varias paradas realizadas dentro del marco de la campaña de terreno.	23
6.	Fotografías mostrando distintas zonas del talud acorde a la Figura 5. (a) Vista sureste del contacto entre la primera rampa y primer flat junto con un pequeño escalón. (b) Primer plano en vista hacia el suroeste. (c) Vista a escala local de la superficie del primer plano en zonas erosionadas. (d) Primer plano en vista hacia el este. (e) Costado lateral del primer plano y contacto con el abanico adyacente hacia el oeste. (f) Vista del primer plano considerando la zona de diques.	24
7.	Muestras tomadas en el talud (a) Roca caja. (b) Diques presente en el primer plano.	25

8.	Valores de tensión de confinamiento (σ_3) con las respectivas tensiones principales aplicadas (σ_3) obtenidos en los ensayos de compresión no confinada, triaxial y de tracción indirecta realizados en laboratorio para la muestra UG1. Las rectas punteadas representan los intervalos de confianza de donde se fijaron los rangos para las propiedades y la recta continua corresponde a la interpolación de los ensayos de donde se obtuvo el valor adoptado para los modelos numéricos.	30
9.	Datos estructurales para los sets menores de discontinuidades	34
10.	Mediciones de ruido efectuadas en la campaña de terreno en el talud. (a) Ruido medido en la componente NS (b) Ruido medido en la componente EW (c) Ruido medido en la componente Z	36
11.	Cálculo del amortiguamiento mediante el método de <i>Half-Bandwith</i>	38
12.	Diagrama esquemático del modelo de validación 1.	44
13.	Curva de tensión-deformación para desplazamientos aplicados de 20, 25 y 35 mm.	45
14.	Desplazamiento remanente para los distintos valores de desplazamiento total (marcados en el eje x).	46
15.	Modelo esquemático del testigo ensayado en compresión no confinada (UCS)	47
16.	Curva de tensión-deformación para el modelo de ensayo UCS	48
17.	Curva tensión-deformación para el modelo de ensayo de tracción	49
18.	Modelo esquemático del ensayo de Amplificación	51
19.	Curvas de amplificación medidas y teóricas para ambos casos estudiados. (a) Modelo Elástico. (b) Modelo Visco-Elástico con una fracción del amortiguamiento crítico de 5%.	53
20.	Esquema de perfiles realizados mediante LIDAR	55
21.	Zona medida con LIDAR y perfiles topográficos realizados. (a) Sector Este mostrando los perfiles 1-14. (b) Sector Central mostrando los perfiles 15-24. (c) Sector Oeste mostrando los perfiles 25-35.	56
22.	Modelo del talud original (a) Perfil utilizado como base de la geometría (18). (b) Reconstrucción geométrica del Perfil 18 mediante interpolación con el cuerpo estimado de la remoción.	57

23. Modelo final esquemático utilizado en UDEC	58
24. Esquema tanto para un modelo de discontinuidades abiertas como para puentes de roca.	59
25. Estabilidad medida para distintos valores de ϕ_r en estado e-nb. Los puntos marcados en la zona oscura indican estabilidad y los marcados en la zona clara, inestabilidad. Se muestra la posición del talud evaluado con una cruz. (a) Estabilidad para $\phi_r = 31^\circ$. (b) Estabilidad para $\phi_r = 35^\circ$	62
26. Estabilidad medida para distintos valores de ϕ_r en estado p-nb. Los puntos marcados en la zona oscura indican estabilidad y los marcados en la zona clara, inestabilidad. Se muestra la posición del talud evaluado con una cruz. (a) Estabilidad para $\phi_r = 31^\circ$. (b) Estabilidad para $\phi_r = 35^\circ$	62
27. Estabilidad medida para distintos valores de cohesión en estado p-b. Los puntos marcados en la zona oscura indican estabilidad y los marcados en la zona clara, inestabilidad. Se muestra la posición del talud evaluado con una cruz. (a) Estabilidad para $c = 10$ MPa. (b) Estabilidad para $c = 15$ MPa.	63
28. Velocidades medidas en los puntos de la superficie del cerro como respuesta a una onda sinusoidal aplicada en la base durante un periodo de 8 segundos acorde a los puntos marcados en la Figura 13 para frecuencias de (a) 1 Hz, (b) 2 Hz, (c) 3 Hz, (d) 4 Hz, (e) 5 Hz y (f) Impulso de referencia.	65
29. Velocidades medidas en puntos de la remoción como respuesta a una onda sinusoidal aplicada en la base durante un periodo de 8 segundos acorde a los puntos marcados en la Figura 13 para frecuencias de (a) 1 Hz, (b) 2 Hz, (c) 3 Hz, (d) 4 Hz, (e) 5 Hz y (f) Impulso de referencia.	66
30. Amplificación para los puntos medidos en el cerro en que está el talud con respecto a la senoide de la base para frecuencias de (a) 1 Hz, (b) 2 Hz, (c) 3 Hz, (d) 4 Hz y (e) 5 Hz.	68
31. Amplificación para los puntos medidos en la remoción con respecto a la senoide de la base para frecuencias de (a) 1 Hz, (b) 2 Hz, (c) 3 Hz, (d) 4 Hz y (e) 5 Hz.	69

32.	Amplificación para los puntos medidos en el cerro en que está el talud con respecto al nodo N para frecuencias de (a) 1 Hz, (b) 2 Hz, (c) 3 Hz, (d) 4 Hz y (e) 5 Hz.	72
33.	Amplificación para los puntos medidos en la remoción con respecto al nodo N para frecuencias de (a) 1 Hz, (b) 2 Hz, (c) 3 Hz, (d) 4 Hz y (e) 5 Hz.	73
34.	Amplificación para los puntos medidos en el cerro en que está el talud con respecto a la senoide de la base para frecuencias de (a) 1 Hz, (b) 2 Hz, (c) 3 Hz, (d) 4 Hz y (e) 5 Hz para un impulso único.	76
35.	Amplificación para los puntos medidos en la remoción con respecto a la senoide de la base para frecuencias de (a) 1 Hz, (b) 2 Hz, (c) 3 Hz, (d) 4 Hz y (e) 5 Hz para un impulso único.	77
36.	Amplificación para los puntos medidos en el cerro en que está el talud con respecto al nodo N para frecuencias de (a) 1 Hz, (b) 2 Hz, (c) 3 Hz, (d) 4 Hz y (e) 5 Hz para un impulso único.	79
37.	Amplificación para los puntos medidos en la remoción con respecto al nodo N para frecuencias de (a) 1 Hz, (b) 2 Hz, (c) 3 Hz, (d) 4 Hz y (e) 5 Hz para un impulso único.	80
38.	Comparación entre las fallas de Tipo 0 y Tipo I, en donde se ve a la izquierda que el puente de roca no se ha fracturado completamente (Falla Tipo 0), mientras que a la derecha y en la parte inferior se produce la fractura completa (Falla Tipo I).	86
39.	Valores de PGA medidos en la superficie vs la señal de entrada para las distintas estaciones de los distintos sismos.	87
40.	Valores de PGA medido en el centro de masa vs la señal de entrada para las distintas estaciones de los distintos sismos.	88
41.	Valores de PGA medido en centro de masa vs la superficie para las distintas estaciones de los distintos sismos.	89
42.	PGA en el centro de masa vs Duración efectiva para las estaciones de ChiChi.	90
43.	PGA en el centro de masa vs Duración efectiva para las estaciones de Northridge.	91
44.	PGA en el centro de masa vs Duración efectiva para las estaciones de Kobe.	91

45. PGA en el centro de masa vs Intensidad de Arias para las estaciones de ChiChi.	92
46. PGA en el centro de masa vs Intensidad de Arias para las estaciones de Northridge.	92
47. PGA en el centro de masa vs Intensidad de Arias para las estaciones de Kobe.	93
48. PGA en la superficie vs Desplazamiento para las estaciones de ChiChi. . .	93
49. PGA en la superficie vs Desplazamiento para las estaciones de Northridge.	94
50. PGA en la superficie vs Desplazamiento para las estaciones de Kobe.	94
51. Contenido de frecuencias para las estaciones del sismo de ChiChi (a) Estación CHY034-000, (b) Estación CHY026-000, (c) Estación CHY026-090, (d) Estación CHY028-000 y (e) Estación CHY024-000.	95
52. Contenido de frecuencias para las estaciones del sismo de Northridge (a) Estación CNP-196, (b) Estación ARL-090, (c) Estación CCN-090, (d) Estación BRD-132 y (e) Estación CBN-131.	96
53. Contenido de frecuencias para las estaciones del sismo de Kobe (a) Estación TAZ-000, (b) Estación KJM-000, (c) Estación TAK-090, (d) Estación TAZ-090 y (e) Estación TAK-000.	97

Índice de Tablas

1.	Normas para lòn distintos tipos de ensayos y procedimientos realizados. . .	30
2.	Propiedades mecánicas de las muestras recolectadas	31
3.	Propiedades mecánicas para las discontinuidades principales.	32
4.	Parámetros resistentes de la roca.	33
5.	Terremotos estudiados en el análisis de señales reales	81
6.	Parámetros de cada estación sísmica y resultados del modelo para el terremoto de Kobe (1995) aplicando una componentes.	83
7.	Parámetros de cada estación sísmica y resultados del modelo para el terremoto de ChiChi (1999) aplicando una componentes.	84
8.	Parámetros de cada estación sísmica y resultados del modelo para el terremoto de Northridge (1994) aplicando una componentes.	85
9.	Parámetros de cada estación sísmica y resultados del modelo para el terremoto de Northridge (1994) aplicando una componentes con amortiguamiento modificado.	99
10.	Parámetros de cada estación sísmica y resultados del modelo para el terremoto de Northridge (1994) aplicando una componente con resistencia a la tracción modificada.	100
11.	Parámetros de cada estación sísmica y resultados del modelo para el terremoto de Northridge (1994) aplicando una componente con resistencia a la tracción modificada.	110