

# TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 MOTIVACIÓN .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	2
1.3 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA .....	3
<b>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>4</b>
2.1 LICUACIÓN DE SUELOS .....	4
2.1.1 <i>Factores que Afectan la Licuación</i> .....	5
2.1.1.1 Geología .....	5
2.1.1.2 Granulometría .....	7
2.1.1.3 Fábrica .....	8
2.1.2 <i>Distancia a la Fuente</i> .....	9
2.1.3 <i>Evaluación del Potencial de Licuación</i> .....	11
2.1.3.1 <i>Solicitud Cíclica, CSR</i> .....	12
2.1.3.2 <i>Resistencia Cíclica, CRR</i> .....	15
2.1.3.3 <i>Ensayo Triaxial Cíclico</i> .....	15
2.1.3.4 <i>Uso de Vs como Predictor de Licuación</i> .....	18
2.1.3.5 <i>Limitaciones del Vs como predictor de Licuación</i> .....	22
2.1.4 <i>Perfil de Velocidad de Onda de Corte Vs</i> .....	24
2.1.4.1 <i>Métodos Geofísicos para Obtención de Perfil Vs</i> .....	24
2.1.4.2 <i>Metodología del método de Correlaciones Cruzadas</i> .....	25
2.1.4.3 <i>Obtención de la razón espectral H/V</i> .....	26
2.1.4.4 <i>Inversión de curvas de dispersión</i> .....	26
2.2 <b>MODELAMIENTO NUMÉRICO MEDIANTE SOFTWARE OPENSEES</b> .....	27
2.2.1 <i>Resumen del Modelo Numérico</i> .....	27
2.2.2 <i>Generación de la Columna de Suelo</i> .....	29
2.2.3 <i>Aplicación de Cargas</i> .....	31
2.2.4 <i>Modelo Constitutivo</i> .....	33
<b>3. CASOS DE ESTUDIO</b> .....	<b>35</b>
3.1 <b>EVIDENCIA DE LICUACIÓN A GRANDES DISTANCIAS</b> .....	35
3.2 <b>MARCO GEOLÓGICO DE LAS ZONAS DE ESTUDIO</b> .....	39
3.3 <b>PROGRAMA DE ENSAYOS</b> .....	41
3.4 <b>LAGO RANCO – PLAYA CALCURRUPE</b> .....	42
3.4.1 <i>Trabajo en Terreno</i> .....	42
3.4.2 <i>Resultados de Ensayos de Laboratorio</i> .....	45
3.4.3 <i>Resultados de Ensayos Geofísicos</i> .....	50
3.5 <b>LAGO LLANQUIHUE– LAS CASCADAS</b> .....	53
3.5.1 <i>Trabajo en Terreno</i> .....	53
3.5.2 <i>Resultados de Ensayos en Laboratorio</i> .....	55
3.5.3 <i>Resultados de Ensayos Geofísicos</i> .....	60
3.6 <b>POTENCIAL DE LICUACIÓN EN EL LAGO LLANQUIHUE</b> .....	62
3.6.1 <i>Mediante la Curva de Resistencia Cíclica</i> .....	62
3.6.2 <i>Mediante el Uso de la Velocidad de Onda de Corte</i> .....	64
3.7 <b>RESUMEN DE RESULTADOS</b> .....	66

<b>4. MODELAMIENTO MEDIANTE OPENSEES®</b> .....	<b>67</b>
4.1 PERFILES DE SUELO.....	68
4.2 REGISTROS DE ACELERACIÓN DE ENTRADA.....	69
4.3 CALIBRACIÓN MEDIANTE ENSAYOS DE LABORATORIO .....	73
4.3.1 <i>Calibración de Parámetros</i> .....	73
4.3.2 <i>Limitaciones del Modelo Constitutivo</i> .....	79
4.3.3 <i>Casos de Estudio</i> .....	80
4.4 RESULTADOS DEL MODELAMIENTO.....	80
<b>5. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	<b>86</b>
<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	<b>89</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>90</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>95</b>
A.1 ESTACIÓN DE VALDIVIA .....	95
A.2 ENSAYOS DE LABORATORIO .....	98
A.2.1 <i>Ensayo de Permeabilidad</i> .....	98
A.2.2 <i>Resultados de Ensayos Triaxiales Cíclicos</i> .....	100
A.3 RESULTADOS DE MODELAMIENTO NUMÉRICO.....	103

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1. Programa de ensayos en terreno y en el laboratorio.....	41
Tabla 3. 2. Ensayo a carga cíclica de 0,35 kg/cm <sup>2</sup> .....	59
Tabla 3. 3. Parámetros utilizados para la obtención de la Figuras 3.36 y 3.37 .....	65
Tabla 3. 4. Resumen de las propiedades obtenidas mediante los ensayos de laboratorio y los ensayos geofísicos .....	66
Tabla 4. 1. Aceleración máxima en superficie rocosa por dirección con el menor error cuadrático medio asociado utilizando las curvas de atenuación CB12 e I17 .....	71
Tabla 4. 2. Parámetros de modelación para cada estrato.....	78
Tabla 4. 3. Aceleraciones máximas en superficie (PGA) obtenidas de los resultados de los modelos de capa con distintas permeabilidades .....	84
Tabla A. 1. Datos de confección de ensayo de permeabilidad a carga constante .....	98
Tabla A. 2. Resultados ensayos de permeabilidad a carga constante. ....	99

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1. Curvas granulométricas con distintos rangos de potencial de licuación marcados: (a) suelo con bajo coeficiente de uniformidad $C_u < 3,5$ y (b) suelos con altos coeficientes de uniformidad $C_u > 3,5$ . (Obtenido de MLIT , 2007).....	7
Figura 2. 2. Resistencia cíclica de probetas inalteradas y reconstituidas (Ramón Verdugo, 2005).....	8
Figura 2. 3. Relación entre magnitud del sismo y: (a) distancia epicentral; (b) distancia a la falla. Los puntos blancos corresponden a terremotos de profundidad intermedia que escapan de la tendencia (Ambraseys, 1988) .....	9
Figura 2. 4. Relación entre distancia hipocentral de licuación documentada y magnitud del sismo (Wang et al., 2006).....	10
Figura 2. 5. Curvas de $r_d$ en profundidad de Seed e Idriss (1971) modificado por Youd et al. (2001) .....	13
Figura 2. 6. Resultados de $r_d$ provenientes del análisis de respuesta de 2153 combinaciones de condiciones de sitio y terremotos. En línea negras se muestra: (a) la primera aproximación de Seed & Idriss (1971) y (b) el promedio y desviación estándar de los valores de los 2153 casos analizados (Seed et al., 2003) .....	13
Figura 2. 7. Coeficiente de corrección por corte simple en función de la densidad relativa (Modificado de Seed & Peacock, 1971).....	16
Figura 2. 8. Número equivalente de ciclos en función de la magnitud (modificado de Seed et al. 1975).....	16
Figura 2. 9. Factor de Corrección $K\alpha$ en función de la razón de esfuerzo de corte inicial $\alpha$ . (Harder & Boulanger, 1997) .....	17
Figura 2. 10. Resistencia cíclica versus velocidad de onda de corte corregida (Andrus & Stokoe, 2000).....	18
Figura 2. 11. Factores de escala por magnitud MSF propuesto por diferentes autores (Youd & Noble, 1997).....	19
Figura 2. 12. Resistencia cíclica versus velocidad de onda de corte corregida. Se muestran las curvas propuestas anteriormente en conjunto a la curva propuesta con los nuevos datos recopilados. (a) set de datos de Andrus & Stokoe (2000) y (b) set de datos ampliados. Los puntos rellenos representan lugares donde hubo licuación y los puntos sin relleno aquellos lugares donde no hubo licuación (Kayen et al., 2013) .....	20

Figura 2. 13. Comparación de las curvas propuestas con distintas magnitudes de momento junto a la propuesta realizada por Andrus y Stokoe (2000) (Kayen et al. 2013) .....	21
Figura 2. 14. Comparación de los factores de escalamiento obtenidos de diferentes autores (modificado de Kayen et al. 2013) .....	21
Figura 2. 15. (a) Efecto del parámetro OCR en la velocidad de onda de corte $V_s$ ; (b) Efecto del parámetro OCR en curva de resistencia cíclica (Verdugo, 2016).....	22
Figura 2. 16. Análisis de desencadenamiento de licuación para casos chilenos; (a) Andrus & Stokoe (2000); (b) Kayen et al. (2013) (Montalva et al. 2016) .....	23
Figura 2. 17. (a) Parte real de los espectros de correlación para los trominos 80 y 86; (b) espectro de correlación promedio normalizado; (c) familia de curvas de velocidad de onda de fase obtenidas con el método espectral. ....	25
Figura 2. 18. (a) Esquema general del modelo de propagación de onda de corte por una columna de suelo; (b) Detalle de elemento con 9 nodos y orden de numeración utilizado en la modelación (Modificado de McGann & Arduino, 2006) .....	28
Figura 2. 19. (a) Superficies de fluencias cónicas en el espacio de los esfuerzos principales; (b) en el plano deviatorico; (c) la curva esqueleto del modelo hiperbólico (Yang et al. 2003).....	33
Figura 2. 20. Esquema de la respuesta del modelo constitutivo con (a) respuesta en el espacio $p'-\tau$ octaédrico y (b) espacio de deformación $\gamma-\tau$ octaédrico junto a la configuración del dominio de fluencia y la regla de endurecimiento propuesta por Parra (1996).....	34
Figura 3. 1. Vista en planta de zona de estudio. (Obtenido de GoogleEarth) .....	35
Figura 3. 2. Evidencias de licuación en las cercanías del Lago Ranco. Evidencia de licuación (a) al interior de la playa y (b) en la playa. (Obtenidas de youtube/José Ríos y GoogleEarth).....	36
Figura 3. 3. Vista en planta del Lago Llanquihue, la localidad de “Las Cascadas” y el Volcán Osorno (Obtenido de GoogleEarth).....	36
Figura 3. 4. Evidencia de licuación en el sector de Las Cascadas; (a) Asentamientos productos de licuación en la playa; (b) en el camino peatonal (Obtenidas de González, 2015; y GoogleEarth). ....	37
Figura 3. 5. Zonas de ruptura estimada del terremoto del Maule Mw 8,8 y distancias de las zonas de interés a la zona de ruptura.....	38

Figura 3. 6. Mapa geológico de la zona de interés en el Lago Ranco (Modificado de Campos et al. 1998) .....	39
Figura 3. 7. Mapa geológico de la localidad de Las Cascadas (Modificado de Moreno et al. 2010) .....	40
Figura 3. 8. Vista en planta del lugar de medición (Obtenida de GoogleEarth®), junto al acceso a la zona, los dos arreglos realizados y la distancia entre trominos (representados por las siglas T1, T2, T3 y T4) en cada arreglo .....	42
Figura 3. 9. Imagen en planta (Obtenida de GoogleEarth®) con las zonas donde posiblemente ocurrió la licuación (en rojo); los lugares donde se obtienen las muestras de suelo (M1 y M2) y las zonas de donde se toman fotos del terreno (a, b, c y d) expuestas en la Figura 3.10 .....	43
Figura 3. 10. Fotos del terreno. (a) Estero Temuleufu desembocando en el Lago Ranco; (b) playa Calcurrupe con abundante pumacita; (c) lugar donde se obtiene la primera muestra de suelo; (d) ensayo de densidad en terreno terminado. ....	43
Figura 3. 11. (a) Muestra de suelo M1 (LR-M1); (b) Muestra de suelo M2 (LR-M2).....	45
Figura 3. 12. (a) Muestra de suelo LR-M2 con presencia de pumita; (b) selección de pumitas halladas en terreno. ....	45
Figura 3. 13. (a) Curva granulométrica del suelo LR-M1; (b) curva granulométrica del suelo LR-M2.....	46
Figura 3. 14. Rangos de potencial de licuación propuestos por el código japonés MLIT (2007) y curvas granulométricas obtenidas: (a) LR-M1 y (b) LR-M2.....	46
Figura 3. 15. (a) Esfuerzo de corte vs deformación axial; (b) variación de presión de poros vs deformación axial.....	48
Figura 3. 16. Determinación de la línea de estado último LEU en el espacio de tensiones p'-q'; (b) línea de consolidación isótropa LCI y LEU en el espacio e-p' .....	48
Figura 3. 17. Estado final de probeta luego de ser ensayada a: (a) 1 kg/cm <sup>2</sup> ; (b) 2 kg/cm <sup>2</sup> y (c) 3 kg/cm <sup>2</sup> .....	49
Figura 3. 18. Resultados de mediciones de la razón H/V, (a) resultados de registros individuales de Trominos; (b) promedio de las mediciones y desviación estándar. ....	50
Figura 3. 19. Metodología para obtener curva de dispersión objetivo en la Playa Calcurrupe. (a) curvas de dispersión entre pares de sensores; (b) curva de dispersión objetivo .....	51

Figura 3. 20. Resultados de inversión mediante software Dinver para la Playa Calcurrupe; (a) curva de dispersión real y generada; (b) razón H/V real y generado; (c) perfil de vs en profundidad generado junto a los valores de Vs y el espesor de cada estrato .....	52
Figura 3. 21. Imagen en planta con las zonas donde posiblemente ocurrió la licuación (en rojo), el lugar donde se toma la muestra (M1), los dos arreglos realizados y los lugares donde se toman fotos en terreno (a, b, c y d).....	53
Figura 3. 22. Fotos de las mediciones en terreno. Lugar donde licuó en el terremoto del Maule 2010 (a); instalación de trominos para hacer mediciones de ruido (b); extracción de muestras en la playa del lago (c); vista en detalle del ensayo para obtener la densidad en terreno. ....	54
Figura 3. 23. (a) Muestra de suelo analizada en laboratorio; (b) curva granulométrica del suelo.....	55
Figura 3. 24. Comparación de rangos de potencial de licuación propuestos por el código japonés MLIT (2007) y la curva granulométrica obtenida. ....	55
Figura 3. 25. Estimación de la permeabilidad del suelo mediante la Ley de Darcy.....	56
Figura 3. 26. (a) Esfuerzo de corte vs deformación axial; (b) variación de presión de poros vs deformación axial.....	57
Figura 3. 27. (a) Determinación de la línea de estado último LEU en el espacio de tensiones $p'-q'$ ; (b) línea de consolidación isótropa LCI y LEU en el espacio $e-p'$ .....	57
Figura 3. 28. Estado final de probeta luego de ser ensayada a: (a) 1 kg/cm <sup>2</sup> ; (b) 2 kg/cm <sup>2</sup> y (c) 4 kg/cm <sup>2</sup> .....	58
Figura 3. 29. Curva de resistencia cíclica obtenida en laboratorio CRRtx. Se define licuación cuando la probeta alcanza una deformación $\varepsilon_{D.A.}$ del 5%.....	58
Figura 3. 30. Resultados de ensayo triaxial cíclico con $\Delta\sigma'/2$ de 0,35 kg/cm <sup>2</sup> y un $\sigma_c'$ de 1 kg/cm <sup>2</sup> : (a) espacio $p'-q'$ ; (b) espacio $\gamma-q'$ ; (c) deformación axial $\varepsilon_{axial}$ versus número de ciclos y (d) razón de presión de poros $r_u = \Delta u/\sigma_c'$ versus número de ciclos.....	59
Figura 3. 31. Resultados de mediciones de la razón H/V, (a) promedio de mediciones entre pares de trominos; (b) promedio total con desviación estándar. ....	60
Figura 3. 32. Metodología para obtener curva de dispersión objetivo. (a) curvas de dispersión entre pares de sensores; (b) curva de dispersión objetivo.....	61
Figura 3. 33. Resultados de inversión mediante software Dinver; (a) curva de dispersión real y generada; (b) razón H/V real y generado; (c) perfil de vs en profundidad generado junto a los valores de Vs y el espesor de cada estrato .....	61

Figura 3. 34. Número de ciclos equivalentes propuestos por Seed et al. (1975) junto a los valores para Chile (Modificado de Gonzalez, 2015) .....	62
Figura 3. 35. Evaluación del potencial de licuación utilizando: (a) coeficiente de reducción propuesto por Seed & Idriss (1971) y (b) coeficiente de reducción propuesto por Cetin et al. (2004).....	63
Figura 3. 36. Evaluación del potencial de licuación utilizando: (a) propuesta hecha por Andrus & Stokoe (2000) y (b) propuesta hecha por Kayen et al. (2013) .....	64
Figura 3. 37. ....	95
Figura 3. 38. (a) Registros de aceleración y (b) Espectro de aceleración en la dirección horizontal combinada del terremoto del Maule Mw 8,8 de la estación acereológica de Valdivia.....	97
Figura 4. 1. Metodología para modelar la propagación de onda de corte representando las condiciones en terreno. ....	67
Figura 4. 2. (a) Líneas de consolidación isotropa (LCI) y de estado último (LEU) obtenidos en laboratorio en el espacio e-log p' junto a la consolidación asumida para el modelo; (b) columna de suelo modelada conformada por 4 estratos con sus respectivos espesores, velocidad de onda de corte y densidad representativa; (c) columna de suelo conformada por un estrato equivalente con su respectiva velocidad de onda de corte y densidad representativa .....	68
Figura 4. 3. Registros en roca del terremoto del Maule Mw 8,8, normalizados por la aceleración máxima PGA (a) componente E-W; (b) componente N-S.....	69
Figura 4. 4. Espectros de aceleración de los registros en roca, normalizados por su aceleración máxima PGA; (a) componente E-W; (b) componente N-S.....	69
Figura 4. 5. (a) Espectros de aceleración en roca a una distancia a la zona de ruptura de 350 km utilizando las curvas de atenuación CB12 e I17; (b) metodología para obtener aceleración máxima en roca; (c) Error cuadrático medio (ECM) en función de la aceleración máxima en superficie del espectro de respuesta, en círculo rojo se indica aquella aceleración que tiene el menor ECM.....	70
Figura 4. 6. Espectros de aceleración de respuesta ajustados a curvas I16: (a) componente E-W; (b) componente N-S; y ajustados a curvas CB12: (c) componente E-W; (d) componente N-S .....	72
Figura 4. 7. Función de transferencia en 1D de un medio visco-elástico entre afloramiento rocoso y roca basal.....	72

Figura 4. 8. Variación de presión de poros y la deformación axial en función del número de ciclos. Comparación de resultados de laboratorio (curva azul) y simulaciones numéricas (curva verde), considerando (a) $c_1 = 0,05$ y (b) $c_1 = 0,1$ .	73
Figura 4. 9. Influencia del parámetro $d_1$ en la acumulación de deformaciones por corte. Comparación de resultados de laboratorio (curva azul) y simulaciones numéricas (curva verde), considerando (a) $d_1 = 0,05$ y (b) $d_1 = 0,4$ .	74
Figura 4. 10. Influencia del parámetro $c_2$ en esfuerzos efectivos del espacio $p'-q'$ . Comparación de resultados de laboratorio (curva azul) y simulaciones numéricas (curva verde), considerando (a) $c_2 = 0,5$ y (b) $c_2 = 3,0$ .	75
Figura 4. 11. (a) Efecto del parámetro $d_2$ en el espacio de esfuerzo de corte normalizado – deformación (b) efecto del parámetro $c_3$ en el espacio $\tau-\sigma'$ normalizado. (Khosravifar, 2012)	75
Figura 4. 12. Resultados de ensayo triaxial cíclico con un $\sigma_0'$ de $1 \text{ kg/cm}^2$ y esfuerzo de corte de $0,35 \text{ kg/cm}^2$ en el espacio $p'-q$ .	76
Figura 4. 13. Resultados de ensayo triaxial cíclico con un $\sigma_0'$ de $1 \text{ kg/cm}^2$ y esfuerzo de corte de $0,35 \text{ kg/cm}^2$ .	77
Figura 4. 14. Resultados de la calibración de parámetros; (a) espacio $p'-q$ ; (b) espacio $\gamma-q$	77
Figura 4. 15. Resultados de calibración de parámetro: variación de presión de poros y deformación axial en función del número de ciclos	77
Figura 4. 16. Comparación de ensayos triaxiales modelados con ensayos de laboratorio, en color los ensayos simulados a distintos confinamientos y en negro los ensayos de laboratorio en: (a) el espacio $p'-q'$ ; (b) el espacio $\epsilon_{axial} - \Delta u$ y; (c) el espacio $\epsilon_{axial} - q'$	79
Figura 4. 17. Resultados de modelamiento en modelo de capas para $k = 10^{-7} \text{ m/s}$	81
Figura 4. 18. Resultados paramétricos del modelo de capas para una permeabilidad de $10^{-7} \text{ m/s}$	82
Figura 4. 19. Resultados paramétricos del modelo equivalente para una permeabilidad de $10^{-7} \text{ m/s}$	82
Figura 4. 20. Resultados del modelamiento en modelo de capas para $k = 9 \times 10^{-5} \text{ m/s}$	83
Figura 4. 21. Resultados paramétricos del modelo de capas para una permeabilidad de $5 \times 10^{-9} \text{ m/s}$	84

Figura 4. 22. Razones entre la aceleración máxima en superficie y la aceleración máxima de la roca basal de acuerdo a los resultados de los modelamientos que consideran: (a) permeabilidad del suelo de $10^{-5}$ m/s y; (b) permeabilidad del suelo de $10^{-7}$ m/s .....	85
Figura 5. 1. Sensibilidad del modelamiento a la permeabilidad para valores con un mismo orden de magnitud .....	87
Figura 5. 2. Comparación de registros en superficie obtenidos mediante el método lineal-equivalente EERA y el modelo de OpenSees® .....	88
Figura A. 1. (a) Curva de dispersión estadística obtenida de la combinación del ensayo pasivo (bajas frecuencias) y activo (altas frecuencias) y (b) Perfil de velocidad de onda de corte generado (Montalva et al. 2014).....	95
Figura A. 2. Zonificación de Valdivia de acuerdo a los períodos predominantes del suelo (modificado de Alvarado & Valdebenito, 2015) en conjunto a los períodos predominantes de distintos sitios otorgados por la FUCHIGE representados por estrellas blancas (V1, V2, V3, V4 y V5) y Montalva et al. (2014) representado por la estrella negra (Estación de Valdivia E.V.).....	96
Figura A. 6. Ensayo de permeabilidad a carga constante; (a) Esquema del ensayo y (b) realización del ensayo en laboratorio de sólidos .....	99
Figura A. 3. Resultados de ensayo triaxial cíclico con $\Delta\sigma'/2$ de $0,4 \text{ kg/cm}^2$ y un $\sigma_c'$ de $1 \text{ kg/cm}^2$ : (a) espacio $p'-q'$ ; (b) espacio $\gamma-q'$ ; (c) deformación axial $\epsilon_{axial}$ versus número de ciclos y (d) razón de presión de poros $ru = \Delta u/\sigma_c'$ versus número de ciclos.....	100
Figura A. 4. Resultados de ensayo triaxial cíclico con $\Delta\sigma'/2$ de $0,4 \text{ kg/cm}^2$ y un $\sigma_c'$ de $1 \text{ kg/cm}^2$ : (a) espacio $p'-q'$ ; (b) espacio $\gamma-q'$ ; (c) deformación axial $\epsilon_{axial}$ versus número de ciclos y (d) razón de presión de poros $ru = \Delta u/\sigma_c'$ versus número de ciclos.....	101
Figura A. 5. Resultados de ensayo triaxial cíclico con $\Delta\sigma'/2$ de $0,3 \text{ kg/cm}^2$ y un $\sigma_c'$ de $1 \text{ kg/cm}^2$ : (a) espacio $p'-q'$ ; (b) espacio $\gamma-q'$ ; (c) deformación axial $\epsilon_{axial}$ versus número de ciclos y (d) razón de presión de poros $ru = \Delta u/\sigma_c'$ versus número de ciclos.....	102