

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Estructura de Trabajo	3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Geometrías de embalses de relaves en Chile	4
2.2. Estimación de daño en Depósito de Relaves	5
2.3. Sismos de Diseño	8
2.3.1. Sismo Máximo Creíble (MCE)	8
2.3.2. Sismo Operacional (OBE)	8
2.3.3. Aspectos Normativos	8
2.4. Teoría del estado crítico	9
2.5. Software de análisis numérico FLAC3D	12
2.5.1. Uso general de FLAC3D	12
2.5.2. Consideraciones en modelamiento dinámico en FLAC3D	12
2.5.3. Esquemas de amortiguamiento en FLAC3D	15
2.6. Modelo constitutivo avanzado P2PSand	19
2.6.1. Ley Elástica	19
2.6.2. Estado Crítico	20
2.6.3. Dependencia ángulo Lode	21
2.6.4. Superficie de borde y dilatancia	21
2.6.5. Función de fluencia	21
2.6.6. Módulo de corte plástico	22
2.6.7. Deformación volumétrica plástica	23
2.6.8. Evolución de la estructura (o “fabric”)	24
2.6.9. Degradación del módulo elástico	24
2.7. Modelo constitutivo avanzado NorSand	25
2.7.1. Elasticidad	25
2.7.2. Estado Crítico	26
2.7.3. Parámetro de estado	26
2.7.4. Superficie de fluencia	26
2.7.5. Dilatancia	27
2.7.6. Relaciones de tasa de deformación plástica	27
2.7.7. Regla de endurecimiento	29

3. ANTECEDENTES DEL CASO DE ANÁLISIS Y MODELO TRIDIMENSIONAL.....	30
3.1. Topografía y Geometría del Muro	30
3.2. Sismos de Análisis	31
3.2.1. Sismo Medido	31
3.2.2. Sismo Máximo Creíble	34
3.3. MODELO TRIDIMENSIONAL	37
3.3.1. Análisis de Estabilidad Estática y Dinámica Tridimensional.....	37
3.3.2. Condición de Agua	40
3.3.3. Recuperación Sismo en superficie.....	41
4. CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS CONSTITUTIVOS AVANZADOS P2PSAND Y NORSAND.....	44
4.1. Calibración Modelo Constitutivo Avanzado P2PSand	45
4.1.1. Calibración Ley Elástica	45
4.1.2. Calibración Estado Crítico	45
4.1.3. Calibración de Ensayos de Corte Simple Cíclicos No Drenados 49	
4.1.4. Calibración curvas de degradación y amortiguamiento.....	54
4.2. Calibración Modelo Constitutivo Avanzado NorSand	56
4.2.1. Calibración Ley Elástica	56
4.2.2. Calibración Estado Crítico	56
4.2.3. Calibración de Ensayos de Corte Simple Cíclicos No Drenados 58	
4.3. Calibración Modelo Constitutivo Mohr-Coulomb	64
4.4. Módulo de corte máximo (Gmax) y velocidad de onda de corte (Vs) .	66
4.5. Propiedades de los Materiales Geotécnicos	67
4.6. Consideraciones generales	68
5. RESULTADOS ANÁLISIS DINÁMICO	69
5.1. Cota de coronamiento 2947 m s.n.m. – Sismo Medido de Mw 5.4 – Modelo 2D	70
5.2. Cota de coronamiento 2947 m s.n.m. – Sismo Medido de Mw 5.4 – Modelo 3D	78
5.3. Comparación del modelo 2D y 3D – Sismo medido de Mw 5.4.....	79
5.4. Cota de coronamiento 2955 m s.n.m. – Sismo MCE de Mw 8.0 – Modelo 2D	80
5.5. Cota de coronamiento 2955 m s.n.m. – Sensibilidad Sismo MCE de Mw 8.0 – Modelo 2D – P2PSand	83
5.6. Cota de coronamiento 2955 m s.n.m. – Sismo MCE de Mw 8.0 – Modelo 3D	86
5.7. Resumen de resultados	88
5.7.1. Desplazamientos remanentes.....	88
5.7.2. Criterios de Aceptabilidad	89

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	90
6.1. Conclusiones.....	90
6.2. Comentarios y Recomendaciones.....	92
7. BIBLIOGRAFÍA.....	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Geometrías de algunos embalses de relaves (Consejo Minero. “Plataforma de Relaves”, Marzo 2018).....	5
Tabla 2.2: Definición de daño según Pells & Fell (2002).....	5
Tabla 2.3: Definición de daño según (Swaigood, 2003).....	6
Tabla 3.1: Características del Sismo medido en Suelo Fundación y Coronamiento.....	31
Tabla 3.2: Características del Sismo MCE.....	35
Tabla 4.1: Caracterización geotécnica arena de relaves.....	44
Tabla 4.2. Parámetros calibrados modelo constitutivo P2PSand.....	55
Tabla 4.3. Parámetros calibrados modelo constitutivo NorSand.....	63
Tabla 4.4: Caracterización geotécnica arena de relaves.....	67
Tabla 4.5: Caracterización geotécnica roca basal.....	67
Tabla 4.6: Caracterización geotécnica Lamas.....	67
Tabla 4.7: Consideraciones generales de modelamiento.....	68
Tabla 5.1: Cota de coronamiento 2947 m s.n.m. – Sismo Medido de Mw 5.4.....	88
Tabla 5.2: Cota de coronamiento 2955 m s.n.m. – Sismo MCE de Mw 8.0.....	88
Tabla 5.3: Comparación del criterio de daño para los sismos de análisis.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Partes de un depósito de relaves (Carvajal, 2018).....	4
Figura 2.2: Asentamiento en coronamiento en función del PGA (Swaigood, 2013).....	6
Figura 2.3: Criterio de daño de deformación por corte (Ishihara, 1996).....	7
Figura 2.4: Esquema del fenómeno de compresión y dilatación (Villalobos, 2014).....	9
Figura 2.5: Resultados esquemáticos de ensayos de corte directo para la misma muestra granularmente densa y suelta bajo la misma tensión normal $a) \tau - \gamma$, $b) \epsilon_{vol} - \gamma$, $c) e - \gamma$ (Villalobos, 2014).....	10
Figura 2.6: Ejemplo línea de estado crítico (CSL) en planos q-p' y e-p' (Schofield & Wroth, 1968).....	11
Figura 2.7: Definición del parámetro de estado (Been & Jefferies, 1985).....	11
Figura 2.8: Sismo de entrada en <i>FLAC3D</i>	13
Figura 2.9: Caso base rígida (Itasca Consulting Group, 2019).....	14
Figura 2.10: Caso base flexible (Itasca Consulting Group, 2019).....	14
Figura 2.11: Variación del amortiguamiento crítico normalizado en función de la frecuencia angular (Itasca Consulting Group, 2019).....	16
Figura 2.12: Curva de histéresis típica (Ishihara, 1996).....	17
Figura 2.13: Degradación de módulo (Seed & Idriss, 1970) y amortiguamiento (Idriss, 1990).....	18
Figura 2.14: Esquema de superficies en el plano π : superficie de borde (rojo); superficie de dilatación (azul); superficie de estado crítico (verde), superficie de relación de esfuerzo máxima (negro) y superficie de fluencia (círculo negro). (Cheng, 2018)...	23

Figura 3.1: Vista en planta del embalse de relaves – Cota 2955 m s.n.m.....	30
Figura 3.2: Sección de visualización transversal del embalse de relaves	30
Figura 3.3: Sismo Horizontal Medido en Suelo Fundación y Coronamiento a) Aceleraciones b) Velocidades c) Desplazamientos d) Intensidad de Arias.....	32
Figura 3.4: Sismo Vertical Medido en Suelo Fundación y Coronamiento a) Aceleraciones b) Velocidades c) Desplazamientos d) Intensidad de Arias.....	33
Figura 3.5: Sismos Horizontal y Vertical Medidos – Amplitud de Fourier a) Suelo Fundación b) Coronamiento	34
Figura 3.6: Sismo Horizontal MCE a) Aceleraciones b) Velocidades c) Desplazamientos d) Intensidad de Arias	36
Figura 3.7: Sismo Horizontal y Vertical MCE – Amplitud de Fourier	36
Figura 3.8: Vista en planta de la secuencia de construcción del modelo FLAC3D resultante para el embalse de relaves	38
Figura 3.9: Vista en planta y dimensiones del embalse de relaves	39
Figura 3.10: Sección de visualización (izquierda) y vista isométrica (derecha).....	39
Figura 3.11: Contornos de presión de poros (acotado a 0.5 MPa) y niveles freáticos modelados. Cota 2947.5 m s.n.m. (izquierda) y Cota 2955 m .s.n.m (derecha) – Sección de visualización.....	40
Figura 3.12: Sismo Medido Componente Horizontal – Recuperación del registro de aceleraciones en superficie (izquierda) y espectro de aceleraciones (derecha).....	41
Figura 3.13: Sismo Medido Componente Vertical – Recuperación del registro de aceleraciones en superficie (izquierda) y espectro de aceleraciones (derecha).....	42
Figura 3.14: Sismo MCE Componente Horizontal – Recuperación del registro de aceleraciones en superficie (izquierda) y espectro de aceleraciones (derecha).....	42
Figura 3.15: Sismo MCE Componente Vertical – Recuperación del registro de aceleraciones en superficie (izquierda) y espectro de aceleraciones (derecha).....	42
Figura 3.16: Sismo Medido a) Amplitud de Fourier en Coronamiento b) Amplitud de Fourier en Suelo de Fundación c) Función de Transferencia (Coronamiento / Suelo Fundación).....	43
Figura 4.1: Esquema de calibración	45
Figura 4.2: Calibración Estado Crítico (dependencia 2 parámetros) considerando parámetros por defecto y valores calibrados. a) Tensión de corte vs deformación de corte b) Deformación volumétrica vs deformación de corte	46
Figura 4.3: Calibración Estado Crítico Material Muro – Relación pendientes D_r (-) y P_c (kPa) para dos y tres parámetros - Modelo P2PSand	47
Figura 4.4: Calibración Estado Crítico - 3 Parámetros	48
Figura 4.5. Calibración Cyc-DSS – Confinamiento 300 kPa y deformación por corte 1% a) esfuerzo de corte-deformación b) esfuerzo de corte-vertical efectivo c) Incremento deformación volumétrica- deformación por corte	50
Figura 4.6: Calibración Cyc-DSS – Confinamiento 300 kPa y deformación por corte 0.1% a) esfuerzo de corte-deformación b) esfuerzo de corte-vertical efectivo c) Incremento deformación volumétrica- deformación por corte	51
Figura 4.7: Calibración Cyc-DSS – Confinamiento 50 kPa y deformación por corte 1% a) esfuerzo de corte-deformación b) esfuerzo de corte-vertical efectivo c) Incremento deformación volumétrica- deformación por corte.....	52
Figura 4.8: Calibración Cyc-DSS – Confinamiento 50 kPa y deformación por corte 0.1% a) esfuerzo de corte-deformación b) esfuerzo de corte-vertical efectivo c) Incremento deformación volumétrica- deformación por corte.....	53

Figura 4.9: Calibración curvas de degradación - Amortiguamiento (superior) y G/G_{max} (inferior) – Modelo P2PSand.....	54
Figura 4.10: Calibración Estado Crítico.....	57
Figura 4.11: Calibración Cyc-DSS – Confinamiento 300 kPa y deformación por corte 1% a) esfuerzo de corte-deformación b) esfuerzo de corte-vertical efectivo c) Incremento deformación volumétrica- deformación por corte.....	59
Figura 4.12: Calibración Cyc-DSS – Confinamiento 300 kPa y deformación por corte 0.1% a) esfuerzo de corte-deformación b) esfuerzo de corte-vertical efectivo c) Incremento deformación volumétrica- deformación por corte.....	60
Figura 4.13: Calibración Cyc-DSS – Confinamiento 50 kPa y deformación por corte 1% a) esfuerzo de corte-deformación b) esfuerzo de corte-vertical efectivo c) Incremento deformación volumétrica- deformación por corte.....	61
Figura 4.14: Calibración Cyc-DSS – Confinamiento 50 kPa y deformación por corte 0.1% a) esfuerzo de corte-deformación b) esfuerzo de corte-vertical efectivo c) Incremento deformación volumétrica- deformación por corte.....	62
Figura 4.15: Comportamiento monótonico del modelo constitutivo M-C.....	64
Figura 4.16: Comparación de las curvas tensión-deformación de los modelos constitutivos P2PSand, NorSand y M-C.....	65
Figura 4.17: a) Módulo de corte máximo, G_{max} b) Velocidad de onda de corte, V_s	66
Figura 5.1: Casos de estudio.....	69
Figura 5.2: Contornos de desplazamientos remanentes horizontales (m) a) sin amortiguamiento Rayleigh b) amortiguamiento Rayleigh 0.2%.....	70
Figura 5.3: Contornos de desplazamientos remanentes verticales (m) a) sin amortiguamiento Rayleigh b) amortiguamiento Rayleigh 0.2%.....	71
Figura 5.4: Asentamientos (m) – Punto de monitoreo en coronamiento.....	71
Figura 5.5: Comparación de aceleraciones horizontales medidas y obtenidas del modelo.....	72
Figura 5.6: Contornos de deformaciones de corte máximas (%) a) sin amortiguamiento Rayleigh b) amortiguamiento Rayleigh 0.2%.....	73
Figura 5.7: Contornos de deformaciones volumétricas a) sin amortiguamiento Rayleigh b) amortiguamiento Rayleigh 0.2%.....	74
Figura 5.8: Puntos de monitoreo tiempo-historia del incremento de deformación volumétrica (%), deformación por corte (%) y aceleración (m/s^2). Simulación con P2PSand.....	75
Figura 5.9. Puntos de monitoreo. Tensión de corte (%) vs deformación por corte (%). Simulación con P2PSand.....	76
Figura 5.10: Razón de incremento de presión de poros - Amortiguamiento Rayleigh 0.2%.....	77
Figura 5.11: Contornos de desplazamientos remanentes (m) – Vista en planta a) horizontales b) verticales.....	78
Figura 5.12. Contornos de desplazamientos horizontales remanentes (m) – Sección de visualización – Modelos 2D y 3D.....	79
Figura 5.13: Contornos de desplazamientos verticales remanentes (m) – Sección de visualización – Modelos 2D y 3D.....	79
Figura 5.14: Contornos de desplazamientos sísmicos horizontales (m) – Isocontorno de 5 m a) sin amortiguamiento Rayleigh b) amortiguamiento Rayleigh 0.2%.....	80
Figura 5.15: Contornos de desplazamientos sísmicos verticales (m) - Isocontorno de 2 m a) sin amortiguamiento Rayleigh b) amortiguamiento Rayleigh 0.2%.....	81

Figura 5.16: Asentamientos (m) – Punto de monitoreo en coronamiento	81
Figura 5.17: Razón de incremento de presión de poros - Amortiguamiento Rayleigh 0.2%	82
Figura 5.18: Incremento del Sismo MCE.....	83
Figura 5.19: Contornos de desplazamientos sísmicos horizontales (m)	83
Figura 5.20: Contornos de desplazamientos sísmicos verticales (m).....	84
Figura 5.21: Historia de desplazamiento horizontal (m)	84
Figura 5.22: Historia de desplazamiento vertical (m)	84
Figura 5.23: Desplazamiento horizontal y vertical en el coramiento vs incremento del sismo MCE	85
Figura 5.24: Contornos de desplazamientos sísmicos horizontales (m)	86
Figura 5.25. Contornos de desplazamientos sísmicos verticales (m).....	86
Figura 5.26. Contornos de desplazamientos horizontales remantes (m) – Sección de visualización	87
Figura 5.27. Contornos de desplazamientos verticales remantes (m) – Sección de visualización	87
Figura 5.28. Ubicación de control.....	88