

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes y motivación.....	2
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo General	4
1.2.2 Objetivos Específicos.....	4
1.3 Alcances.....	4
1.4 Metodologías y herramientas utilizadas	5
1.5 Resultados esperados	5
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	6
2.1 Depósitos de relave.....	7
2.2 Embalse de relaves	7
2.2.1 Componentes principales de un embalse de relaves.	8
2.3 Fallas de depósitos de relave	9
2.4 Revisión de posibles mecanismos de fallas de depósitos de relave	10
2.4.1 Rebalse (<i>Overtopping</i>):	11
2.4.2 Filtraciones y erosión interna (<i>Piping</i>):.....	11
2.4.3 Inestabilidad de Talud	12
2.5 Normativa Vigente	13
2.5.1 Decreto N°248.....	14
2.5.2 Decreto N°50.....	14
2.6 Estabilidad de taludes	15
2.6.1 Factor de seguridad (FS)	16
2.7 Métodos de cálculo para análisis de estabilidad de taludes.....	16
2.7.1 Estabilidad de taludes en 3D	17
2.7.2 Método de equilibrio límite (MEL).....	17
2.7.3 Método de elementos finitos (MEF)	18
2.8 Modelos Constitutivos.....	18
2.8.1 Modelo lineal elástico	18
2.8.2 Modelo Finn	19
2.8.3 Modelo Hardening Soil (HS)	19
2.8.4 Modelo Hardening Soil con pequeñas deformaciones (HS-Small)23	
2.9 Análisis pseudoestáticos.....	26
2.9.1 Expresión de Saragoni.....	26

2.9.2 Manual Chileno de carreteras.....	27
2.10 Análisis Dinámico	27
2.10.1 Amortiguamiento	28
2.10.2 Amortiguamiento de Rayleigh	28
2.10.3 Método de Newmark	29
2.11 Peligro Sísmico.....	30
2.11.1 Terremotos Intraplaca Oceánica	31
2.11.2 Terremotos Interplaca	31
2.11.3 Mapa de Peligro sísmico Probabilístico.....	31
2.11.4 Leyes de Atenuación	32
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....	33
3.1 Objetivo específico 1:.....	34
3.1.1 Revisión bibliográfica	34
3.2 Objetivo específico 2:.....	34
3.2.1 Levantamiento de información	34
3.2.2 Muestreo.....	34
3.2.3 Ensayos de laboratorio	35
3.2.4 Gravedad específica	37
3.3 Objetivo específico 3:.....	40
3.3.1 Sismo de Estudio.....	40
3.4 Objetivo específico 4:.....	40
3.4.1 Autocad Civil 3D	40
3.4.2 Slide 2.....	41
3.5 Objetivo específico 5	41
3.6 Objetivo específico 6	41
3.6.1 RS2	41
3.6.2 RS3	42
3.7 Objetivo específico 7:.....	42
3.7.1 Análisis de Estabilidad.....	43
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	44
4.1 Antecedentes geológicos, geotécnicos y estructurales del embalse de relaves de Mina Chépica.....	45
4.1.1 Generalidades del deposito	45
4.1.2 Topografía	46

4.1.3	Transporte y Descarga del relave	47
4.1.4	Captación y desvió de la quebrada la Hoyada	47
4.1.5	Sistema de Drenaje.....	48
4.1.6	Material Muro, embalse de mina Chépica	48
4.1.7	Geología del lugar	50
4.1.8	Relave.....	55
4.2	Nivel freático	56
4.3	Caracterización geotécnica	56
4.3.1	Límites de Atterberg	57
4.3.2	Análisis Granulométrico	58
4.3.3	Gravedad específica	58
4.3.4	Ensayo Proctor	59
4.3.5	Ensayo Triaxial	60
4.4	Sismo de Estudio	67
4.4.1	Terremoto del Maule 2010.....	67
4.4.2	Atenuación sísmica	69
4.4.3	Análisis de respuesta de sitio	70
4.5	Método de Equilibrio límite (MEL)	74
4.5.1	Modelamiento en Slide 2	74
4.6	Modelamiento numérico vía elementos finitos	81
4.6.1	Tamaño de Malla.....	84
4.6.2	<i>Input</i> sísmico	85
4.6.3	Condiciones de borde dinámicas.....	86
4.6.4	Amortiguamiento de Rayleigh	87
4.6.5	Modelo estático en RS3	88
4.6.6	Modelos estáticos en RS2	90
4.6.7	Modelos Dinámicos en RS2.....	91
CAPITULO 5: CONCLUSIÓN		109
6 REFERENCIAS		113
7 ANEXOS.....		117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Imagen del colapso del tranque de Mina Las Palmas	2
Figura 1.2: Ubicación geográfica del embalse de relaves de Mina Chépica	3
Figura 2.1: Embalse de relaves de Mina Chépica construido con material de empréstito de zonas aledañas 2021	8
Figura 2.2: Componentes principales de un embalse de relaves	9
Figura 2.3: Principales fallas históricas de depósitos de relaves a nivel mundial	10
Figura 2.4: Falla por rebalse, presa Auburn, Cofferdam	11
Figura 2.5: Falla por erosión interna	12
Figura 2.6: Falla por inestabilidad de talud	12
Figura 2.7: Mecanismos de falla de depósitos de relave al año 2016	13
Figura 2.8: Falla de un talud	15
Figura 2.9: Métodos de cálculo de estabilidad de taludes	17
Figura 2.10: Relación hiperbólica entre el esfuerzo y deformación	21
Figura 2.11; Determinación del valor de <i>Eoedref</i> en ensayos edométricos	22
Figura 2.12: Superficie de fluencia del modelo HS en el espacio de esfuerzos principales	23
Figura 2.13: Comportamiento característico rigidez-deformación del suelo	24
Figura 2.14: Parámetros de rigidez en el modelo HS Small	26
Figura 2.15: Zonificación sísmica en Chile central	27
Figura 2.16 Gráfico de la relación de amortiguación, amortiguación del 20% a 2 y 8 Hz	29
Figura 2.17: Fuentes sismogénicas principales en Chile central, letra “a” representa fuente interplaca tipo thrust, “b” intraplaca de profundidad intermedia, “c” cortical y “d” outer-rise . El color azulado representa la posición esquemática de la placa Nazca, y en color verde la placa Sudamericana	30
Figura 2.18: Mapa de peligro sísmico probabilístico conjunto, incorporando fuente interplaca e interplaca oceánica	32
Figura 3.1: Ubicación georreferenciada de los puntos de muestreo de la Memoria y de estudios previos	35
Figura 3.2: Partes de la Célula Triaxial Universidad de Talca	38
Figura 3.3: Estado de esfuerzos en ensayo CID	39
Figura 3.4: Estado de esfuerzos en ensayo CIU	39
Figura 3.5: Ubicación de los puntos de medición en el estudio sísmico	40
Figura 3.6: Imagen referencial de los modelos en 2D en el software Slide 2	41
Figura 3.7: Imagen referencial de los modelos en 2D en el software RS2	42
Figura 3.8: Imagen del modelo en 3D en el software RS3	42
Figura 3.9: Metodología general del proyecto	43
Figura 4.1: Imagen panorámica del depósito de estudio	45

Figura 4.2: Plano adaptado de Google Earth de las principales instalaciones de la Mina Chépica	46
Figura 4.3: Superficie reconstruida del emplazamiento del embalse de relaves de Mina Chépica	46
Figura 4.4: Transporte de relaves por tubería de HDPE por gravedad.....	47
Figura 4.5: Canal de desvío de la quebrada la Hoyada	48
Figura 4.6: Muro del embalse de relaves de mina chépica	49
Figura 4.7: Mapa geológico del área de estudio, delimitado en color verde se presenta la zona de estudio	51
Figura 4.8: Columna estratigráfica del área de Mina Chépica	52
Figura 4.9: Estrato de roca y suelo visualizado a partir de la extracción del material del muro.....	53
Figura 4.10: Imagen del relave depositado en la cubeta del depósito	55
Figura 4.11: Nivel freático asociado a un perfil del embalse de relaves de Mina Chépica .	56
Figura 4.12: Gráficas del límite líquido para las muestras del suelo de fundación y muro .	57
Figura 4.13 Figura 4.13: Curva granulométrica del suelo de fundación, muro y relave	58
Figura 4.14: Curva de compactación para el suelo	59
Figura 4.15: Curva de compactación para el muro	60
Figura 4.16: Probeta remoldeada del Material Muro de Empréstito.	61
Figura 4.17: Instalación de la probeta remoldeada en la célula triaxial	61
Figura 4.18: Proceso de Saturación de la probeta en el equipo triaxial).	62
Figura 4.19: Comprobación de la saturación de la probeta a partir del coeficiente B.....	63
Figura 4.20: Etapa de consolidación de la probeta en el equipo triaxial.	64
Figura 4.21: Etapa de corte de la probeta del muro	65
Figura 4.22: Probeta fallada del muro de empréstito	65
Figura 4.23: Envolvente de falla para el muro de empréstito.....	66
Figura 4.24: Envolvente de falla para el Suelo de Fundación	66
Figura 4.25: Hipocentro del terremoto del 27 de febrero de 2010	68
Figura 4.26: Registros de aceleraciones para las tres direcciones del terremoto del 27 de febrero medidas en la estación de la UTFSM de Valparaíso	68
Figura 4.27: Registro sísmico escalado	70
Figura 4.28: Columna de suelo en el modelamiento en Deepsoil.	72
Figura 4.29: Registro de aceleraciones medidas en el estrato de suelo (a), Andesita lixiviada (b) y Andesita Z1 (c)	72
Figura 4.30: Respuesta espectral del terremoto del 27F	73
Figura 4.31: Ubicación de los perfiles seleccionados para los análisis 2D	74
Figura 4.32: Características del modelo en SLIDE 2	75
Figura 4.33: Factores de seguridad para la primera etapa del depósito, considerando los tres perfiles (análisis estático)	76
Figura 4.34: Figura 4.34: Factores de seguridad para la segunda etapa del depósito, considerando los tres perfiles (análisis estático)	76

Figura 4.35: Factores de seguridad para la tercera etapa del depósito, considerando los tres perfiles. (análisis estático)	76
Figura 4.36: Factores de seguridad para los análisis pseudoestático por zonificación sísmica en la primera etapa del depósito, considerando los tres perfiles	77
Figura 4.37: Factores de seguridad para los análisis pseudoestático por zonificación sísmica en la segunda etapa del depósito, considerando los tres perfiles	77
Figura 4.38: Factores de seguridad para los análisis pseudoestático por zonificación sísmica en la segunda etapa del depósito, considerando los tres perfiles	77
Figura 4.39: Factores de seguridad para los análisis pseudoestático del 27F en la primera etapa del depósito, considerando los tres perfiles	78
Figura 4.40: Factores de para los análisis pseudoestático de la segunda etapa del depósito, considerando los tres perfiles	78
Figura 4.41: Factores de seguridad para los análisis pseudoestático de la tercera etapa del depósito, considerando los tres perfiles	78
Figura 4.42: Factores de seguridad para la reducción de la porosidad del dren en la tercera etapa del depósito, considerando los tres perfiles	79
Figura 4.43: Factores de seguridad para la reducción de la porosidad del dren en la tercera etapa del depósito, considerando los tres perfiles	79
Figura 4.44: Gráfica de los factores de seguridad en Slide 2. Línea en color rojo representa un factor de seguridad crítico (FS=1)	80
Figura 4.45: Factores de seguridad para el caso en que exista colmatación del sistema de drenaje. Línea en color rojo representa un factor de seguridad crítico (FS=1)	81
Figura 4.46: Parámetro $E_{50\ ref}$ del modelo HS-Small para el muro.	82
Figura 4.47: Parámetro $E_{50\ ref}$ del modelo HS-Small para el suelo.	83
Figura 4.48: Modelo dinámico considerando Base rígida	86
Figura 4.49: Representación de la condición de borde absorbente	86
Figura 4.50: Representación de la condición de borde de transmisión	87
Figura 4.51: Condiciones de borde dinámicas en el modelo RS2	87
Figura 4.52: Espectros de respuesta para el registro escalado del 27F	88
Figura 4.53: Amortiguamientos de Rayleigh en modelos RS2	88
Figura 4.54: Contornos de desplazamientos totales en el modelo 3D.....	89
Figura 4.55: Corte transversal del modelo en 3D. Desplazamiento en x (a), asentamientos (b) y desplazamientos totales (c)	90
Figura 4.56: Desplazamientos verticales (a), desplazamientos horizontales (b) y desplazamientos totales en la simulación estática del perfil central del depósito.	91
Figura 4.57: Modelo dinámico del perfil central del depósito	92
Figura 4.58: Desplazamientos totales transcurridos 40 segundos del evento sísmico, para un amortiguamiento promedio de 3% (a), 2%(b) y 1%(c)	93
Figura 4.59: Desplazamientos totales transcurridos 50 segundos del evento sísmico, para un amortiguamiento promedio de 3% (a), 2%(b) y 1%(c)	94

Figura 4.60: Desplazamientos totales transcurridos los 72 segundos de duración del evento sísmico, para un amortiguamiento promedio de 3% (a), 2%(b) y 1%(c).	95
Figura 4.61: Asentamiento registrados una vez finalizado el sismo, para un amortiguamiento promedio de 3% (a), 2%(b) y 1%(c)	96
Figura 4.62: Asentamiento en el coronamiento del embalse de relaves	97
Figura 4.63:Desplazamientos horizontales en el muro, para un amortiguamiento promedio de 3% (a), 2%(b) y 1%(c).	98
Figura 4.64: Desplazamientos horizontales para los puntos 8 y 6.	98
Figura 4.65: Elevaciones del coronamiento antes y después del sismo.	99
Figura 4.66: Aceleración medida en el estrato de roca de la Andesita Z1, para un amortiguamiento promedio de 3% (a), 2%(b) y 1% (c).	100
Figura 4.67: Figura 4.67: Aceleraciones horizontales en la base del muro (Punto 6), para un amortiguamiento promedio de 3% (a), 2%(b) y 1%(c).	101
Figura 4.68: Aceleración horizontal en el coronamiento del muro (Punto 2), para un amortiguamiento promedio de 3% (a), 2%(b) y 1%(c)	102
Figura 4.69: Contornos de exceso de presión de poros al final de la carga sísmica. Amortiguamiento de 3% (a), 2%(b) y 1%(c).	103
Figura 4.70: Resultados de la evaluación de licuefacción del punto del relave cercano al muro: (a) Presión de poros, y (b) Relación de exceso de presión de poros (Ru) en el transcurso del sismo.	104
Figura 4.71: Resultados de la evaluación de licuefacción del punto en la cola del relave: (a) Presión de poros, y (b) Relación de exceso de presión de poros (Ru) en el transcurso del sismo	104
Figura 4.72: Contornos de desplazamientos del perfil central con elevación del nivel freático. Desplazamientos verticales (a) y desplazamientos horizontales (b)	105
Figura 4.73: Registros de desplazamientos medidos en puntos de monitoreo en el muro	106
Figura 4.74: Exceso de presiones de poro considerando la elevación del nivel freático. .	106
Figura 4.75: Resultados de la evaluación de licuefacción del punto en la base del muro: (a) Presión de poros, y (b) Relación de exceso de presión de poros (Ru) en el transcurso del sismo.	107
Figura 7.1: Muestra roleada para análisis granulométrico.	117
Figura 7.2: Límite líquido en la cuchara de Casagrande.	120
Figura 7.3: Ensayo para determinar la Gravedad específica	121
Figura 7.4: Suelo compactado por Proctor modificado.	123
Figura 7.5: Resultados triaxial CID del muro (p - q).....	129
Figura 7.6: Resultados triaxial CID del muro (ϵ - q).....	130
Figura 7.7: Resultados triaxial CID del muro (ϵ - ϵ_v).....	130
Figura 7.8: Resultados triaxial CIU del muro (p - q).....	131
Figura 7.9: Resultados triaxial CIU del muro (ϵ - q).....	131
Figura 7.10: Resultados triaxial CIU del muro (ϵ - Δu)	132

Figura 7.11: Resultados triaxial CIU del Suelo ($p - q$).....	142
Figura 7.12: Resultados triaxial CIU del Suelo ($\varepsilon - q$).....	143
Figura 7.13: Resultados triaxial CIU del Suelo ($\varepsilon - \Delta u$).....	143
Figura 7.14: Degradación de la rigidez al corte.....	144
Figura 7.15: Amortiguamiento de suelo.....	144
Figura 7.16: Resistencia al corte del suelo.....	145

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Desencadenantes comunes y principales causas de falla.	13
Tabla 2.2: Parámetros modelo lineal elástico	19
Tabla 2.3: Parámetros modelo Hardening soil (HS).....	23
Tabla 2.4: Parámetros del modelo HS Small	25
Tabla 2.5: Coeficiente máximo efectivo de aceleración.....	27
Tabla 2.6: Leyes de atenuación para determinar las aceleraciones máximas	32
Tabla 3.1: Coordenadas geográficas de los 3 puntos de muestreo de la Memoria	35
Tabla 3.2: Series de tamices para análisis granulométrico.	36
Tabla 4.1: Parámetros del suelo y muro asociados a estudios previos.	49
Tabla 4.2: Parámetros de la Andesita lixiviada	53
Tabla 4.3: Parámetros de la Andesita porfídica Z1	54
Tabla 4.4: Parámetros de la Andesita porfídica Z2	54
Tabla 4.5: Resumen de los parámetros obtenidos del levantamiento de información para el relave	55
Tabla 4.6 : Resultados límites de Atterberg	57
Tabla 4.7: Gravedad específica determinada para los materiales.....	58
Tabla 4.8: Resumen ensayo Proctor modificado al suelo	59
Tabla 4.9: Resumen ensayo Proctor modificado al muro	59
Tabla 4.10: Resumen de los ensayos realizados en esta investigación para los materiales analizados	67
Tabla 4.11: Aceleraciones máximas asociadas a las tres direcciones del terremoto del 27 de febrero medidas en la estación de la UTFSM de Valparaíso	69
Tabla 4.12: Parámetros para las leyes de atenuación	69
Tabla 4.13: Aceleraciones máximas estimadas en roca para diferentes ubicaciones	69
Tabla 4.14: Características de la columna de suelo de la zona de estudio	71
Tabla 4.15: PGA asociado a cada estrato	73
Tabla 4.16: Resumen de los factores de seguridad en Slide 2.	80
Tabla 4.17: Resumen de los factores de seguridad para el para el caso en que exista colmatación del sistema de drenaje	81
Tabla 4.18: Modelos definidos en RS2 y RS3 para cada material	82
Tabla 4.19: Parámetros para los materiales del Suelo y Muro	83
Tabla 4.20: Parámetros para los estratos de Roca.	84
Tabla 4.21: Parámetros para el material de Relave.	84
Tabla 4.22: Tamaño máximo de la malla del modelo	85
Tabla 4.23: Resumen de los desplazamientos máximos registrados por los modelos numéricos	108
Tabla 7.1: Curva granulométrica para la muestra del suelo de fundación del embalse de relaves de Mina Chépica.....	117

Tabla 7.2: Curva granulométrica para la muestra del muro del embalse de relaves de Mina Chépica.	118
Tabla 7.3: Curva granulométrica para la muestra del relave del embalse de relaves de Mina Chépica.	118
Tabla 7.4: Límites de Atterberg para la muestra del suelo de fundación.	119
Tabla 7.5: Límites de Atterberg para la muestra del muro del embalse de relaves.	119
Tabla 7.6: Determinación de la gravedad específica de las partículas menores a 5mm.	120
Tabla 7.7: Determinación de densidad neta de los gruesos.	121
Tabla 7.8: Ensayo Proctor modificado del suelo de fundación.	122
Tabla 7.9: Ensayo Proctor modificado del Muro.	122
Tabla 7.10: Resultados ensayo triaxial CID para el Muro. Parte 1.	124
Tabla 7.11: Resultados ensayo triaxial CID para el Muro. Parte 2.	125
Tabla 7.12: Resultados ensayo triaxial CID para el Muro. Parte 3.	126
Tabla 7.13: Resultados ensayo triaxial CID para el Muro. Parte 4.	127
Tabla 7.14: Resultados ensayo triaxial CID para el Muro. Parte 5.	128
Tabla 7.15: Resultados ensayo triaxial CID para el Muro. Parte 6.	129
Tabla 7.16: Resultados ensayo triaxial CIU para el Muro. Parte 1.	133
Tabla 7.17: Resultados ensayo triaxial CIU para el Muro. Parte 2.	134
Tabla 7.18: Resultados ensayo triaxial CIU para el Muro. Parte 3.	135
Tabla 7.19: Resultados ensayo triaxial CIU para el Muro. Parte 4.	136
Tabla 7.20: Resultados ensayo triaxial CIU para el Muro. Parte 5.	137