
Tabla de contenido

RESUMEN	ii
AGRADECIMIENTOS	vi
CAPÍTULO 1 : INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del problema.....	2
1.2 Solución propuesta	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Alcances del proyecto.....	5
1.5. Metodologías y herramientas utilizadas	5
CAPÍTULO 2 : MARCO TEÓRICO	7
2.1 Manejo de relaves.....	8
2.1.1 Embalse de relave.....	8
2.1.2 Descarga de relaves	8
2.2 Fallas asociadas a depósitos de relaves	9
2.2.1 Deslizamiento Rotacional.....	10
2.2.2 Falla de fundación	10
2.2.3 <i>Overtopping</i> o Desbordamiento.....	11
2.2.4 Licuación Sísmica.....	12
2.2.5 Licuación Estática.....	13
2.2.6 Tubificación (<i>Piping</i>)	13
2.3 Infiltración en depósitos de relaves	14
2.4 Drenes en depósitos de relaves.....	14
2.5 Terremoto 27 de febrero de 2010	15

2.5.1 Comportamiento de los depósitos de relaves para el terremoto del 27F del 2010 ...	17
2.6 Análisis de estabilidad.....	19
2.6.1 Decreto Supremo N° 248: Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves	19
2.6.2 Peligro Sísmico.....	22
2.6.3 Leyes de atenuación.....	23
2.6.4 Estabilidad por método de equilibrio límite	25
2.6.5 Método de desplazamiento bloque rígido de Newmark	28
2.7 Caracterización geotécnica	29
2.7.1 Ensayo infiltración directa en área circular	29
2.7.2 Ensayo Porchet	31
2.7.3 Ensayo Porchet	32
2.7.4 Ensayos en laboratorio.....	33
CAPÍTULO 3 : METODOLOGÍA	35
3.1 Metodología.....	36
A. Etapa 1: Análisis operacional.....	36
B. Etapa 2: Caracterización geotécnica	36
C. Etapa 3: Ubicación nivel freático.....	37
D. Etapa 4: Identificación de la sollicitación sísmica	37
E. Etapa 5: Evaluación pseudoestática	37
CAPÍTULO 4 : ANÁLISIS DE RESULTADOS	39
4.1 Estimación volumen de relaves al año 2010.	40
4.1.1 Operación y depositación de relaves del embalse según diseño original	40
4.1.2 Reconstrucción operación y depositación de relaves histórica del embalse	43
4.1.3 <i>Timeline</i> comparativo para el llenado de cubeta de relaves	49

4.1.3.1 Volumen vs Tiempo	50
4.1.3.2 Crecimiento Muro vs Tiempo.....	50
4.1.4 Resultados estudio operacional	52
4.2 Caracterización geotécnica.....	55
4.2.1 Formaciones geológicas	58
4.2.2 Muro	62
4.2.3 Relave convencional.....	64
4.2.4 Suelo de fundación	65
4.3 Análisis de infiltraciones y estimación del nivel freático.....	68
4.3.1 Análisis configuración de diseño.....	68
4.3.2 Análisis configuración de operación histórica.....	69
4.4 Estudio sísmico.....	70
4.4.1 Efecto de sitio	73
4.5 Análisis pseudoestático.....	79
4.5.1 Caso 1: Análisis según consideraciones originales del diseño	79
4.5.2 Caso 2: Análisis según DS-248	80
4.5.3 Caso 3: Análisis según Terremoto del 27 de febrero del año 2010.....	86
4.5.4 Comparación de factores de seguridad	87
CAPÍTULO 5 : CONCLUSIÓN.....	92
REFERENCIAS	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:Ubicación Geográfica3

Figura 1-2: Ubicación epicentro 27F y embalse Mina Chépica3

Figura 2-1: Embalse Enami Vallenar 8

Figura 2-2:Descarga de relaves subáreas y corrientes superficiales de baja velocidad trenzadas en una playa de colas.9

Figura 2-3: Vista Falla por Deslizamiento rotacional 10

Figura 2-4: Vista Falla de Fundación presa Aznacóllar, Mina Los Frailes, 11

Figura 2-5: Vista Falla por Overtopping 11

Figura 2-6: Vista Falla por Licuefacción Sísmica en relaves 12

Figura 2-7: Vista Falla por Licuefacción Tranque Las Palmas, Maule 2010..... 12

Figura 2-8: Vista Falla por Licuefacción Estática 13

Figura 2-9: Vista Falla por Tubificación 14

Figura 2-10: Ejemplo sistema de drenaje y canal de inspección 15

Figura 2-11: Mapa del epicentro (rojo) y replicas (azul) del terremoto del 27 de febrero del año 2010 16

Figura 2-12: Diagrama de Fuerza horizontal y vertical en un depósito de relaves21

Figura 2-13: Zonificación sísmica de las regiones zona centro sur y Tabla Aceleración efectiva máxima según zona22

Figura 2-14: Mapa de PGA asociado a la Región del Maule, utilizando métodos probabilísticos y determinísticos.....23

Figura 2-15: Diagrama de cuerpo libre sobre el bloque o dovela i27

Figura 2-16: Método del bloque deslizante28

Figura 2-18: Punto 8, ensayo infiltración directa en área circular.....30

Figura 2-19:Punto 5, ensayo Porchet.....31

Figura 2-20: Equipo estándar en terreno32

Figura 3-1: Metodología utilizada para el desarrollo de esta memoria.38

Figura 4-1: Perfiles transversales al eje del muro embalse de relaves Mina Chépica (Elaboración Propia)40

Figura 4-2: Representación spigots y laguna de aguas claras según diseño.....41

Figura 4-3: Perfil B etapa 1 embalse de relaves mina Chépica	41
Figura 4-4: Perfil B etapa 2 embalse de relaves mina Chépica	42
Figura 4-5: Perfil B etapa 3 embalse de relaves mina Chépica	42
Figura 4-6:Fotografía subetapa 1 embalse de relaves mina Chépica vista desde oficinas – Marzo,2008.....	43
Figura 4-7: Fotografía subetapa 2 embalse de relaves mina Chépica- septiembre, 2012	44
Figura 4-8: Fotografía subetapa 3 embalse de relaves mina Chépica – octubre ,2015	45
Figura 4-9: Fotografía etapa 2 embalse de relaves mina Chépica, vista desde planta de procesamiento de minerales -octubre,2018	45
Figura 4-10: Representación laguna de aguas claras según descarga por spigot derecho	46
Figura 4-11:Representación laguna de aguas claras según descarga por spigot central	47
Figura 4-12:Representación laguna de aguas claras según descarga por spigot izquierdo	47
Figura 4-13: Representación laguna de aguas claras según descarga por spigot lateral	48
Figura 4-14: Representación laguna de aguas claras según descarga por spigot central e izquierdo	48
Figura 4-15: Embalse de relaves después de evento de precipitación – junio 2019	49
Figura 4-16: Grafica comparativa de volúmenes	50
Figura 4-17: Grafica Comparación Operacional de Elevación vs Tiempo	51
Figura 4-18: Grafica Comparación Operacional de Elevación vs Tiempo 2010	52
Figura 4-19: Grafica Comparación Volumen Cubeta de Relaves vs Tiempo	53
Figura 4-20: Modelo embalse de relaves año 2010 para operación según diseño (Perfil A)	53
Figura 4-21: Modelo embalse de relaves año 2010 para operación según diseño (Perfil B)	54
Figura 4-22: Modelo embalse de relaves año 2010 para operación según diseño (Perfil C)	54
Figura 4-23: Modelo embalse de relaves año 2010 para operación histórica (Perfil A)	54
Figura 4-24: Modelo embalse de relaves año 2010 para operación histórica (Perfil B)	55
Figura 4-25:Modelo embalse de relaves año 2010 para operación histórica (Perfil C)	55
Figura 4-26: Puntos utilizados en campaña de terreno en embalse mina Chépica.....	56
Figura 4-27:Mapa geológico del área de estudio.....	58
Figura 4-28: Columna estratigráfica del área Mina Chépica y alrededores	59
Figura 4-29: Andesita en zona de lixiviación.....	60
Figura 4-30: Andesita porfídica de piroxeno.....	60

Figura 4-31: Andesita porfídica gris verdosa	61
Figura 4-32: Muro etapa 1 año 2008	62
Figura 4-33: Corte vertical ladera en piscina de recolección	63
Figura 4-34: Cubeta de relaves año 2012	65
Figura 4-35: Excavaciones aledañas zona del embalse de relaves de Mina Chépica.....	65
Figura 4-36: Corte Vertical Calicata en suelo de fundación	66
Figura 4-37: Columna de suelo zona de estudio.....	68
Figura 4-38: Resultados para diseño con drenaje operativo y no operativo.....	69
Figura 4-39: Resultados para Op. histórica con drenaje operativo y no operativo	69
Figura 4-40:Registro de aceleraciones (Fuente: RENADIC)	70
Figura 4-41: Comparación Leyes de atenuación con PGA Roca en localidades de Talca y Valparaíso.....	71
Figura 4-42: Comparación Leyes de atenuación con PGA Roca en localidades de Talca y Valparaíso (Elaboración propia).....	72
Figura 4-43: Grafica de amplificación dinámica de suelos (Elaboración propia)	74
Figura 4-44: Modelo Deepsoil para columna de suelo mina Chépica (Elaboración propia).....	75
Figura 4-45: Aceleraciones en cada.....	76
Figura 4-46: Modelos QUAKE/W para configuraciones (a) de diseño y (b) operación histórica.	77
Figura 4-47: Graficas desplazamiento de Newmark en superficie (a) y muro (b) (Elaboración propia).....	78
Figura 4-48:Modelo original – Carga estática y pseudoestática.....	80
Figura 4-49: Factores de Seguridad para configuraciones (a) de diseño y (b) operación histórica para Fase I - Caso 2	82
Figura 4-50: Factores de Seguridad para configuraciones (a) de diseño y (b) operación histórica para Fase II - Caso 2.....	84
Figura 4-51: Factores de Seguridad para configuraciones (a) de diseño y (b) operación histórica para Fase IV - Caso 2	85
Figura 4-52: Factores de Seguridad para configuración de diseño	86
Figura 4-53: Factores de Seguridad para configuración de operación histórica	87
Figura 4-54: Grafica Factores de seguridad – Fase I.....	88

Figura 4-55: Grafica Factores de seguridad – Fase II	88
Figura 4-56: Grafica Factores de seguridad – Fase IV	89
Figura 4-57: Grafica Factores de seguridad – Situación drenaje operativo	90
Figura 4-58: Grafica Factores de seguridad – Situación drenaje operativo	91
Figura 4-59: Grafica Factores de seguridad – Situación drenaje operativo	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Resumen catastro consecuencias terremoto 27F.....	16
Tabla 2-2: Registros UTFSM Terremoto 27F.....	17
Tabla 2-3: Catastro de comportamiento de depósitos de relave del Terremoto del 27F (SERNAGEOMIN, 2010)	18
Tabla 4-1: Resumen campaña de ensayos In-Situ	56
Tabla 4-2: Resumen Ensayos de Laboratorio.....	57
Tabla 4-3: Resultados de cada ensayo.....	58
Tabla 4-4: Características andesita lixiviada	60
Tabla 4-5: Características andesita Z1.....	61
Tabla 4-6: Características andesita Z2.....	61
Tabla 4-7: Características muro.....	62
Tabla 4-8: Resultados Muro	63
Tabla 4-9: Características relave convencional	64
Tabla 4-10: Características suelo de fundación.....	66
Tabla 4-11: Resultados Suelo de fundación	66
Tabla 4-12: Resumen de propiedades estratos	67
Tabla 4-13: Distancias al epicentro	70
Tabla 4-14: Leyes de atenuación y registro UTFSM transversal	72
Tabla 4-15: Resumen resultados teoría de amplificación sísmica.....	73
Tabla 4-16: PGA Estratos columna de suelo.....	77
Tabla 4-17: Resumen resultados Fase I.....	83
Tabla 4-18: Resumen resultados Fase II.....	85
Tabla 4-19: Resumen resultados Fase IV	86
Tabla 4-20: Resumen resultados Drenaje operativo.....	87

Tabla A-1. Curva granulométrica obtenida para material de relave, punto 1	99
Tabla A-2. Curva granulométrica obtenida para material de relave, punto 2.	99
Tabla A-3. Curva granulométrica obtenida para material de relave, punto 3.	100
Tabla A-4. Curva granulométrica obtenida para material de relave, punto 4.	100
Tabla A-5. Curva granulométrica obtenida para material de muro, punto 5.....	100
Tabla A-6. Curva granulométrica obtenida para material de muro, punto 6.....	100
Tabla A-7. Curva granulométrica obtenida para material de muro, punto 8.....	101
Tabla A-8. Curva granulométrica obtenida para material de suelo de fundación, punto 11. ..	101
Tabla A-9. Curva granulométrica obtenida para material de suelo de fundación, punto 12. ..	102
Tabla A-10. Curva granulométrica obtenida para material de suelo de fundación, punto 15.	102
Tabla A-11. Límites de Atterberg obtenidos del material de suelo de fundación.	103
Tabla A-12. Límites de Atterberg obtenidos del material del coronamiento del muro del embalse de relaves.	103
Tabla A-13. Límites de Atterberg obtenidos del material del muro inferior del embalse de relaves.	104
Tabla A-14. Ensayo de densidad in situ mediante cono de arena para punto 5.	105
Tabla A-15. Ensayo de densidad in situ mediante cono de arena para punto 6.	105
Tabla A-16. Ensayo de densidad in situ mediante cono de arena para punto 7.	106
Tabla A-17. Ensayo de densidad in situ mediante cono de arena para punto 9.	106
Tabla A-18. Ensayo de densidad in situ mediante cono de arena para punto 11	107
Tabla A-19. Ensayo de densidad in situ mediante cono de arena para punto 12.	107
Tabla A-20. Ensayo de densidad in situ mediante cono de arena para punto 13.	108
Tabla A-21. Resumen de densidades para cada material.	108
Tabla A-22. Resultados muestra de relave Parte 1	109
Tabla A-23. Resultados muestra de relave Parte 2	110
Tabla A-24. Graficas muestra de relave	111
Tabla A-25. Resultados muestra suelo de fundación	112
Tabla A-26. Resultados muestra suelo de fundación Parte 2	113
Tabla A-27. Graficas muestra suelo de fundación	113
Tabla A-28. Resultados muestra de muro	114
Tabla A-29. Graficas muestra de muro	115

Tabla A-30. Prueba de infiltración Porchet, para puntos 5, 6 y 7.	116
Tabla A-31. Prueba de infiltración Porchet, para puntos 8 y 10.	116
Tabla A-32. Prueba de infiltración Porchet, para punto 13.	117
Tabla A-33. Resumen de permeabilidades obtenidas mediante Ensayo Porchet, y permeabilidades promedio.	117
Tabla A-34. Prueba de Infiltración directa, para puntos 6 y 5.	118
Tabla A-35. Prueba de infiltración directa, para puntos 8, 9 y 10.	118
Tabla A-36. Prueba de Infiltración directa, para puntos 13, 14 y 15.	119
Tabla A-37. Prueba de Infiltración directa con carga variable, para puntos 5, 6 y 7.	120
Tabla A-38. Prueba de Infiltración directa con carga variable, para puntos 8, 9 y 10.	121
Tabla A-39. Prueba de Infiltración directa con carga variable, para puntos 13, 14 y 15.	122
Tabla A-40. Resumen de permeabilidades obtenidas mediante Infiltración directa, y permeabilidades promedio.	123
Tabla A-41. Resumen de permeabilidades ensayo carga variable.	124
Tabla A-42. Resumen de permeabilidades ensayo carga variable.	124