
ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1 : INTRODUCCIÓN..... 1

 1.1 Antecedentes y motivación..... 2

 1.2 Descripción del problema 4

 1.3 Solución propuesta..... 5

 1.4 Objetivo general..... 6

 1.5 Objetivos específicos 6

 1.6. Alcance 7

 1.7. Metodologías 7

 1.7.1 Etapa de terreno y laboratorio..... 8

 1.7.2 Etapa de modelamiento..... 8

CAPÍTULO 2 : MARCO TEÓRICO 9

 2.1 Manejo y clasificación de depósitos de relaves..... 10

 2.1.1 Manejo y clasificación en Chile 10

 2.2 Sistema de drenaje en un depósito de relaves..... 11

 2.2.1 Problemáticas e importancia de un mal diseño de un sistema de drenaje. 12

 2.2.2 Parámetros y estándares de diseño en un sistema de drenaje 13

 2.3 Permeabilidad o conductividad hidráulica..... 20

 2.3.1 Ensayos de laboratorio..... 22

 2.3.2 Ensayos *in situ* 26

 2.3.3 Expresiones empíricas 30

 2.3.4 Curvas de conductividad hidráulica..... 33

CAPÍTULO 3 : METODOLOGÍA 36

3.1 Metodología.....	37
3.2 Ensayos y normativa.....	38
CAPÍTULO 4 : ANÁLISIS DE RESULTADOS	40
4.1 Estudios existentes de las instalaciones de las obras.....	41
4.1.1 Hidrogeología	41
4.1.2 Geotecnia	41
4.1.3 Estratigrafía.....	42
4.1.4 Filtraciones	42
4.2 Ensayos realizados <i>in situ</i>	43
4.3 Resultados.....	44
4.3.1 Reconstrucción de actividades operacionales.....	52
4.3.2 Clasificación de suelos	44
4.3.3 Determinación de la permeabilidad de los materiales:	52
4.3.4 Sensibilidad hidráulica de la permeabilidad:	58
4.3.5 Determinación de la capacidad drenante	60
4.3.6 Modelamiento en <i>SEEP /W</i>	62
4.3.7 Análisis de infiltraciones según el estado operacional del sistema de drenaje....	80
4.3.8 Análisis de infiltraciones considerando precipitaciones.....	85
CAPÍTULO 5 : CONCLUSIÓN.....	93
REFERENCIAS	98
ANEXOS	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Ubicación geográfica del embalse de relaves de Mina Chépica. Google Earth. 4

Figura 1-2. Embalse de relaves, vista aérea. Google Earth. 5

Figura 2-1. Embalse de relaves, elaboración propia. 11

Figura 2-2. Variación del nivel freático respecto a la incorporación de un dedo drenante con distintos niveles de adecuación (Blight, 2010). 14

Figura 2-3. Distintos tipos de dren. a) tubo de barro. b) dren francés. c) dren vertical. (Martínez, 2014). 14

Figura 2-4. Ejemplo de diámetros efectivos (Universidad de Memphis, sf). 17

Figura 2-5. Dren con geotextil. 1) geotextil. 2) material basal, (construblogspain, 2014). 20

Figura 2-6. K para 5 tipos de relaves de oro en Witwatersrand en función de la profundidad (Blight, 2010). 21

Figura 2-7. Ejemplo de cómo se calcula la permeabilidad en ensayos de carga constante (Blight, 2010). 22

Figura 2-8. Permeámetro para realizar prueba a carga constante y variable. 23

Figura 2-9. Ejemplo de cómo se calcula la permeabilidad en ensayos de carga variable (Blight, 2010). 24

Figura 2-10 Método de la raíz cuadrada basada en (Taylor, 1948). 26

Figura 2-11. Consolidación como una función de la profundidad y del factor de tiempo. 26

Figura 2-12. Diferentes tipos de pruebas a carga constante y su factor de forma asociado. (Blight, 2010). 27

Figura 2-13. Ensayo de infiltración directa en área circular realizado en muro de embalse de relaves Chépica. 1) material de relaves. 2) suelo del muro del embalse, elaboración propia. 28

Figura 2-14. Ensayo Porchet realizado en muro de embalse de relaves Chépica, elaboración propia. 30

Figura 2-15 Gráfica de permeabilidades para una porosidad determinada, elaboración propia. 33

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

Figura 4-1. Estratos presentes en la zona de emplazamiento del embalse de relaves, Modificado de Rivas (2015). 42

Figura 4-2. Ubicación de ensayos realizados en la zona de emplazamiento del embalse de relaves. 43

Figura 4-3. Fotografía actual del depósito de relaves de Chépica, autoría propia. 44

Figura 4-4. Embalse de relaves durante su primera etapa. 45

Figura 4-5. Embalse de relaves bajo operación de Polar Star Mining Chile Ltda. 46

Figura 4-6. Embalse de relaves al final de su 1ra etapa, antes del levantamiento del muro para la etapa 2. 47

Figura 4-7. Embalse de relaves después del levantamiento del muro para la etapa 2. 47

Figura 4-8. Cambio de empresas durante periodo de operación histórica, elaboración propia. 51

Figura 4-9. Gráfica de deformación vs tiempo para el ensayo Edométrico realizado en material del muro del embalse. 56

Figura 4-10. Ubicación de perfiles del embalse a analizar en la etapa de modelamiento (diseño 2018). 63

Figura 4-11. Vista en planta de la distribución de los drenes en su etapa 1 y 2. 64

Figura 4-12. Perfil central del embalse de relave según operación para el año 2018. 65

Figura 4-13. Perfil N°2 completo del embalse de relave según operación para el año 2018. 65

Figura 4-14. Carga total y trayectoria del nivel freático para el año 2009 según operación histórica.	66
Figura 4-15. Carga total y trayectoria del nivel freático para para el año 2010 según operación histórica.	66
Figura 4-16. Carga total y trayectoria del nivel freático para para el año 2011 según operación histórica.	67
Figura 4-17. Carga total y trayectoria del nivel freático para para el año 2012 según operación histórica.	67
Figura 4-18. Carga total y trayectoria del nivel freático para para el año 2013 según operación histórica.	68
Figura 4-19. Carga total y trayectoria del nivel freático para el año 2014 según operación histórica.	68
Figura 4-20. Carga total y trayectoria del nivel freático para el año 2015 según operación histórica.	69
Figura 4-21. Carga total y trayectoria del nivel freático para para el año 2016 según operación histórica.	69
Figura 4-22. Carga total y trayectoria del nivel freático para los años 2017- 2018 según operación histórica.	70
Figura 4-23. Perfil 1 del embalse de relave según diseño para el año 2018.	71
Figura 4-24. Perfil 2 del embalse de relave según diseño para el año 2018.	71
Figura 4-25. Perfil 3 del embalse de relave según diseño para el año 2018.	72
Figura 4-26. Perfil N°1 completo del embalse de relave según operación para el año 2018.....	72
Figura 4-27. Perfil N°2 completo del embalse de relave según operación para el año 2018.....	72
Figura 4-28. Perfil N°3 completo del embalse de relave según operación para el año 2018.....	72
Figura 4-29. Carga total y trayectoria del nivel freático para el año 2009 de diseño.	73
Figura 4-30. Carga total y trayectoria del nivel freático para el año 2010.	74
Figura 4-31. Carga total y trayectoria del nivel freático para el año 2010.	74
Figura 4-32. Carga total y trayectoria del nivel freático para el año 2011.	75
Figura 4-33. Carga total y trayectoria del nivel freático para el año 2012.	75
Figura 4-34. Carga total y trayectoria del nivel freático para el año 2013.	76
Figura 4-35. Carga total y trayectoria del nivel freático para el año 2013.	76
Figura 4-36. Carga total y trayectoria del nivel freático para el año 2014.	77
Figura 4-37. Carga total y trayectoria del nivel freático para el año 2015.	77
Figura 4-38. Carga total y trayectoria del nivel freático para el año 2016.	78
Figura 4-39. Carga total y trayectoria del nivel freático para el año 2017-2018.	78
Figura 4-40. Alza en el n.f. al pie del talud aguas abajo producto de la colmatación del dren, elaboración propia.	83
Figura 4-41. Eje central del sis. de drenaje perfil N°2 a distintos grados de colmatación respecto a su porosidad para el año 2018.	85
Figura 4-42. Embalse Chépica después de precipitaciones en junio, 2019, elaboración propia.....	86
Figura 4-43. Perfil N°1 año 2018 operacional, en el instante que el caudal es aplicado.	86
Figura 4-44. Diferencia de caudales del perfil N°1 año 2018 sin precipitaciones (1) y en el instante 0 de haber aplicado las precipitaciones (2).	87
Figura 4-45. Caudales del perfil N°1 año 2018 luego de 12 horas de precipitación continua (3) y 12 horas posteriores al cese de precipitaciones (4).....	87
Figura 4-46. Perfil N° 2 año 2018 operacional, en el instante que el caudal es aplicado.	88

Figura 4-47. Diferencia de caudales del perfil N°2 año 2018 sin precipitaciones (1) y en el instante 0 de haber aplicado las precipitaciones (2).	88
Figura 4-48. Caudales del perfil N°2 año 2018 luego de 12 horas de precipitación continua (3) y 12 horas posteriores al cese de precipitaciones (4).....	88
Figura 4-49. Perfil N°3 año 2018 operacional, en el instante que el caudal es aplicado.	89
Figura 4-50. Diferencia de caudales del perfil N°3 año 2018 sin precipitaciones (1) y en el instante 0 de haber aplicado las precipitaciones (2).	89
Figura 4-51. Caudales del perfil N°3 año 2018 luego de 12 horas de precipitación continua (3) y 12 horas posteriores al cese de precipitaciones (4).....	89
Figura 4-52. Diferencia de presiones de poros del perfil N°1 año 2018 sin precipitaciones (1) y en el instante 0 de haber aplicado las precipitaciones (2).	90
Figura 4-53. Diferencia de presiones de poros del perfil N°1 año 2018 luego de 12 horas de precipitación continua (3) y 12 horas posteriores al cese de precipitaciones (4).	91
Figura 4-54. Diferencia de presiones de poros del perfil N°2 año 2018 sin precipitaciones (1) y en el instante 0 de haber aplicado las precipitaciones (2).	91
Figura 4-55. Diferencia de presiones de poros del perfil N°2 año 2018 luego de 12 horas de precipitación continua (3) y 12 horas posteriores al cese de precipitaciones (4).	91
Figura 4-56. Diferencia de presiones de poros del perfil N°3 año 2018 sin precipitaciones (1) y en el instante 0 de haber aplicado las precipitaciones (2).	92
Figura 4-57. Diferencia de presiones de poros del perfil N°3 año 2018 luego de 12 horas de precipitación continua (3) y 12 horas posteriores al cese de precipitaciones (4).	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1. Volúmenes y tonelajes de relaves durante el periodo de operación.	47
Tabla 4-2 Volúmenes y tonelajes de relaves según diseño.	48
Tabla 4-3. Clasificación de suelos según U.S.C.S.	52
Tabla 4-4. Resumen de permeabilidades in situ obtenidas - Muro.	53
Tabla 4-5. Resumen de permeabilidades in situ obtenidas – Suelo de fundación.	53
Tabla 4-6. Ensayo de permeabilidad a carga constante para material de relaves P3.	53
Tabla 4-7. Ensayo de permeabilidad a carga constante para material de relave P1.	54
Tabla 4-8. Ensayo de permeabilidad a carga constante para material de fundación.	54
Tabla 4-9. Ensayo de permeabilidad a carga constante para material de muro del embalse.	54
Tabla 4-10. Valores de permeabilidad para el lecho rocoso de la zona de emplazamiento del embalse.	55
Tabla 4-11. Determinación de la permeabilidad a partir de ensayos de consolidación a densidades in situ.	56
Tabla 4-12. Resumen de caracterización de los materiales del sistema.	57
Tabla 4-13 Diámetros propuestos para materiales de filtro y drenantes.	60
Tabla 4-14. Estimación indirecta de d_{10} a partir de las permeabilidades esperadas.	60
Tabla 4-15. Cálculo de caudales utilizando d_{10} como radio hidráulico medio.	61
Tabla 4-16. Área necesaria para un factor de seguridad 10.	61
Tabla 4-17. Condiciones de borde para modelos según operación histórica.	65
Tabla 4-18. Condiciones de borde para modelos según diseño.	73
Tabla 4-19. Resumen de los flujos encontrados en el sistema del embalse durante las precipitaciones.	90
Tabla A-1. Prueba de Infiltración directa, para puntos 6 y 5.	100
Tabla A-2. Prueba de infiltración directa, para puntos 8, 9 y 10.	100
Tabla A-3. Prueba de Infiltración directa, para puntos 13, 14 y 15.	101
Tabla A-4. Prueba de Infiltración directa con carga variable, para puntos 5, 6 y 7.	102
Tabla A-5. Prueba de Infiltración directa con carga variable, para puntos 8, 9 y 10.	103
Tabla A-6. Prueba de Infiltración directa con carga variable, para puntos 13, 14 y 15.	104
Tabla A-7. Resumen de permeabilidades obtenidas mediante Infiltración directa, y perm. promedio.	105
Tabla A-8. Prueba de infiltración Porchet, para puntos 5, 6 y 7.	106
Tabla A-9. Prueba de infiltración Porchet, para puntos 8 y 10.	106
Tabla A-10. Prueba de infiltración Porchet, para punto 13.	107
Tabla A-11. Resumen de permeabilidades obtenidas mediante Ensayo Porchet, y permeabilidades promedio. .	107
Tabla A-12. Ensayo de densidad in situ mediante cono de arena para punto 5.	108
Tabla A-13. Ensayo de densidad in situ mediante cono de arena para punto 6.	108
Tabla A-14. Ensayo de densidad in situ mediante cono de arena para punto 7.	109
Tabla A-15. Ensayo de densidad in situ mediante cono de arena para punto 9.	109
Tabla A-16. Ensayo de densidad in situ mediante cono de arena para punto 11.	110

Tabla A-17. Ensayo de densidad in situ mediante cono de arena para punto 12.	110
Tabla A-18. Ensayo de densidad in situ mediante cono de arena para punto 13.	111
Tabla A-19. Resumen de densidades para cada material.	111
Tabla A-20. Curva granulométrica obtenida para material de relave, punto 1.	112
Tabla A-21. Curva granulométrica obtenida para material de relave, punto 2.	112
Tabla A-22. Curva granulométrica obtenida para material de relave, punto 3.	113
Tabla A-23. Curva granulométrica obtenida para material de relave, punto 4.	113
Tabla A-24. Curva granulométrica obtenida para material de muro, punto 5.	114
Tabla A-25. Curva granulométrica obtenida para material de muro, punto 6.	114
Tabla A-26. Curva granulométrica obtenida para material de muro, punto 8.	115
Tabla A-27. Curva granulométrica obtenida para material de suelo de fundación, punto 11.	115
Tabla A-28. Curva granulométrica obtenida para material de suelo de fundación, punto 12.	116
Tabla A-29. Curva granulométrica obtenida para material de suelo de fundación, punto 15.	116
Tabla A-30. Límites de Atterberg obtenidos del material de suelo de fundación.	117
Tabla A-31. Límites de Atterberg obtenidos del material del coronamiento del muro del embalse de relaves.	117
Tabla A-32. Límites de Atterberg obtenidos del material del muro inferior del embalse de relaves.	118

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 4-1. Comparación de volumen de cubeta de relaves vs tiempo, elaboración propia.	49
Gráfica 4-2. Elevación vs tiempo –Diseño y Operación histórica, elaboración propia.	50
Gráfica 4-3 resumen de permeabilidades obtenidas en permeámetro de pared rígida.	55
Gráfica 4-4. Resumen de permeabilidades obtenidas para los distintos materiales.	57
Gráfica 4-5. Conductividad Hidráulica en función del diámetro efectivo; con porosidades de 0,2 a 0,4.	59
Gráfica 4-6. Gráfica doble logarítmica y ecuación general para el cálculo de la permeabilidad hidráulica.	59
Gráfica 4-7. Conductividad Hidráulica en función de la porosidad; para distintos tamaños de diámetro efectivo.	59
Gráfica 4-8. Curva de retención de agua volumétrica para los distintos materiales que componen el embalse. Adaptada de Musso y Suazo (2018),	62
Gráfica 4-9. Nodos conver. a lo largo de cada iteración en el modelo del perfil N° 3 de operación, año 2018.	79
Gráfica 4-10. Convergencia de las funciones de permeabilidad para los distintos materiales en el perfil N° 3 de operación, año 2018.	80
Gráfica 4-11. Permeabilidad en función de la porosidad para distintos tamaños de diámetro efectivo.	81
Gráfica 4-12. Disminución de la porosidad y la permeabilidad en función del grado de colmatación del sistema de drenaje.	82
Gráfica 4-13. Gráf. logarítmica de aumento en el caudal no drenado en un sistema de drenaje con distintos FS.	82
Gráfica 4-14. Aumento de la altura del nivel freático (H N.F.) en el talud aguas abajo.	84