

ÍNDICE

	Pág.
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes y motivación.....	2
1.2 Descripción del problema.....	4
1.3 Solución propuesta.....	6
1.4 Objetivos.....	7
1.4.1 Objetivo general.....	7
1.4.2 Objetivos específicos.....	7
1.5 Alcance.....	8
1.6 Metodologías y herramientas utilizadas.....	9
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	10
2.1 Sistemas de drenaje, filtros, características, normativa e importancia.....	11
2.1.1 Sistemas de drenajes.....	11
2.1.2 Importancia histórica de los sistemas de drenaje.....	12
2.1.3 Importancia operacional de los sistemas drenaje mineros.....	14
2.1.4 Parámetros de diseño y construcción de sistemas de drenaje.....	16
2.1.5 Materiales de construcción de sistemas de drenaje.....	17
2.1.5 Filtros.....	18
2.1.6 Importancia de los filtros.....	18
2.1.7 Parámetros de diseño y construcción de filtros.....	19
2.1.8 Materiales de construcción de filtros.....	23
2.2 Permeabilidad saturada.....	24
2.2.1 Ensayos de laboratorio para determinar la permeabilidad saturada.....	25
2.2.2 Importancia de la permeabilidad.....	32
2.3 Densidad mínima, máxima y relativa.....	33
2.3.1 Densidad mínima seca:.....	33
2.3.2 Densidad máxima seca:.....	34
2.3.3 Densidad relativa:.....	35
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....	39
3.1 Metodología.....	40
3.1.1 Etapa 1: Estudio de los materiales.....	40
3.1.2 Etapa 2: Plan de acción.....	40
3.1.3 Etapa 4: Modelamiento.....	41

3.1.4 Etapa 5: Análisis de resultados	41
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS	43
4.1 Estudio de los materiales.....	44
4.1.1 Diseño de materiales de filtro	44
4.1.2 Materiales acotados.	50
4.1.2 Planteamiento de los materiales.	56
4.1.3 Construcción de los materiales.	60
4.2 Determinar densidades mínimas y máximas secas	61
4.2.1 Determinar densidad mínima seca.....	61
4.2.1 Determinar densidad máxima seca	63
4.2.3 Determinar densidades relativas.....	64
4.3 Estimación de permeabilidades saturadas de sistemas homogéneos	67
4.3.1 Ensayos de permeabilidad para el material de transición 1	67
4.3.2 Ensayos de permeabilidad para el material de filtro.....	72
4.3.3 Estimación indirecta de permeabilidad.....	78
4.3.4 Ajustes de permeabilidad en base a la granulometría.....	82
4.3.5 Relaciones de permeabilidad	85
4.4 Estimación de permeabilidades saturadas de sistemas mixtos.....	86
4.4.1 Primer escenario-MT fijo a 60% de densidad relativa	87
4.4.2 Segundo escenario-MT fijo a 70% de densidad relativa	89
4.4.3 Tercer escenario-MT fijo a 80% de densidad relativa.....	92
4.4.4. Efectos en la direccionalidad del flujo	94
4.4.5 Pérdidas de potencial de filtración entre escenarios	97
4.6 Modelos de SEEP/W.....	101
4.6.1 Modelos 1 al 4	103
4.6.2 Pérdidas de caudal modelos 1 al 4.....	107
4.6.3 Modelos 5 al 7	111
4.6.4 Pérdidas de caudal modelos 5 al 7.....	115
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	119
5.1 Conclusiones	120
5.2 Recomendaciones.....	122
REFERENCIAS	123
ANEXOS	125

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-1. Trayectoria relave de Brumadinho.	4
Figura 1-2. Conductividad hidráulica vs aumento en la densidad seca.....	6
Figura 2-1. Muro de contención de relaves.	11
Figura 2-2. Mecanismos de erosión interna.....	13
Figura 2-3. Diferentes formas y diseños de drenajes mineros.....	15
Figura 2-4. Secciones transversales de drenajes y diferentes capas.	16
Figura 2-5: Capas en un drenaje al pie de una presa.	23
Figura 2-6. Diagrama del ensayo de carga constante.	27
Figura 2-7. Registro de un ensayo de carga constante.	28
Figura 2-8. Diagrama del ensayo de carga variable.	29
Figura 2-9. Sección típica mesa vibratoria. (NCh 1726, 1980).....	35
Figura 2-10. Variabilidad de la permeabilidad respecto al índice de vacíos.....	37
Figura 3-1. Diagrama del plan de acción a seguir.	41
Figura 3-2. Diagrama de la metodología.	42
Figura 4-1. Curva granulométrica del relave.....	45
Figura 4-2. Bandas granulométricas del material de filtro.	46
Figura 4-3. Banda granulométrica de MT si MF tiene granulometría mínima	48
Figura 4-4. Banda granulométrica de MT si MF tiene granulometría máxima.....	49
Figura 4-5. Espectro de banda máximo para el material de transición.....	50
Figura 4-6. Banda granulométrica de MT2.	52

Figura 4-7. Banda granulométrica del material drenante.	53
Figura 4-8. Banda granulométrica acotada para MT.	54
Figura 4-9. Banda granulométrica acotada para MF.	56
Figura 4-10. Curva granulométrica del MT.	57
Figura 4-11. Curva granulométrica del MF.	59
Figura 4-12. Diferentes materiales y bandas granulométricas.	60
Figura 4-13. Variabilidad de la densidad seca de MT respecto a DR.	65
Figura 4-14. Variabilidad de la densidad seca de MF respecto a DR.	66
Figura 4-15. Valores de permeabilidad para diferentes densidades relativas de MT.	69
Figura 4-16. Permeabilidad para diferentes DR de MT, segunda serie.	70
Figura 4-17. Permeabilidades obtenidas para MT, según densidad relativa, valores promedio y ajuste potencial.	71
Figura 4-18. Pérdidas parciales y acumuladas de permeabilidad para MT.	72
Figura 4-19. Permeabilidades para diferentes valores de densidad relativa de MF. ..	74
Figura 4-20. Valores de permeabilidad obtenidos para diferentes densidades relativas de MF, segunda serie.	75
Figura 4-21. Permeabilidad obtenidos para MF, según densidad relativa, valores promedio y ajuste potencial.	76
Figura 4-22. Pérdidas parciales y acumulada de permeabilidad para MF.	77
Figura 4-23. Decaimiento en las relaciones de permeabilidad.	77
Figura 4-24. Comparaciones de valores reales y estimaciones indirectas de permeabilidad saturada para el material de relave.	80
Figura 4-25. Comparaciones de valores reales y estimaciones indirectas de permeabilidad saturada para el material de filtro.	81

Figura 4-26. Comparaciones de valores reales y estimaciones indirectas de permeabilidad saturada para el material de transición 81

Figura 4-27. Ajustes potenciales (desde arriba hacia abajo 50%, 60%, 80% y 90% de DR) que relacionan la permeabilidad saturada con el d10 de los materiales..... 83

Figura 4-28. Ajustes potenciales (desde arriba hacia abajo 50%, 60%, 80% y 90% de DR) que relacionan la permeabilidad saturada con el d30 de los materiales..... 84

Figura 4-29. Ajustes potenciales (desde arriba hacia abajo 50%, 60%, 80% y 90% de DR) que relacionan la permeabilidad saturada con el d50 de los materiales..... 84

Figura 4-30. Valores de permeabilidad correspondiente a todos los ensayos realizados en el primer escenario, acotados por los valores esperados de MT y MF, incluyendo valores promedio y ajuste..... 88

Figura 4-31. Pérdidas en la capacidad de filtro para el primer escenario..... 89

Figura 4-32. Valores de permeabilidad correspondiente a todos los ensayos realizados en el segundo escenario, acotados por los valores esperados de MT y MF, incluyendo valores promedio y ajuste..... 91

Figura 4-33. Pérdidas en la capacidad de filtro para el segundo escenario. 92

Figura 4-34. Valores de permeabilidad correspondiente a todos los ensayos realizados en el tercer escenario, acotados por los valores esperados de MT y MF, incluyendo valores promedio y ajuste. 93

Figura 4-35. Pérdidas en la capacidad de filtro para el tercer escenario. 94

Figura 4-36. Comparación de los valores obtenidos del ensayo de verificación con los recogidos anteriormente para el primer escenario. 96

Figura 4-37. Comparación de los valores obtenidos del ensayo de verificación con los recogidos anteriormente para el segundo escenario..... 96

Figura 4-38. Comparación de los valores obtenidos del ensayo de verificación con los recogidos anteriormente para el tercer escenario. 97

Figura 4-39. Comportamiento de los tres escenarios (promedios) al compararlo con el del material de filtro y de transición (promedios)..... 98

Figura 4-40. Pérdidas de K_{sat} del primer escenario respecto a MT. 99

Figura 4-41. Pérdidas de K_{sat} del segundo escenario respecto a MT..... 99

Figura 4-42. Pérdidas de K_{sat} del tercer escenario respecto a MT..... 100

Figura 4-43. Vista del modelo 1 (MT=50% DR y MF variable) para el caso 1..... 103

Figura 4-44. Vista del modelo 1 (MT=50% DR y MF variable) para el caso 2, notar el cambio en la condición limite. 104

Figura 4-45. Caudales colectados en el sistema, caso 1. 110

Figura 4-46. Caudales colectados en el sistema, caso 2. 110

Figura 4-47. Vista del modelo 5 (MT=60% DR y MF variable) para el caso 1..... 111

Figura 4-48. Vista del modelo 5 (MT=60% DR y MF variable) para el caso 2, notar el cambio en la condición limite. 112

Figura 4-49. Caudales colectados por el sistema, caso 1..... 117

Figura 4-50. Caudales colectados por el sistema, caso 2..... 118

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2-1: Diferentes expresiones indirectas según autor y tipo de material.	32
Tabla 4-1. Información granulométrica del relave o suelo a retener.	44
Tabla 4-2. Granulometría de la curva mínima del material de filtro.	45
Tabla 4-3. Granulometría de la curva máxima del material de filtro.	46
Tabla 4-4. Granulometría mínima del material de transición si MF corresponde a la granulometría mínima.	47
Tabla 4-5. Granulometría máxima del material de transición si MF corresponde a la granulometría mínima.	47
Tabla 4-6. Granulometría mínima del material de transición si MF corresponde a la granulometría máxima.	48
Tabla 4-7. Granulometría máxima del material de transición si MF corresponde a la granulometría máxima.	49
Tabla 4-8. Granulometría de la curva mínima de MT2.	51
Tabla 4-9. Granulometría de la curva máxima de MT2.	51
Tabla 4-10. Granulometría de la curva mínima de material drenante.	52
Tabla 4-11. Granulometría de la curva máxima de material drenante.	53
Tabla 4-12. Nueva banda granulométrica de material de transición.	54
Tabla 4-13. Nueva banda granulométrica de material de filtro.	55
Tabla 4-14. Granulometría y cantidad de materia del MT.	57
Tabla 4-15. Propiedades del material de transición.	58
Tabla 4-16. Granulometría y cantidad de materia del MF.	58

Tabla 4-17. Propiedades del material de filtro.	59
Tabla 4-18. Granulometría sacos de arena.	61
Tabla 4-19. Resultados de ensayos de densidad mínima para MT.....	62
Tabla 4-20. Resultados de ensayos de densidad mínima para MF.....	62
Tabla 4-21. Resultados de ensayos de densidad máxima para MT.....	63
Tabla 4-22. Resultados de ensayos de densidad máxima para MF.....	63
Tabla 4-23. Densidades secas para diferentes valores de DR del MT.....	64
Tabla 4-24. Densidades secas para diferentes valores de DR del MF.....	65
Tabla 4-25. Características de las muestras a ensayar para MT.....	68
Tabla 4-26. Resultados de ensayos de permeabilidad de carga constante para MT...	68
Tabla 4-27. Resultados de ensayos de permeabilidad de carga constante para MT, segunda medición.....	70
Tabla 4-28. Permeabilidades promedio de MT y CV.....	72
Tabla 4-29. Características de las muestras a ensayar para MF.....	73
Tabla 4-30. Resultados ensayo de permeabilidad a carga constante para MF.....	73
Tabla 4-31. Resultados ensayo de permeabilidad a carga constante para MF, segunda medición.....	75
Tabla 4-32. Valores de permeabilidad promedio de MF y CV.....	76
Tabla 4-33. Parámetros utilizados, resultados y errores en la estimación indirecta de permeabilidad saturada para el material de relave.....	79
Tabla 4-34. Parámetros utilizados, resultados y errores en la estimación indirecta de permeabilidad para el material de filtro.....	79
Tabla 4-35. Parámetros utilizados, resultados y errores en la estimación indirecta de permeabilidad para el material de transición.....	80

Tabla 4-36. Relaciones de permeabilidad entre el material de filtro y el relave. 85

Tabla 4-37. Relaciones de permeabilidad entre el material de transición y el de filtro. 86

Tabla 4-38. Resultados de ensayos de permeabilidad para ensayos con MT a una densidad relativa de 60 % y MF con densidad relativa variable entre 50% y 80%. 87

Tabla 4-39. Resultados de ensayos de permeabilidad para ensayos con MT a una densidad relativa de 60 % y MF con densidad relativa variable entre 50% y 80%, segunda medición. 88

Tabla 4-40. Resultados promedios de permeabilidad saturada para el sistema con densidad relativa fija en 60% y cálculos de CV. 89

Tabla 4-41. Resultados de ensayos de permeabilidad para ensayos con MT a una densidad relativa de 70 % y MF con densidad relativa variable entre 50% y 80%. 90

Tabla 4-42. Resultados de ensayos de permeabilidad para ensayos con MT a una densidad relativa de 70 % y MF con densidad relativa variable entre 50% y 80%, segunda medición. 90

Tabla 4-43. Resultados promedios de permeabilidad saturada para el sistema con densidad relativa fija en 70% y cálculos de CV. 91

Tabla 4-44. Resultados de ensayos de permeabilidad para ensayos con MT a una densidad relativa de 80 % y MF con densidad relativa variable entre 50% y 80%. 92

Tabla 4-45. Resultados de ensayos de permeabilidad para ensayos con MT a una densidad relativa de 80 % y MF con densidad relativa variable entre 50% y 80%, segunda medición. 93

Tabla 4-46. Resultados promedios de permeabilidad saturada para el sistema con densidad relativa fija en 80% y cálculos de CV. 94

Tabla 4-47. Resultados de ensayos de permeabilidad para los diferentes ensayos extra. 95

Tabla 4-48. Variaciones de CV y promedios de permeabilidad si se añadiesen los ensayos extras a los escenarios anteriores. 95

Tabla 4-49. Pérdidas e incrementos en la permeabilidad del sistema entre escenarios. 98

Tabla 4-50. Resultados de caudales para modelo 1.....	105
Tabla 4-51. Resultados de caudales para modelo 2.....	105
Tabla 4-52. Resultados de caudales para modelo 3.....	106
Tabla 4-53. Resultados de caudales para modelo 4.....	106
Tabla 4-54. Pérdidas de caudal para un mismo modelo.	107
Tabla 4-55. Pérdidas de caudal entre modelos.	108
Tabla 4-56. Resultados de caudales para modelo 5.	113
Tabla 4-57. Resultados de caudales para modelo 6.	113
Tabla 4-58. Resultados de caudales para modelo 7.....	114
Tabla 4-59. Pérdidas de caudal para un mismo modelo.	115
Tabla 4-60. Pérdidas de caudal para distintos modelos.....	116