

UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DE MINAS

**EFFECTOS DE LA SOBRECMPACTACIÓN EN LA
PERMEABILIDAD DE FILTROS GRANULARES
UTILIZADOS EN DRENAJES PARA PRESAS DE
RESIDUOS MINEROS**

“MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS”

ANDRÉS EDUARDO LEÓN HERRERA

PROFESOR GUÍA

M. Sc. Mauricio Andrés Jara Ortiz

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

M. Sc. Francisco Javier Rivas Saldaña

M. Sc. Carlos Alejandro Moraga Cruz

CURICÓ - CHILE

2020

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular official stamps and handwritten signatures in blue ink. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS UNIVERSIDAD DE TALCA' and the right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO'.

Curicó, 2022

RESUMEN

Uno de los procesos más importantes a desarrollar al momento de realizar una actividad minera es el almacenamiento y utilización de los residuos mineros como relaves en depósitos que requieran de presas, las cuales deben ser competentes no solo en seguridad humana sino también medioambiental.

En los últimos años se ha podido observar variados problemas en la estabilidad física de presas de relaves, dejando al mundo de la minería con la importante misión de poder seguir investigando sobre la seguridad y resiliencia que presentan estas estructuras. La atención de esta investigación estará específicamente centrada sobre la capacidad de drenajes de las presas de contención de relaves mineros y la importancia del diseño y construcción de sus materiales componentes, lo anterior en relación con la problemática que existe en la industria principalmente durante la fabricación y colocación de estos elementos en terreno, actividades que modifican su respuesta en infiltración y disminuir el rendimiento de su funcionamiento.

En la siguiente investigación se analiza lo que sucede cuando se genera este tipo de problemáticas, por lo que a partir de datos de un relave de cobre y utilizando la normativa internacional se crearon materiales de filtro y transición, los cuales se sometieron a ensayos de densidad máxima y mínima, lo cual permitió obtener el rango de densidades secas a estudiar en ensayos de carga constante, obteniendo información de la permeabilidad que tienen estos materiales según el grado de acomodo o densidad relativa, generando propuestas que relacionan un decaimiento potencial en la permeabilidad a medida que se aumenta la densidad relativa, para finalmente realizar simulaciones de infiltración de un sistema de drenaje en el software SEEP/W de GeoStudio, obteniendo como resultado diferentes disminuciones en el caudal para varios modelos de un sistema de drenaje, en el que las relaciones de permeabilidad descritas por ICOLD sean menores a los valores originales.

ABSTRACT

One of the most important processes to develop when carrying out a mining activity is the storage and use of mining waste as tailings in deposits that require dams, which must be competent not only in human but also environmental safety.

In recent years, various problems have been observed in the physical stability of tailings dams, leaving the mining world with the important mission of continuing to investigate the safety and resilience of these structures. The attention of this research will be specifically focused on the drainage capacity of the mine tailings containment dams and the importance of the design and construction of their component materials, the foregoing in relation to the problems that exist in the industry mainly during manufacturing and placement of these elements in the field, activities that modify their response in infiltration and decrease the performance of their operation.

The following research analyzes what happens when this type of problem is generated, so that from data from a copper tailings and using international regulations, filter and transition materials were created, which were subjected to density tests. maximum and minimum, which allowed obtaining the range of dry densities to be studied in constant load tests, obtaining information on the permeability of these materials according to the degree of accommodation or relative density, generating proposals that relate a potential decay in permeability to as the relative density is increased, to finally perform infiltration simulations of a drainage system in the SEEP/W software of GeoStudio, obtaining as a result different decreases in flow for various models of a drainage system, in which the relationships permeability described by ICOLD are lower than the original values.

AGRADECIMIENTOS

Deseo utilizar este espacio de la investigación para agradecer a toda la gente que me estuvo ayudando principalmente en mi vida personal por lo que le doy las gracias a mi núcleo familiar, a mis padres Sergio y Estrella, mis hermanos Felipe y Paulina y mi perrita Lola, por apoyarme siempre.

Quiero agradecer profundamente a mi profesor guía Mauricio Jara por aceptarme como su memorista, enseñarme, guiarme y corregirme durante este último año.

Quiero agradecer también a mi abuela Leonor, mi abuelo Roberto a mi tía Claudia por estar siempre pendientes de mi bienestar.

Quiero agradecer el apoyo de parte de mis tías Isabel, Rosa, Juana, Julia, Pamela y Corina y mi tío Juan, junto a mis primos María Eliana, Daniel, Catalina y en especial a mi primo Juan Sebastián por su aporte este año no solo conmigo sino su familia.

Agradecer también a todos los amigos que forjé a lo largo de mi vida, principalmente a Alejandro, Emilio, Juan Pablo, Nicolás Zerené, Vicente, Bastián, Eduardo, Marco, Danixa, Felipe, Fabián, Nicolás Delaunoy, Gabriel, Francisca, Cristóbal y Germán, no olvidando a mis colegas practicantes.

Agradecer a la Universidad de Talca por dejarme utilizar implementos en casa y sobre todo a la señorita Cristina Cereceda.

Finalmente agradecer a los profesores que dejaron una huella en mi persona Rosa Loberto y Raimundo Becerra quien ya no está con nosotros.

A todos ustedes, muchas gracias.

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	48
Figura 4-4. Banda granulométrica de MT si MF tiene granulometría máxima..... 49	49
Figura 4-5. Espectro de banda máximo para el material de transición..... 50	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

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se nominan y describen las principales temáticas y antecedentes que generan la creación de esta investigación, además de presentar los alcances y los objetivos a desarrollar para dar origen a la solución propuesta.

1.1 Antecedentes y motivación

A lo largo de la historia de la humanidad, la minería ha sido vital para el desarrollo de la vida tal cual la conocemos hoy en día (Outlet minero, 2016). La minería conlleva muchos procesos y subprocesos, para cumplir su objetivo fundamental de retirar materiales de la corteza terrestre para poder encontrar aquello que da valor a la actividad, los minerales. Dentro de estos procesos se encuentra la disposición de los relaves, es decir, dónde y cómo dejar los desechos de las actividades mineras (Blight, 2010). El cómo se han dispuesto de los desechos de estas actividades a lo largo del tiempo se remonta a los inicios de la minería, con procesos carentes de seguridad (precarias condiciones) y de mínima conciencia ambiental (descargas en ríos cercanos), puesto que el compromiso estaba con los inversionistas (Vick, 1990). Hoy, sin embargo, el panorama es otro, dado el marco de sustentabilidad y el compromiso con la seguridad de las personas; por ello es necesario asegurar que los lugares donde se depositan dichos materiales, es decir, que las presas de relaves cumplan las condiciones mínimas de seguridad y de contención.

Aunque nos encontramos en una época que ofrece grandes avances tecnológicos no sólo en la ciencia detrás de la construcción de tranques y presas, sino en las herramientas tecnológicas como lo son el monitoreo constante y software de análisis, nos encontramos, sin embargo, con noticias que azotan no sólo el panorama local sino del mundo, tal es el caso de Las Palmas el 2010 en Chile o Brumadinho el 2019 en Brasil. El caso de Las Palmas sucedió en Chile el 27 de febrero del 2010 en el sector de Pencahue de la región del Maule, en donde un tranque de relave perteneciente a la pequeña mina Las Palmas, que se encontraba abandonado, cedió para el terremoto de la misma fecha, dejando una familia de cuatro personas fallecidas y sepultadas además de contaminar gran parte de la provincia con cianuro y otros desechos tóxicos (Relaves, 2020). Mientras que el caso del dique Brumadinho en Minas Gerais perteneciente a la mina Brucutu, el cual el 25 de enero del 2019 cedió dejando un saldo de más de 260 personas fallecidas y varios desaparecidos, sin contar una liberación considerable de elementos tóxicos al medioambiente. Entre las causas del accidente se encuentran las potentes lluvias estacionales sumado a las pobres condiciones de drenaje del dique, indicando que los altos niveles de agua dentro del dique fueron los principales causantes de que este cediese de forma tan súbita y abrupta, puesto que los esfuerzos que debían soportar las paredes del dique iban en aumento con el nivel del agua dentro de éste (Mining Magazine, 2019).

De acuerdo con lo descrito anteriormente se puede evidenciar que, aunque ha existido un progreso bastante grande a la hora de disponer de los residuos de la minería estos se ven opacados frente a sucesos catastróficos, los que generan pérdidas irremplazables como las vidas humanas y pérdidas difíciles de remediar como lo son los impactos al medio ambiente. Sin embargo, no es necesario esperar nuevos accidentes para tomar medidas, ya que se pueden recopilar varios casos y determinar las causas de dichos accidentes, puesto que, aunque las causas de los accidentes correspondan a temáticas conocidas como lo son la estabilidad, los sistemas de drenaje, los métodos de construcción, entre otros siempre se puede profundizar en las investigaciones, proponiendo nuevas posturas para así en un futuro evitar eventos de tal magnitud.

Es por estas razones que el profundizar en el estudio del efecto de la sobrecompactación como esta investigación ayuda a cuantificar los efectos y generar consciencia de los efectos nocivos que se podrían presentar en el futuro.

1.2 Descripción del problema

En el marco de los problemas causados por presas de relaves de desechos mineros se encuentran aquellos asociados a los sistemas de evacuación de líquidos de éstas, conocidos como sistemas de drenaje.

Los filtros corresponden a capas de material granular especialmente diseñado para proteger los drenajes o cañerías y tubos sobre los cuales se encuentran, evitando que sustancias peligrosas y materiales finos escapen de la presa (ICOLD N°97, 1994). Como se evidenció en la noticia del 2019 sobre Brumadinho, una de las causas fue el pobre sistema de drenaje que se tenía, es decir, éste no estaba funcionando de manera eficiente, aun cuando el sistema de drenaje fue definido y dimensionado en particular para las condiciones de esa presa en particular. Dada la importancia de los filtros dentro del sistema de drenaje, surge la siguiente inquietud, ¿Qué podría ocurrir cuando los materiales de filtro del sistema de drenaje (elementos que se dimensionan y construyen antes de realizar la presa o dique) son fabricados y colocados bajo condiciones que afectan lo estipulado en el diseño?



Figura 1-1. Trayectoria relave de Brumadinho. (Mining Magazine 2019)

Existen entonces una serie de problemáticas de la construcción de obras mineras que podrían darse a la hora de crear un sistema de drenaje y acarrear diversas consecuencias, como la sobrecompactación a la hora de la construcción del drenaje, o la incertidumbre de si se está realizando un buen trabajo durante la construcción.

El presentar un peligro el cual lleva asociados costos, tanto de tiempo, dinero y seguridad solo permite que en vez de tener un sistema de drenaje se genere un riesgo.

La investigación propuesta tiene como objetivo encontrar y analizar la variabilidad que se puede desarrollar en la permeabilidad de los filtros una vez que se cambia el grado de compactación a un tipo de arena y a una conjunción de arenas al trabajar como sistema para representar la capa de filtro dentro del drenaje, permitiendo verificar si estas al trabajar en conjunto cumplen con las condiciones necesarias para asegurar un buen trabajo.

1.3 Solución propuesta

Como solución para la problemática se propone el realizar varios ensayos de permeabilidad a carga constante para diferentes tipos de arenas (saturadas) para distintos valores de densidad relativa, obteniendo así diferentes curvas de permeabilidad contra densidad relativa, esperando cuantificar el comportamiento clásico que se observa al variar la permeabilidad con respecto a la densidad relativa (Blight, 2010).

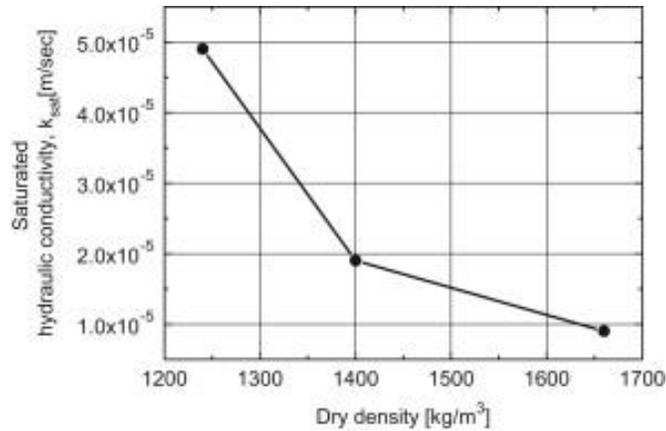


Figura 1-2. Conductividad hidráulica vs aumento en la densidad seca. (Laboratory measurement of hydraulic conductivity functions of two unsaturated sandy soils during drying and wetting processes, 2013)

Una vez obtenida dicha información se procederá a realizar combinaciones de diferentes arenas con diferentes grados de compactación, de manera de simular las capas de un filtro., las cuales se verán reflejadas en simulaciones dentro del software SEEP/W perteneciente a la suite de programas de GeoStudio, en donde se observará cómo se comportan las arenas al trabajar como un conjunto.

Con los resultados obtenidos tanto experimentales como vía simulación, se deberán comprobar si al comparar los comportamientos individuales y los comportamientos de sistemas se respetan los valores de permeabilidad, de manera que si existe se pueda proponer una relación directa o indirecta de los resultados.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Cuantificar los efectos de la variabilidad en la permeabilidad y capacidad de flujo de arenas finas utilizadas como filtros dentro de los elementos de drenaje, considerando la influencia del grado de acomodo de sus partículas.

1.4.2 Objetivos específicos

- Diseñar a partir de la normativa internacional descrita por ICOLD (*International Commission for Large Dams*), diferentes materiales para un sistema de drenaje utilizando la información de un determinado relave de cobre.
- Construir a partir de materiales granulares los materiales diseñados para el sistema de drenaje.
- Caracterizar los valores de densidad relativa de los materiales del sistema a través de ensayos de densidad mínima y máxima.
- Determinar mediante ensayos de carga constante la respuesta global de la permeabilidad saturada de filtros de arenas, considerando diferentes niveles de acomodo.
- Determinar mediante ensayos de carga constante la respuesta global de la permeabilidad saturada de sistemas compuestos de dos capas de materiales, considerando diferentes niveles de acomodo.
- Realizar análisis comparativo de las respuestas globales sobre los resultados obtenidos para sistemas simples y compuestos de dos capas.
- Determinar mediante simulación numérica, la variabilidad en la capacidad de flujo captados en un dren considerando las tendencias de permeabilidad dependiente del grado de acomodo encontradas en el análisis.

1.5 Alcance

El desarrollo de esta memoria considera los efectos que podrían producirse en un sistema de drenaje en el cual las capas que constituyen el filtro presenten anomalías dentro de su densidad relativa, una de las propiedades más importantes a la hora de asegurar el correcto funcionamiento de un sistema de drenaje de residuos mineros.

El primer alcance que considera esta investigación es que, aunque se trabaje sobre el sistema de drenaje de una presa de residuos mineros solo se estudiarán los estratos que componen los filtros, en este caso los materiales de filtro, por lo que los materiales que componen la parte gruesa del drenaje serán constantes en el estudio.

Es necesario mencionar que el estudio se realizará en base a los estándares internacionales de ICOLD o Comisión internacional para grandes presas, por lo que en caso de querer replicar el estudio para un sistema de drenaje de una presa perteneciente a una faena en particular es recomendable utilizar las condiciones o estándares impuestas para cada escenario en particular.

También es importante mencionar que el sistema de drenaje propuesto en esta memoria se construye en base a valores de granulometría de relaves existente, sin embargo, no refleja algún sistema de drenaje existente en la actualidad.

Es importante mencionar además que los valores de permeabilidad que se obtienen en la fase de experimentación del estudio corresponden a los valores de permeabilidad saturada de los materiales.

El software utilizado en el proceso de modelamiento numérico solo permite análisis 2D, por lo que la sección modelada corresponde a una vista transversal de un sistema de drenaje.

Por último, es importante mencionar que dada la situación mundial de pandemia y los resguardos tomados no se pudo acceder a un laboratorio, debido a medidas de higiene y seguridad, por lo que la totalidad de los ensayos fueron realizados en el domicilio del memorista utilizando equipamiento otorgado por la Universidad de Talca. Los procedimientos fueron llevados a cabo siguiendo las instrucciones de las normas cuando fuese posible, mientras que en otros se tuvo que utilizar algunas modificaciones para lograr los objetivos.

1.6 Metodologías y herramientas utilizadas

El proceso que permitió la creación de esta memoria se resume en varias actividades o etapas, las cuales se describen a continuación.

La primera etapa corresponde a una revisión del estado del arte, que permite la recolección de información existente acerca de los materiales que componen las capas de filtro, así como la normativa internacional. Esta etapa es la que marca principalmente la creación del marco teórico, a través de la lectura de libros y artículos de ICOLD.

La segunda etapa corresponde al análisis de materiales, en donde se encontraría también el estudio de diferentes parámetros para poder cuantificar el estudio como lo son: curvas granulométricas, permeabilidad, densidad relativa, estimadores de permeabilidad indirecta, etc.

Posterior al proceso de recolección de información se procedió a la creación de un plan de acción, es decir, decidir de qué forma realizar los diferentes ensayos en laboratorios y de esta forma poder recolectar datos. El plan de acción se desarrolla con más detalle en capítulos posteriores.

Una vez definido el plan de acción y realizados los experimentos es necesario utilizar los datos en el software SEEP/W de GeoStudio para poder modelar los diferentes materiales, lo cual permitirá enfrentar las diferentes configuraciones y así obtener diferentes variaciones de los valores de permeabilidad.

Una vez realizadas todas las configuraciones y obtenidos los resultados se analizarán estos valores en busca de alguna relación o expresión que relacione el comportamiento de los filtros.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describen conceptos claves, relaciones, ecuaciones, métodos y el estado del arte referente a la investigación.

2.1 Sistemas de drenaje, filtros, características, normativa e importancia.

2.1.1 Sistemas de drenajes.

Un sistema de drenaje minero para presas de relaves minero consiste según definiciones como la de ICOLD, como un sistema de diferentes materiales de cuya permeabilidad va en aumento y que cumple el papel de reducir la presión de poros (evacuar agua) desde la presa sumado a que un filtro (los cuales van sobre el drenaje) además impide que las partículas más finas migren hacia una zona de partículas más gruesas, protegiendo la integridad del drenaje. (ICOLD N°97, 1994).

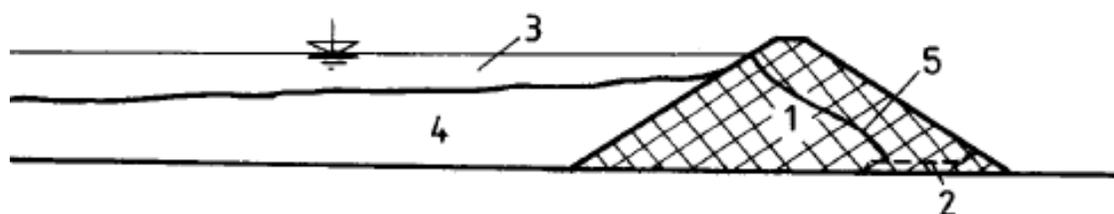


Figura 2-1. Muro de contención de relaves. 1: Muro de relave, 2: Sistema de drenaje, 3: Aguas arriba del muro, 4: Relaves y 5: Flujo de agua dentro del muro. (ICOLD N°97, 1994)

Es importante además mencionar que existen 2 tipos de sistemas principales de drenaje, los críticos y no críticos.

Autores como Fell, MacGregor, Satpledon, Bell y Foster (2014) estipulan que los drenes críticos son aquellos que representan una gran importancia en la presa, por lo que en caso de fallar otorgan una gran chance de que se presenten erosión interna y fugas. Por otra parte, los drenes no críticos en caso de presentar alguna falla o error pueden ser reparados o reemplazados, por lo que suelen desempeñar principalmente funciones auxiliares. La clasificación de drenes críticos es difícil de enmarcar, pero los factores que más se toman en cuenta son la dirección del flujo y la facilidad de acceder a la estructura, siendo los drenes inaccesibles o de difícil acceso en la mayoría de los casos de tipo crítico, como solo estamos hablando de sistemas de drenaje que serán construidos antes de la presa estamos hablando de sistemas de drenaje críticos.

Según Craig (2004) la elección de los materiales y el método de construcción es vital a la hora de definir un sistema de drenaje para una presa de contención de relaves o residuos mineros, puesto que dependiendo de la configuración propuesta (materiales, nivel de compactación, humedad, etc.) se obtendrá una diferente trayectoria de nivel freático dentro de la presa (altura

a la cual se encuentra el agua alojada en los vacíos) y por ende un diferente comportamiento en general (estabilidad, tasas de filtración, fuerzas internas, etc.). Para evitar que el nivel freático de una obra pueda comprometer la integridad se utilizan los sistemas de drenes, los cuales serán necesarios según la legislación chilena DS 248, Artículo 14.

A partir de lo desarrollado en los párrafos anteriores podemos hacer la siguiente analogía, que los sistemas de drenaje corresponden al símil de los pulmones para un humano, por lo que demuestra la criticidad de estas estructuras y la importancia que radica en su correcta planificación, ejecución y mantenimiento.

2.1.2 Importancia histórica de los sistemas de drenaje.

Según Robbins y Griffiths (2018), el proceso de erosión interna (IE) es aquel en el que las partículas dentro o debajo de una estructura se erosionan. Es un proceso importante puesto que la mayoría de los fallos en presas son por IE.

Aunque en los últimos 50 años se han realizado propuestas sigue siendo un problema, puesto que se puede atribuir un 50% de las fallas históricas de presas a este proceso, esto debido a que anteriormente no se atribuían diferentes causas a los fenómenos de erosión interna, por lo que hoy en día se reconoce la importancia de los buenos sistemas de drenaje. Existen principalmente 4 tipos de mecanismo que generan IE, los cuales son:

- Erosión por fugas concentradas: Corresponde al proceso en el que el agua puede moverse libremente por algún espacio, como lo es a través de alguna grieta o a través del contacto entre dos materiales, este mecanismo de erosión es el más peligroso y el que reporta la mayor cantidad de fallas en presas, los sistemas de drenaje la combaten canalizando las filtraciones en el sistema de drenaje.
- Erosión de tuberías en reversa (BEP): Corresponde al proceso en el que los canales de erosión también conocidos como tuberías avanzan desde el suelo de fundación hacia la presa (por eso en reversa). Este proceso toma lugar debajo de la presa y la presión de poro debe de ser lo suficientemente alta como para poder iniciar y propagar las tuberías. Además, el flujo debe de ser suficientemente alto como para propagar materiales, sin considerar además que el material en el cual se forman las tuberías debe ser resistente como para que los canales se mantengan abiertos. Corresponde solo a un tercio de los accidentes y fallas por IE, pero se ha evidenciado que es un fenómeno

frecuente. Los sistemas de drenaje reducen las presiones de poro evitando este fenómeno.

- **Inestabilidad interna:** Se refiere al proceso mediante el cual las filtraciones son capaces de erosionar de manera selectiva los granos más finos de una matriz de granos más gruesos. Se puede dividir en IE con sufusión (erosión con cambio de volumen) o sufusión (erosión sin cambio de volumen). Aunque es uno de los mecanismos menos peligrosos es uno de los más estudiados debido a la gran cantidad de casos que se reporta movimiento de suelos que ha causado en varias presas. Los filtros evitan el movimiento de partículas.
- **Erosión por contacto:** Este tipo de erosión se da cuando el flujo a través de una sección de suelo gruesa se da adyacente a una sección de suelo de granos más finos. Suele ser un problema en lugares como Francia donde se tienen diques de limos sobre suelos gravosos. Los procesos de erosión de contacto suelen avanzar de manera lenta y requiere de altas velocidades de flujo para poderse dar, filtros que no presenten diferencias granulométricas severas evitan este problema.

La figura 2-2 muestra los tipos de erosión interna dentro de una presa:

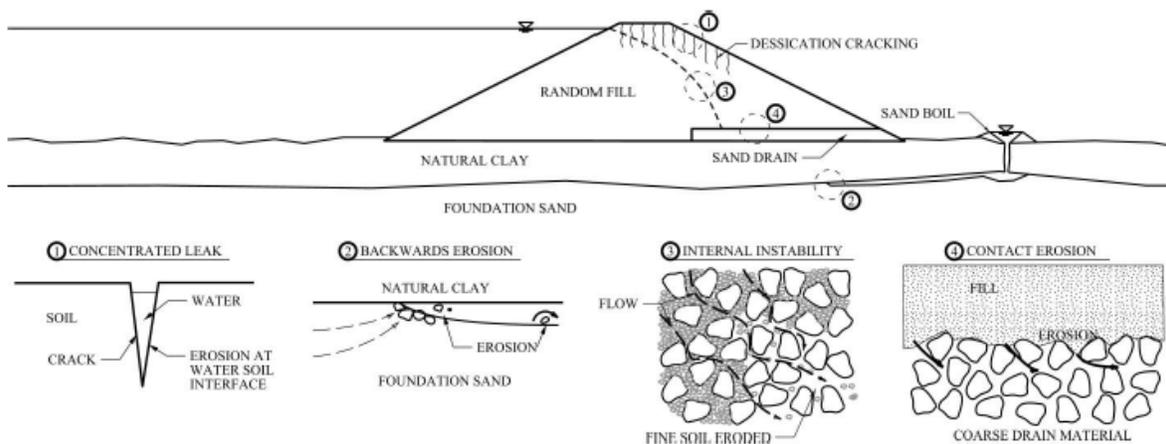


Figura 2-2. Mecanismos de erosión interna. (Internal Erosion of Embankments: A Review and Appraisal, Robbins & Griffiths, 2018)

Según Robbins y Griffiths (2018), el correcto uso, diseño y construcción puede evitar los problemas de erosión interna al mitigar o eliminar las causas de los diferentes mecanismos que producen la erosión.

2.1.3 Importancia operacional de los sistemas drenaje mineros.

Las falencias que se pueden llegar a producir en un sistema de drenaje se visibilizan principalmente debido a las consecuencias que se producen si estos funcionan de manera pobre o nula (ICOLD N°97, 1994).

Es también posible que los errores se presenten o se generen en diferentes etapas de su desarrollo, por lo que el listado de problemas se detalla a continuación:

Problemas de diseño: Corresponden a aquellos problemas que se generan durante la etapa de diseño de los filtros, es decir, antes de la construcción, mediante revisiones o consultas pueden ser evitados.

- Mala ubicación a la hora de concebir el sistema de drenaje, generando problemáticas que afecten la construcción del drenaje o la durabilidad de éste.
- Mal dimensionamiento del sistema, generando construcciones que puedan subestimar o sobreestimar las necesidades hidráulicas de la obra.
- Mala elección de materiales de construcción, generando a futuro sistemas no funcionales: no existe evacuación de agua, existe menor flujo del calculado, existe migración de partículas

Problemas de ejecución: Corresponden a los problemas originados durante la construcción de los sistemas de drenaje, mediante supervisión pueden evitarse o aminorarse.

- Segregación de los materiales granulométricamente a la hora de la construcción, producto de una mala disposición de transporte, el uso de equipos, prácticas de los constructores, etc.
- Construcción prematura en relación con la presa de relaves, la exposición puede generar erosión y cambios en la granulometría.
- Sobrecompactación de las capas de materiales que compondrán el sistema de drenajes, causando discrepancias respecto al diseño y mayor uso de materiales en la construcción de estos.

Problemas de operación: Corresponden a problemas generados mientras los drenajes trabajan o están activos, pueden detectarse a través de monitoreo y remediarse solo en algunos casos.

- Cambios en la capacidad de diseño del sistema.
- Cambios en la granulometría del sistema debido a interacción con sustancias lixiviantes o corrosivas.

Revisado los puntos anteriores, se puede ver la importancia que tiene la implementación de sistemas de drenaje en obras como las presas de relaves mineros, puesto que independientemente del punto en que se pueda producir cualquiera de las falencias anteriormente mencionadas, los sistemas se construyen antes de la presa, por lo que su mala ejecución puede traer consigo distintos efectos negativos, tales como: problemas operacionales, mal o nulo funcionamiento; problemas económicos derivados de rehacer estructuras, problemáticas ambientales, como efectos de potenciales fugas o derrames y también problemáticas de seguridad, provocadas por derrumbes y colapsos.

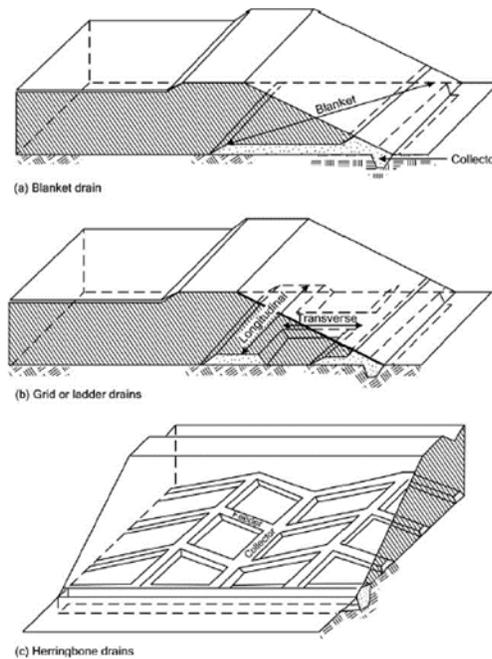


Figura 2-3. Diferentes formas y diseños de drenajes mineros. (Waste Storage Facility, 2010)

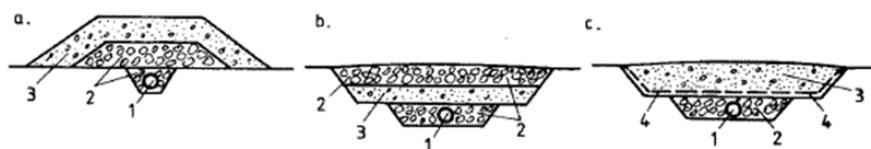


Figura 2-4. Secciones transversales de drenajes y diferentes capas. (ICOLD N°97, 1994)

2.1.4 Parámetros de diseño y construcción de sistemas de drenaje.

Dentro de los parámetros a la hora de definir un sistema de drenaje intervienen diferentes variables, las cuales determinarán las dimensiones de construcción que debe de tener el sistema de drenaje. Entre las dimensiones y variables presentadas en ICOLD N°97, 1994 se encuentran:

Localización: La localización del sistema de drenaje varía según el método de construcción y el tipo de relave que contenga la presa, sin embargo, la distancia siempre optimiza la reducción de altura máxima y prioriza el desagüe de una zona definida de la presa.

Ancho: El ancho de los drenes debe de ser suficiente de manera de que se pueda reducir la línea del nivel freático y para que exista flujo en las condiciones máximas de descarga.

Grosor: Las dimensiones deben de ser suficientes como para que la permeabilidad y el flujo prevalezcan a máxima descarga. Proponiendo un mínimo de 150 mm para drenes construidos a mano y 250 mm para drenes construidos por maquinaria, considerando un extra para zonas con alta probabilidad de sismos.

Tipo de relave: Una de las variables, tal vez la más importante, puesto que es la que determina la altura máxima del nivel freático, el ritmo de consolidación y la capacidad de descarga.

Como se presentó todos los drenes pueden tener diferentes formas o localización dentro de la presa, todos tienen en común que la construcción se realiza con antelación, por lo que errores en esta etapa pueden tener impacto negativo a corto y largo plazo.

2.1.5 Materiales de construcción de sistemas de drenaje.

Para poder construir un buen sistema de drenaje y de filtro es necesario como se mencionó anteriormente que se cumplan ciertos criterios, para lograrlos es necesario disponer de dos o más capas de materiales (Sherard y Dunningan, 1986), en donde los más utilizados suelen ser:

Gravas: Representadas por la letra G según el *United Soil Classification System* (USCS) o Sistema unificado de clasificación de suelos, corresponden a suelos de grano grueso, es decir, su porcentaje en masa que pasa la malla #200 y la malla #4 es menor al 50%. Dependiendo del contenido de finos y de la distribución de tamaños se puede agregar una segunda letra en la clasificación.

Dada la distribución de tamaños que presenta suelen ser utilizadas en zonas donde es necesaria una gran permeabilidad (ICOLD N°97, 1994).

Arenas: Representadas por la letra S según la USCS, corresponden a suelos de grano grueso, es decir, su porcentaje en masa que pasa la malla #200 es menor al 50%, sin embargo, el porcentaje en masa pasante respecto a la malla #4 es mayor al 50%. Dependiendo del contenido de finos y de la distribución de tamaños se puede agregar una segunda letra en la clasificación.

Suelen ser utilizadas arenas del tipo SP o pobremente clasificadas para asegurar una uniformidad en la distribución de tamaños.

Geotextiles: Dentro de los geosintéticos, los geotextiles corresponden a materiales sintéticos generalmente polímeros trenzados. Usados principalmente para impermeabilizar los sistemas de drenaje y proteger los suelos. Los geotextiles además pueden servir como alternativa para filtros, principalmente para aquellos que no son críticos.

ICOLD (N°97, 1994) presenta las características de geotextiles, permitiendo discriminar entre ventajas y desventajas. Entre las ventajas que exhiben los geotextiles se encuentra su costo, su relativa flexibilidad, su facilidad de ubicación, su pequeño espesor y su homogeneidad. Mientras que en sus desventajas se encuentra su durabilidad finita (40 años aproximadamente), y su estabilidad química y física debe estudiarse para cada caso.

Material de mina: Puede ser utilizado también si cumple con las condiciones de permeabilidad y de tamaño.

Tuberías perforadas: Utilizados como dispositivos para la captación de agua, deben ser utilizados solo en donde no se pueda soportar la carga hidráulica. Además, la apertura de éstas es parte fundamental a la hora de diseñar un sistema de drenaje (ICOLD, N°97 1994).

2.1.5 Filtros

Los filtros corresponden a una zona del sistema de drenaje, consistente principalmente de material particulado fino. La función principal de los filtros es proteger el sistema de drenaje evitando la migración de partículas del suelo a drenar y permitir que el agua fluya a una zona de drenaje relativamente más gruesa (ICOLD N°97, 1994).

2.1.6 Importancia de los filtros

Los filtros deben considerar las propiedades del suelo a drenar, así como el proteger al sistema de la erosión.

La importancia de los filtros entonces radica en los objetivos que se desea conseguir, según ICOLD N°97, 1994 se encuentran las siguientes necesidades que posteriormente regirán en la construcción de los filtros:

- Se debe evitar que exista segregación de los materiales de filtro con el paso del tiempo.
- Se debe evitar que exista un cambio en la gradación de las partículas a causa del tiempo, erosión, congelamiento, etc.
- Los materiales no deben exhibir una cohesión aparente o real, ni tampoco deben de cementar o consolidarse con el paso del tiempo, de manera de asegurar una capacidad de auto reparación en caso de colapso.
- Deben presentar curvas granulométricas que garanticen la estabilidad interna.
- Deben asegurar que la capacidad de descarga sea funcional.
- Deben permitir el paso del agua entre las capas.

De todos estos puntos, se recalca la importancia del último pues el objetivo de la investigación está en determinar si se respeta el aumento progresivo de permeabilidad entre las capas a la hora de trabajar en conjunto.

Si no se cumplen las condiciones mencionadas anteriormente los filtros comenzarán a fallar presentando irregularidades como partículas finas en zonas más gruesas que hacen de tapón, generando fugas entre las capas de filtro, evacuando pocas o nulas cantidades de agua. Todas estas consecuencias desembocan en un aumento del nivel freático de agua dentro de la presa, aumento de la presión de poros y finalmente el riesgo de colapso.

2.1.7 Parámetros de diseño y construcción de filtros.

Según ha pasado el tiempo y a medida que avanzaba la tecnología se ha vuelto necesario establecer criterios y recomendaciones sobre cómo crear los filtros para las presas mineras. Por lo que comisiones como ICOLD han compartido información y normativas que son necesarias de aplicar para que los filtros puedan retener las partículas evitando que estas migren entre diferentes capas y además puedan permitir el paso de los fluidos (ICOLD N°97, 1994).

Para poder guiar la confección de los materiales que se usarán en la construcción de filtros, así como para poder garantizar las necesidades de los filtros existen los siguientes criterios y expresiones.

2.1.7.1 Normativa Internacional.

Recordando la importancia de los filtros es necesario establecer como poder asegurar que aquellas necesidades listadas se cumplan.

Existe una variación de criterios y recomendaciones dependiendo el sistema, en este caso se hablará de las normas internacionales para filtros protegiendo suelos no cohesivos.

Es a raíz de esto que diversos autores y comisiones como ICOLD (N°95, 1994) han establecido criterios, relaciones y reglas empíricas a la hora de diseñar, entre las cuales se encuentran principalmente:

Criterios de tubería (*Piping criteria*)

$$\frac{D_{15f}}{D_{85m}} < 4 \text{ ó } 5 \quad (1)$$

$$\frac{D_{50f}}{D_{50m}} < 25 \quad (2)$$

$$\frac{D_{15f}}{D_{15m}} < 20 \quad (3)$$

En dónde:

D_{15f}, D_{85f} : Diámetro del porcentaje pasante (15 y 85) por masa del material de filtro.

D_{15m}, D_{85m} : Diámetro del porcentaje pasante (15 y 85) por masa del material a proteger.

La primera ecuación propuesta por Terzhagi (1948) demuestra ser incluso más significativo que en las condiciones donde fue probado, además autores como Sherard y Dunningan (1986) añaden la condición de que el índice de plasticidad de los finos sea cero. Terzhagi propone una desigualdad menor a 4 mientras Sherard y Dunningan menor a 5.

La segunda propuesta por Ziems (1968) y Thanikachalam y Sakthivadivel (1974), corresponde a una relación dependiendo del coeficiente de uniformidad, si el coeficiente de uniformidad aumenta también lo hace el límite de la relación.

La última condición propuesta por la *United States Bureau of Reclamation* (USBR) u Oficina normativa americana, puede llegar a límites de 40 en ciertas circunstancias (USBR N°13, 1987).

Se utilizará principalmente la primera propuesta ya que como se mencionó suele ser la más conservadora.

Criterio de permeabilidad (*Permeability criteria*)

$$\frac{D_{15f}}{D_{15m}} > 4 \text{ ó } 5 \quad (4)$$

En dónde:

D_{15f} : Diámetro del 15 % pasante por masa del material de filtro.

D_{15m} : Diámetro del 15% pasante por masa del material a proteger.

Este criterio intenta asegurar que la permeabilidad aumente a medida que se avanza en el filtro, autores como Terzhagi (1948) aseguran que la relación no debe ser mayor a 4, mientras que otros aseguran que no debe ser mayor que 5. Este principio permite una diferencia de permeabilidad considerable entre ambos materiales.

Criterio de estabilidad interna (*Internal stability criteria*)

Existen diversos criterios propuestos por diversos autores, para asegurar la estabilidad interna de las capas de filtro, es decir, evitar que las partículas migren evitando así posibles tapones.

La mayoría de los criterios propuestos corresponden a cortes realizados en la curva granulométrica del material, como el que se propone en Blight, (2010) y en ICOLD (Nº97, 1994).

$$\frac{D_{85f}}{D_{15f}} < 5 \quad (5)$$

$$\frac{D_{15fg}}{D_{85ff}} < 5 \quad (6)$$

En dónde:

D_{15f} : Diámetro del 15% porcentaje pasante por masa del filtro.

D_{85f} : Diámetro del 85% porcentaje pasante por masa del filtro.

D_{15fg} : Diámetro del 15% porcentaje pasante por masa del filtro de la fracción gruesa.

D_{85ff} : Diámetro del 85% porcentaje pasante por masa del filtro de la fracción fina.

Aunque según autores como Sherard y Dunnigan (1986) puede medir la estabilidad también con el coeficiente de uniformidad, es decir la forma que presenta la banda granulométrica, la cual se mide como:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (7)$$

En donde:

C_u : Coeficiente de uniformidad.

D_{60} : Diámetro del 60% porcentaje pasante por masa de suelo.

D_{10} : Diámetro del 10% porcentaje pasante por masa de suelo.

Los autores proponen que el suelo será totalmente estable si se tiene valores de coeficiente menores a 10, aceptando valores de hasta 20 si es que la curva no tiene cambios abruptos en la gradación.

Otros criterios:

Es además menester que las partículas no sean captadas por los agujeros en las tuberías de recolección, por lo que según Blight (2010):

$$D_{85f} > A \quad (8)$$

En dónde:

D_{85f} : Diámetro del 15% pasante por masa del filtro.

A : Abertura de la tubería de recolección.

A modo de conclusión, cabe mencionar que estos criterios comparan dos capas entre sí, por lo que para drenajes de más de un material de filtro es necesario intercambiar en las siguientes iteraciones el material de filtro de la capa superior como el material a retener, esto con el objetivo que las partículas no rellenen los espacios de las futuras capas, y evitar la disminución de la permeabilidad.

2.1.8 Materiales de construcción de filtros.

Como corresponden a la parte que estará en contacto con el suelo a drenar es necesario que las capas que conforman el filtro tengan una granulometría fina, por lo que suelen ser capaz de arena e incluso a veces gravas muy finas, las cuales van aumentando su grosor y permeabilidad.

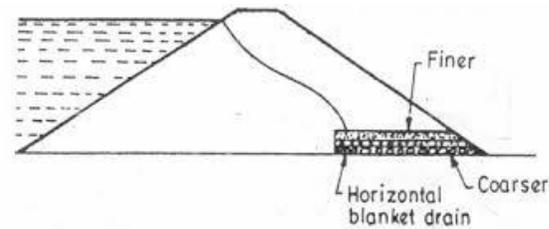


Figura 2-5: Capas en un drenaje al pie de una presa. (Reservoir & Farm Pond Design, 2020)

2.2 Permeabilidad saturada

Autores como Whitlow (1995) la definen como la capacidad de un suelo de permitir el paso de agua a través de este. Siendo usada la letra k o la expresión k_{sat} para representar el coeficiente de permeabilidad saturada, el cual en palabras del mismo autor corresponde a la medida de la resistencia de un suelo a que se genere un flujo. No se debe de confundir la expresión con K una variable que representa la permeabilidad intrínseca del material.

El termino k proviene de la ecuación publicada por Henri Phillbert Gaspar Darcy en 1856, conocida como la ley de Darcy en la cual se explica la relación entre la velocidad de descarga sobre suelos saturados y un gradiente hidráulico, siendo k la variable el tercer término de la ecuación como se puede ver en la siguiente ecuación:

$$v = k * \frac{h_2 - h_1}{L} \quad (9)$$

$$v = k * i \quad (10)$$

En dónde:

v : Velocidad de descarga del flujo del suelo (m/s).

k : Coeficiente de permeabilidad del suelo (m/s).

i : Gradiente hidraulico por diferencias de nivel ($h_2 - h_1$) sobre una distancia (L).

El coeficiente de permeabilidad al ser una variable se ve afectada por diferentes factores, de entre los que Craig identifica a:

- Tamaño de partículas: Siendo descrito como uno de los factores principales, en donde una distribución de tamaños de partícula menor será perjudicial para el valor de la permeabilidad, por lo que el tamaño de partícula es directamente proporcional al coeficiente de permeabilidad.
- Succión: A medida que aumenta la succión dentro de un material la permeabilidad disminuye.
- Porosidad: A mayor porosidad del suelo, es decir, a mayor cantidad de poros mayor es la permeabilidad, dada la facilidad que tiene el agua para moverse.
- Saturación: Si el suelo no se encuentra totalmente saturado puede contener burbujas de aire que impidan el paso del agua afectando la permeabilidad significativamente.

- Temperatura: El valor de la permeabilidad de un suelo se puede ver alterado por cambios en la viscosidad del agua, la cual uno de los factores que la hacen variar es la temperatura, por lo que también se incluye como factor de la permeabilidad. Siendo un medio de baja temperatura perjudicial para la permeabilidad ya que el agua se vuelve más viscosa.

2.2.1 Ensayos de laboratorio para determinar la permeabilidad saturada

Para poder trabajar de manera confiable con los materiales a la hora de crear sistemas de filtro es necesario conocer de manera confiable los valores de permeabilidad de dichos elementos y aunque en varios libros y publicaciones se establecen rangos y valores representativos es menester el saber de qué manera se obtienen dichos valores.

Existen dos propuestas a la hora de determinar la permeabilidad de los suelos, obtener valores de coeficientes de permeabilidad mediante relaciones teóricas de forma indirecta o a través de intervenciones directas, la cual se divide en dos formas de intervención, siendo la primera el realizar ensayos normados en laboratorios y la segunda el realizar ensayos en terreno.

Los métodos indirectos consisten en varias relaciones empíricas propuestas por diferentes autores, las cuales suelen servir para un determinado número de suelos, por lo que no existen ecuaciones capaces de englobar a todos los materiales.

Por su parte los métodos directos para determinar la permeabilidad corresponden a instancias en donde se trabaja con el suelo o alguna muestra de este para poder obtener conclusiones. Estos métodos se dividen en ensayos de laboratorio, utilizando muestras o ensayos in situ en la que las pruebas se realizan en terreno.

2.2.1.1 Ensayos de laboratorio

Como se mencionó anteriormente, es necesaria una muestra de suelo además de los equipos y los procedimientos adecuados para poder llevar a cabo estas pruebas. Se dividen en principalmente dos grupos, los cuales son carga constante, utilizado para materiales principalmente finos y carga variable utilizado principalmente para materiales porosos.

Ensayo de carga constante: Consiste en una prueba para determinar la permeabilidad de materiales porosos y se encuentra detallado en la norma ASTM D 2434. La prueba se resume en el siguiente procedimiento:

- 1) Se identifican las partes del permeámetro, dejando registro de la altura del recipiente, así como la altura de la muestra y también el diámetro del permeámetro como su diámetro (d), para calcular posteriormente el área (A).
- 2) Posteriormente se rellena el recipiente con la muestra, asegurando colocar placas o discos permeables bajo y sobre la muestra.
- 3) Se colocan los tubos que servirán como manómetros y se conecta a la fuente de agua, se dará paso a la fuente de agua solo cuando se haya alcanzado un nivel constante.
- 4) Dependiendo de que manómetros se usarán se encontrarán los valores de h y L. El valor de h corresponde a la diferencia de lecturas en los manómetros, mientras que L corresponde a la altura de la muestra que se encuentra entre dichos manómetros. Sin embargo, también se puede expresar h como la diferencia de altura entre el nivel de agua constante y el nivel de salida del agua y el valor de L como la altura total de la muestra.
- 5) Una vez que se alcanza un nivel constante de agua en el reservorio es necesario permitir el flujo de agua y esperar que la muestra se sature completamente hasta que el agua comience a fluir por la salida.
- 6) Posterior a que el agua comience a fluir por la salida del permeámetro es necesario colocar un recipiente graduado de volumen conocido (q) y cronometrar el tiempo que se demora en llenar dicho recipiente (t), siendo posible realizar varias mediciones o incrementos en caso de tener algún contenedor tipo probeta.

Por lo tanto, la forma de calcular la permeabilidad se puede escribir como:

$$k = \frac{\left(\frac{q}{t}\right) * L}{\left(\frac{d^2}{4} * \pi\right) * h} \quad (11)$$

La figura 2-6 muestra la estructura de un permeámetro junto a algunos parámetros del ensayo, mientras que la figura 2-7 un ejemplo de cómo se ven los resultados de un ensayo en el que se realizan incrementos en la medición de volumen evacuado.

La lógica detrás de este experimento es que mientras más permeable sea el material de estudio más fácil será que el agua lo atraviese, generando un caudal mucho mayor. Al conocer el volumen del permeámetro y la cantidad de muestra a ensayar es posible manipular la densidad a la que se somete la muestra.

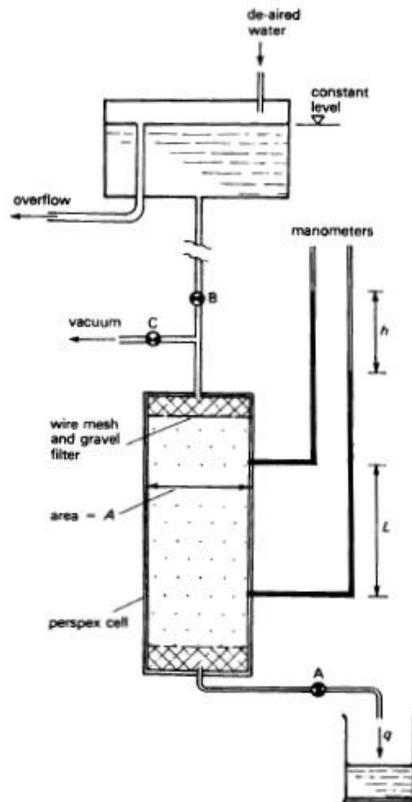


Figura 2-6. Diagrama del ensayo de carga constante. (Whitlow, 1995)

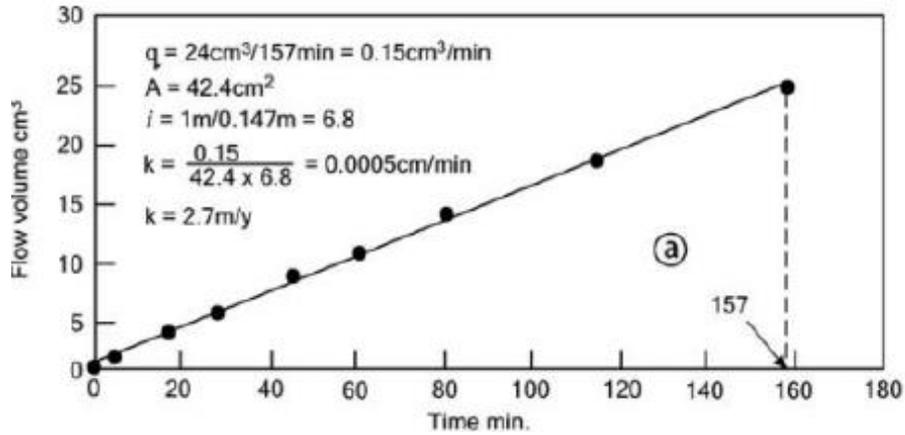


Figura 2-7. Registro de un ensayo de carga constante. (Blight, 2010)

El coeficiente de permeabilidad se obtiene de despejar la expresión de caudal como se ve a continuación:

$$Q = v * A \tag{12}$$

$$Q = k * i * A \tag{13}$$

$$Q = k * \left(\frac{h}{L}\right) * A \tag{14}$$

Reordenando se obtiene:

$$k = \frac{q * L}{A * h * t} \tag{15}$$

En dónde:

Q : Caudal obtenido al realizar ensayo (m^3/s).

q : Volumen evacuado en el ensayo (m^3).

v : Velocidad de descarga de ensayo (m/s).

A : Área transversal de la muestra de suelo (m^2).

t : Duración del ensayo (s).

k : Coeficiente de permeabilidad del suelo (m/s).

i : Gradiente hidráulico debido a diferencias de altura (h) sobre una distancia (L).

Carga variable: En este ensayo se tiene una configuración parecida en la confinación de la muestra, sin embargo, los cambios están en que la diferencia de carga hidráulica varía según el tiempo y en que se utiliza para materiales finos. El objetivo del ensayo es determinar a través de las diferencias de nivel de agua y el gradiente hidráulico que se presentan en el experimento cual es la permeabilidad saturada del material. En la figura 2-8 se muestra una realización del ensayo.

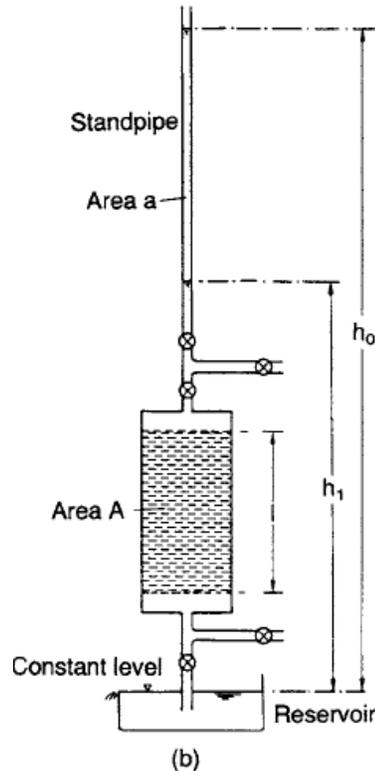


Figura 2-8. Diagrama del ensayo de carga variable. (Craig, 2004)

2.2.1.1 Ensayos in situ

Como se mencionó anteriormente son ensayos realizados en los estratos que se desean estudiar en condiciones naturales, por lo que suelen ser utilizadas solo cuando se realizan investigaciones en terreno y no se tiene acceso a un laboratorio, a continuación, se mencionarán algunas pruebas solo de manera superficial.

- Bombeo de pozos: También descritos como ensayos de recuperación y como define Craig (2004) este ensayo consiste en cavar una serie de pozos en el estrato que se desea investigar, es necesario que exista una bomba extrayendo el agua a una tasa constante,

las observaciones se realizan después de iniciado el bombeo al pozo central y los pozos radiales hasta que el nivel freático se vuelve constante, el procedimiento detallado se encuentra en la norma ASTM D 4050.

- Slug Test: En este ensayo, el cual está regulado por la norma ASTM D 4044, se sumerge un objeto en un pozo bajo el nivel freático hasta que se alcance un equilibrio, luego se retira produciendo un descenso en el pozo, el tiempo que demora en reestablecerse el equilibrio permite calcular la tasa de recuperación, la cual permite calcular la permeabilidad. De forma parecida existen variantes en las que el objeto se deja sumergido generando un aumento del nivel freático y se mide el tiempo hasta que el descenso en el pozo se normaliza.
- Ensayos de infiltración: En este tipo de ensayos se busca conocer el valor de permeabilidad a partir de infiltraciones realizadas en el suelo o estrato, entre estos tipos de ensayos se encuentran una gran variedad, entre las cuales destacamos:
 - Lagunas de infiltración: Se generan calicatas de dimensiones establecidas en el suelo y se rellena con agua hasta determinado nivel, registrando descensos y tiempo se puede obtener la permeabilidad.
 - Porchet: Parecido al método anterior, en el ensayo Porchet se crea un pozo de forma radial relleno con agua hasta determinado nivel, registrando los descensos y el tiempo, se puede obtener la permeabilidad para intervalos de tiempo.
 - Infiltrómetro cilíndrico: Corresponden a tubos cilíndricos de metal los cuales se rellenan y luego se colocan sobre el estrato a estudiar. Su base teórica es la misma que los ensayos anteriores, existen algunos infiltrómetros dobles de manera que se pueda realizar dos mediciones obteniendo la segunda medición el beneficio de que el suelo cercano se encuentre saturado.

2.2.1.2 *Expresiones y relaciones empíricas:*

Como se mencionó anteriormente, se puede estimar la permeabilidad de algunas muestras si se tienen algunos datos respecto a las propiedades de los suelos, principalmente a propiedades granulométricas, sin embargo, es necesario recordar que estas expresiones no están hechas para todos los tipos de suelo y funcionarán mejor en suelos parecidos a los cuales fueron

concebidos. También es importante mencionar que solo son estimadores y por ende los valores no siempre se acercarán a la realidad (Das, B. M, 2001).

Entre las expresiones más conocidas se encuentra la siguiente:

$$k = C * d_{10}^2 \quad (16)$$

En dónde:

k: Permeabilidad (m/s)

C: Constante que varía entre 1 y 1,5

d_{10}^2 : Diámetro efectivo

La expresión anterior permite relacionar la permeabilidad saturada con la ley de Poiseuille, por lo que se relaciona el diámetro efectivo con una constante, diversos autores han buscado valores para dicha constante, diferentes posturas se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 2-1: Diferentes expresiones indirectas según autor y tipo de material. (Sullca & Quispe, 2015)

Autor	Expresión	Parámetros	Usos
Allen Hazen	$k = C * d_{10}^2$	<i>k</i> : Permeabilidad (cm/s) <i>C</i> : Constante varía entre 1 y 1,5 <i>d</i> ₁₀ : Diámetro efectivo (mm)	Arenas uniformes y limpias
Arthur Casagrande	$k = 1,4 * e^2 * k_{0,85}$	<i>k</i> : Permeabilidad (cm/s) <i>e</i> : Índice de vacíos <i>k</i> _{0,85} : Permeabilidad para <i>e</i> = 0,85	Arenas limpias
Kozeny- Carman	$k = 8,3^{-3} * d_{10}^2 * \frac{\eta^3}{(1 - \eta)^2}$	<i>k</i> : Permeabilidad (m/s) <i>η</i> : Porosidad <i>d</i> ₁₀ : Diámetro efectivo (mm)	Arenas
Slitcher	$k = \eta^{3,287} * d_{10}^2 * 10^{-2}$	<i>k</i> : Permeabilidad (m/s) <i>η</i> : Porosidad <i>d</i> ₁₀ : Diámetro efectivo (mm)	Arenas

2.2.2 Importancia de la permeabilidad.

Dada la criticidad que tiene la creación de filtros, es imperioso conocer la permeabilidad de los materiales utilizados en la construcción de sistemas de filtro puesto que el agua seguirá una dirección en estos sistemas dependiendo de los valores de permeabilidad que se encuentre. Siendo necesario un aumento de la permeabilidad a lo largo del sistema de filtro, en caso de no cumplirse puede producirse un mal o nulo funcionamiento del sistema. (Blight, 2010)

2.3 Densidad mínima, máxima y relativa

Dentro de los estudios del área geotécnica es de vital importancia el conocer y entender las propiedades de los suelos a estudiar. En este caso la densidad relativa de los suelos es una de las variables más importantes en el estudio, por lo cual es de extrema necesidad entender los procesos detrás de la determinación de estos parámetros (Braja DAS).

2.3.1 Densidad mínima seca:

La densidad mínima de un suelo corresponde como su nombre lo indica al mayor espacio o volumen que puede utilizar una masa de suelo. El proceso mediante el cual se obtiene la densidad mínima se encuentra regulado a nivel internacional por la norma ASTM D 4254 y en Chile por la Norma Chilena 1726 (NCh 1726). El proceso se resume de la siguiente manera.

- 1) Seleccionar un molde cilíndrico para el experimento, registrando su diámetro (d), altura (h_1) y masa (m_1).
- 2) Rellenar el molde cilíndrico con el material (previamente seco) de la forma más cuidadosa posible, evitando golpear el molde y depositando el material desde la menor altura posible, de manera que se minimice el reacomodo de partículas.
- 3) Una vez lleno el molde registrar la masa del molde (m_2).
- 4) Repetir la experiencia hasta que se obtengan valores constantes entre mediciones.
- 5) Calcular las densidades y asignar la densidad mínima como el menor valor de densidad obtenida en los ensayos.

El cálculo de la densidad seca corresponde a:

$$\rho_d = \frac{m_2 - m_1}{\frac{\pi * d^2 * h_1}{4}} \quad (17)$$

Como se puede ver la densidad mínima no es un valor absoluto para una muestra, sino es un valor que se asigna según los resultados y la cantidad de los experimentos realizados.

Para el caso de esta investigación y dada la contingencia del mundo no se pudo seguir completamente la norma chilena, pues no se disponía de la mayoría de los recursos, sin embargo, se utilizó como guía en este proceso, siendo el procedimiento bastante similar al de la norma, los resultados y condiciones iniciales de dichos ensayos se ven en los

2.3.2 Densidad máxima seca:

La densidad máxima al contrario que la densidad mínima indica el máximo grado de acomodo que pueden presentar las partículas de un determinado suelo. Al igual que con la densidad mínima el valor de la densidad máxima corresponde a un valor que se asigna luego de realizar los experimentos. El proceso mediante el cual se obtiene la densidad mínima se encuentra regulado a nivel internacional por la norma ASTM D 4254 y en Chile por la Norma Chilena 1726 (NCh 1726). Sin embargo, como se mencionó con anterioridad al no ser posible aplicar la norma en su totalidad se aplicó un proceso equivalente, el cual se describe a continuación.

- 1) Seleccionar un molde cilíndrico para el experimento, registrando su diámetro (d), altura (h_1) y masa (m_1).
- 2) Seleccionar un objeto de masa considerable y de forma cilíndrica para colocar sobre la muestra en un proceso posterior.
- 3) Rellenar el molde cilíndrico con el material (previamente seco).
- 4) Una vez lleno el molde registrar la masa del molde (m_2).
- 5) Colocar el objeto de masa considerable sobre la muestra y hacer vibrar el molde mediante algún rotor, en este caso a través de los cabezales de una máquina de afeitar, deteniéndose para retirar el peso y golpear la superficie de la muestra con algún objeto de superficie palana, evitando la pérdida de material.
- 6) Repetir el proceso 5 hasta que el descenso de la muestra no presente variaciones o durante un máximo de 8 minutos.
- 7) Registrar el descenso en la altura del material (h_2).
- 8) Repetir la experiencia hasta que se obtengan valores constantes entre mediciones.
- 9) Calcular las densidades y asignar la densidad máxima como el mayor valor de densidad obtenida en los ensayos.

El cálculo de la densidad seca corresponde a:

$$\rho_d = \frac{m_2 - m_1}{\frac{\pi * d^2 * (h_1 - h_2)}{4}} \quad (18)$$

En comparación a la norma chilena este es el proceso que más varía, puesto que el proceso original considera una mesa que vibra en la que se coloca el material como la de la figura 2-9, siendo mucho más fácil en un laboratorio bien equipado. Sin embargo, se cree que los

resultados están dentro de lo aceptable. La configuración utilizada, así como los detalles del ensayo se resumen en los Anexo 11 y Anexo 12.

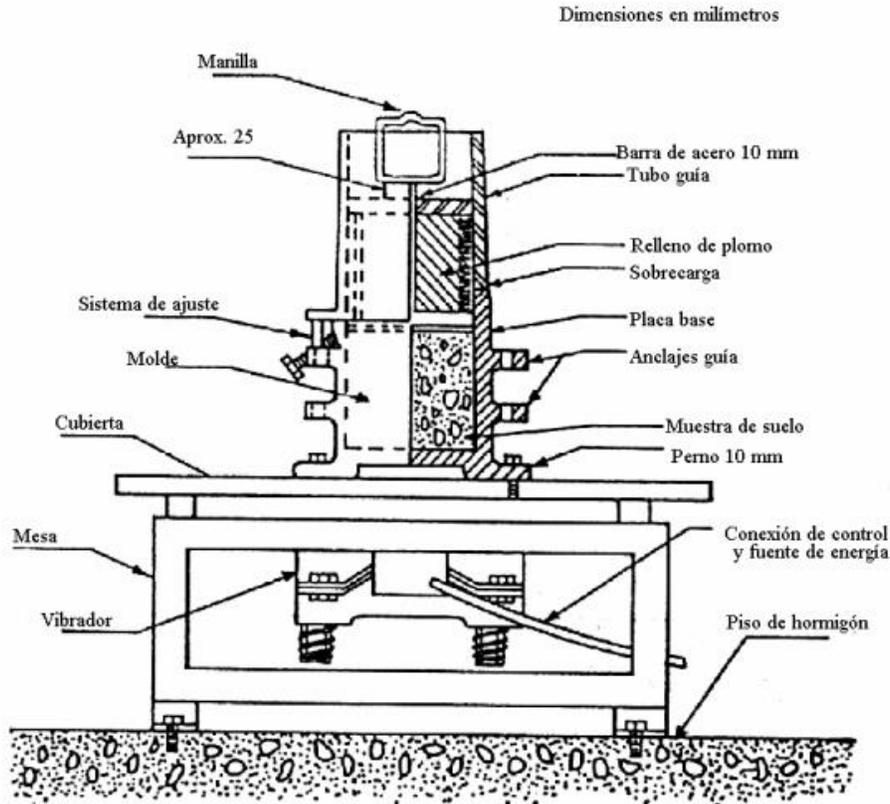


Figura 2-9. Sección típica mesa vibratoria. (NCh 1726, 1980)

2.3.3 Densidad relativa:

La densidad relativa o también llamada compacidad relativa es un término que varía entre 0 y 1 o también 0% y 100% dependiendo de la expresión, el cual se usa para describir el estado y la densidad que presenta un suelo respecto a su máxima y mínima densidad. Por lo que se usa para indicar que tan suelto o duro se encuentra un suelo.

La expresión de densidad relativa está ligada directamente a la cantidad de espacios vacíos que presenta el suelo, por lo que una densidad relativa del 0% indica que el suelo presenta su mayor índice de vacíos y el suelo está en su estado más suelto, es decir su densidad mínima. Por el contrario, una densidad relativa del 100% indica que la cantidad de espacios vacíos en el suelo

se ha minimizado y el suelo se encuentra en su estado de mayor densidad alcanzable o también de densidad máxima. La expresión de densidad relativa se define como:

$$DR = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (19)$$

$$DR(\%) = \left(\frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \right) * 100 \quad (20)$$

En dónde:

e : Índice de vacíos de la muestra de suelo.

e_{max} : Índice de vacíos máximo del suelo.

e_{min} : Índice de vacíos mínimo del suelo.

Puesto que la densidad relativa es un indicador de si la densidad in situ se parece más o menos a la densidad máxima o mínima la densidad relativa también se puede expresar a través de una relación de los pesos específicos mediante las expresiones:

$$DR = \left(\frac{\gamma_d - \gamma_{d \min}}{\gamma_{d \max} - \gamma_{d \min}} \right) * \left(\frac{\gamma_{d \max}}{\gamma_d} \right) \quad (21)$$

$$DR(\%) = \left(\frac{\gamma_d - \gamma_{d \min}}{\gamma_{d \max} - \gamma_{d \min}} \right) * \left(\frac{\gamma_{d \max}}{\gamma_d} \right) * 100 \quad (22)$$

En dónde:

γ : Peso específico de la muestra de suelo.

γ_{max} : Peso específico máximo del suelo.

γ_{min} : Peso específico mínimo del suelo.

Las expresiones anteriormente mencionadas también son válidas para las densidades secas de la muestra, de la siguiente manera:

$$DR = \left(\frac{\rho_d - \rho_{d \min}}{\rho_{d \max} - \rho_{d \min}} \right) * \left(\frac{\rho_{d \max}}{\rho_d} \right) \quad (23)$$

$$DR(\%) = \left(\frac{\rho_d - \rho_{d \min}}{\rho_{d \max} - \rho_{d \min}} \right) * \left(\frac{\rho_{d \max}}{\rho_d} \right) * 100 \quad (24)$$

Los máximos y mínimos estados de vacíos que puede presentar un suelo y por ende las densidades máximas y mínimas que puede presentar un suelo son valores que se definen a través de los ensayos mencionados en la sección anterior.

2.3.3.1 Importancia de la densidad relativa

Como se mencionó en el punto anterior la permeabilidad se ve afectada por la cantidad de vacíos que presenta un suelo, siendo más permeable un suelo si se tiene una gran cantidad de espacios vacíos y de manera opuesta si el índice de vacíos es menor.

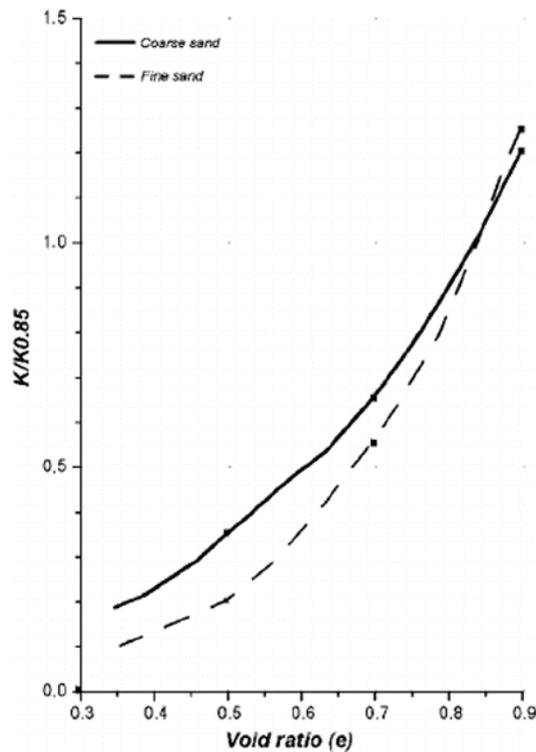


Figura 2-10. Variabilidad de la permeabilidad respecto al índice de vacíos. Donde $k_{0.85}$ es la permeabilidad saturada con ese índice de vacíos (A hydrogeophysical study to estimate water seepage from northwestern Lake Nasser, Egypt, 2005)

De esta manera los suelos con una menor densidad relativa son más permeables, pero con un potencial de acomodo y de licuación muy alto, es decir, que ante un evento sísmico estos podrían presentar excesos de deformación.

Por el otro lado los suelos con una densidad relativa muy alta son lo suficientemente resistentes para ser utilizados como materiales, sin embargo, dado que presentan un bajo índice de vacíos su permeabilidad no es suficiente para actuar como buenos filtros.

Es por esta razón que se suele recomendar al trabajar con materiales de construcción de presas y filtros utilizar una densidad relativa mínima del 70 % (USBR N°13, 1987).

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

En este capítulo se abarcarán los diferentes procedimientos utilizados en las distintas etapas de la investigación.

3.1 Metodología

Con el fin de poder abordar de forma ordenada la problemática, que consiste en estudiar el efecto en la variabilidad de la permeabilidad y de cumplir los objetivos mencionados anteriormente, es entonces necesario dividir la metodología en las siguientes cuatro partes, las cuales se detallan a continuación y se resumen en la figura 3-1.

3.1.1 Etapa 1: Estudio de los materiales

Correspondiente al inicio de la investigación, en este paso se tomaron los datos pertenecientes a un relave de producción de cobre que permitiría la construcción del sistema de drenaje bajo investigación y por ende de los estratos de filtro.

En esta etapa se analizó la granulometría de los relaves, lo que junto a la información proporcionada por ICOLD referente a los diferentes criterios permitió definir máximos y mínimos en la granulometría de las diferentes capas, generando así bandas granulométricas, las cuales ayudarían a la hora de constituir los materiales para el estudio, los cuales se construyeron tamizando diferentes sacos de arena separando por malla el contenido de manera que fuese más fácil la creación de estos.

3.1.2 Etapa 2: Plan de acción

Una vez caracterizados de manera granulométrica los materiales que conformarían el sistema de drenaje. Por lo que se volvió necesario el construir los materiales de filtro antes diseñados según estándares, esto se logró a partir de muestras de arenas más grandes, de las cuales se separó su contenido según diferentes mallas granulométricas para posteriormente crear diferentes muestras utilizando diferentes cantidades dependiendo del ensayo o prueba a realizar.

Posterior a la construcción de los materiales de filtro fue necesario el caracterizar dichos materiales, lo cual se realizó mediante ensayos de densidad máxima y mínima, así como ensayos de permeabilidad de carga constante para un amplio rango de partículas.

También es posible caracterizar materiales según relaciones empíricas que permiten relacionar la densidad relativa y/o granulometría para poder obtener valores estimados de permeabilidad, lo cual puede ser acompañado de estimaciones del software.

3.1.3 Etapa 4: Modelamiento

Una vez caracterizados los parámetros esenciales para realizar la investigación fue necesario modelar los materiales que se utilizarían dentro del software SEEP/W, además de un diseño de drenaje que permitiese la inclusión e interacción de los diferentes materiales.

Posterior a la creación del modelo, el cual incluye los diferentes materiales es necesario poner a prueba las configuraciones de los materiales definidos en el plan de acción, es decir, como enfrentar las diferentes arenas y los diferentes valores de densidad relativa. Esto se realizó mediante diferentes simulaciones estacionarias en el software SEEP/W.

3.1.4 Etapa 5: Análisis de resultados

Una vez obtenido los resultados del proceso de modelamiento fue necesario graficar el comportamiento que presentaba la permeabilidad y observar la influencia generada sobre compactación en las primeras capas de filtro. Para luego concluir si se reflejaba un comportamiento de materiales de forma individual o como conjunto. Finalmente proponer una expresión que se ajuste a dicho comportamiento.

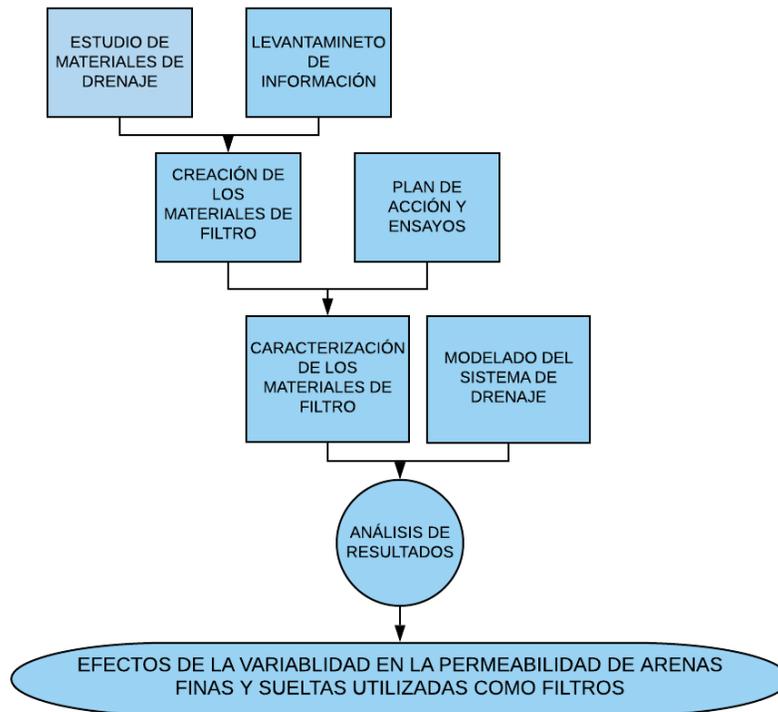


Figura 3-1. Diagrama del plan de acción a seguir. (Elaboración propia)

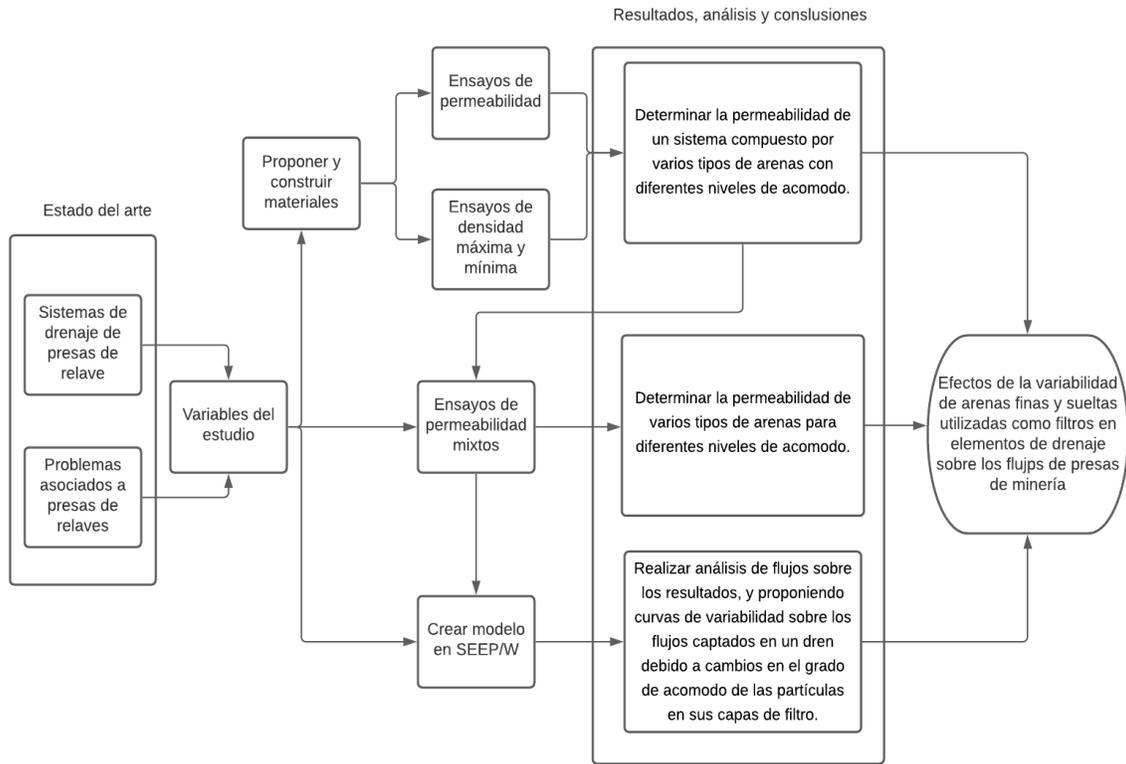


Figura 3-2. Diagrama de la metodología. (Elaboración propia)

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en las diferentes etapas descritas previamente en la metodología.

4.1 Estudio de los materiales

4.1.1 Diseño de materiales de filtro

Como punto de partida para diseñar materiales de filtro es necesario tener en cuenta el material que se debe contener, para lo cual fue considerada la siguiente curva granulométrica, la cual corresponde a arenas de relaves procedentes del *underflow* de un hidrociclón. El contenido granulométrico se ve en la tabla 4-1. Por lo cual se considerará la información de este material para el desarrollo de materiales, así como para el análisis.

Tabla 4-1. Información granulométrica del relave o suelo a retener. (Elaboración propia)

Información relave	
Tamaño (mm)	Material pasante (%)
0,5	85
0,08	20
0,074	17
0,062	15
0,05	13
0,02	10

Utilizando la información de la tabla anterior se puede construir la curva granulométrica, así como clasificar el material, obteniéndose la figura mostrada a continuación.

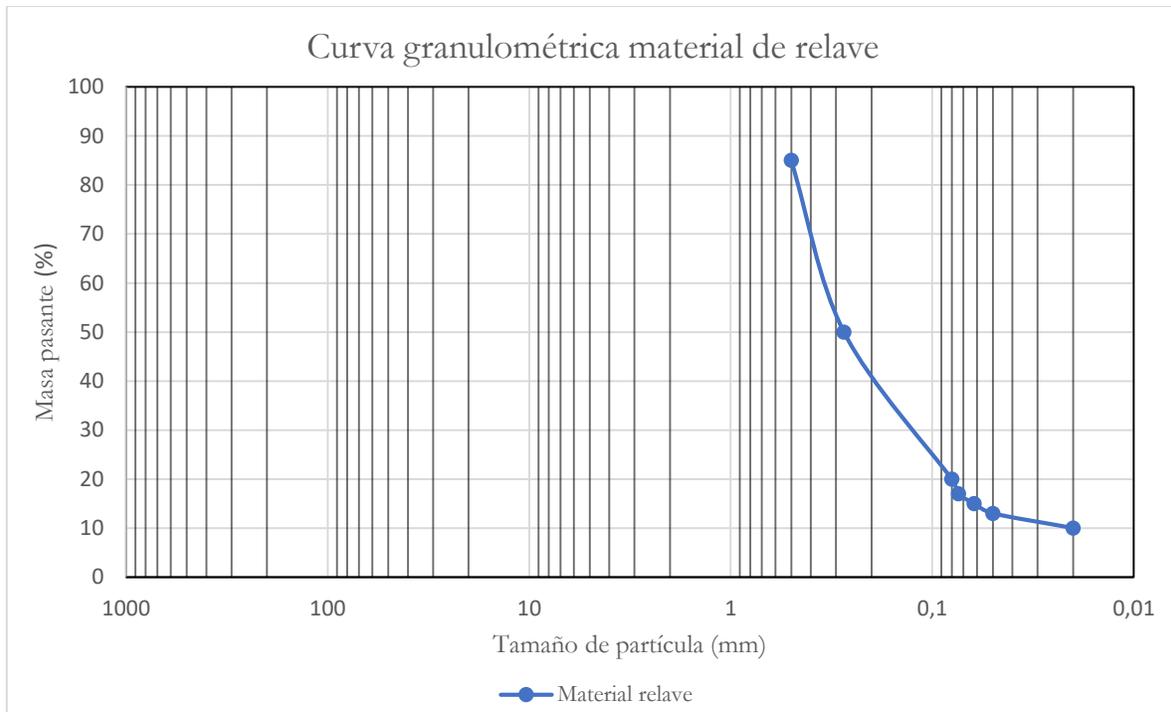


Figura 4-1. Curva granulométrica del relave. (Elaboración propia)

Una vez realizado el análisis del material a retener, es necesario crear un material de filtro capaz de retener el material de relave. Para lo cual se utilizan los principios descritos por ICOLD y Terzaghi, generándose una zona o banda granulométrica en donde debe encontrarse el primer material de filtro.

Los principios para obtener los materiales de filtro (MF) producen dos curvas granulométricas, las cuales podemos denominar curva máxima o de material grueso y curva mínima o de material fino. La importancia de estas curvas es que delimitan una zona en donde el primer material de filtro debe caer, dicho material está delimitado por las curvas descritas en las siguientes tablas las cuales se representan en la figura 4-2.

Tabla 4-2. Granulometría de la curva mínima del material de filtro. (Elaboración propia)

Tamaño mínimo (mm)	Material pasante (%)
1,24	85
0,99	60
0,25	15
0,17	10

Tabla 4-3. Granulometría de la curva máxima del material de filtro. (Elaboración propia)

Tamaño máximo (mm)	Material pasante (%)
6,2	85
4,96	60
1,24	15
0,83	10

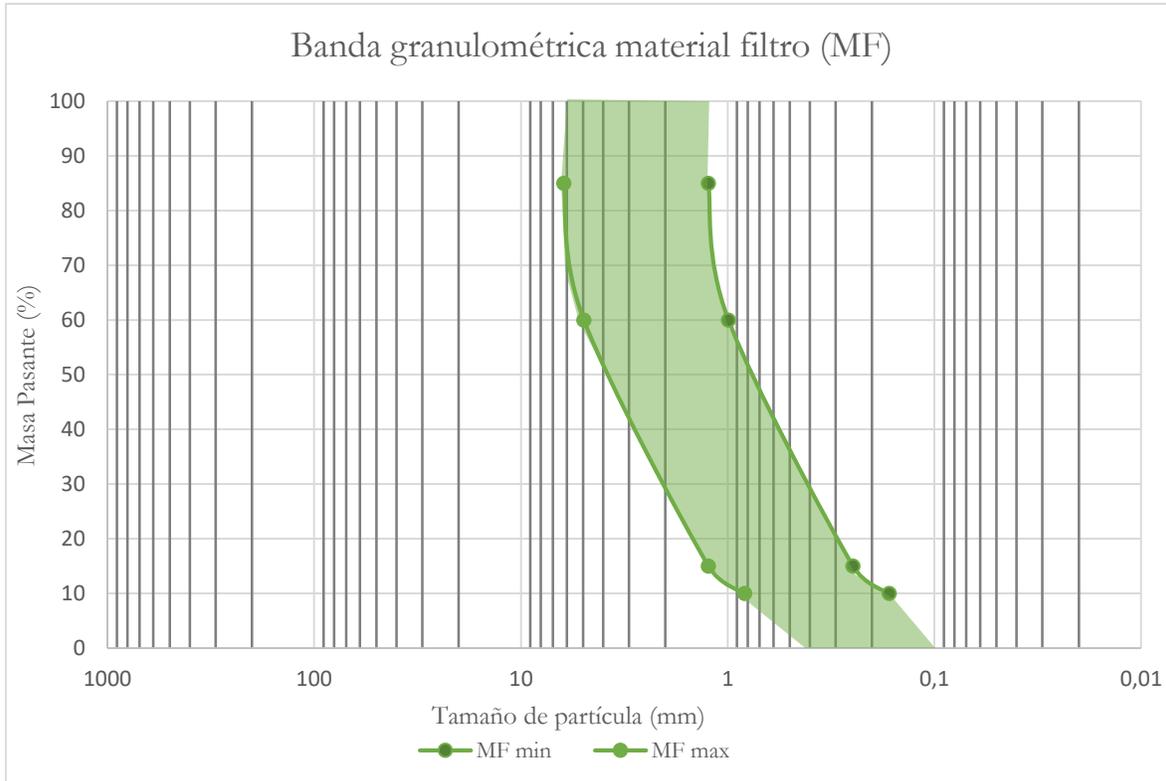


Figura 4-2. Bandas granulométricas del material de filtro. MF min y MF máx representan la granulometría de mínima y máxima el material. (Elaboración propia)

La importancia de esta banda granulométrica es que define un amplio espectro de curvas granulométricas, por lo que facilita el proceso de fabricación de estos materiales, sobre todos a la hora de crearlos a gran escala

Una vez definida la banda granulométrica del primer material se debe de considerar la construcción del segundo material o material de transición, sin embargo, antes de eso se deben observar los diferentes escenarios. Como se mencionó anteriormente el primer material de filtro se puede mover por un amplio espectro granulométrico, lo cual deja una zona bastante

grande a su banda granulométrica, esto quiere decir que es necesario acotar el material de filtro de alguna manera.

Si se considera que el tentativo material de transición se genera a partir de la curva mínima del material de filtro se obtienen las siguientes granulometrías y curvas granulométricas, descritas en las tablas presentadas a continuación, las cuales describen la primera mitad del espectro granulométrico.

*Tabla 4-4. Granulometría mínima del material de transición si MF corresponde a la granulometría mínima.
(Elaboración propia)*

Tamaño mínimo (mm)	Material pasante (%)
4,96	85
3,97	60
0,99	15
0,66	10

*Tabla 4-5. Granulometría máxima del material de transición si MF corresponde a la granulometría mínima.
(Elaboración propia)*

Tamaño máximo (mm)	Material pasante (%)
24,80	85
19,84	60
4,96	15
3,31	10

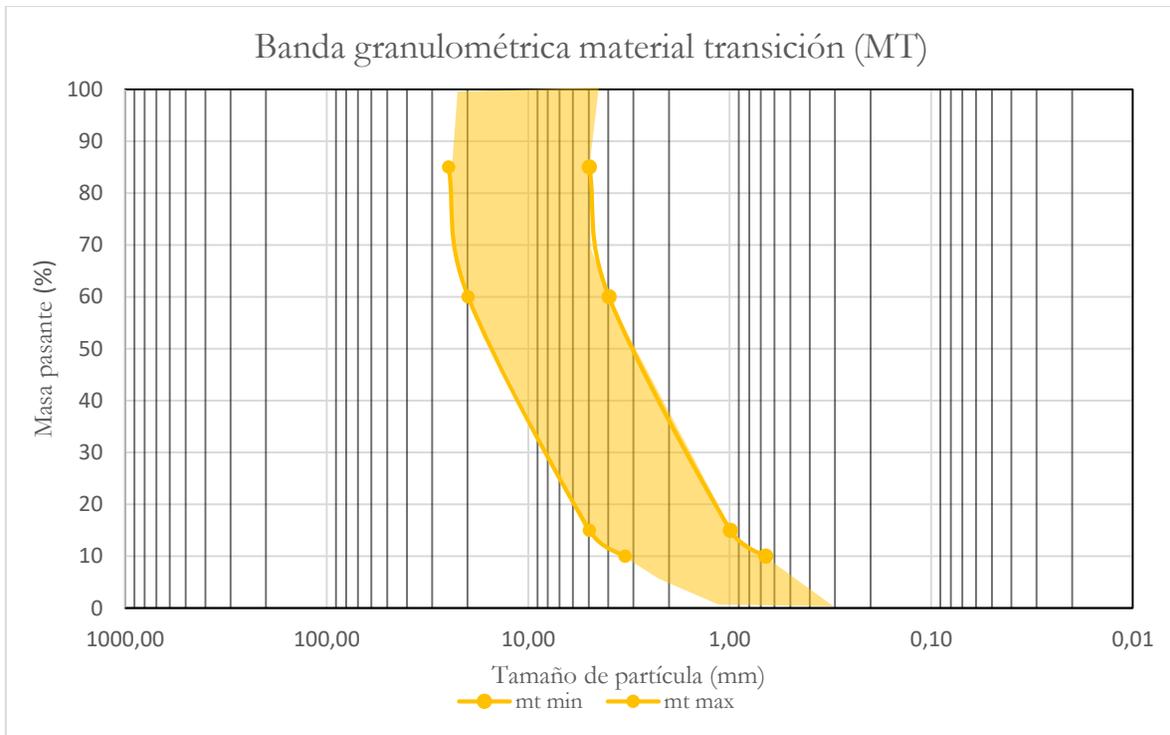


Figura 4-3. Banda granulométrica de MT si MF tiene granulometría mínima. (Elaboración propia)

Por otro lado, si se considera que el material de transición se genera a partir de la curva máxima de granulometría del primer material de filtro podemos obtener las siguientes granulometrías y curvas granulométricas, resumidas en las siguientes dos tablas y la figura 4-4.

Tabla 4-6. Granulometría mínima del material de transición si MF corresponde a la granulometría máxima. (Elaboración propia)

Tamaño mínimo (mm)	Material pasante (%)
24,80	85
19,84	60
4,96	15
3,31	10

Tabla 4-7. Granulometría máxima del material de transición si MF corresponde a la granulometría máxima. (Elaboración propia)

Tamaño máximo (mm)	Material pasante (%)
124	85
99,20	60
24,80	15
16,53	10

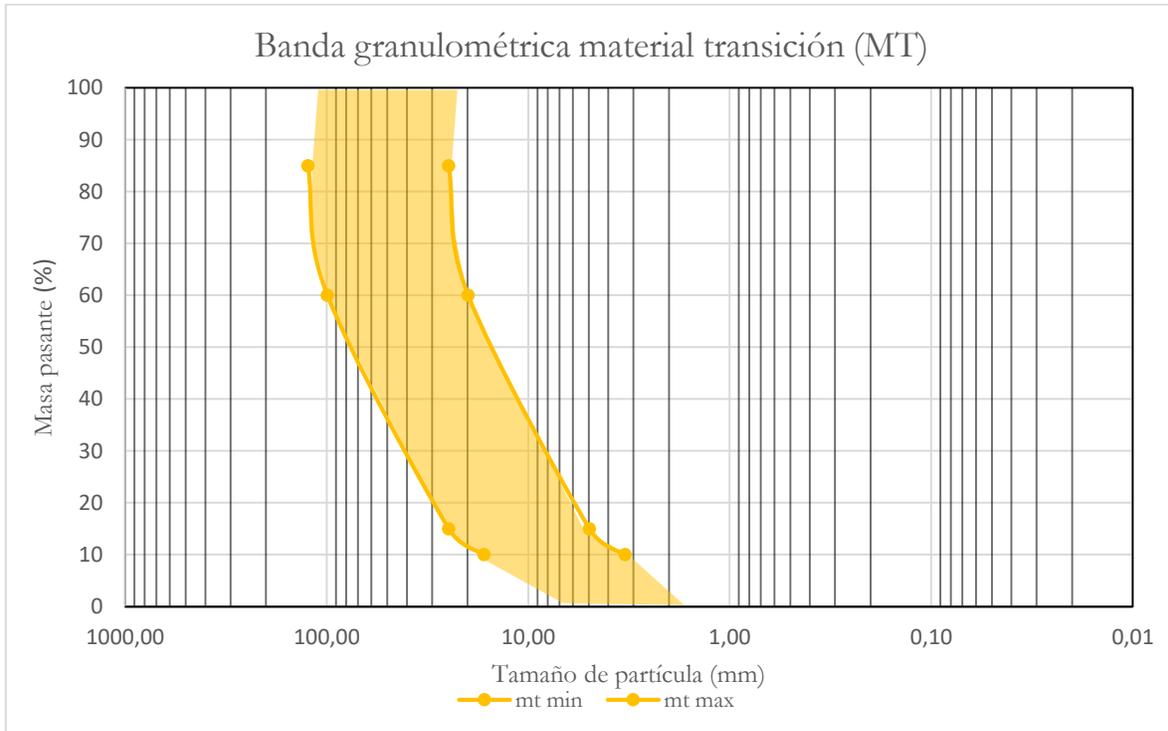


Figura 4-4. Banda granulométrica de MT si MF tiene granulometría máxima. (Elaboración propia)

Si consideramos ambos escenarios y unimos los resultados anteriores combinando la curva mínima del primer escenario y la curva máxima del segundo escenario tenemos la totalidad del espectro granulométrico del material de transición, antes de haber siquiera construido el primer material. Este espectro o ancho de banda se resume en la figura presentada a continuación.

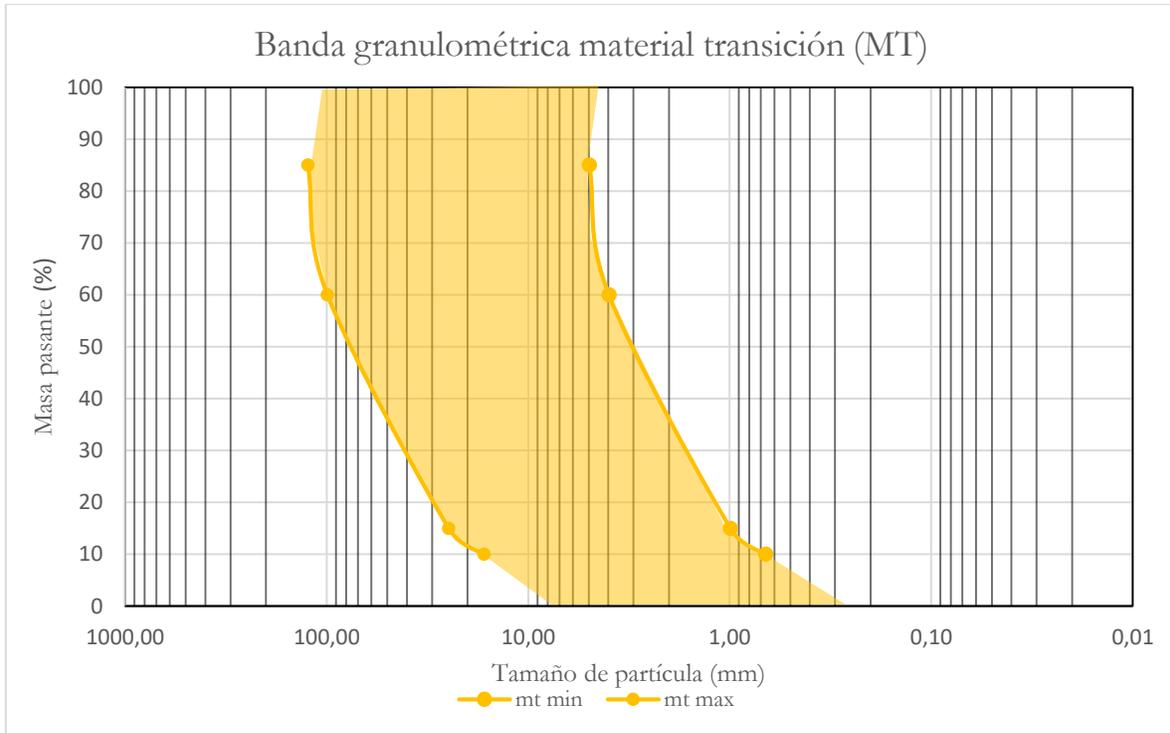


Figura 4-5. Espectro de banda máximo para el material de transición. (Elaboración propia)

4.1.2 Materiales acotados.

Como se puede ver a través de los gráficos de las bandas granulométricas el material de filtro se encuentra acotado, mientras que el material de transición se encuentra bastante disperso, por lo cual es necesario estrechar los bordes de las bandas granulométricas. Para este proceso se añade al estudio las bandas granulométricas pertenecientes a un material de transición y un material drenante.

Con la ayuda de estos materiales es fácil acotar el material de transición, ya que es el que tiene la banda granulométrica más grande. Para evitar confusiones el material de transición definido en las secciones pasadas se referirá como material de transición 1 o simplemente material de transición (MT), mientras que el material de transición que se añade junto al material drenante será llamado material de transición 2 (MT2), indicando su similitud con el material de transición.

Las bandas granulométricas del material de transición 2 y del material drenante se resumen en las tablas y figuras siguientes.

Tabla 4-8. Granulometría de la curva mínima de MT2. (Elaboración propia)

Material de transición 2	
Material transición min. (mm)	Material pasante (%)
100	100
50	91
46,43	85
25	49
12,5	16
11,75	15
9,5	12
4,75	5
2	3
0,15	2

Tabla 4-9. Granulometría de la curva máxima de MT2. (Elaboración propia)

Material de transición 2	
Material transición máx. (mm)	Material pasante (%)
125	100
100	90
94,9	85
50	41
29,03	15
25	10
12,5	4
9,5	2
4,75	0

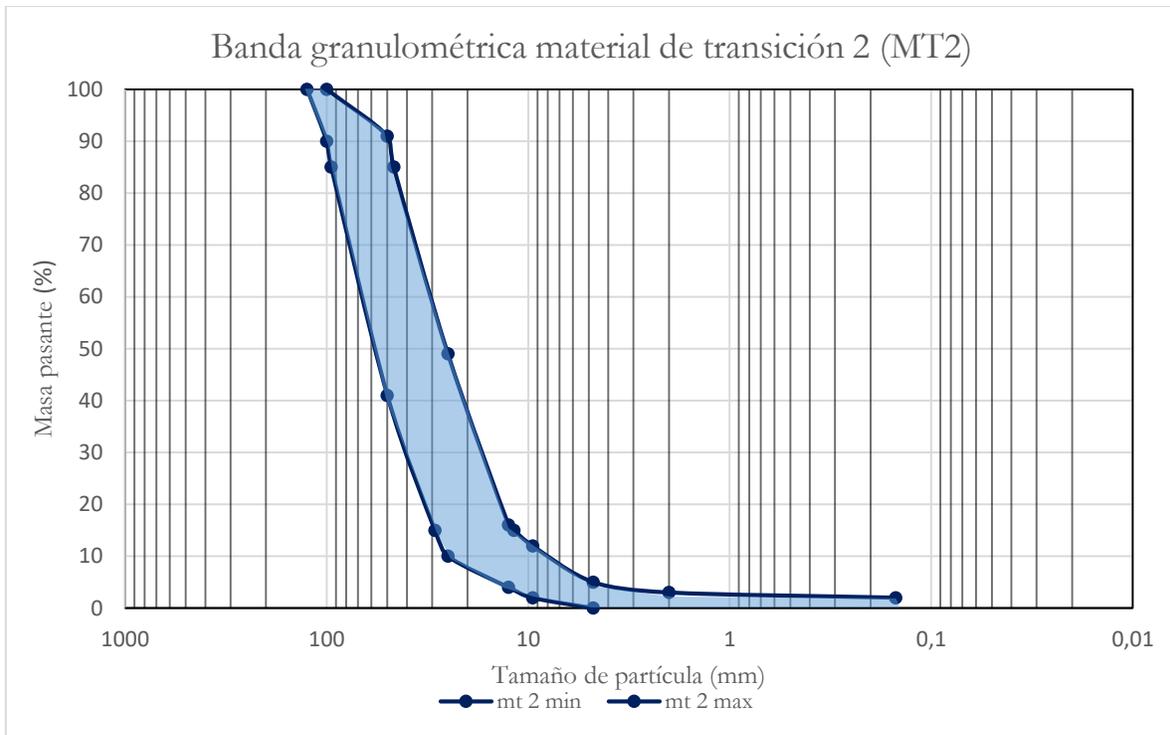


Figura 4-6. Banda granulométrica de MT2. (Elaboración propia)

Tabla 4-10. Granulometría de la curva mínima de material drenante. (Elaboración propia)

Material drenante	
Material drenante min. (mm)	Material pasante (%)
200	100
171,15	85
150	74
100	33
65,38	15
50	7
25	0

Tabla 4-11. Granulometría de la curva máxima de material drenante. (Elaboración propia)

Material drenante	
Material drenante máx. (mm)	Material pasante (%)
330	100
270	85
250	80
200	54
193,55	50
150	23
123,33	15
100	8
50	0

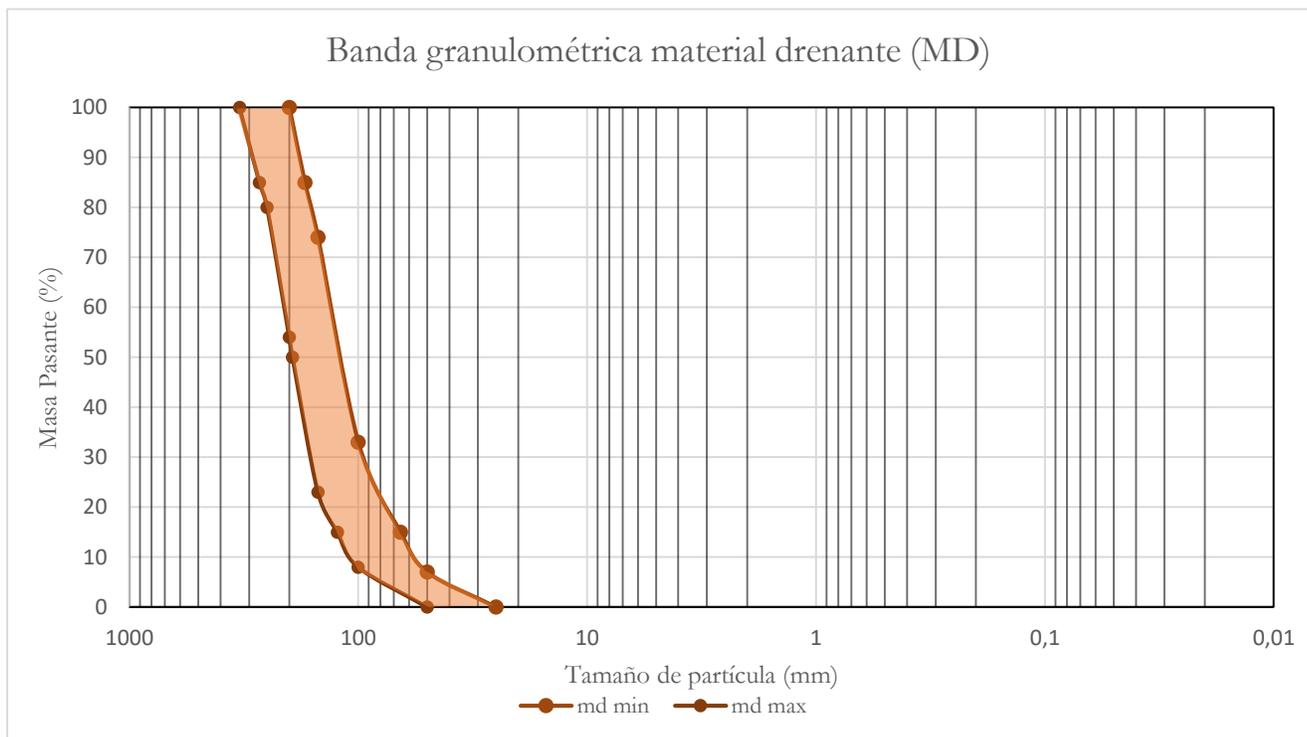


Figura 4-7. Banda granulométrica del material drenante. (Elaboración propia)

Con la ayuda de los materiales descritos anteriormente es posible acotar los materiales, principalmente el segundo material, es decir, el de transición 1. Para acotar los materiales es necesario considerar todos los escenarios, es decir, si al enfrentar los extremos de las bandas granulométricas del material de transición y de transición 2 se cumplirán los principios que rigen la creación de filtros.

Al comparar ambas bandas queda claro que el material de transición 1 es necesario reducir su ancho de banda de manera que el material de transición 2 pueda existir y que ambos funcionen de manera correcta. Los nuevos tamaños que rigen la banda granulométrica corresponden a lo mostrado en la siguiente tabla y en la figura 4-8.

Tabla 4-12. Nueva banda granulométrica de material de transición. (Elaboración propia)

Material de transición 1			
Tamaño máx. (mm)	Material pasante (%)	Tamaño min. (mm)	Material pasante (%)
13,36	100	8,47	100
11,36	85	7,2	85
8,317	60	5,27	60
7,1	50	4,5	50
2,84	15	1,8	15
1,89	10	1,2	10
0,95	5	0,6	5

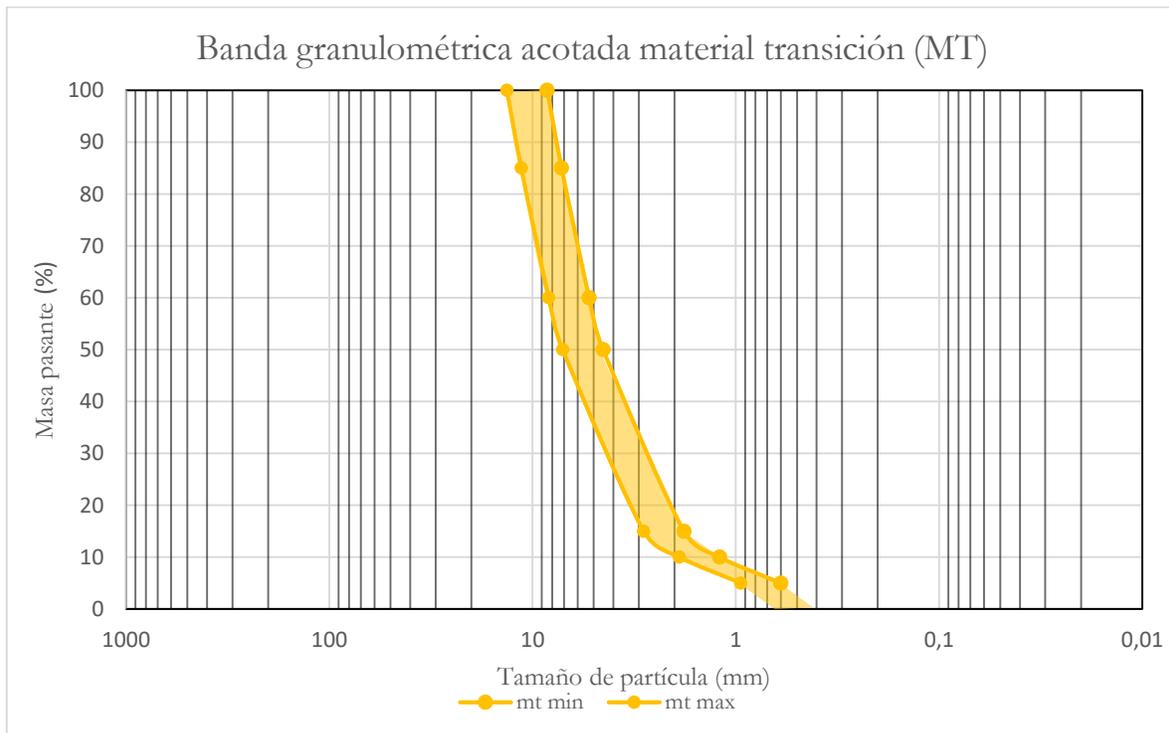


Figura 4-8. Banda granulométrica acotada para MT. (Elaboración propia)

Se puede ver que este material está dentro de la banda granulométrica anterior y que las bandas granulométricas contienen una mayor cantidad de puntos, los cuales se obtuvieron a través de interpolación. Esto permite que el proceso de construcción sea mucho más fácil.

Sin embargo, ahora que el material fue acotado es necesario realizar el mismo chequeo para el material de filtro, el cual será enfrentado al material de transición o sus bandas granulométricas.

El resultado de acotar la banda granulométrica del material de filtro se resume en la tabla presentada a continuación y en la figura 4-9.

Tabla 4-13. Nueva banda granulométrica de material de filtro. (Elaboración propia)

Material de filtro			
Tamaño máx. (mm)	Material pasante (%)	Tamaño min. (mm)	Material pasante (%)
2,12	100	1,17	100
1,8	85	0,99	85
1,318	60	0,73	60
1,13	50	0,62	50
0,45	15	0,25	15
0,3	10	0,17	10
0,13	1	0,074	1

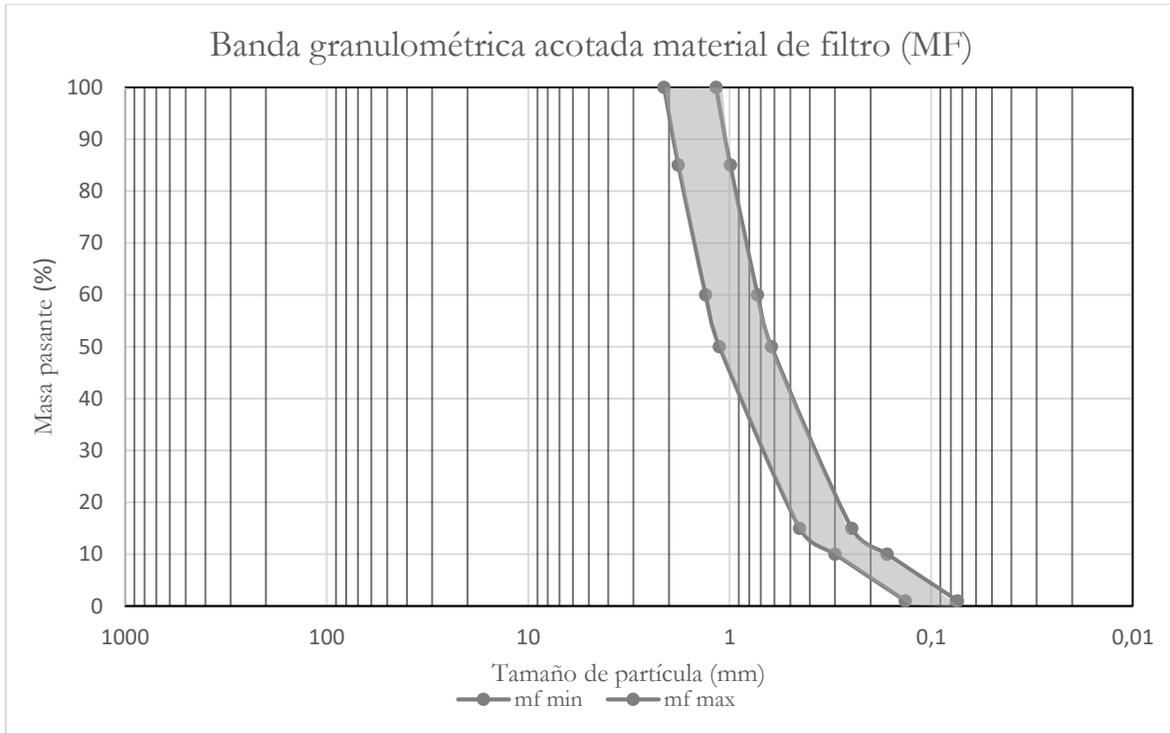


Figura 4-9. Banda granulométrica acotada para MF. (Elaboración propia)

El proceso de acotamiento del material de filtro se considera correcto, puesto que la curva del material de relave está fija y la banda al ser menor que la anterior está contenida dentro de los resultados previos, por lo que la siguiente etapa corresponde en proponer como serán los materiales y construirlos.

4.1.2 Planteamiento de los materiales.

Una vez se tienen delimitados y acotados los bordes de las bandas granulométricas es necesario proponer curvas granulométricas para los materiales a construir.

Utilizando los tamaños de los diferentes tamices o mallas ASTM es posible definir los porcentajes de cada tipo de tamaño necesario para construir la suficiente cantidad de muestra de material, considerando que se desea crear muestras de 6 Kg para disponer de varias muestras durante los futuros ensayos.

La tabla siguiente muestra la cantidad de material necesario para fabricar el material de transición, mientras que la figura 4-10 muestra como esta curva se adecua al espacio delimitado por la banda granulométrica.

Tabla 4-14. Granulometría y cantidad de materia del MT. (Elaboración propia)

Material de transición					
Tamiz	Tamaño (mm)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante (%)	Masa (g)
"3/8"	10	0	0	100	0
N.º 4	4,75	55	55	45	3300
N.º 10	2	30	85	15	1800
N.º 20	0,85	10	95	5	600
N.º 40	0,425	4	99	1	240
N.º 200	0,075	1	100	0	60

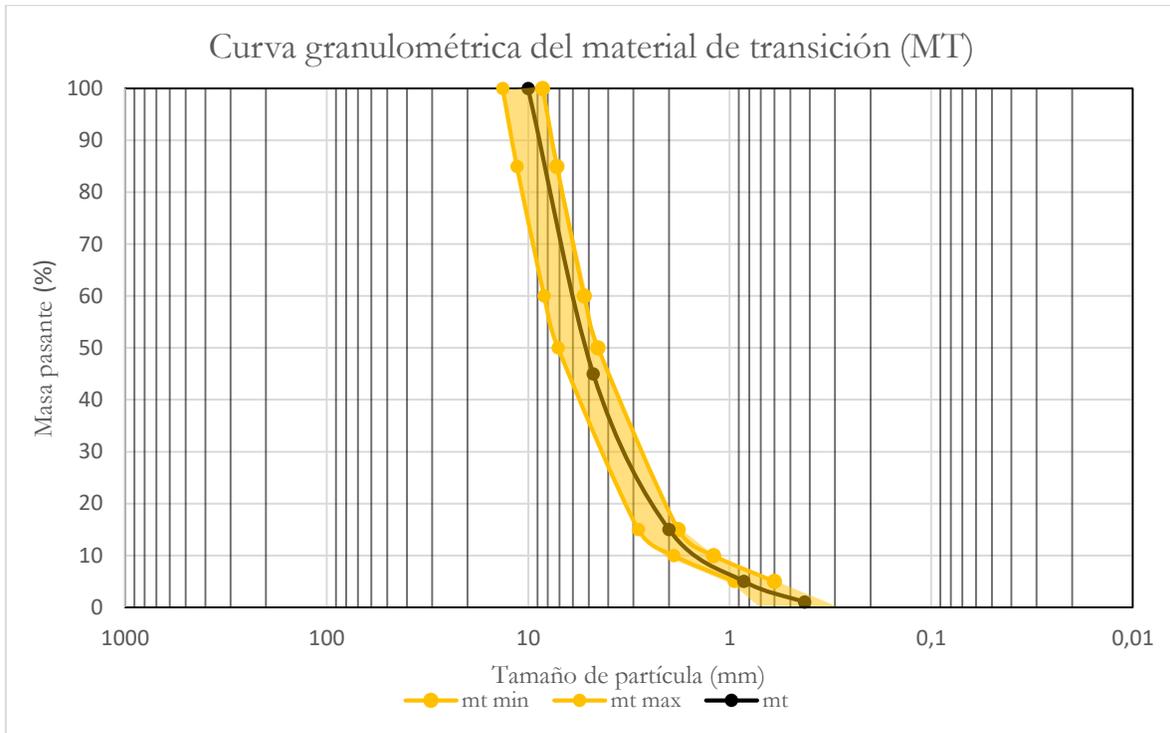


Figura 4-10. Curva granulométrica del MT. (Elaboración propia)

Adicionalmente el fabricar materiales de este tipo entregaría información granulométrica importante para ayudar en la clasificación de suelos, dicha información se resume la tabla mostrada a continuación.

Tabla 4-15. Propiedades del material de transición. (Elaboración propia)

Parámetro	Resultado
D10 (mm)	1,43
D60 (mm)	6,18
Coficiente de uniformidad (Cu)	4,34
Porcentaje pasante malla N°200	0
Porcentaje pasante malla N°4	45
Tipo de suelo	GP

Como se puede observar en la tabla el material corresponde a grava mal graduada, lo cual asegura su estabilidad interna e indica que la granulometría se asemeja a la del material de transición.

De la misma manera el material de filtro se creó en base a los tamaños disponibles de los tamices anteriormente mencionados, buscando de igual forma mantenerse dentro de la banda granulométrica.

La siguiente tabla indica la cantidad y tipo de granulometría usada para la construcción del material de filtro, mientras que la figura 4-11 indica la curva del material dentro de la banda granulométrica, por último, la tabla 4-17 indica propiedades sobre el tipo de suelo al cual pertenece el material.

Tabla 4-16. Granulometría y cantidad de materia del MF. (Elaboración propia)

Material de filtro					
Tamiz	Tamaño (mm)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante (%)	Masa (g)
N.º 10	2	0	0	100	0
N.º 20	0,85	55	55	45	3300
N.º 40	0,425	27	82	18	1620
N.º 200	0,075	18	100	0	1080

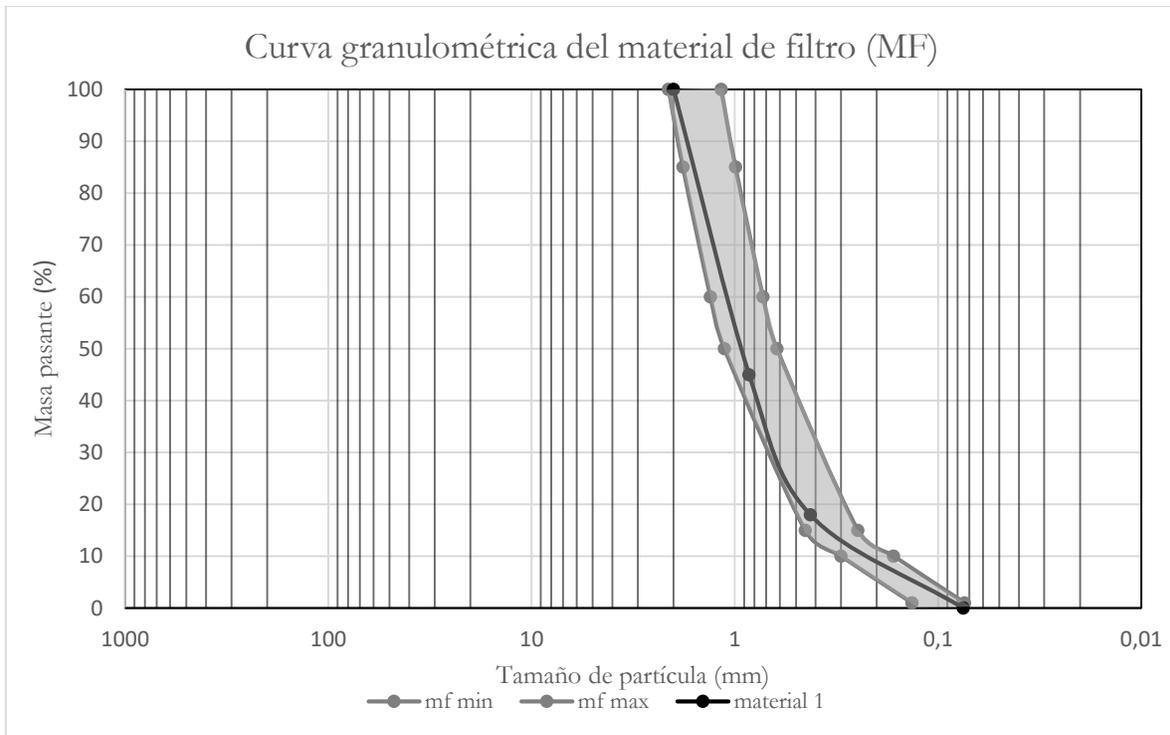


Figura 4-11. Curva granulométrica del MF. (Elaboración propia)

Tabla 4-17. Propiedades del material de filtro. (Elaboración propia)

Parámetro	Resultado
D10 (mm)	0,27
D60 (mm)	1,16
Coefficiente de uniformidad (Cu)	4,32
Porcentaje pasante malla N°200	0
Porcentaje pasante malla N°4	100
Tipo de suelo	SP

De igual manera que con el material de transición 1, el material de filtro posee un coeficiente de uniformidad menor a 6 por lo cual se considera como material estable. Sin embargo, este material corresponde a arena mal graduada (SP).

Por último, la siguiente figura resume los diferentes materiales y las bandas granulométricas.

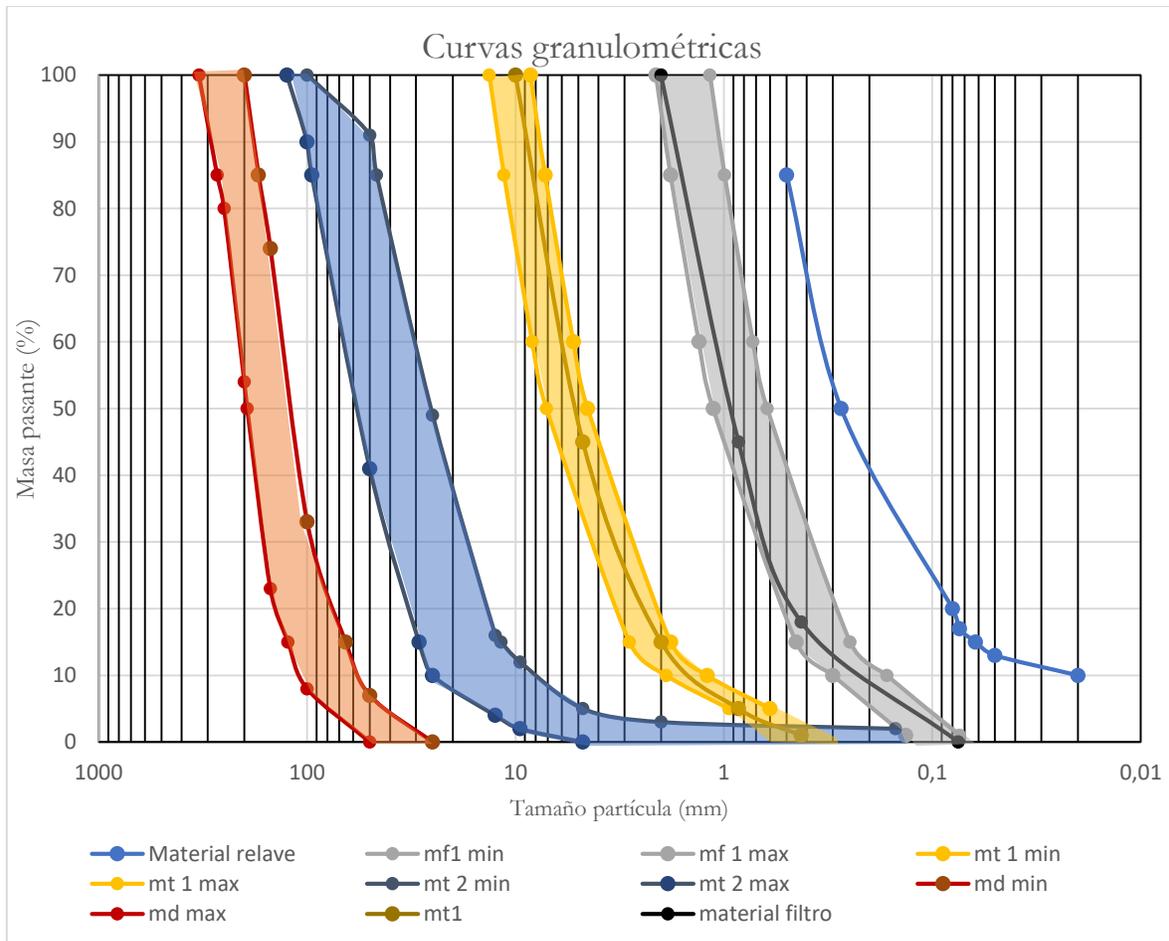


Figura 4-12. Diferentes materiales y bandas granulométricas. (Elaboración propia)

A partir de la figura se ve que las bandas son casi paralelas, y aunque la banda del material de transición 2 choca con la del material de transición, sin embargo, es algo que se puede ya que para estos materiales granulares gruesos no se debería incluir materiales finos o de 0,075 mm superior al 5%.

4.1.3 Construcción de los materiales.

Para la construcción del material de filtro se utilizaron tres sacos de arena fina de aproximadamente 20 Kg cada uno, los cuales fueron clasificados según los tamices N°4, N°10, N°20, N°40 y N°200. Lo cual dejaba un gran contenido másico de material fino, por lo que posterior a este proceso fue necesario obtener material grueso de un cuarto saco de arena, sin embargo, esta vez de arena gruesa, del cual se extrajo solo el material necesario para finalizar la construcción de material por lo que solo se clasificó respecto a los tamices N°4, N°10 y N°20, asegurando que el material retenido en la malla N°4 fuese menor a la malla 3/8.

El contenido granulométrico de los sacos de arena se resume en la siguiente tabla. Una vez separado el contenido se mezclaron los materiales según la tabla 4-14 y tabla 4-16.

Tabla 4-18. Granulometría sacos de arena. (Elaboración propia)

Saco	Tamiz	Tamaño (mm)	Material pasante (%)
1	N.º 4	4,75	98,99
	N.º 10	2	98,21
	N.º 20	0,85	96,96
	N.º 40	0,425	85,61
	N.º 200	0,075	3,91
	Fino	<0,075	0
2	Tamiz	Tamaño (mm)	Material pasante (%)
	N.º 4	4,75	99,19
	N.º 10	2	98,55
	N.º 20	0,85	97,29
	N.º 40	0,425	80,83
	N.º 200	0,075	2,46
Finos	<0,075	0	
3	Tamiz	Tamaño (mm)	Material pasante (%)
	N.º 4	4,75	99,21
	N.º 10	2	98,32
	N.º 20	0,85	96,73
	N.º 40	0,425	77,74
	N.º 200	0,075	0,49
Finos	<0,075	0	
4	Tamiz	Tamaño (mm)	Material pasante (%)
	N.º 4	4,75	67,5
	N.º 10	2	43
	N.º 20	0,85	22
	< N.º 20	<0,85	0

4.2 Determinar densidades mínimas y máximas secas

4.2.1 Determinar densidad mínima seca

Una vez construidos los materiales a utilizar se realizaron las pruebas para determinar la densidad mínima de estos, puesto que para poder determinar los valores de densidad relativa a utilizar es necesario conocer los valores mínimos y máximos que pueden alcanzar estos materiales.

La tabla mostrada a continuación resume los resultados de la densidad mínima para el material de transición, mientras que la tabla 4-20 muestra los resultados para el material de filtro.

Tabla 4-19. Resultados de ensayos de densidad mínima para MT. (Elaboración propia)

Dato	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Masa del molde (g)	127,1	127,1	127,1	127,1	127,1	127,1
Altura del molde (cm)	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
Diámetro del molde (cm)	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5
Masa del molde + suelo (g)	2618,2	2663,4	2673,8	2590,5	2643,2	2634,9
Masa de suelo seca (g)	2491,1	2536,3	2546,7	2463,4	2516,1	2507,8
Volumen ocupado muestra (cm ³)	1792,57	1792,57	1792,57	1792,57	1792,57	1792,57
Densidad seca (g/ cm ³)	1,39	1,41	1,42	1,37	1,40	1,34
Densidad mínima seca (g/ cm ³)	1,37					

Tabla 4-20. Resultados de ensayos de densidad mínima para MF. (Elaboración propia)

Dato	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Masa del molde (g)	127,1	127,1	127,1	127,1	127,1	127,1
Altura del molde (cm)	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
Diámetro del molde (cm)	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5
Masa del molde +suelo (g)	2874,4	2814,3	2870	2810,8	2890	2860,3
Masa de suelo seca (g)	2747,3	2687,2	2742,9	2683,7	2762,9	2733,2
Volumen ocupado muestra (cm ³)	1792,57	1792,57	1792,57	1792,57	1792,57	1792,57
Densidad seca (cm ³)	1,54	1,45	1,53	1,5	1,54	1,53
Densidad mínima seca (g/ cm ³)	1,5					

4.2.1 Determinar densidad máxima seca

De manera similar al proceso anterior se realizan los ensayos para determinar la densidad máxima de los materiales, dejando registrado los resultados en las siguientes dos tablas.

Tabla 4-21. Resultados de ensayos de densidad máxima para MT. (Elaboración propia)

Dato	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Masa del molde (g)	127,1	127,1	127,1	127,1	127,1	127,1
Altura de la muestra (cm)	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
Diámetro del molde (cm)	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5
Masa del molde +suelo (g)	2790,3	2717,9	2798,3	2746	2725,3	2727,5
Masa de muestra (g)	2663,2	2590,8	2671,2	2618,9	2598,2	2600,4
Reducción de altura de muestra (cm)	0,9	1,4	1	1,5	1,3	1,2
Volumen ocupado muestra (cm ³)	1622,75	1528,40	1603,88	1509,54	1547,27	1566,14
Densidad seca (g/ cm ³)	1,64	1,70	1,67	1,73	1,68	1,66
Densidad máxima seca (g/ cm ³)	1,73					

Tabla 4-22. Resultados de ensayos de densidad máxima para MF. (Elaboración propia)

Dato	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Masa del molde (g)	127,1	127,1	127,1	127,1	127,1	127,1
Altura de la muestra (cm)	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
Diámetro del molde (cm)	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5
Masa del molde +suelo (g)	2928,3	2989,6	2864,3	3007,1	2966,8	2839,6
Masa de muestra (g)	2801,2	2862,5	2737,2	2880	2839,7	2712,5
Reducción de altura de muestra (cm)	1,1	0,8	1,4	0,7	0,9	1,5
Volumen ocupado muestra (cm ³)	1585,01	1641,62	1528,40	1660,49	1622,75	1509,54
Densidad seca (g/ cm ³)	1,77	1,74	1,79	1,73	1,75	1,80
Densidad máxima seca (g/ cm ³)	1,80					

4.2.3 Determinar densidades relativas

Al poseer información de las densidades máximas y mínimas de ambos materiales es posible determinar todos los valores de densidades relativas, así como cuál es su equivalente en densidad seca y también peso específico.

Las densidades relativas, así como las densidades secas del material de transición se resumen en la tabla 4-23 y la figura 4-13, mientras que la información del material de filtro se resume en la tabla 4-24 y la figura 4-14.

Tabla 4-23. Densidades secas para diferentes valores de DR del MT. (Elaboración propia)

DR (%)	ρ_d (g/ cm ³)	ρ_d (Kg/m ³)
0,5	1,38	1376
10	1,40	1403
20	1,43	1434
30	1,47	1466
40	1,50	1499
50	1,53	1534
60	1,57	1570
70	1,61	1608
80	1,65	1648
90	1,69	1691
100	1,74	1735

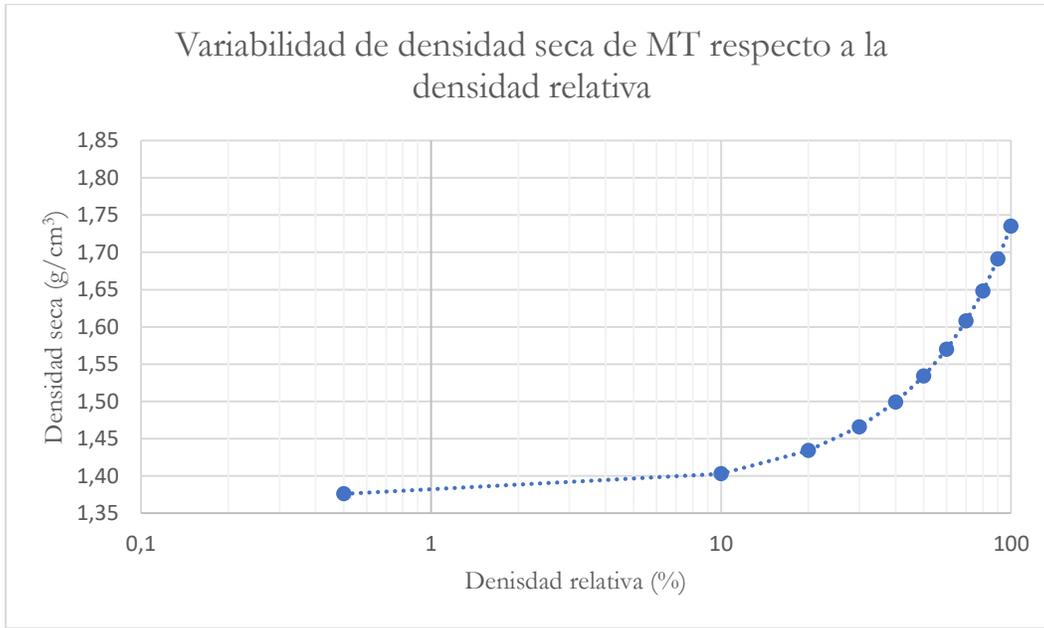


Figura 4-13. Variabilidad de la densidad seca de MT respecto a DR. (Elaboración propia)

Tabla 4-24. Densidades secas para diferentes valores de DR del MF. (Elaboración propia)

DR (%)	ρ_d (g/ cm ³)	ρ_d (Kg/m ³)
0,5	1,50	1498
10	1,52	1523
20	1,55	1549
30	1,58	1576
40	1,60	1604
50	1,63	1633
60	1,66	1664
70	1,70	1695
80	1,73	1728
90	1,76	1762
100	1,80	1797

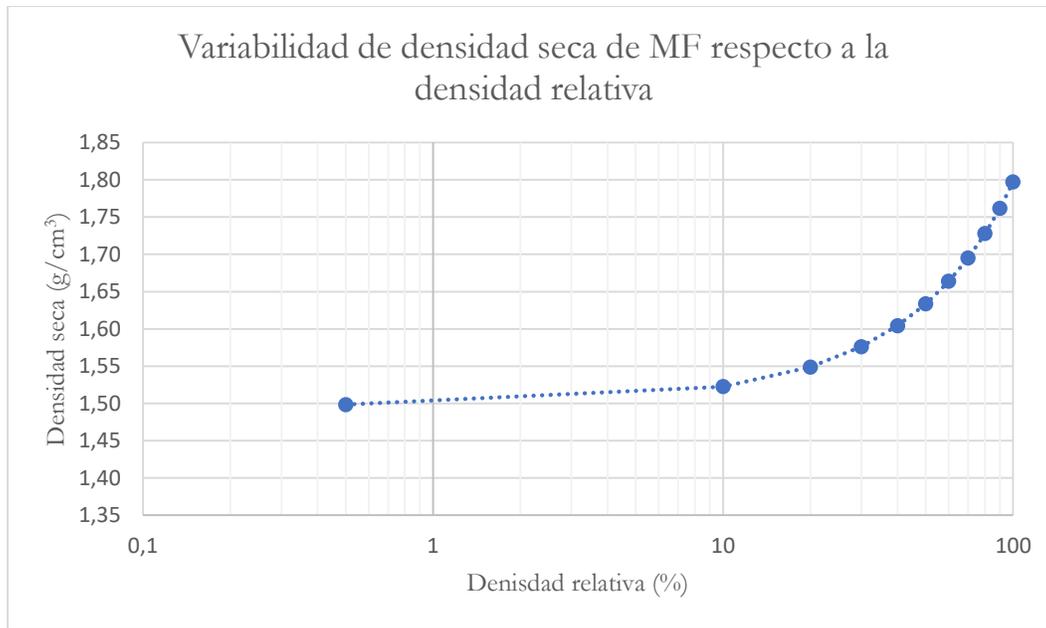


Figura 4-14. Variabilidad de la densidad seca de MF respecto a DR. (Elaboración propia)

Este proceso es de suma importancia para los posteriores ensayos de permeabilidad, puesto que conociendo el volumen del permeámetro es posible estipular la cantidad de material necesaria para colocar dentro del permeámetro para alcanzar la densidad relativa deseada.

4.3 Estimación de permeabilidades saturadas de sistemas homogéneos

Como se mencionó en la sección anterior es de suma importancia conocer los valores de densidad seca para cada material de estudios, es decir, relave, material de filtro y material de transición, así como su equivalente de densidad seca, para poder planear los experimentos de permeabilidad.

En primera instancia se realizaron ensayos de permeabilidad considerando solo un tipo de material en el permeámetro, de manera que se pueda terminar de caracterizar el material. Las densidades relativas que se utilizaron para los experimentos fueron de 50%, 60%, 80% y 90%. Se eligieron estos valores ya que como se mencionó anteriormente valores muy bajos de densidad relativa presentan riesgo a sufrir licuefacción, mientras que los valores más grandes son el objetivo de la investigación.

Además, se decidió realizar diversas mediciones de permeabilidad para un mismo nivel de densidad relativa, esto se logró al cronometrar cuanto se demoraba en llenar diferentes cantidades de volumen, en este caso 150, 300 y 450 ml. Estas mediciones se hicieron para detectar posibles equivocaciones en las mediciones, así como para poder observar de mejor manera la banda o espectro de valores de permeabilidad que puede alcanzar el material, finalmente también permite el poder estimar valores promedios para cada valor de densidad relativa analizada.

Con respecto al valor de permeabilidad saturada correspondiente al material de relave, no se consideró necesario realizar ensayos de estimación de permeabilidad saturada, dado que no se había construido el material y además de que se conocían datos previamente facilitados correspondiente al relave, entre los cuales se encontraban: la curva granulométrica (mostrada anteriormente), la gravedad específica de las partículas ($G_s=2,65$), densidad seca ($1,45 \text{ g/cm}^3$) y permeabilidad saturada. Para efectos de esta investigación se utilizará como permeabilidad saturada del relave el valor de $0,00002 \text{ m/s}$.

4.3.1 Ensayos de permeabilidad para el material de transición 1

Utilizando la información de la tabla 4-23 y conociendo el volumen del permeámetro es posible designar la cantidad de material que se debe colocar dentro del permeámetro para lograr la densidad relativa deseada, cuidando siempre la forma de colocar el material dentro de este y acomodando el material cuando se deba.

La siguiente tabla muestra la información pertinente a la preparación de muestras para los cuatro valores de densidad relativa estudiados, es decir, 50%, 60%, 80% y 70%. La

tabla 4-26 resume los resultados de los ensayos, mientras que la figura 4-15 resume los resultados. Finalmente, los detalles totales de los ensayos pueden verse en los Anexos.

Tabla 4-25. Características de las muestras a ensayar para MT. (Elaboración propia)

Volumen permeámetro (cm ³)	DR (%)	pd (g/ cm ³)	pd (Kg/m ³)	Masa requerida (g)
1016,11	50	1,53	1533	1558,35
1016,11	60	1,57	1570	1595,36
1016,11	80	1,65	1648	1674,93
1016,11	90	1,69	1690	1717,77

Tabla 4-26. Resultados de ensayos de permeabilidad de carga constante para MT. (Elaboración Propia)

Material	Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K _{sat} (m/s)	K _{sat} promedio(m/s)
MT=50% DR	1,5*10 ⁻⁴	4,25	3,53 *10 ⁻⁵	2,31*10 ⁻³	2,24*10 ⁻³
	3*10 ⁻⁴	8,84	3,39*10 ⁻⁵	2,22*10 ⁻³	
	4,5*10 ⁻⁴	13,6	3,31*10 ⁻⁵	2,17*10 ⁻³	
MT=60% DR	1,5*10 ⁻⁴	4,38	3,42*10 ⁻⁵	2,27*10 ⁻³	2,13*10 ⁻³
	3*10 ⁻⁴	9,61	3,12*10 ⁻⁵	2,06*10 ⁻³	
	4,5*10 ⁻⁴	14,48	3,11*10 ⁻⁵	2,06*10 ⁻³	
MT=80% DR	1,5*10 ⁻⁴	4,46	3,36*10 ⁻⁵	2,27*10 ⁻³	2,11*10 ⁻³
	3*10 ⁻⁴	10,1	2,97*10 ⁻⁵	2,01*10 ⁻³	
	4,5*10 ⁻⁴	14,81	3,04*10 ⁻⁵	2,05*10 ⁻³	
MT=90% DR	1,5*10 ⁻⁴	4,52	3,32*10 ⁻⁵	2,24*10 ⁻³	2,07*10 ⁻³
	3*10 ⁻⁴	10,2	2,94*10 ⁻⁵	1,99*10 ⁻³	
	4,5*10 ⁻⁴	15,4	2,925*10 ⁻⁵	1,98*10 ⁻³	

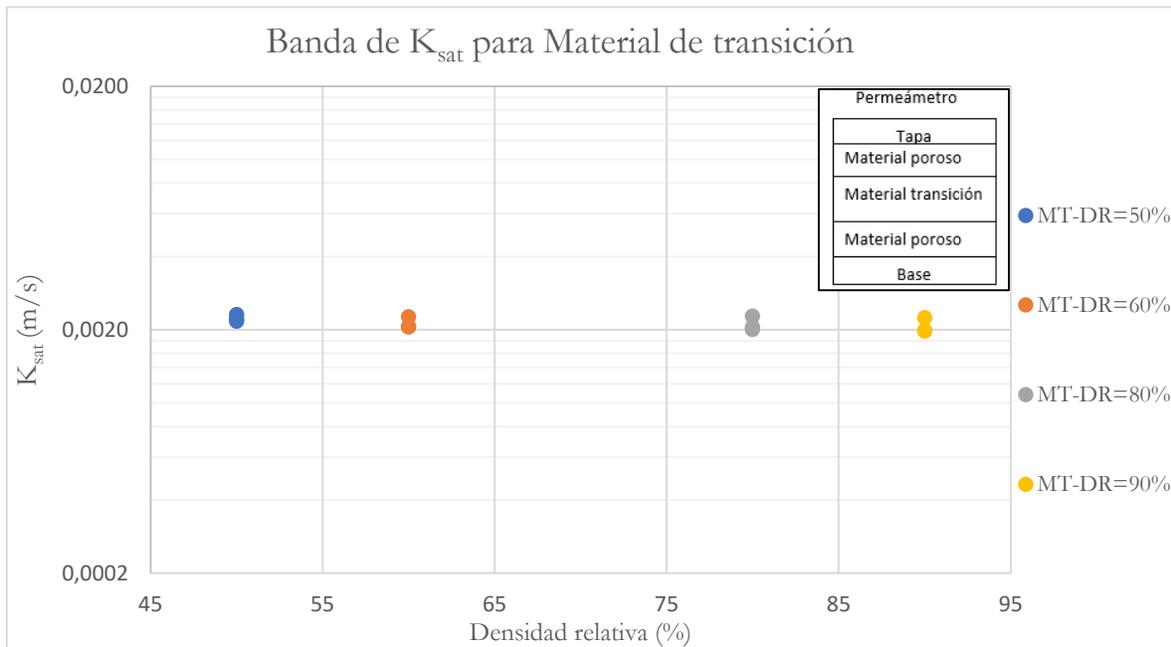


Figura 4-15. Valores de permeabilidad para diferentes densidades relativas de MT. (Elaboración propia)

Como se puede ver existe un decaimiento en los valores de permeabilidad, los cuales podrían considerarse como resultados esperados debido al reacomodo que tienen las partículas dentro del material. Sin embargo, debido a que existen ciertas variaciones en los resultados de permeabilidad dependiendo del volumen evacuado se realizó una segunda ronda de experimentos para comprobar que no existiesen problemas en cuanto a los valores obtenidos, es decir comprobar que los valores sean lo suficientemente parecidos, así como para tener más valores a la hora de proponer valores promedio de permeabilidad.

Se presenta en la tabla a continuación, un resumen correspondiente a la segunda ronda de experimentos de permeabilidad para el material de transición, resumidos los resultados en la figura 4-16, mientras que al igual que con los ensayos anteriores la información completa se encuentra en los Anexos.

Tabla 4-27. Resultados de ensayos de permeabilidad de carga constante para MT, segunda medición. (Elaboración propia)

Material	Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K _{sat} (m/s)	K _{sat} promedio(m/s)
MT=50% DR	1,5*10 ⁻⁴	3,84	3,901*10 ⁻⁵	2,18*10 ⁻³	1,98*10 ⁻³
	3*10 ⁻⁴	8,9	3,3*10 ⁻⁵	1,88*10 ⁻³	
	4,5*10 ⁻⁴	13,34	3,37*10 ⁻⁵	1,88*10 ⁻³	
MT=60% DR	1,5*10 ⁻⁴	4,256	3,52*10 ⁻⁵	2,06*10 ⁻³	1,68*10 ⁻³
	3*10 ⁻⁴	11,86	2,53*10 ⁻⁵	1,48*10 ⁻³	
	4,5*10 ⁻⁴	17,713	2,54*10 ⁻⁵	1,49*10 ⁻³	
MT=80% DR	1,5*10 ⁻⁴	5,03	2,98*10 ⁻⁵	1,74*10 ⁻³	1,51*10 ⁻³
	3*10 ⁻⁴	12,16	2,47*10 ⁻⁵	1,44*10 ⁻³	
	4,5*10 ⁻⁴	19,6	2,23*10 ⁻⁵	1,34*10 ⁻³	
MT=90% DR	1,5*10 ⁻⁴	5,24	2,86*10 ⁻⁵	1,68*10 ⁻³	1,5*10 ⁻³
	3*10 ⁻⁴	12,42	2,15*10 ⁻⁵	1,42*10 ⁻³	
	4,5*10 ⁻⁴	19	2,37*10 ⁻⁵	1,39*10 ⁻³	

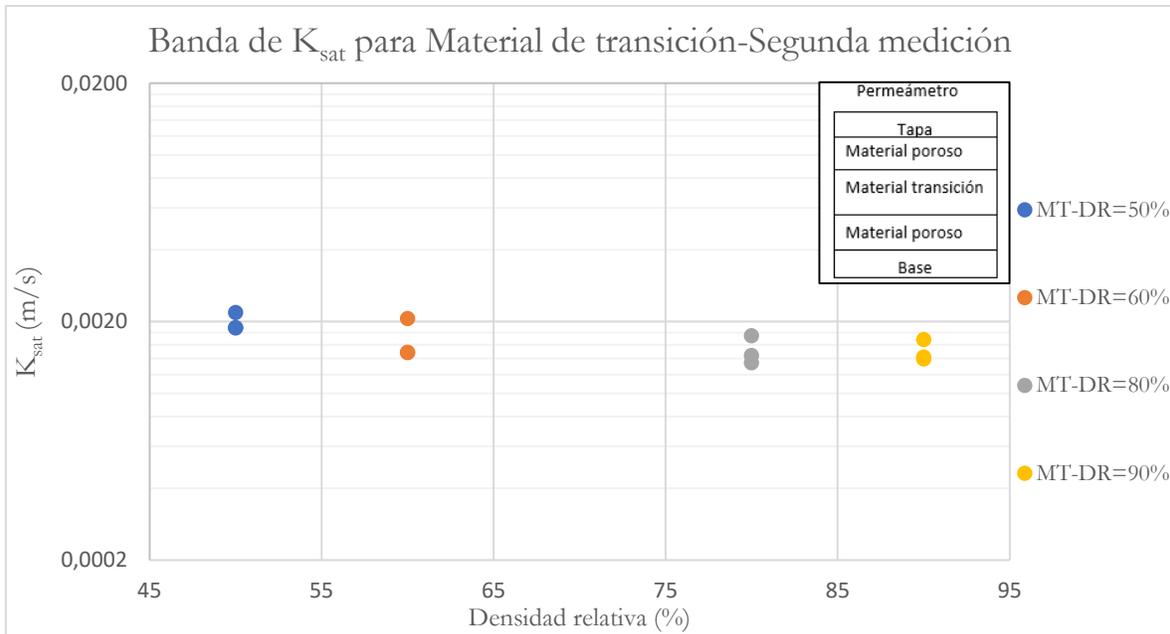


Figura 4-16. Permeabilidad para diferentes DR de MT, segunda serie. (Elaboración propia)

Por su parte la figura 4-17 corresponde a la mezcla de la figura 4-15 y figura 4-16, es decir todos los ensayos realizados, indicando además los valores promedio de permeabilidad saturada para cada densidad relativa, por lo que es posible ver en la figura como se realiza un ajuste a dichos valores promedios para obtener una relación entre la densidad relativa del material y la permeabilidad esperada.

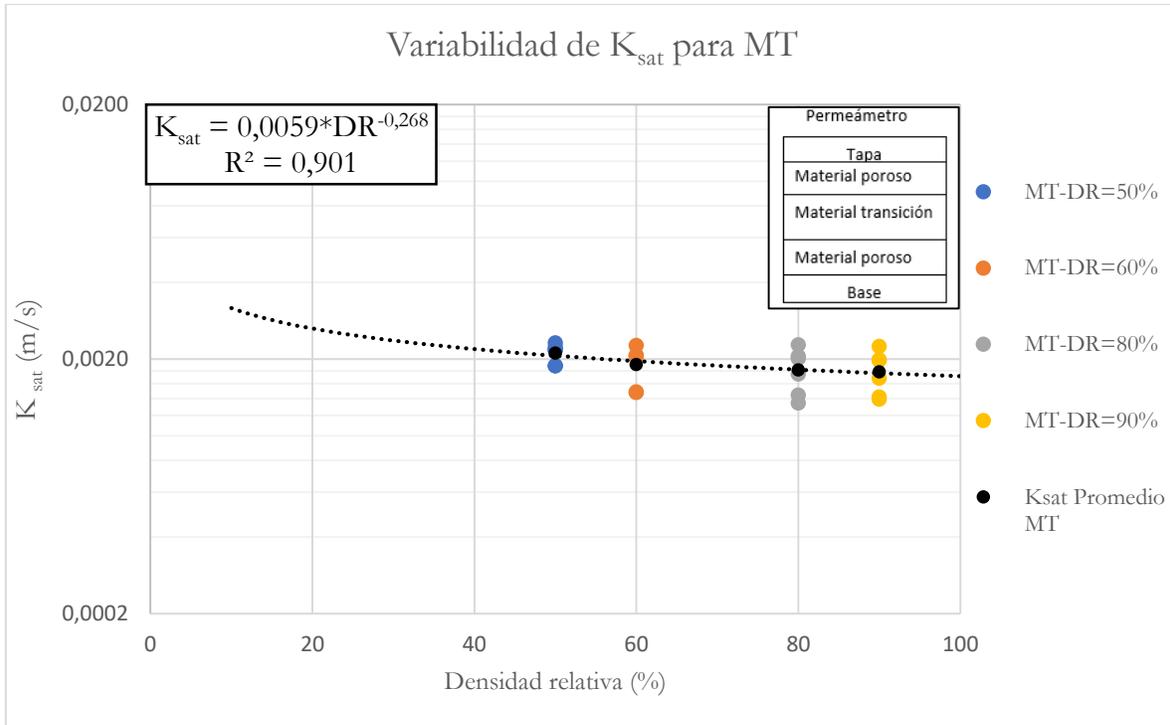


Figura 4-17. Permeabilidades obtenidas para MT, según densidad relativa, valores promedio y ajuste potencial. (Elaboración propia)

Antes de que se presenten los resultados promedios de permeabilidad saturada para los valores de densidad relativa es importante observar el grado de dispersión de los datos obtenidos, por lo que se introduce el concepto de coeficiente de variación o CV. El CV es un indicador estadístico que mide la dispersión relativa de un conjunto de datos, el resultado se define como un valor entre 0 y 100 %, siendo indicadores de una muestra representativa y confiable valores de CV menores a 33%. Para valores mayores se considera heterogénea y de alta dispersión. La expresión se define como:

$$CV (\%) = \frac{S_x}{\bar{X}} * 100 \tag{25}$$

En donde:

S_x : Desviación estandar.

\bar{X} : Promedio

Una vez definido la relevancia del indicador CV se presentan los resultados de permeabilidad saturada promedio para el material de transición, así como el valor de CV en la siguiente tabla.

Tabla 4-28. Permeabilidades promedio de MT y CV. (Elaboración propia)

Densidad relativa (%)	50	60	80	90
Promedio (m/s)	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$
S_x	$18 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$3,7 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$
CV (%)	8,64	17,57	20,23	19,19

Por último, la figura mostrada a continuación indica las pérdidas de capacidad filtrante o de permeabilidad que sufre el material a medida que aumenta la compactación del material, terminando en un material con una capacidad de filtración de un 85% aproximadamente respecto a los valores iniciales.

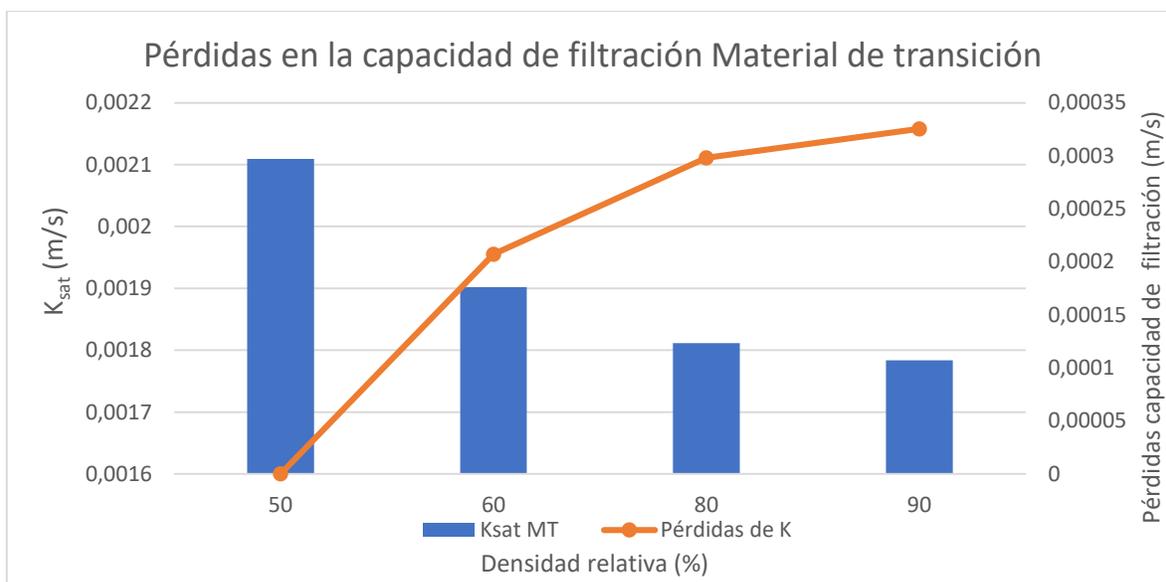


Figura 4-18. Pérdidas parciales y acumuladas de permeabilidad para MT. (Elaboración propia)

4.3.2 Ensayos de permeabilidad para el material de filtro

De la misma forma que con el proceso anterior y utilizando la información de la tabla 4-24, además del volumen del permeámetro se designa la cantidad de material de filtro a ensayar, cuidando la colocación y el grado de acomodo. La tabla siguiente muestra la información pertinente a la preparación de muestras, mientras que la tabla 4-30 condensa los resultados de los ensayos, la totalidad de parámetros se puede ver en los Anexos. Finalmente, la figura 4-19 ilustra como varía la permeabilidad saturada dependiendo de la densidad relativa.

Tabla 4-29. Características de las muestras a ensayar para MF. (Elaboración propia)

DR (%)	ρ_d (g/ cm ³)	ρ_d (Kg/m ³)	Masa requerida (g)
50	1,63	1633,37	1659,69
60	1,66	1663,66	1690,46
80	1,73	1727,72	1755,55
90	1,76	1761,64	1790,01

Tabla 4-30. Resultados ensayo de permeabilidad a carga constante para MF. (Elaboración Propia)

Material	Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K _{sat} (m/s)	K _{sat} promedio(m/s)
MF=50% DR	1,5*10 ⁻⁴	18,82	8*10 ⁻⁶	5,2*10 ⁻⁴	4,42*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	47,77	6,3*10 ⁻⁶	4,1*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	74,01	6,1*10 ⁻⁶	4*10 ⁻⁴	
MF=60% DR	1,5*10 ⁻⁴	23,89	6,28*10 ⁻⁶	4,13*10 ⁻⁴	3,66*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	57,39	5,2*10 ⁻⁶	3,44*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	87,43	5,1*10 ⁻⁶	3,34*10 ⁻⁴	
MF=80% DR	1,5*10 ⁻⁴	25,51	5,9*10 ⁻⁶	4*10 ⁻⁴	3,56*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	59,78	5,0*10 ⁻⁶	3,39*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	92,34	4,9*10 ⁻⁶	3,3*10 ⁻⁴	
MF=90% DR	1,5*10 ⁻⁴	27,49	5,5*10 ⁻⁶	3,69*10 ⁻⁴	3,24*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	67,13	4,5*10 ⁻⁶	3,02*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	101,19	4,41*10 ⁻⁶	3,01*10 ⁻⁴	

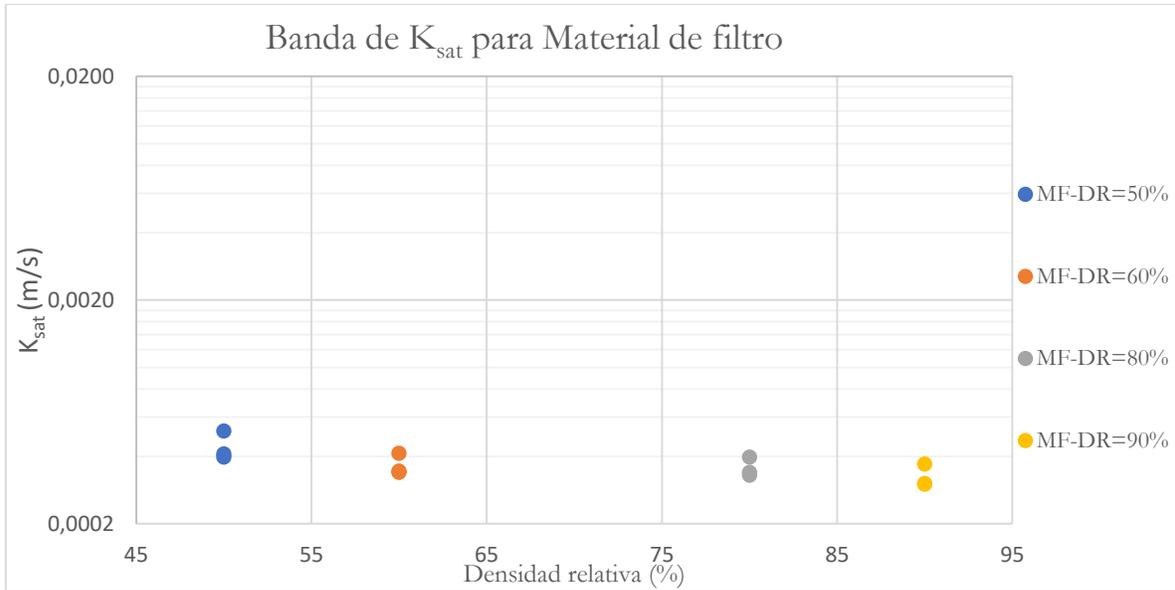


Figura 4-19. Permeabilidades para diferentes valores de densidad relativa de MF.

(Elaboración propia)

Al igual que con el material de filtro se llevó a cabo una segunda serie de ensayos para corroborar la información que estaba siendo recogida, así como para tener una mayor cantidad de información. La tabla 4-31 resume los resultados obtenidos en esta segunda serie de experimentos, de la misma manera que antes los datos pertinentes a la preparación se encuentran disponibles en los Anexos. La figura 4-20 representa lo señalado en la tabla anterior.

Tabla 4-31. Resultados ensayo de permeabilidad a carga constante para MF, segunda medición. (Elaboración propia)

Material	Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K _{sat} (m/s)	K _{sat} promedio(m/s)
MF=50% DR	1,5*10 ⁻⁴	19,31	7,8*10 ⁻⁴	4,38*10 ⁻⁴	4,05*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	41,92	7,2*10 ⁻⁴	4,04*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	68,27	6,6*10 ⁻⁴	3,72*10 ⁻⁴	
MF=60% DR	1,5*10 ⁻⁴	21,245	7,1*10 ⁻⁴	4,13*10 ⁻⁴	3,48*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	54,96	5,5*10 ⁻⁴	3,19*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	84,25	5,3*10 ⁻⁴	3,13*10 ⁻⁴	
MF=80% DR	1,5*10 ⁻⁴	24	6,3*10 ⁻⁴	3,68*10 ⁻⁴	3,18*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	58,76	5,1*10 ⁻⁴	3*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	92,64	4,9*10 ⁻⁴	2,86*10 ⁻⁴	
MF=90% DR	1,5*10 ⁻⁴	26,39	5,7*10 ⁻⁴	3,34*10 ⁻⁴	3,08*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	57,71	5,2*10 ⁻⁴	3,06*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	93,03	4,8*10 ⁻⁴	2,84*10 ⁻⁴	

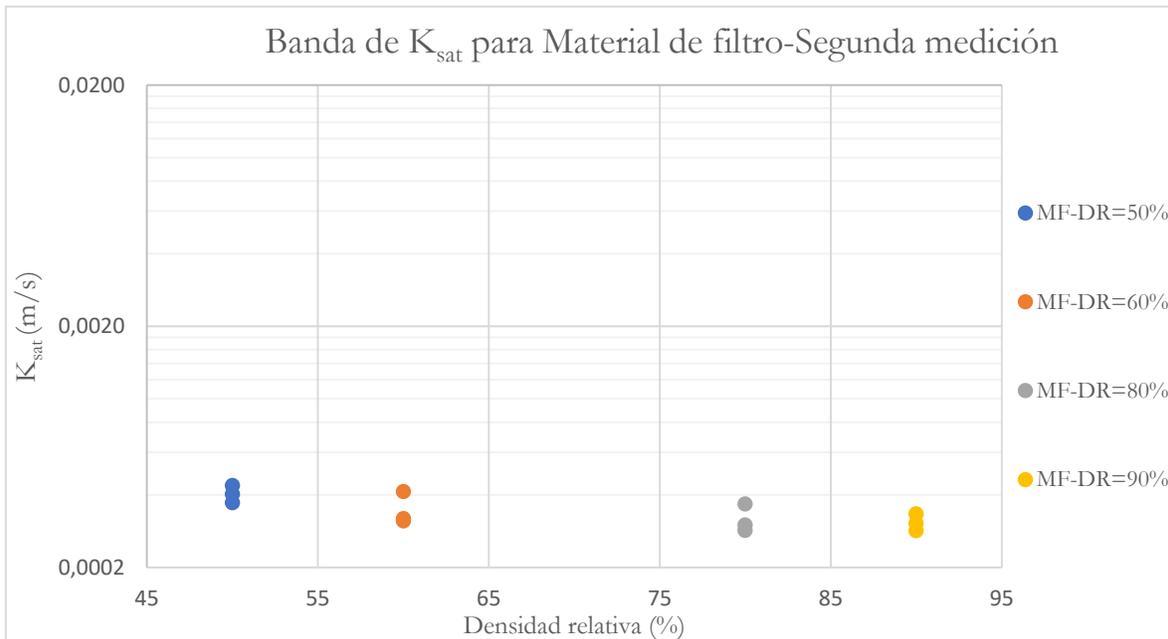


Figura 4-20. Valores de permeabilidad obtenidos para diferentes densidades relativas de MF, segunda serie. (Elaboración propia)

En la figura 4-21 se observa la unión de la figura 4-19 y figura 4-20, con un ajuste potencial igual que la figura 4-17. Mientras que la tabla posterior sintetiza los resultados correspondientes a los valores promedios de permeabilidad saturada y los valores de CV para dicho experimento.

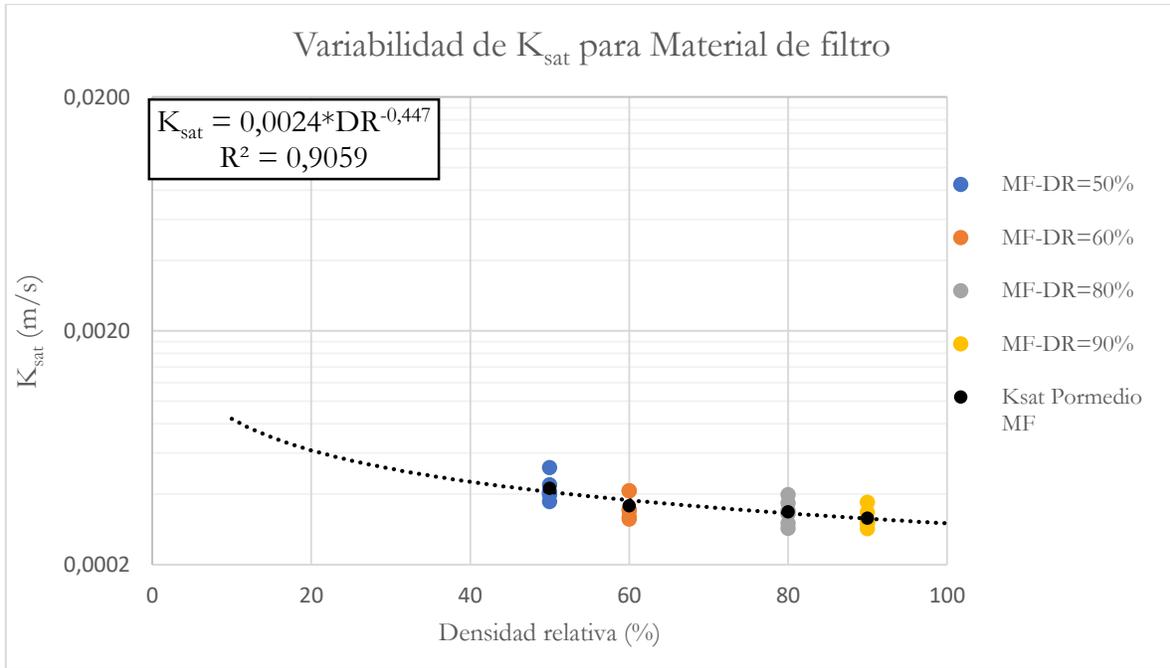


Figura 4-21. Permeabilidad obtenidos para MF, según densidad relativa, valores promedio y ajuste potencial. (Elaboración propia)

Tabla 4-32. Valores de permeabilidad promedio de MF y CV. (Elaboración propia)

Densidad relativa (%)	50	60	80	90
Promedio (m/s)	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$
S_x	$5,2 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$
CV (%)	12,27	12,67	12,36	9,67

Finalmente, la figura 4-22 muestra las pérdidas de capacidad filtrante o de permeabilidad que sufre el material a medida que aumenta la compactación del material, terminando en un material con una capacidad de filtración de un 75% aproximadamente respecto a los valores iniciales.

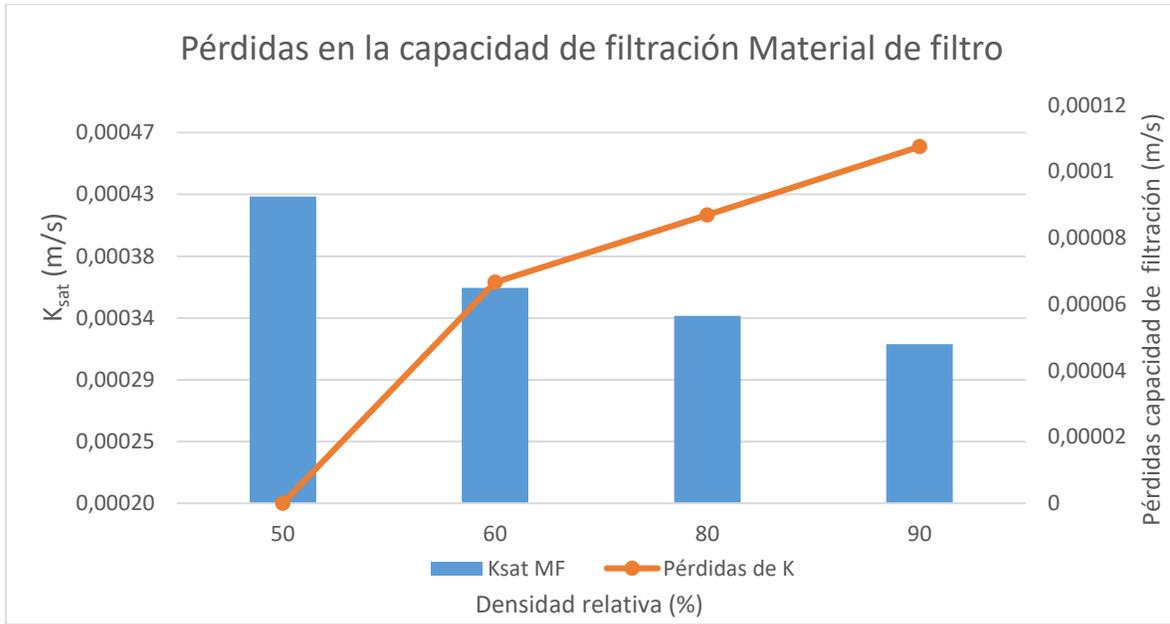


Figura 4-22. Pérdidas parciales y acumulada de permeabilidad para MF. (Elaboración propia)

Finalmente se presenta en la siguiente figura como a medida que se varían los parámetros de densidad relativa disminuyen las relaciones de permeabilidad entre los materiales de filtro y transición.

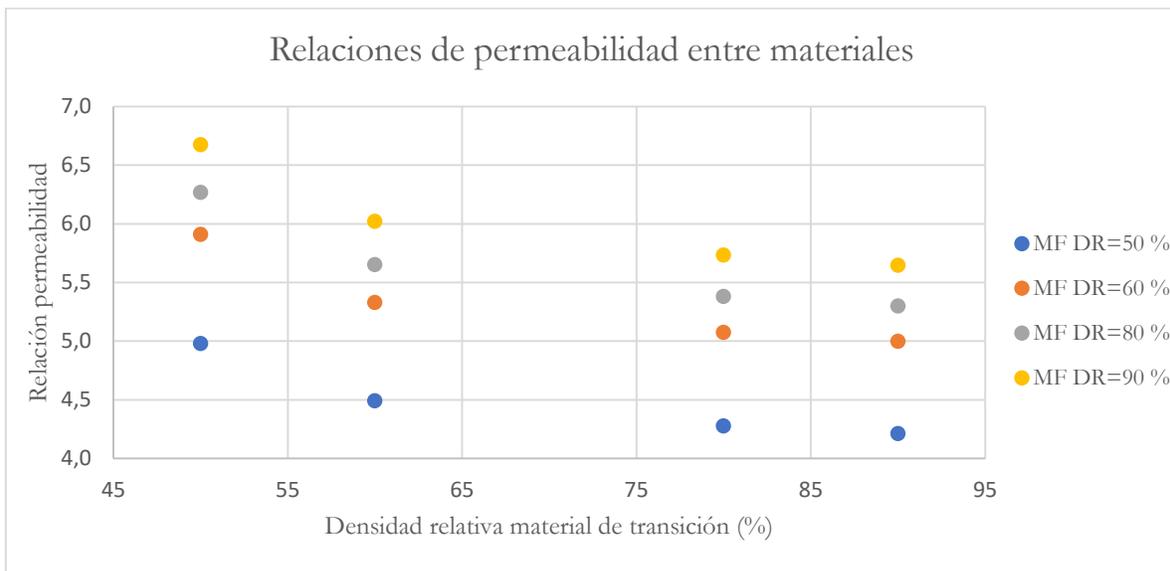


Figura 4-23. Decaimiento en las relaciones de permeabilidad. (Elaboración propia)

4.3.3 Estimación indirecta de permeabilidad

Posterior a la estimación directa de permeabilidad saturada de los materiales de filtro y de transición, se decidió realizar estimaciones indirectas de estos materiales y también para el material de relave. Para las estimaciones indirectas de permeabilidad se consideraron las siguientes instancias y características:

- Para el material de filtro y de transición se considerarán como reales los valores promedios obtenidos a partir de los ensayos de carga constante, mientras que para el material de relave se considerará como real el valor estipulado anteriormente.
- Se realizaron dos estimaciones utilizando la ecuación de Hazen, una utilizando una constante de 1 y la otra la de 1,5, de manera que se pueda observar el espectro de valores que cubre la ecuación.
- Los valores estimados de permeabilidad saturada según Hazen son independientes de la densidad relativa puesto que no cambia la granulometría del material.
- Se realizaron estimaciones utilizando la ecuación de Kozeny-Carman y la ecuación de Slitcher, principalmente porque se ajustan a las arenas.
- Los valores estimados de permeabilidad saturada según Kozeny-Carman y Slitcher dependen de la porosidad del material, por lo que los valores varían según el grado de acomodo del material o densidad relativa.
- Dado que no se disponía de un picnómetro se utilizaron valores estimados de G_s (gravedad específica) para los materiales de filtro y transición.
- Los resultados de las estimaciones solo servirán para contrastar los resultados obtenidos de las estimaciones directas y valores reales obtenidos previamente.

Las siguientes tres presentadas a continuación resumen los criterios utilizados en la estimación de permeabilidades saturadas, mientras que las tres figuras siguientes presentan las comparaciones entre los valores estimados y los valores reales.

Tabla 4-33. Parámetros utilizados, resultados y errores en la estimación indirecta de permeabilidad saturada para el material de relave. (Elaboración propia)

Estimación de permeabilidad del relave	
Yd (KN/m ³)	14,22
Gs	2,65
Índice de vacíos (e)	0,83
Porosidad (n)	0,45
D10 (mm)	0,02
K Hazen (m/s) C= 1	4*10 ⁻⁶
K Hazen (m/s) C=1,5	6*10 ⁻⁶
K Kozeny-Carman (m/s)	1*10 ⁻⁶
K Slitcher (m/s)	3*10 ⁻⁶
K Real (m/s)	2*10 ⁻⁵
Error de Hazen (%) C=1	80
Error de Hazen (%) C=1,5	70
Error Kozeny-Carman (%)	94,85
Error Slitcher (%)	98,52

Tabla 4-34. Parámetros utilizados, resultados y errores en la estimación indirecta de permeabilidad para el material de filtro. (Elaboración propia)

Estimación permeabilidad material de filtro				
Densidad relativa (%)	50	60	80	90
Gs	2,65	2,65	2,65	2,65
Yd (kg/m ³)	1633,37	1663,66	1727,72	1761,64
Índice de vacíos (e)	0,62	0,59	0,53	0,50
Porosidad	0,38	0,37	0,35	0,34
d ₁₀ (mm)	0,27	0,27	0,27	0,27
K Hazen (m/s) C=1	7,24*10 ⁻³	7,24*10 ⁻³	7,24*10 ⁻³	7,24*10 ⁻³
K Hazen (m/s) C=1,5	1,1*10 ⁻²	1,1*10 ⁻²	1,1*10 ⁻²	1,1*10 ⁻²
K Kozeny-Carman (m/s)	8,9*10 ⁻⁵	7,9*10 ⁻⁵	6*10 ⁻⁵	5,1*10 ⁻⁵
K Slitcher (m/s)	3,1*10 ⁻⁵	2,8*10 ⁻⁵	2,3*10 ⁻⁵	2*10 ⁻⁵
K Medida Promedio (m/s)	4,2*10 ⁻⁴	3,6*10 ⁻⁴	3,4*10 ⁻⁴	3,3*10 ⁻⁴
Error de Hazen (%) C=1	70,85	102,75	114,98	129,0
Error de Hazen (%) C=1,5	156,28	204,12	222,47	243,49
Error Kozeny-Carman (%)	78,93	77,98	82,31	83,80
Error Slitcher (%)	92,67	92,12	93,31	93,70

Tabla 4-35. Parámetros utilizados, resultados y errores en la estimación indirecta de permeabilidad para el material de transición. (Elaboración propia)

Estimación permeabilidad material de transición				
Densidad relativa (%)	50	60	80	90
Gs	2,6	2,6	2,6	2,6
Yd (kg/m3)	1533,65	1570,07	1648,38	1690,54
Índice de vacíos (e)	0,70	0,66	0,58	0,54
Porosidad	0,41	0,40	0,37	0,35
d ₁₀ (mm)	1,43	1,43	1,43	1,43
K Hazen (m/s) C=1	0,02	0,02	0,02	0,02
K Hazen (m/s) C=1,5	0,03	0,03	0,03	0,03
K Kozeny-Carman (m/s)	3,3*10 ⁻³	2,9*10 ⁻³	2*10 ⁻³	1,7*10 ⁻³
K Slitcher (m/s)	1,1*10 ⁻³	9,7*10 ⁻⁴	7,5*10 ⁻⁴	6,4*10 ⁻⁴
K Medida Promedio (m/s)	2,1*10 ⁻³	1,9*10 ⁻³	1,8*10 ⁻³	1,8*10 ⁻³
Error de Hazen (%) C=1	862,69	967,52	1021,12	1038,28
Error de Hazen (%) C=1,5	1344,02	1501,28	1581,68	1607,42
Error Kozeny-Carman (%)	58,43	51,03	13,51	4,35
Error Slitcher (%)	48,57	49,13	58,80	63,96

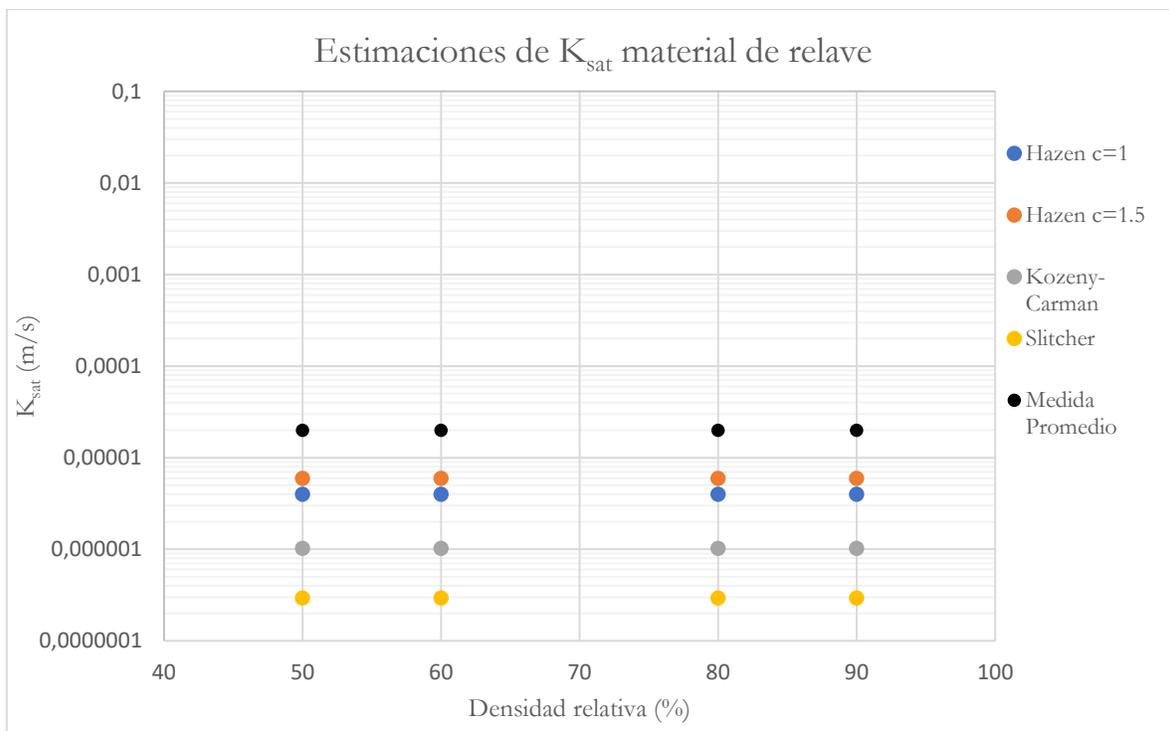


Figura 4-24. Comparaciones de valores reales y estimaciones indirectas de permeabilidad saturada para el material de relave. (Elaboración propia)

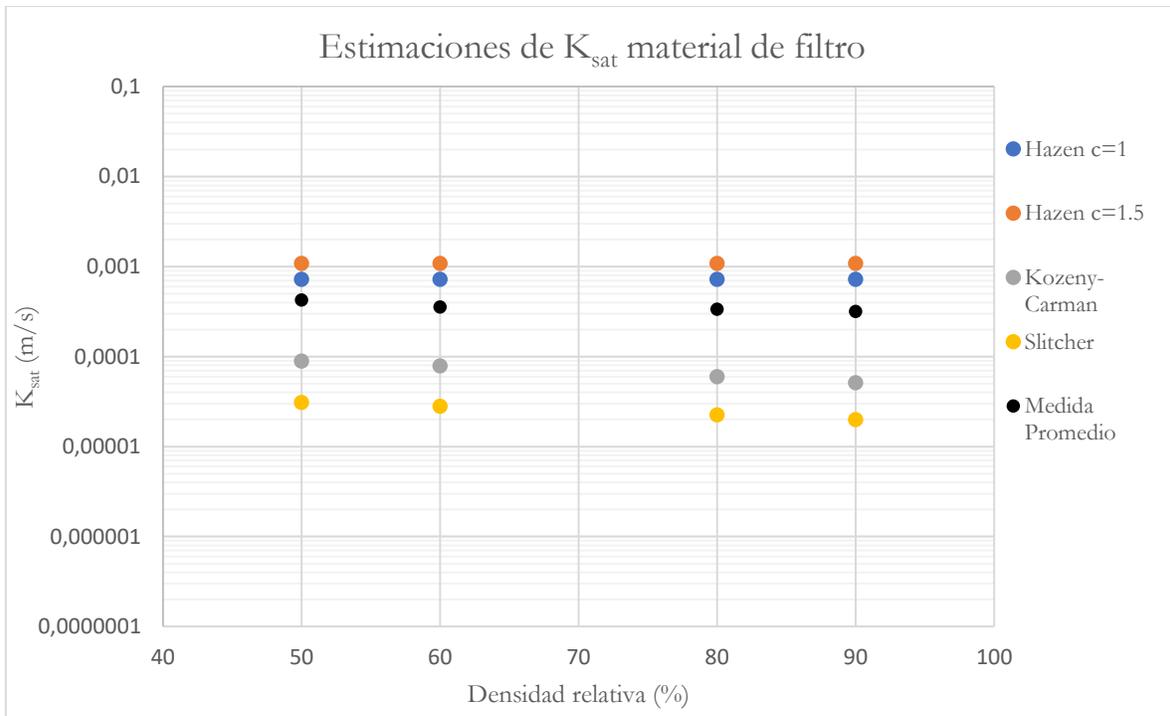


Figura 4-25. Comparaciones de valores reales y estimaciones indirectas de permeabilidad saturada para el material de filtro. (Elaboración propia)

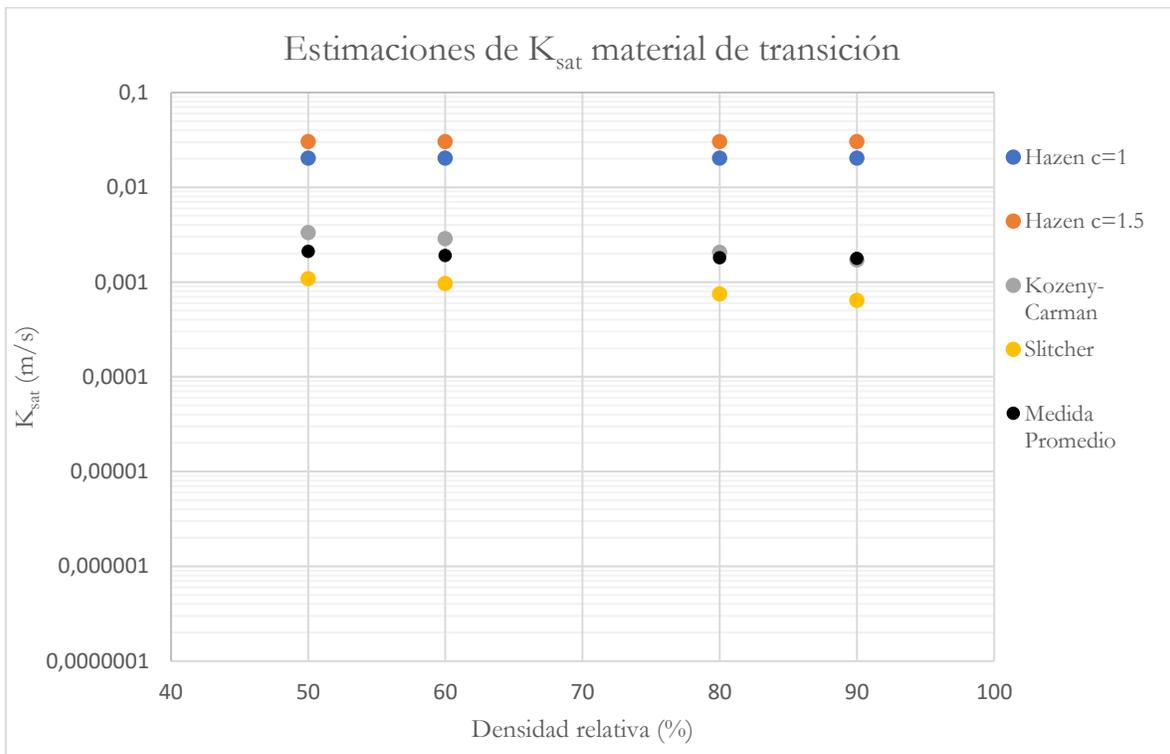


Figura 4-26. Comparaciones de valores reales y estimaciones indirectas de permeabilidad saturada para el material de transición. (Elaboración propia)

De estos resultados se puede ver que los mejores estimadores fueron las expresiones de Hazen con $C=1,5$ para el relave mientras que para el material de filtro y transición fue la expresión de Kozeny-Carman. Por otro lado, el peor estimador para el material de relave fue la expresión de Slitcher, mientras que para el material de filtro y transición fue la expresión de Hazen con $C=1,5$.

Estos resultados nos dicen que en general para los materiales granulares como el material de filtro y transición Kozeny-Carman es un buen estimador por la complejidad que presenta la expresión, sobre todo porque incluye un parámetro de porosidad, lo que permite que a diferencia de Hazen se obtengan diversos valores de permeabilidad saturada según el grado de densidad relativa.

También es importante mencionar que las expresiones como Slitcher si bien no se acercaron tanto como Kozeny-Carman presentaban en general errores menores a Hazen, por lo que es una expresión para tomar en cuenta si se quiere definir una banda granulométrica solo con estimaciones indirectas.

Finalmente se puede ver que el material de relave no se adoptó muy bien a Kozeny-Carman, la explicación más sencilla debe ser la granulometría del material de relave.

4.3.4 Ajustes de permeabilidad en base a la granulometría

Teniendo en cuenta los valores de permeabilidad obtenidos para los materiales de relave, filtro y transición se pensó en modelar el comportamiento que exhiben estos materiales al comparar diferentes tamaños granulométricos con la permeabilidad, es decir, observar si la tendencia que se presentan en los valores de permeabilidad es parecida a las propuestas de Hazen o si se desvía de alguna forma. Para realizar este proceso se consideró la utilización del d_{10} , d_{30} y d_{50} de los materiales.

Los siguientes tres gráficos muestran el comportamiento que exhiben las curvas una vez que se ajustan los materiales.

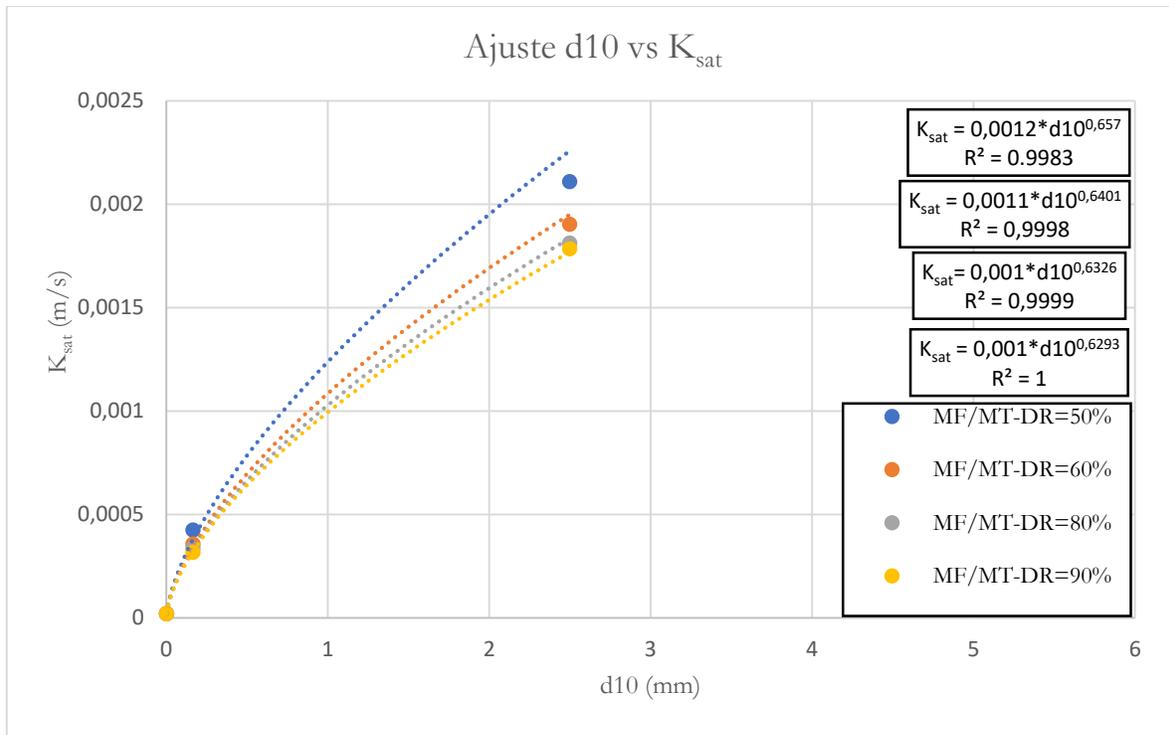


Figura 4-27. Ajustes potenciales (desde arriba hacia abajo 50%, 60%, 80% y 90% de DR) que relacionan la permeabilidad saturada con el d_{10} de los materiales. (Elaboración propia)

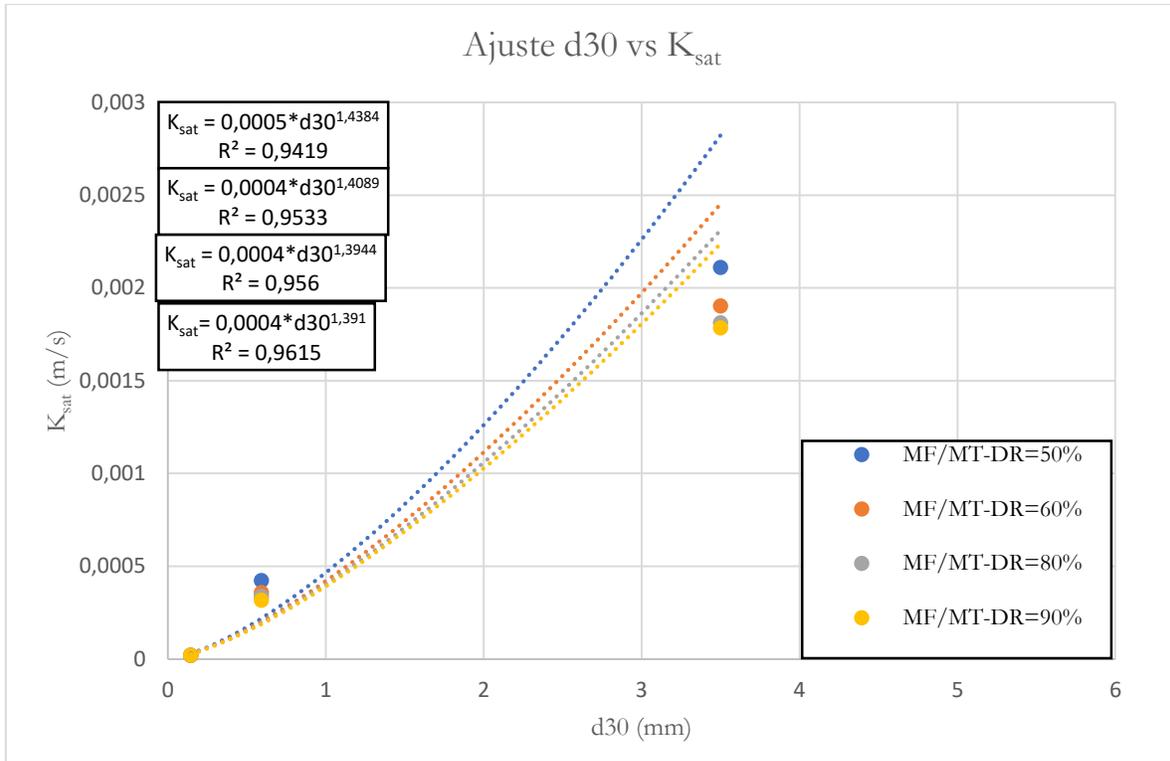


Figura 4-28. Ajustes potenciales (desde arriba hacia abajo 50%, 60%, 80% y 90% de DR) que relacionan la permeabilidad saturada con el d_{30} de los materiales. (Elaboración propia)

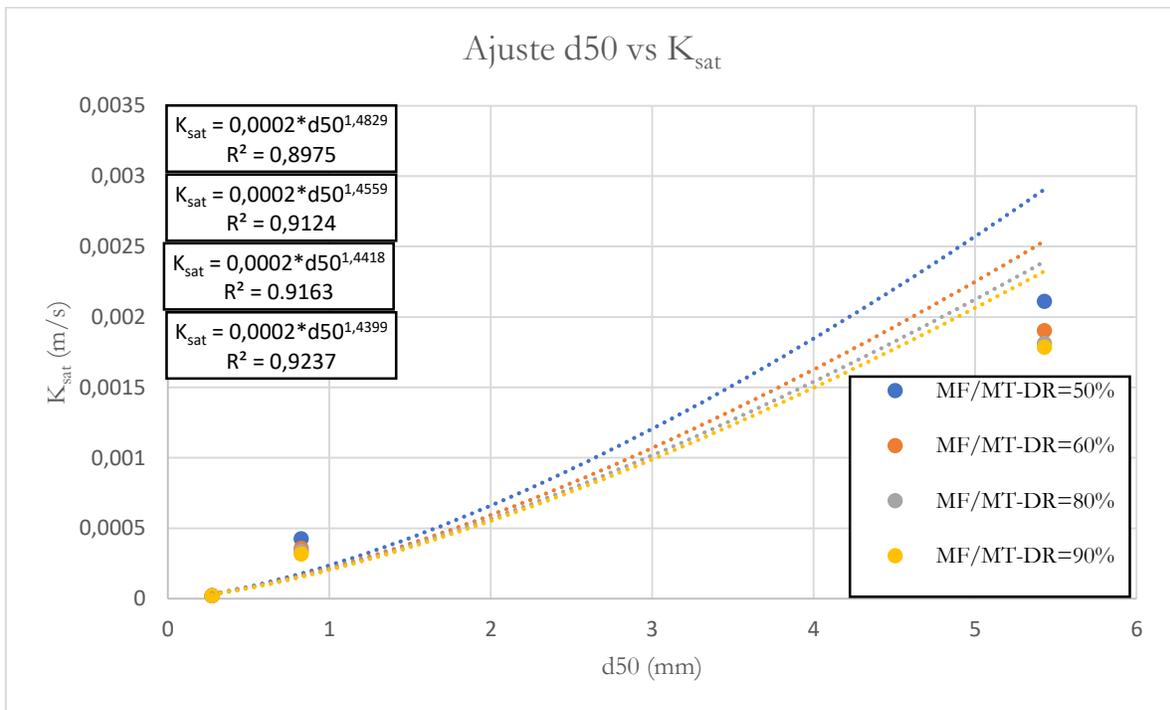


Figura 4-29. Ajustes potenciales (desde arriba hacia abajo 50%, 60%, 80% y 90% de DR) que relacionan la permeabilidad saturada con el d_{50} de los materiales. (Elaboración propia)

A partir de las gráficas se puede ver que las expresiones que rigen los ajustes tienen cierta similitud con las expresiones de Hazen, por lo menos en la forma de la expresión, una constante y un exponente cercano a 2 en el tamaño de partícula por lo menos en los escenarios donde se relaciona el d_{30} y d_{50} .

El ajuste puede estar fallando en aproximarse probablemente por los tamaños de partícula que presenta el material del relave, aunque también puede deberse a las diferencias entre todos los materiales, si esta diferencia fuese más pequeña probablemente se observarían mejores resultados.

4.3.5 Relaciones de permeabilidad

Una vez obtenidos los valores de permeabilidad saturada es necesario corroborar que exista una diferencia considerable entre los valores de permeabilidad para poder asegurar que exista un aumento en la permeabilidad a medida que se avanza por el sistema. Aunque debería bastar con comparar los valores reales o medidos se incluyó en estas comparaciones los valores obtenidos a partir de las estimaciones indirectas, solo para ilustrar las diferencias que existen.

La tabla 4-36 resume que tan permeable es el material de filtro en comparación al material de relave, mientras que la tabla 4-37 muestra que tan permeable es el material de transición en relación con el material de filtro.

Tabla 4-36. Relaciones de permeabilidad entre el material de filtro y el relave. (Elaboración propia)

Relación (MF vs Relave)	Densidad relativa (%)			
	50	60	80	90
K real vs K real	21,18	17,84	16,83	15,80
K Hazen vs K Hazen (c=1)	180,90	180,90	180,90	180,90
K Hazen vs K Hazen (c=1,5)	180,90	180,90	180,90	180,90
K Kozeny-Carman vs K Kozeny-Carman	86,69	76,31	57,47	49,73
K Slitcher vs K Slitcher	104,89	94,96	76,1523429	67,33

Tabla 4-37. Relaciones de permeabilidad entre el material de transición y el de filtro. (Elaboración propia)

Relación (MT vs MF)	Densidad relativa (%)			
	50	60	80	90
K real vs K real	4,98	5,33	5,38	5,65
K Hazen vs K Hazen (c=1)	28,06	28,06	28,06	28,06
K Hazen vs K Hazen (c=1,5)	28,06	28,06	28,06	28,06
K Kozeny-Carman vs K Kozeny-Carman	37,44	36,56	34,52	33,32
K Slitcher vs K Slitcher	34,95	34,44	33,11	32,27

Se puede observar que existen grandes diferencias entre los valores de permeabilidad, principalmente entre el material de filtro y de relave (entre 15 a 21) mientras que las relaciones entre material de transición 1 y de filtro (4 a 5) es menor, esto se debe principalmente a la forma de construcción.

4.4 Estimación de permeabilidades saturadas de sistemas mixtos

Posterior a los ensayos de permeabilidad para los materiales de filtro y de transición de manera individual se realizaron ensayos con dos materiales dentro del permeámetro, de manera que sea posible describir el comportamiento que presentan cada uno de estos en el rango de densidades relativas descrito anteriormente.

Como es necesario realizar una gran cantidad de ensayos estos se agrupan para que sea más fácil la metodología, así como el análisis. Es por esta razón que los ensayos se describen en 3 escenarios distintos. Cabe mencionar que a pasar de un escenario a otro se mantienen ciertos aspectos, como lo son:

- La disposición de los materiales en el permeámetro, siendo el material de filtro quien recibe el agua y el material de transición 1 el que está a continuación, de manera que se representen las condiciones de un sistema de drenaje.
- La longitud o altura de los materiales en el permeámetro, siendo cada uno la mitad de la altura del permeámetro.
- El desnivel que existe entre el nivel constante de agua y la salida del permeámetro, siendo esta de 0,77 metros.

- La realización de 2 series de ensayos al igual que con las mediciones anteriores, para obtener suficientes datos y analizar el coeficiente de variación (CV).
- Los detalles en cuanto a la preparación de experimentos se encuentran en Anexos.

A partir de lo anterior se puede inferir que en todos los escenarios se tiene el mismo gradiente hidráulico. Los escenarios se dividen en cómo se varía la densidad relativa del material de filtro, mientras se deja constante la densidad relativa del material de transición. Es necesario también mencionar que las densidades relativas estudiadas en estos ensayos corresponden a valores entre 50% y 80%. Se omitió 90% debido a que según los resultados anteriores se alcanza cierto grado de estabilidad en los valores de permeabilidad una vez que se supera un 80% de densidad relativa.

4.4.1 Primer escenario-MT fijo a 60% de densidad relativa

El primer escenario consiste en mantener la densidad relativa del material de transición al 60%, mientras que el valor del material de filtro se mueve entre 50%, 60%, 70% y 80%. Por lo que se tiene un total de 4 ensayos u 8 si se considera la segunda serie. Los resultados de las series se presentan en las siguientes dos tablas. La figura 4-30 representa la banda de permeabilidad de este escenario, la cual está acotada por el comportamiento de material de filtro y de transición, dicha banda además presenta un ajuste potencial a la densidad relativa del material de filtro.

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%. (Elaboración propia)

Material	Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K _{sat} (m/s)	K _{sat} promedio(m/s)
MT=60% MF=50% DR	1,5*10 ⁻⁴	12,23	1,23*10 ⁻⁵	7,9*10 ⁻⁴	7,04*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	28,45	1,05*10 ⁻⁵	6,79*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	45,04	1*10 ⁻⁵	6,43*10 ⁻⁴	
MT=60% MF=60% DR	1,5*10 ⁻⁴	14,34	1,05*10 ⁻⁵	6,92*10 ⁻⁴	5,83*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	36,2	8*10 ⁻⁶	5,48*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	58,38	7,7*10 ⁻⁶	5,1*10 ⁻⁴	
MT=60% MF=70% DR	1,5*10 ⁻⁴	17	8,8*10 ⁻⁶	5,91*10 ⁻⁴	5,16*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	40	7,5*10 ⁻⁶	5,03*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	66,49	6,8*10 ⁻⁶	4,54*10 ⁻⁴	
MT=60% MF=80% DR	1,5*10 ⁻⁴	18,71	8*10 ⁻⁶	5,34*10 ⁻⁴	4,67*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	45,5	6,6*10 ⁻⁶	4,44*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	72,52	6,3*10 ⁻⁶	4,18*10 ⁻⁴	

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. (Elaboración propia)

Material	Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K _{sat} (m/s)	K _{sat} promedio(m/s)
MT=60% MF=50% DR	1,5*10 ⁻⁴	12,78	1,17*10 ⁻⁵	7,76*10 ⁻⁴	7,02*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	29,33	1,02*10 ⁻⁵	6,65*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	45,66	1,0*10 ⁻⁵	6,52*10 ⁻⁴	
MT=60% MF=60% DR	1,5*10 ⁻⁴	15,51	1,0*10 ⁻⁵	6,51*10 ⁻⁴	5,67*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	37,21	8*10 ⁻⁶	5,43*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	59,91	7,5*10 ⁻⁶	5,06*10 ⁻⁴	
MT=60% MF=70% DR	1,5*10 ⁻⁴	16,35	9,1*10 ⁻⁶	6,2*10 ⁻⁴	5,48*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	38,39	7,8*10 ⁻⁶	5,28*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	61,59	7,3*10 ⁻⁶	4,94*10 ⁻⁴	
MT=60% MF=80% DR	1,5*10 ⁻⁴	18,39	8,1*10 ⁻⁶	5,52*10 ⁻⁴	4,91*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	42,97	7*10 ⁻⁶	4,72*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	67,58	6,7*10 ⁻⁶	4,5*10 ⁻⁴	

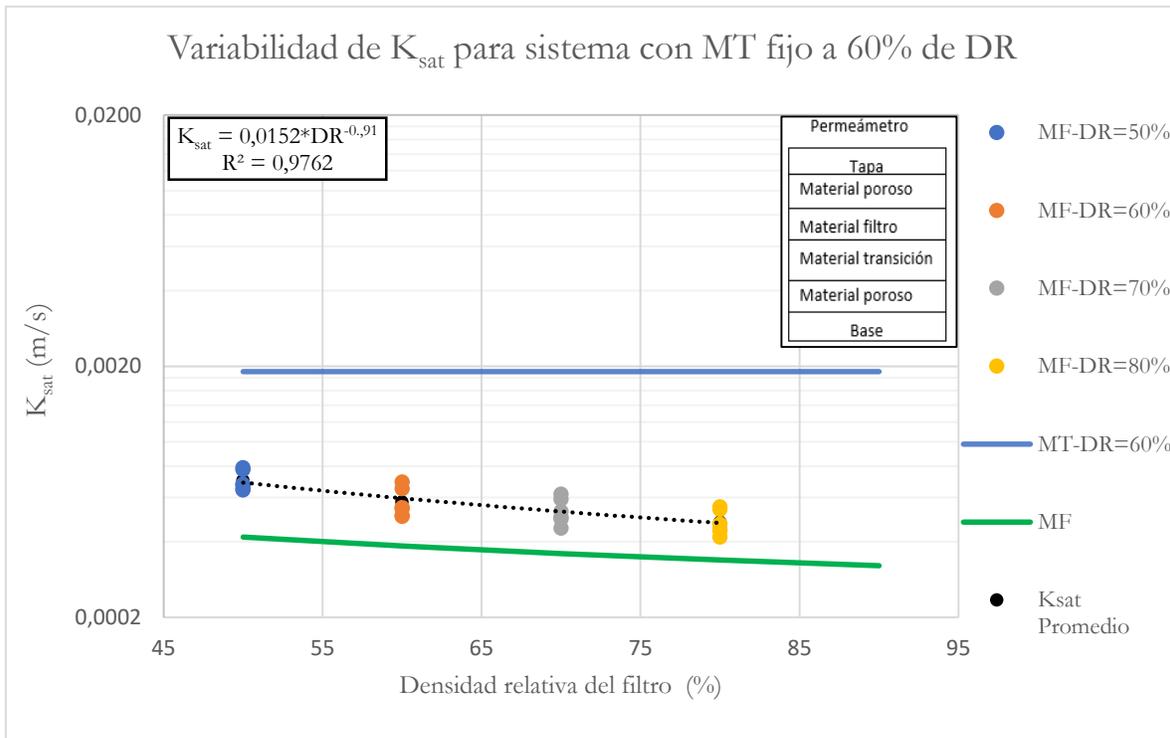


Figura 4-30. Valores de permeabilidad correspondiente a todos los ensayos realizados en el primer escenario, acotados por los valores esperados de MT y MF, incluyendo valores promedio y ajuste. (Elaboración propia)

La siguiente tabla entrega los valores promedios de permeabilidad saturada para las diferentes configuraciones de este escenario además de indicar los CV, mientras que la figura 4-31 muestra las pérdidas de permeabilidad para el sistema a medida que se varía la densidad relativa del material de filtro.

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

DR Material filtro (%)	50	60	70	80
Promedio (m/s)	$7 \cdot 10^{-4}$	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$
S_x	$6,4 \cdot 10^{-5}$	$7,8 \cdot 10^{-5}$	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$5,4 \cdot 10^{-5}$
CV (%)	9,08	13,53	11,83	11,36

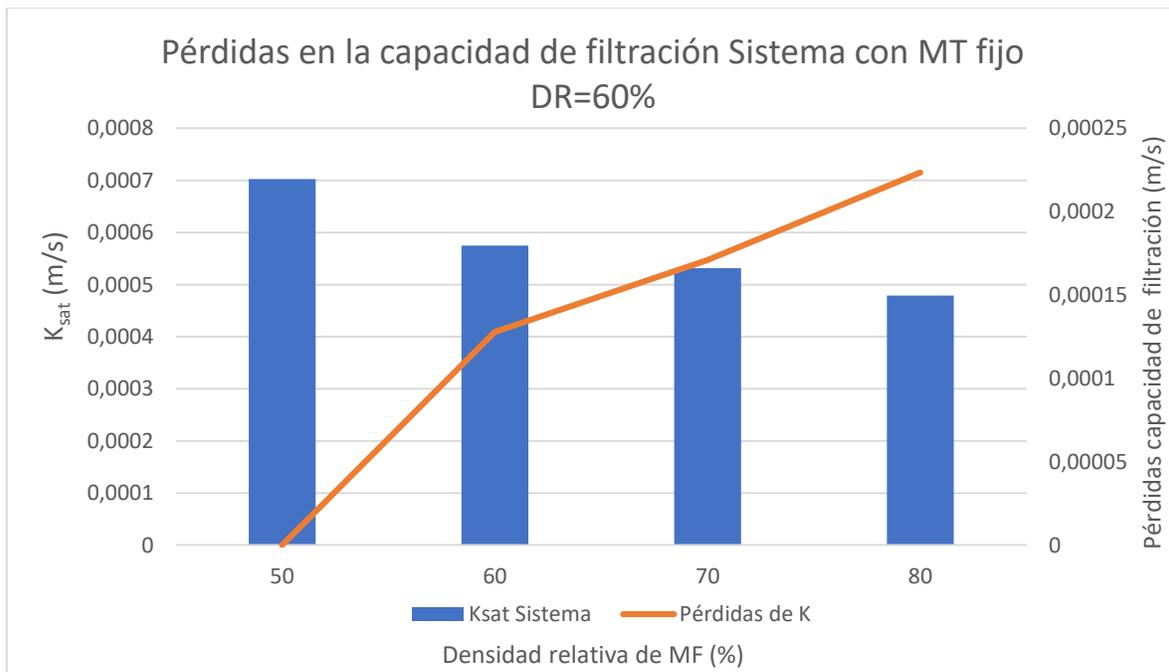


Figura 4-31. Pérdidas en la capacidad de filtro para el primer escenario. (Elaboración propia)

4.4.2 Segundo escenario-MT fijo a 70% de densidad relativa

Parecido al primer escenario, el segundo escenario consiste en mantener la densidad relativa del material de transición al 70 %, mientras que el valor del material de filtro se varía de la misma forma que en el escenario anterior. Los resultados de estos experimentos se resumen en las dos tablas siguientes. La figura 4-32 representa la banda de permeabilidad de este escenario acotada por el comportamiento de material de filtro y de transición, dicha banda además presenta un ajuste potencial.

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%. (Elaboración propia)

Material	Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K _{sat} (m/s)	K _{sat} promedio(m/s)
MT=70% MF=50% DR	1,5*10 ⁻⁴	12,6	1,19*10 ⁻⁵	8,01*10 ⁻⁴	7,25*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	28,5	1,05*10 ⁻⁵	7,09*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	45,6	9,9*10 ⁻⁶	6,64*10 ⁻⁴	
MT=70% MF=60% DR	1,5*10 ⁻⁴	16,96	8,8*10 ⁻⁶	5,95*10 ⁻⁴	5,42*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	38,31	7,8*10 ⁻⁶	5,27*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	60,37	7,5*10 ⁻⁶	5,02*10 ⁻⁴	
MT=70% MF=70% DR	1,5*10 ⁻⁴	17,9	8,4*10 ⁻⁶	5,67*10 ⁻⁴	5,28*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	38,62	7,8*10 ⁻⁶	5,25*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	61,83	7,3*10 ⁻⁶	4,92*10 ⁻⁴	
MT=70% MF=80% DR	1,5*10 ⁻⁴	20,07	7,5*10 ⁻⁶	5,05*10 ⁻⁴	4,56*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	45,58	6,6*10 ⁻⁶	4,45*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	72,73	6,2*10 ⁻⁶	4,18*10 ⁻⁴	

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. (Elaboración propia)

Material	Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K _{sat} (m/s)	K _{sat} promedio(m/s)
MT=70% MF=50% DR	1,5*10 ⁻⁴	11,93	1,26*10 ⁻⁵	8,43*10 ⁻⁴	7,38*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	28,8	1,04*10 ⁻⁵	6,98*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	44,9	1*10 ⁻⁵	6,72*10 ⁻⁴	
MT=70% MF=60% DR	1,5*10 ⁻⁴	15,76	9,5*10 ⁻⁶	6,41*10 ⁻⁴	5,71*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	36,4	8,2*10 ⁻⁶	5,55*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	58,55	7,7*10 ⁻⁶	5,17*10 ⁻⁴	
MT=70% MF=70% DR	1,5*10 ⁻⁴	18,39	8,2*10 ⁻⁶	5,52*10 ⁻⁴	4,82*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	43,59	6,9*10 ⁻⁶	4,65*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	70,86	6,4*10 ⁻⁶	4,29*10 ⁻⁴	
MT=70% MF=80% DR	1,5*10 ⁻⁴	19,98	7,5*10 ⁻⁶	5,08*10 ⁻⁴	4,48*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	47,66	6,3*10 ⁻⁶	4,26*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	74,23	6,1*10 ⁻⁶	4,1*10 ⁻⁴	

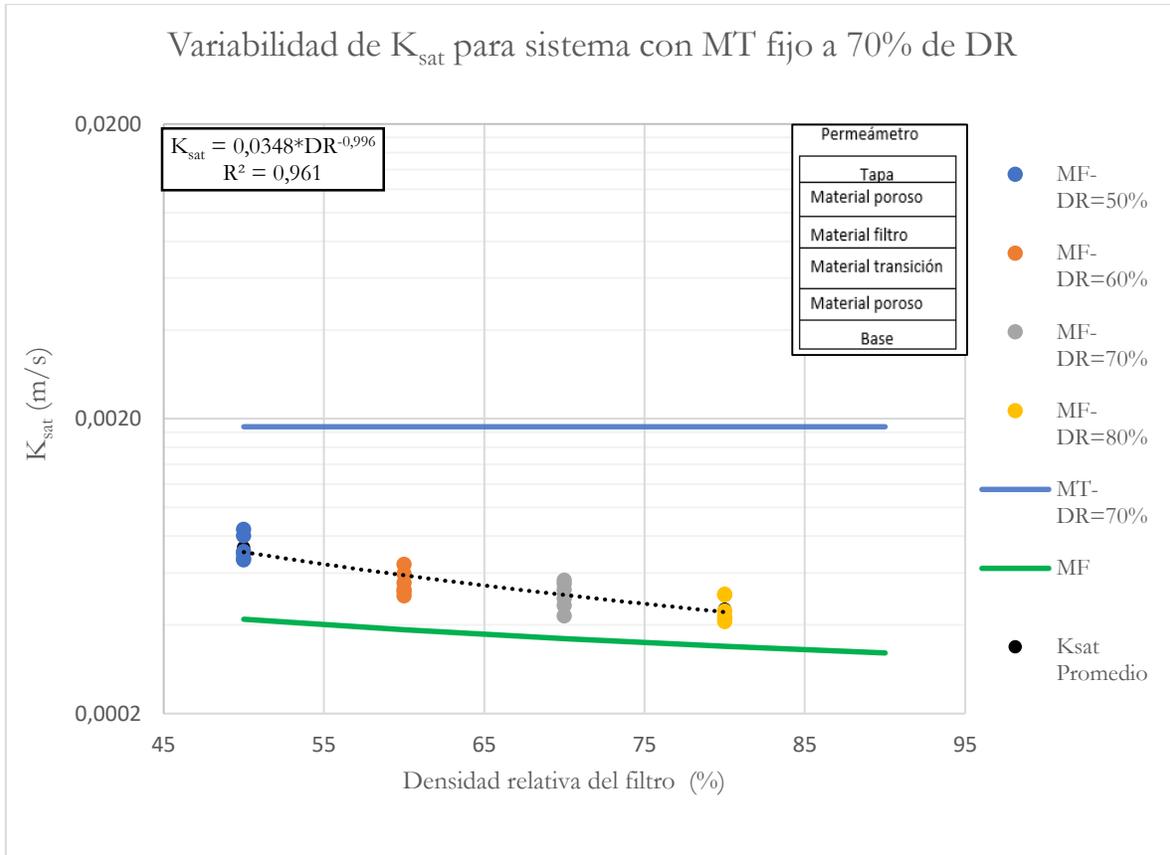


Figura 4-32. Valores de permeabilidad correspondiente a todos los ensayos realizados en el segundo escenario, acotados por los valores esperados de MT y MF, incluyendo valores promedio y ajuste. (Elaboración propia)

La tabla mostrada a continuación entrega los valores promedios de permeabilidad saturada para este escenario además de indicar los coeficientes de variación, mientras que la figura 4-33 muestra las pérdidas de permeabilidad para el sistema.

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

DR Material filtro (%)	50	60	70	80
Promedio (m/s)	$7,3 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$5,1 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$
S_x	$7,3 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$4,4 \cdot 10^{-5}$
CV (%)	10,05	9,51	10,41	9,69

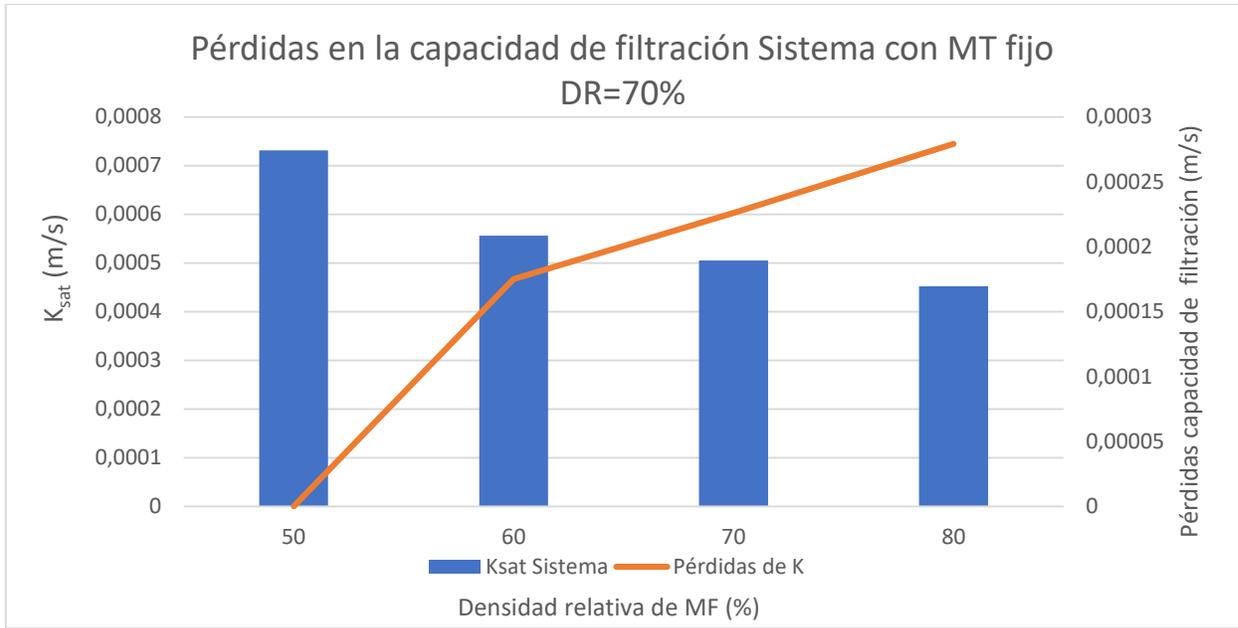


Figura 4-33. Pérdidas en la capacidad de filtro para el segundo escenario. (Elaboración propia)

4.4.3 Tercer escenario-MT fijo a 80% de densidad relativa

Como en escenarios anteriores, en el último escenario se mantiene una densidad relativa fija del 80% para el material de transición. Los resultados de las dos series de experimentos se ven entre las tablas siguientes dos tablas. Mientras que la banda de permeabilidad ajustada del sistema que está acotada por los valores esperados de MT y MF se ve en la figura 4-34.

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%. (Elaboración propia)

Material	Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K _{sat} (m/s)	K _{sat} promedio(m/s)
MT=80% MF=50% DR	1,5*10 ⁻⁴	19,93	7,5*10 ⁻⁶	5,09*10 ⁻⁴	4,56*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	45,65	6,6*10 ⁻⁶	4,44*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	73,25	6,1*10 ⁻⁶	4,15*10 ⁻⁴	
MT=80% MF=60% DR	1,5*10 ⁻⁴	23,38	6,4*10 ⁻⁶	4,34*10 ⁻⁴	3,88*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	54,22	5,5*10 ⁻⁶	3,74*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	85,19	5,3*10 ⁻⁶	3,57*10 ⁻⁴	
MT=80% MF=70% DR	1,5*10 ⁻⁴	27,99	5,4*10 ⁻⁶	3,62*10 ⁻⁴	3,26*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	64,87	4,6*10 ⁻⁶	3,13*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	100,7	4,5*10 ⁻⁶	3,02*10 ⁻⁴	
MT=80% MF=80% DR	1,5*10 ⁻⁴	28,71	5,2*10 ⁻⁶	3,53*10 ⁻⁴	3,25*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	65,74	4,6*10 ⁻⁶	3,09*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	96,94	4,6*10 ⁻⁶	3,14*10 ⁻⁴	

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. (Elaboración propia)

Material	Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K _{sat} (m/s)	K _{sat} promedio(m/s)
MT=80% MF=50% DR	1,5*10 ⁻⁴	17,36	8,6*10 ⁻⁶	5,77*10 ⁻⁵	5,34*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	37,54	8,0*10 ⁻⁶	5,33*10 ⁻⁵	
	4,5*10 ⁻⁴	60,98	7,4*10 ⁻⁶	4,92*10 ⁻⁵	
MT=80% MF=60% DR	1,5*10 ⁻⁴	21,47	7,0*10 ⁻⁶	4,7*10 ⁻⁵	4,14*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	50,84	5,9*10 ⁻⁶	3,97*10 ⁻⁵	
	4,5*10 ⁻⁴	81,19	5,5*10 ⁻⁶	3,73*10 ⁻⁵	
MT=80% MF=70% DR	1,5*10 ⁻⁴	25,35	5,9*10 ⁻⁶	4*10 ⁻⁵	3,54*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	60,02	5,0*10 ⁻⁶	3,38*10 ⁻⁵	
	4,5*10 ⁻⁴	93,92	4,8*10 ⁻⁶	3,24*10 ⁻⁵	
MT=80% MF=80% DR	1,5*10 ⁻⁴	27,64	5,4*10 ⁻⁶	3,67*10 ⁻⁵	3,43*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	60,83	4,9*10 ⁻⁶	3,33*10 ⁻⁵	
	4,5*10 ⁻⁴	92,9	4,8*10 ⁻⁶	3,28*10 ⁻⁵	

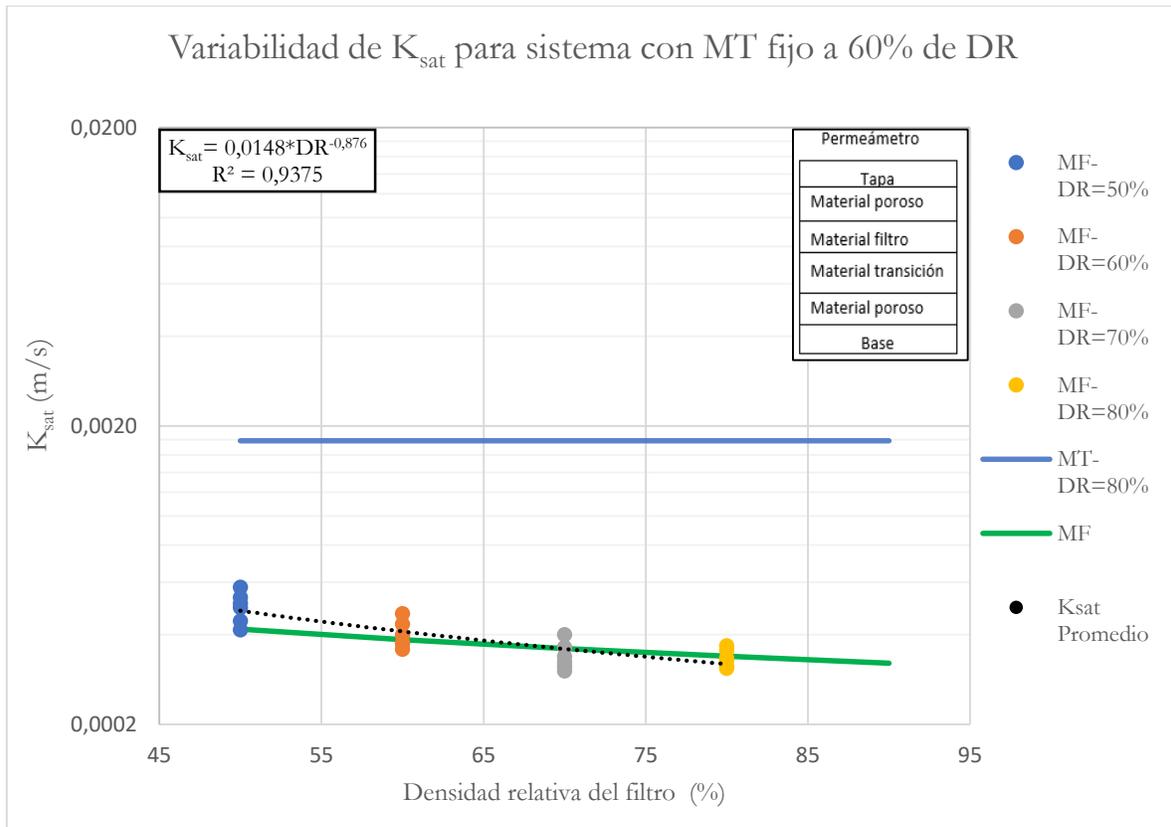


Figura 4-34. Valores de permeabilidad correspondiente a todos los ensayos realizados en el tercer escenario, acotados por los valores esperados de MT y MF, incluyendo valores promedio y ajuste. (Elaboración propia)

La siguiente tabla entrega los valores promedios de permeabilidad saturada para este escenario además de indicar los coeficientes de variación, mientras que la figura 4-35 muestra las pérdidas de permeabilidad para el sistema.

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

DR Material filtro (%)	50	60	70	80
Promedio (m/s)	$5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$
S_x	$5,9 \cdot 10^{-5}$	$4,3 \cdot 10^{-5}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$
CV (%)	11,855	10,77	10,65	6,76

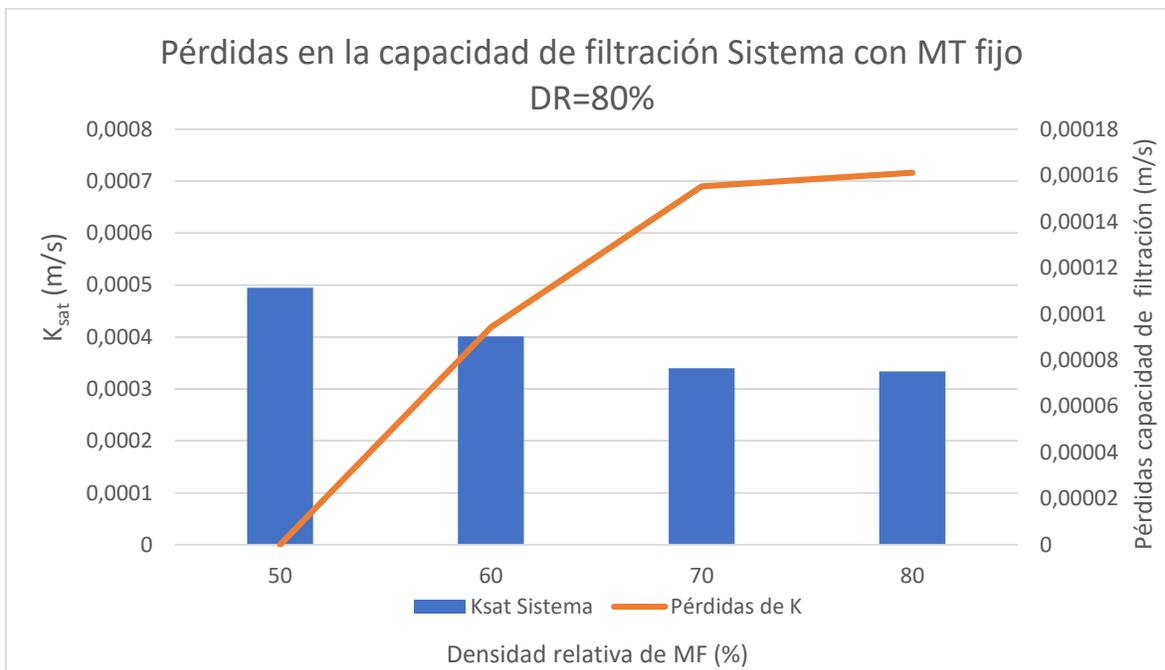


Figura 4-35. Pérdidas en la capacidad de filtro para el tercer escenario. (Elaboración propia)

4.4.4. Efectos en la direccionalidad del flujo

Una vez realizados todos los experimentos y series de experimentos de todos los escenarios se consideró la posibilidad de realizar experimentos concordantes a los tres escenarios propuestos anteriormente para determinar de manera adicional si el comportamiento de los materiales al funcionar como sistema se ve afectado al modificar el orden de los materiales. Para esto se llevaron a cabo tres experimentos, los cuales consistían en colocar el material de transición y el material de filtro en el permeámetro, pero en orden inverso al realizado en los experimentos

anteriores, cabe mencionar que la configuración para cada experimento fue realizada al azar. Por lo tanto, los experimentos extras o de verificación son:

- Material de transición 1 a 60% y material de filtro a 70%. (primer escenario)
- Material de transición 1 a 70% y material de filtro a 60%. (segundo escenario)
- Material de transición 1 a 80% y material de filtro a 60%. (tercer escenario)

Los resultados de dichos ensayos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4-47. Resultados de ensayos de permeabilidad para los diferentes ensayos extra. (Elaboración propia)

Material	Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K _{sat} (m/s)	K _{sat} promedio(m/s)
MT=60% MF=70% DR	1,5*10 ⁻⁴	13	1,15*10 ⁻⁵	7,46*10 ⁻⁴	7,21*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	27,5	1,09*10 ⁻⁵	7,06*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	41	1,01*10 ⁻⁵	7,1*10 ⁻⁴	
MT=70% MF=60% DR	1,5*10 ⁻⁴	17,02	8,8*10 ⁻⁶	5,7*10 ⁻⁴	5,68*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	34,19	8,8*10 ⁻⁶	5,68*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	51,37	8,8*10 ⁻⁶	5,67*10 ⁻⁴	
MT=80% MF=60% DR	1,5*10 ⁻⁴	20	7,5*10 ⁻⁶	4,85*10 ⁻⁴	4,7*10 ⁻⁴
	3*10 ⁻⁴	42,17	7,1*10 ⁻⁶	4,6*10 ⁻⁴	
	4,5*10 ⁻⁴	62,7	7,2*10 ⁻⁶	4,64*10 ⁻⁴	

Como se puede ver en la tabla mostrada a continuación el añadir estos datos a los escenarios anteriormente planteados causaría las siguientes modificaciones de promedio y CV. Indicando que la familia de resultados sigue siendo homogénea, sin embargo, es mejor ver a través de las siguientes tres figuras que los valores son mayores respecto a los escenarios originales.

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

Ensayos	MT 60/MF 70	MT 70/MF 60	MT 80/MF 60
Promedio (m/s)	5,9*10 ⁻⁴	5,6*10 ⁻⁴	4,2*10 ⁻⁴
S _x	1,1*10 ⁻⁴	4,2*10 ⁻⁵	4,9*10 ⁻⁵
Delta promedio (m/s)	1,2*10 ⁻⁴	3,9*10 ⁻⁵	2,3*10 ⁻⁵
CV (%)	18,04	7,54	11,54
Delta de CV (%)	6,21	-1,97	0,77

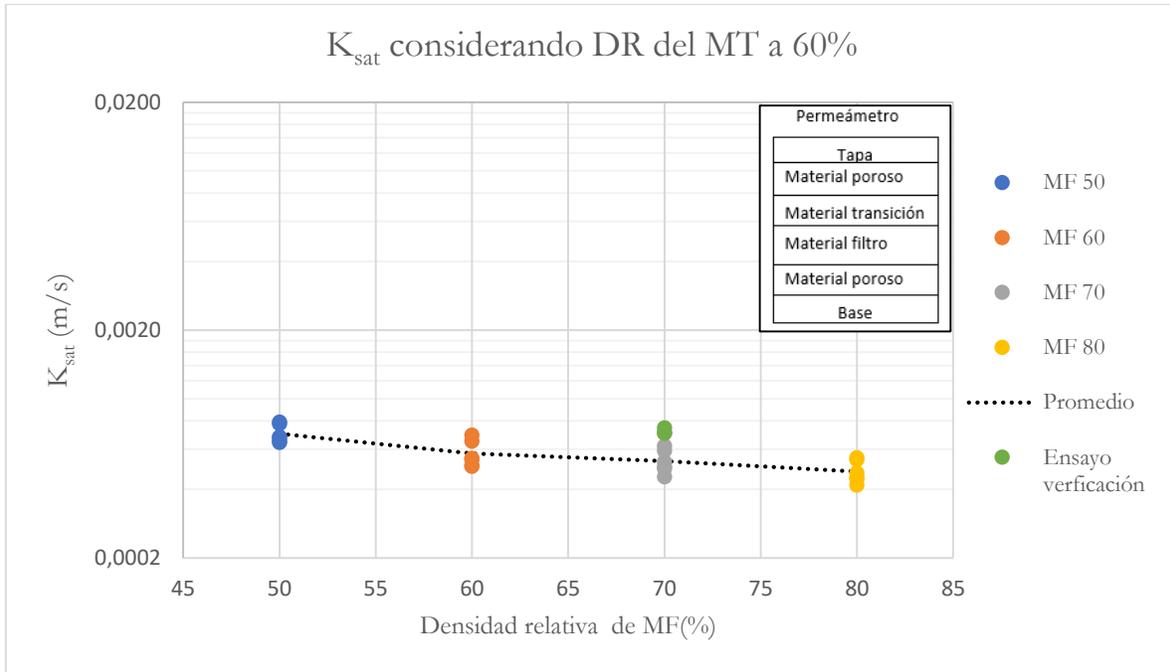


Figura 4-36. Comparación de los valores obtenidos del ensayo de verificación con los recogidos anteriormente para el primer escenario. (Elaboración propia)

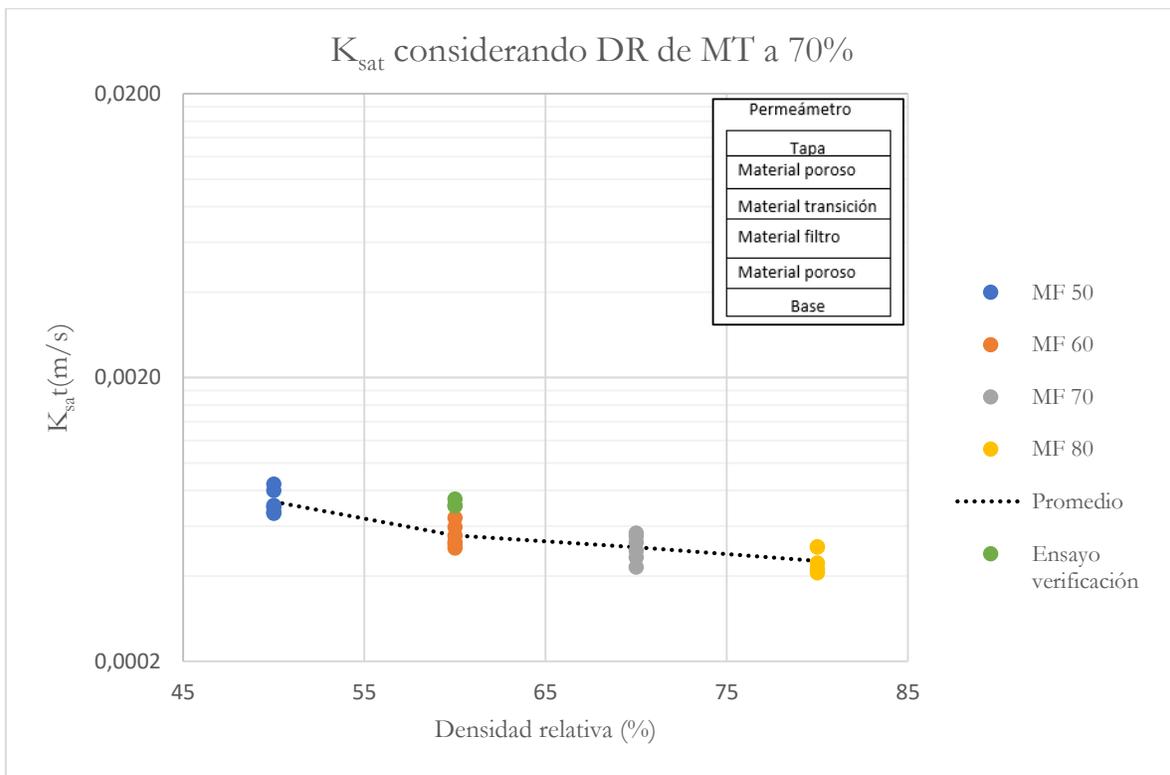


Figura 4-37. Comparación de los valores obtenidos del ensayo de verificación con los recogidos anteriormente para el segundo escenario. (Elaboración propia)

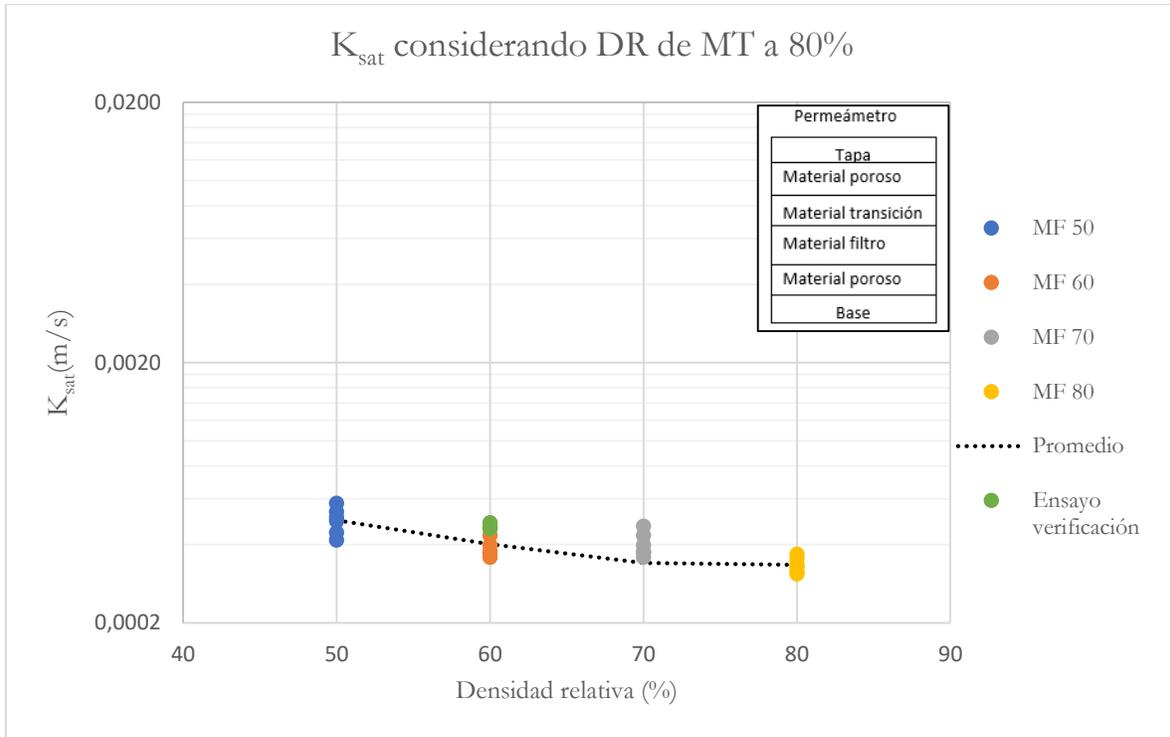


Figura 4-38. Comparación de los valores obtenidos del ensayo de verificación con los recogidos anteriormente para el tercer escenario. (Elaboración propia)

En las estimaciones anteriores se observa que al cambiar el orden en el que se colocan los materiales, el material de transición no es quien recibe la compactación secundaria, sino el material de filtro, es por esta razón que al pasar de un material más permeable (material de transición) a uno menos permeable (material de filtro) el flujo de agua vaya con una mayor velocidad, lo cual podría ayudar a saturar con mayor rapidez el material de filtro. En general se puede decir que al cambiar el orden de los materiales no se exhiben cambios notorios en la dispersión de la familia de datos, aunque los valores tienden a ser mayores, por lo menos en escenarios de materiales más sueltos.

4.4.5 Pérdidas de potencial de filtración entre escenarios

Retomando los ensayos realizados anteriormente en los distintos escenarios se puede ver en la figura siguiente los comportamientos de los escenarios o sistemas en comparación a los materiales de transición o de filtros cuando se encuentran trabajando solos.

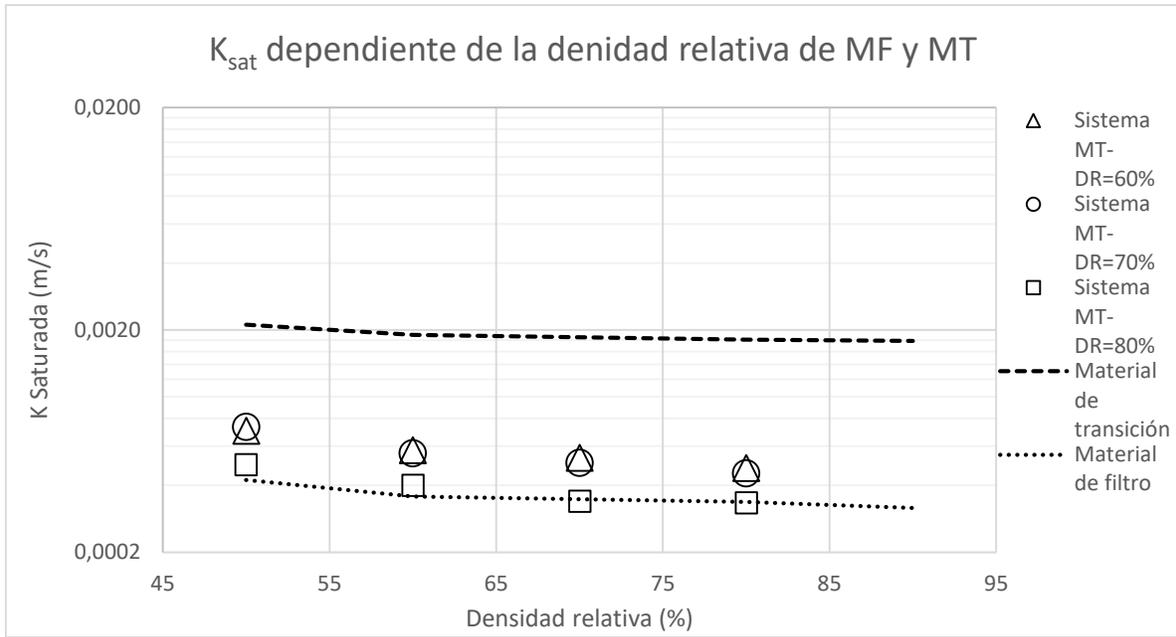


Figura 4-39. Comportamiento de los tres escenarios (promedios) al compararlo con el del material de filtro y de transición (promedios). (Elaboración propia)

Se pueden cuantificar las pérdidas de permeabilidad entre escenarios descrita en la figura anterior según muestra la siguiente tabla.

Tabla 4-49. Pérdidas e incrementos en la permeabilidad del sistema entre escenarios. (Elaboración propia)

DR materiales de transición	DR Material de filtro			
	DR 50%	DR 60%	DR 70%	DR 80%
De 60% a 70 %	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$-1,9 \cdot 10^{-5}$	$-2,7 \cdot 10^{-5}$	$-2,7 \cdot 10^{-5}$
De 70% a 80 %	$-2,36 \cdot 10^{-4}$	$-1,55 \cdot 10^{-4}$	$-1,65 \cdot 10^{-4}$	$-1,18 \cdot 10^{-4}$

Finalmente, las siguientes tres figuras que se muestran a continuación permiten ver cuánto se reduce la permeabilidad del sistema con respecto a la permeabilidad del material de transición puro, lo que entrega una cuantificación de que tanto se aleja el sistema respecto de este material, es por esta razón que las pérdidas no inician desde cero, ya que se está comprando con otro sistema.

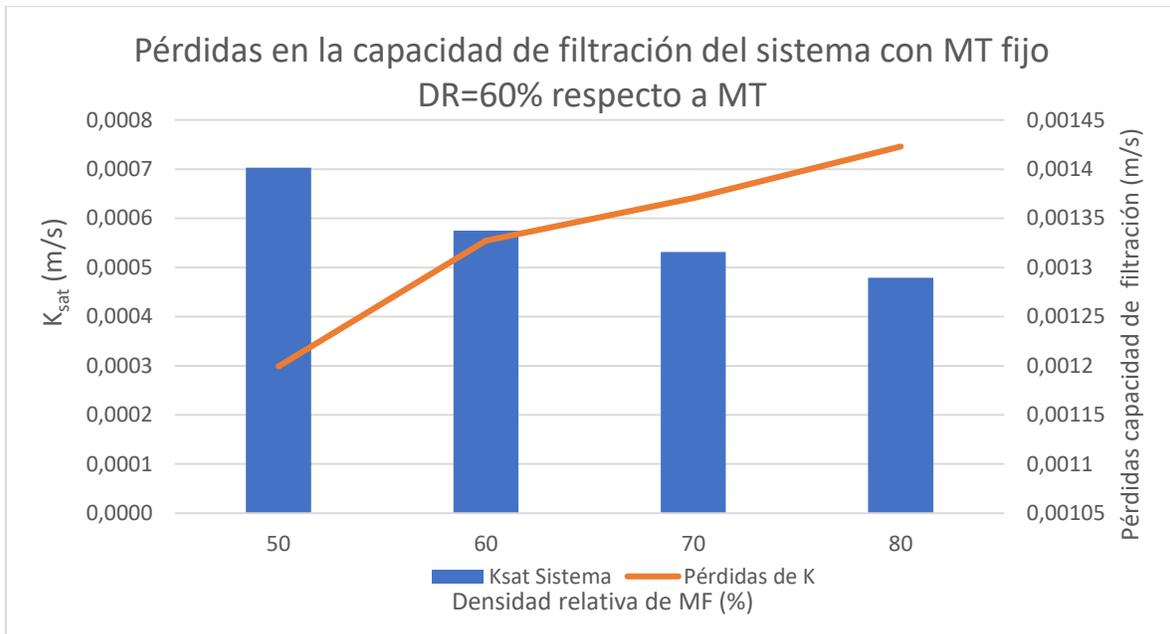


Figura 4-40. Pérdidas de K_{sat} del primer escenario respecto a MT. (Elaboración propia)

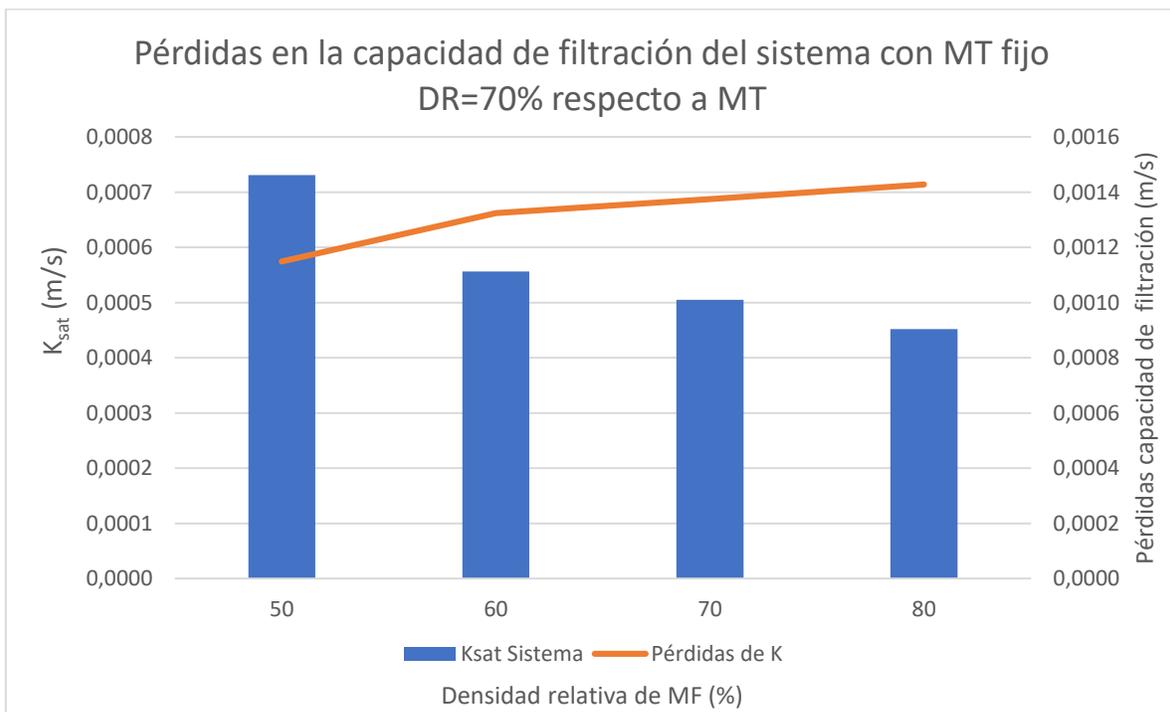


Figura 4-41. Pérdidas de K_{sat} del segundo escenario respecto a MT. (Elaboración propia)

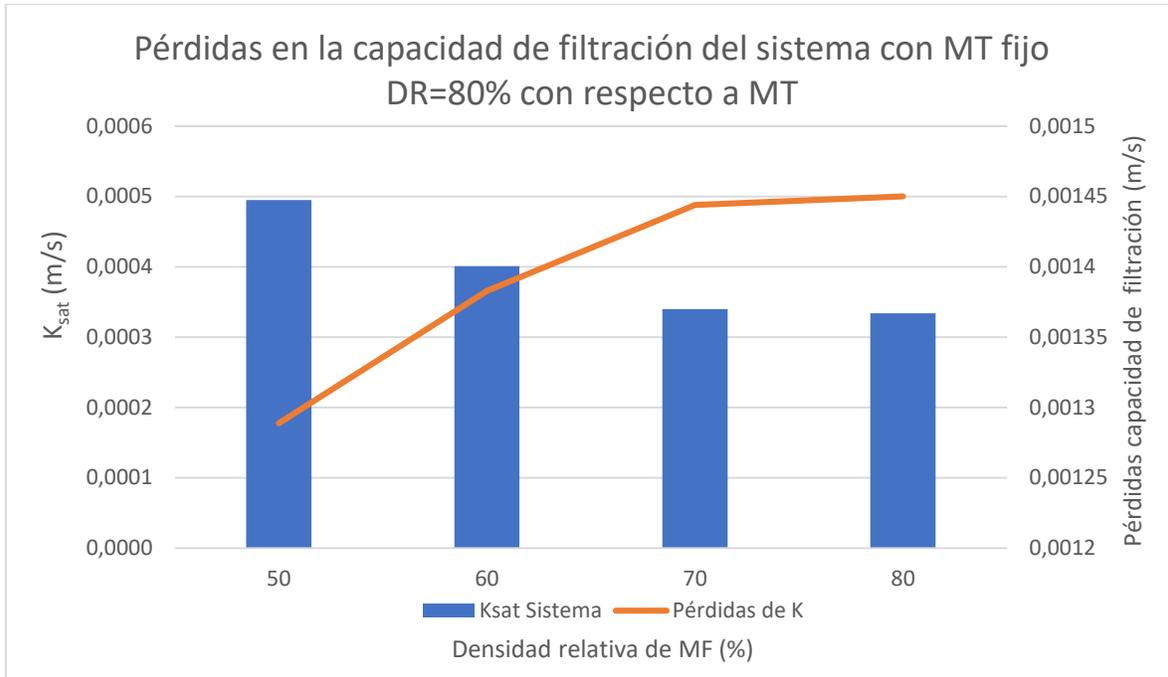


Figura 4-42. Pérdidas de K_{sat} del tercer escenario respecto a MT. (Elaboración propia)

A partir de los gráficos y tablas presentados anteriormente es posible ver que a medida que se aumenta el grado de compactación del material de transición y se deja constante el de material de filtro el comportamiento se va convergiendo al descrito por el de un material de filtro. El mismo efecto se consigue si se deja constante la densidad relativa de un material de transición y se aumenta la compactación del material de filtro. Sin embargo, el cómo va disminuyendo esta permeabilidad no es igual en cada caso, ya que para un mismo incremento de densidad relativa las pérdidas de potencial de filtración serán mayores o menores dependiendo del grado de densidad relativa original y final.

4.6 Modelos de SEEP/W

Una vez caracterizada la permeabilidad saturada tanto para los materiales por sí solos, así como para los sistemas, es posible dentro del software SEEP/W de GeoStudio cuantificar el efecto que tiene la sobrecompactación, a fin de comparar las pérdidas de flujo con las registradas experimentalmente. Para la confección del modelo se tomaron las siguientes consideraciones:

- La zanja en donde se colocarían los materiales de tipo dren sería modelada tomando como referencia algunas medidas de otras estructuras similares.
- De manera similar el espesor de las capas 0,5 metros para el material de filtro y 0,6 metros para el material de transición se basó en referencias, siempre superando el espesor mínimo recomendado por ICOLD.
- Se colocó una condición de borde para proteger el suelo de fundación de filtraciones (*liner*), permitiendo así que las interacciones se diesen mayoritariamente entre las diferentes capas que componen el sistema.
- Para un sistema de drenaje se modeló material de relave, material de filtro y un material de transición, así como un material de dren. Esto se hizo para simplificar el sistema, puesto que se desea observar las interacciones entre las capas más superficiales del sistema de drenaje.
- El espesor de la capa de material dren corresponde a un metro debido a que es necesario que la participación de este material sea importante dentro del sistema.
- El espesor de la capa de relaves corresponde a dos metros dado que la altura del material de relave que se utiliza en la creación del muro suele ser bastante grande.
- Se crearon secciones de flujo en la mitad de cada material del sistema para analizar los caudales.
- El caudal unitario utilizado en los modelos corresponde al máximo permisible por el material de relave.
- Las permeabilidades saturadas horizontales y verticales se considerarán como iguales, es decir, anisotropía de los materiales se considerará como 1.

Cabe resaltar que se recrearon en los modelos de SEEP/W las experiencias relatadas anteriormente en los ensayos homogéneos y mixtos, es decir, los siguientes modelos:

- Modelo 1: Material de transición con densidad relativa fija de 50 % y material de filtro con densidad relativa variable entre 50% y 90%, se modelaron ambos materiales.
- Modelo 2: Material de transición con densidad relativa fija de 60 % y material de filtro con densidad relativa variable entre 50% y 90%, se modelaron ambos materiales.
- Modelo 3: Material de transición con densidad relativa fija de 80 % y material de filtro con densidad relativa variable entre 50% y 90%, se modelaron ambos materiales.
- Modelo 4: Material de transición con densidad relativa fija de 90 % y material de filtro con densidad relativa variable entre 50% y 90%, se modelaron ambos materiales.
- Modelo 5: Material de transición con densidad relativa fija de 60% y material de filtro con densidad relativa variable entre 50% y 80%, se modeló un material de sistema.
- Modelo 6: Material de transición con densidad relativa fija de 70% y material de filtro con densidad relativa variable entre 50% y 80%, se modeló un material de sistema.
- Modelo 7: Material de transición con densidad relativa fija de 80% y material de filtro con densidad relativa variable entre 50% y 80%, se modeló un material de sistema.

De los modelos se ejecutarán dos escenarios o casos, de los cuales se rescatarán los caudales en diferentes partes del sistema de drenaje. Los casos son:

- Caso 1: Considerando nivel estacionario a nivel de material de filtro y una tubería inmersa en material dren, más infiltración constante desde los relaves.
- Caso 2: Considerando nivel estacionario variable por sobre el material de filtro y una tubería inmersa en material dren, más infiltración constante desde los relaves.

A partir de esto se puede inferir que existen 7 modelos de SEEP/W cada uno con 2 casos y cada caso con 4 situaciones en las que se varía la densidad relativa del material de filtro, por lo que lo que a diferencia de los estudios anteriores no solo hay que realizar un estudio para un mismo modelo, sino que hay que comparar entre modelos para poder obtener conclusiones.

4.6.1 Modelos 1 al 4

Una vez realizados los ensayos anteriores y definidas las curvas que rigen el comportamiento de la permeabilidad saturada es posible modelar la totalidad de los materiales que integrarán los modelos, por lo que posterior al proceso de modelado es posible correr las simulaciones y obtener caudales que atraviesan el modelo. Como se mencionó anteriormente los modelos 1, 2, 3 y 4 corresponden a colocar los materiales de filtro y transición por separado en el sistema y observar cómo interactúan.

La siguiente figura muestra cómo se ve un modelo para el caso 1 y la figura 4-44 como se ve un modelo para el caso 2, en Anexos se podrán observar el detalle de los modelos.

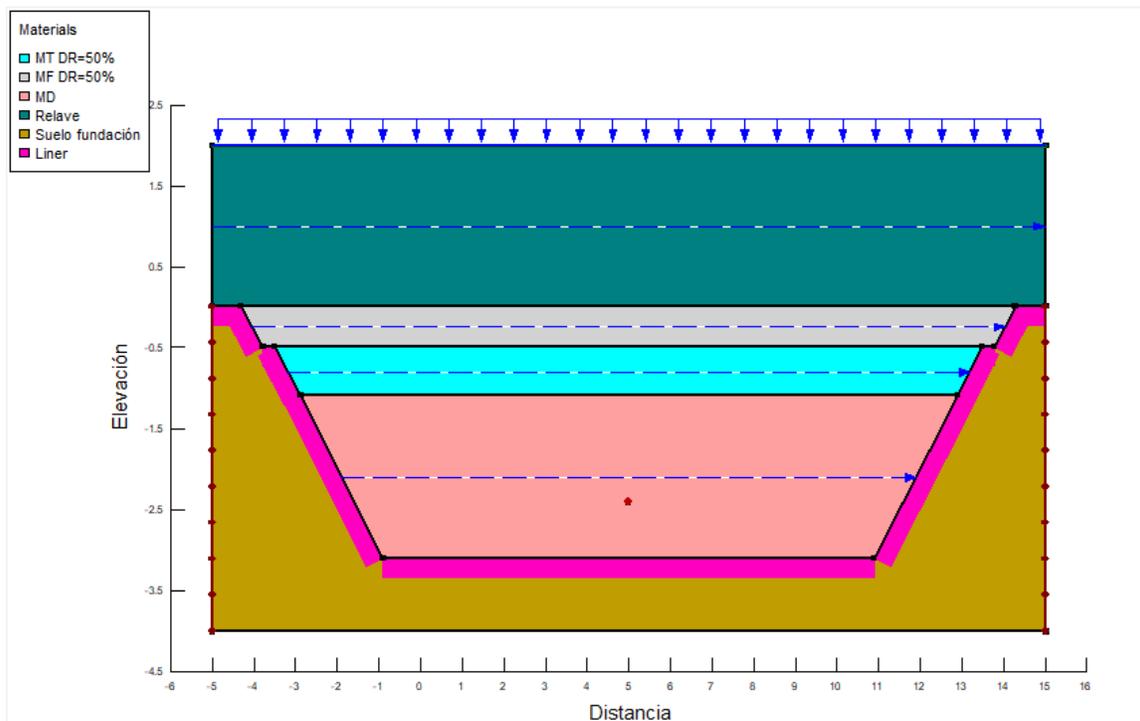


Figura 4-43. Vista del modelo 1 (MT=50% DR y MF variable) para el caso 1. (Elaboración propia)

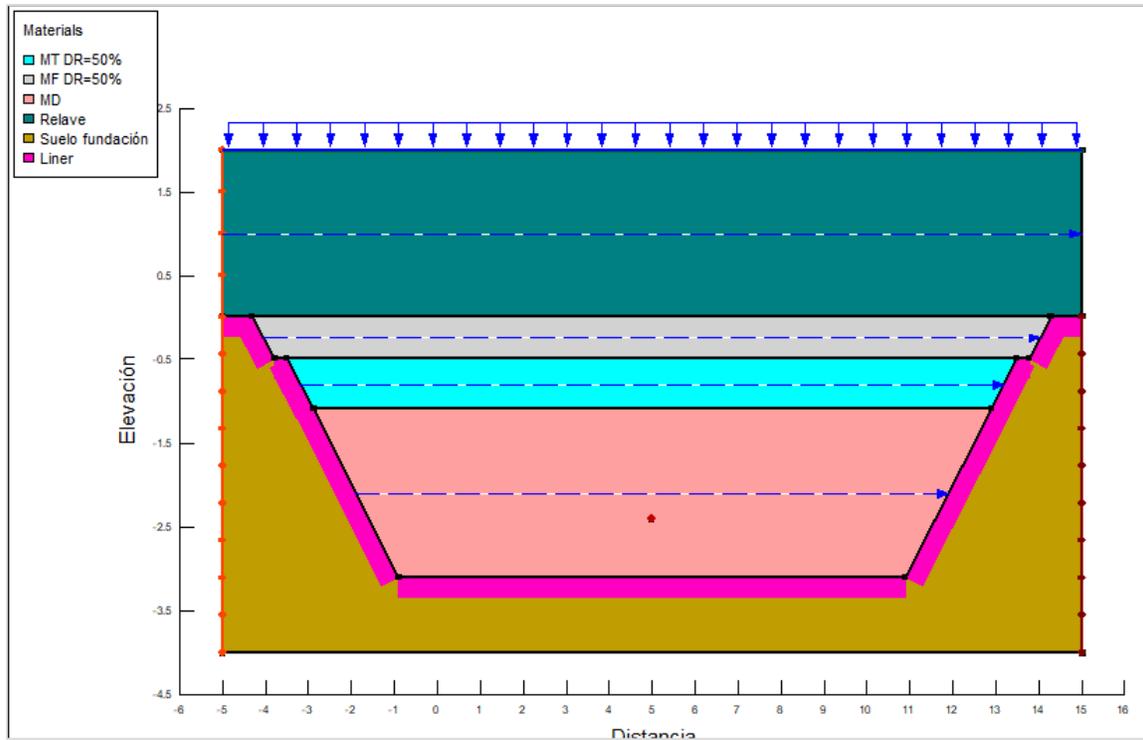


Figura 4-44. Vista del modelo 1 (MT=50% DR y MF variable) para el caso 2, notar el cambio en la condición límite. (Elaboración propia)

A continuación, se presenta en tres tablas los caudales recogidos por las diferentes secciones del sistema de drenaje para los modelos 1, 2, 3 y 4 considerando tanto el caso 1 como el caso 2, se calcula el caudal final litros por segundo para tener números más fáciles de manejar.

De estas tablas se puede ver que en general el caudal que pasa por las secciones delimitadas en los modelos va disminuyendo a medida que se aumenta el grado de compactación en los materiales, lo importante es clasificar el cómo y si existe alguna tendencia.

Tabla 4-50. Resultados de caudales para modelo 1.
(Elaboración propia)

Modelo 1			
Configuración	CASO	Sección de flujo	Caudal corregido (L/s)
MT=50% MF=50%	1	Relave	0,40
		MF	0,38
		MT	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,37
		MF	0,35
		MT	0,35
		MD	0,35
MT=50% MF=60%	1	Relave	0,40
		MF	0,38
		MT	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,37
		MF	0,35
		MT	0,35
		MD	0,35
MT=50% MF=80%	1	Relave	0,40
		MF	0,38
		MT	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,37
		MF	0,35
		MT	0,35
		MD	0,35
MT=50% MF=90%	1	Relave	0,40
		MF	0,38
		MT	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,37
		MF	0,35
		MT	0,35
		MD	0,35

Tabla 4-51. Resultados de caudales para modelo 2.
(Elaboración propia)

Modelo 2			
Configuración	CASO	Sección de flujo	Caudal corregido (L/s)
MT=60% MF=50%	1	Relave	0,40
		MF	0,38
		MT	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,37
		MF	0,35
		MT	0,35
		MD	0,35
MT=60% MF=60%	1	Relave	0,40
		MF	0,38
		MT	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,37
		MF	0,35
		MT	0,35
		MD	0,35
MT=60% MF=70%	1	Relave	0,40
		MF	0,38
		MT	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,37
		MF	0,35
		MT	0,35
		MD	0,35
MT=60% MF=80%	1	Relave	0,40
		MF	0,38
		MT	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,37
		MF	0,35
		MT	0,34
		MD	0,35

Tabla 4-52. Resultados de caudales para modelo 3.
(Elaboración propia)

Modelo 3			
Configuración	CASO	Sección de flujo	Caudal corregido (L/s)
MT=80% MF=50%	1	Relave	0,40
		MF	0,38
		MT	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,37
		MF	0,35
		MT	0,35
		MD	0,35
MT=80% MF=60%	1	Relave	0,40
		MF	0,38
		MT	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,37
		MF	0,35
		MT	0,35
		MD	0,35
MT=80% MF=70%	1	Relave	0,40
		MF	0,38
		MT	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,37
		MF	0,35
		MT	0,35
		MD	0,35
MT=80% MF=80%	1	Relave	0,40
		MF	0,38
		MT	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,37
		MF	0,35
		MT	0,35
		MD	0,35

Tabla 4-53. Resultados de caudales para modelo 4.
(Elaboración propia)

Modelo 4			
Configuración	CASO	Sección de flujo	Caudal corregido (L/s)
MT=90% MF=50%	1	Relave	0,40
		MF	0,38
		MT	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,37
		MF	0,35
		MT	0,35
		MD	0,35
MT=90% MF=60%	1	Relave	0,40
		MF	0,38
		MT	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,37
		MF	0,35
		MT	0,35
		MD	0,35
MT=90% MF=70%	1	Relave	0,40
		MF	0,38
		MT	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,37
		MF	0,35
		MT	0,35
		MD	0,35
MT=90% MF=80%	1	Relave	0,40
		MF	0,38
		MT	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,37
		MF	0,35
		MT	0,34
		MD	0,35

4.6.2 Pérdidas de caudal modelos 1 al 4

A continuación, se presentan dos tablas, que sintetizan las pérdidas de caudal, la tabla 4-54 para medir el caudal que se pierde cuando se aumenta la densidad relativa del material de filtro, mientras la tabla 4-55 permite ver los cambios de caudales al variar el material de transición.

Tabla 4-54. Pérdidas de caudal para un mismo modelo. (Elaboración propia)

Diferencias de caudal (L/s)							
Modelo	CASO	Entre	Relave	MF	MT	MD	
1	Caso 1	MT 50 MF 50 y MT 50 MF 60	0	$-1,7*10^{-4}$	$-2,19*10^{-4}$	$-2*10^{-4}$	
		MT 50 MF 60 y MT 50 MF 80	0	$-2,8*10^{-4}$	$-4,41*10^{-4}$	$-3,4*10^{-4}$	
		MT 50 MF 80 y MT 50 MF 90	0	$-1,2*10^{-4}$	$-1,7*10^{-4}$	$-1,5*10^{-4}$	
	Caso 2	Entre	Relave	MF	MT	MD	
		MT 50 MF 50 y MT 50 MF 60	$-1,2*10^{-4}$	$-4,8*10^{-4}$	$-6,1*10^{-4}$	$-5,5*10^{-4}$	
		MT 50 MF 60 y MT 50 MF 80	$-2*10^{-4}$	$-8,2*10^{-4}$	$-9,9*10^{-4}$	$-9,2*10^{-4}$	
		MT 50 MF 80 y MT 50 MF 90	$-8*10^{-5}$	$-3,5*10^{-4}$	$-4,3*10^{-4}$	$-4*10^{-4}$	
2	Caso 1	Entre	Relave	MF	MT	MD	
		MT 60 MF 50 y MT 60 MF 60	0	$-1,8*10^{-4}$	$-2,6*10^{-4}$	$-2,1*10^{-4}$	
		MT 60 MF 60 y MT 60 MF 80	0	$-2,8*10^{-4}$	$-4,1*10^{-4}$	$-3,4*10^{-4}$	
			MT 60 MF 80 y MT 60 MF 90	0	$-1,2*10^{-4}$	$-1,7*10^{-4}$	$-1,5*10^{-4}$
	Caso 2	Entre	Relave	MF	MT	MD	
		MT 60 MF 50 y MT 60 MF 60	$-1,2*10^{-4}$	$-4,9*10^{-4}$	$-6,1*10^{-4}$	$-5,5*10^{-4}$	
MT 60 MF 60 y MT 60 MF 80		$-2*10^{-4}$	$-8,2*10^{-4}$	$-1*10^{-3}$	$-9,2*10^{-4}$		
		MT 60 MF 80 y MT 60 MF 90	$-9*10^{-5}$	$-3,5*10^{-4}$	$-4,3*10^{-4}$	$-4*10^{-4}$	
3	Caso 1	Entre	Relave	MF	MT	MD	
		MT 80 MF 50 y MT 80 MF 60	0	$-1,8*10^{-4}$	$-2,5*10^{-4}$	$-2,1*10^{-4}$	
		MT 80 MF 60 y MT 80 MF 80	0	$-2,9*10^{-4}$	$-4,2*10^{-4}$	$-3,4*10^{-4}$	
			MT 80 MF 80 y MT 80 MF 90	0	$-1,2*10^{-4}$	$-1,8*10^{-4}$	$-1,5*10^{-4}$
	Caso 2	Entre	Relave	MF	MT	MD	
		MT 80 MF 50 y MT 80 MF 60	$-1,2*10^{-4}$	$-4,9*10^{-4}$	$-6,1*10^{-4}$	$-5,5*10^{-4}$	
MT 80 MF 60 y MT 80 MF 80		$-2*10^{-4}$	$-8,2*10^{-4}$	$-1,01*10^{-3}$	$-9*10^{-4}$		
		MT 80 MF 80 y MT 80 MF 90	$-9*10^{-5}$	$-3,6*10^{-4}$	$-4,3*10^{-4}$	$-4*10^{-4}$	
4	Caso 1	Entre	Relave	MF	MT	MD	
		MT 90 MF 50 y MT 90 MF 60	0	$-1,8*10^{-4}$	$-2,6*10^{-4}$	$-2,1*10^{-4}$	
		MT 90 MF 60 y MT 90 MF 80	0	$-2,9*10^{-4}$	$-4,2*10^{-4}$	$-3,4*10^{-4}$	
			MT 90 MF 80 y MT 90 MF 90	0	$-1,2*10^{-4}$	$-1,8*10^{-4}$	$-1,5*10^{-4}$
	Caso 2	Entre	Relave	MF	MT	MD	
		MT 90 MF 50 y MT 90 MF 60	$-1,2*10^{-4}$	$-5*10^{-4}$	$-6,2*10^{-4}$	$-5,6*10^{-5}$	
MT 90 MF 60 y MT 90 MF 80		$-2*10^{-4}$	$-8,2*10^{-4}$	$-1*10^{-4}$	$-9,3*10^{-5}$		
		MT 90 MF 80 y MT 90 MF 90	$-9*10^{-5}$	$-3,5*10^{-4}$	$-4,3*10^{-4}$	$-4,04*10^{-4}$	

Tabla 4-55. Pérdidas de caudal entre modelos. (Elaboración propia)

Diferencias de caudal (L/s)						
Entre	CASO	Entre	Relave	MF	MT	MD
Modelo 1 y 2	1	MT 50 MF 50 Y MT 60 MF 50	0	$-5,5*10^{-5}$	$-2,4*10^{-5}$	$-7*10^{-5}$
		MT 50 MF 60 Y MT 60 MF 60	0	$-6,5*10^{-5}$	$-6,5*10^{-5}$	$-8*10^{-5}$
		MT 50 MF 80 Y MT 60 MF 80	0	$-6,5*10^{-5}$	$-3,4*10^{-5}$	$-8*10^{-5}$
		MT 50 MF 90 Y MT 60 MF 90	0	$-6,5*10^{-5}$	$-3,4*10^{-5}$	$-8*10^{-5}$
	2	Entre	Relave	MF	MT	MD
		MT 50 MF 50 Y MT 60 MF 50	$-2,3*10^{-5}$	$-8*10^{-5}$	$-7*10^{-5}$	$-1*10^{-4}$
		MT 50 MF 60 Y MT 60 MF 60	$-2,3*10^{-5}$	$-9*10^{-5}$	$-7*10^{-5}$	$-1*10^{-4}$
		MT 50 MF 80 Y MT 60 MF 80	$-2,3*10^{-5}$	$-9*10^{-5}$	$-8*10^{-5}$	$-1*10^{-4}$
MT 50 MF 90 Y MT 60 MF 90	$-3,3*10^{-5}$	$-9*10^{-5}$	$-8*10^{-5}$	$-1*10^{-4}$		
Modelo 2 y 3	1	Entre	Relave	MF	MT	MD
		MT 60 MF 50 Y MT 80 MF 50	0	$-9,70*10^{-5}$	$-4,8*10^{-5}$	$-1,18*10^{-4}$
		MT 60 MF 60 Y MT 80 MF 60	0	$-9,7*10^{-5}$	$-3,8*10^{-5}$	$-1,18*10^{-4}$
		MT 60 MF 80 Y MT 80 MF 80	0	$-1,07*10^{-5}$	$-4,8*10^{-5}$	$-1,18*10^{-4}$
	MT 60 MF 90 Y MT 80 MF 90	0	$-1,07*10^{-5}$	$-5,8*10^{-5}$	$-1,18*10^{-4}$	
	Caso 2	Entre	Relave	MF	MT	MD
		MT 60 MF 50 Y MT 80 MF 50	$-3,5*10^{-5}$	$-1,5*10^{-4}$	$-1,1*10^{-4}$	$-15*10^{-5}$
		MT 60 MF 60 Y MT 80 MF 60	$-3,5*10^{-5}$	$-1,5*10^{-4}$	$-1,1*10^{-4}$	$-15*10^{-5}$
MT 60 MF 80 Y MT 80 MF 80		$-3,5*10^{-5}$	$-1,5*10^{-4}$	$-1,2*10^{-4}$	$-16*10^{-5}$	
MT 60 MF 90 Y MT 80 MF 90	$-3,5*10^{-5}$	$-1,6*10^{-4}$	$-1,2*10^{-4}$	$-16*10^{-5}$		
Modelo 3 y 4	Caso 1	Entre	Relave	MF	MT	MD
		MT 80 MF 50 Y MT 90 MF 50	0	$-4,1*10^{-5}$	$-1*10^{-5}$	$-4,7*10^{-5}$
		MT 80 MF 60 Y MT 90 MF 60	0	$-4,1*10^{-5}$	$-2,3*10^{-5}$	$-4,7*10^{-5}$
		MT 80 MF 80 Y MT 90 MF 80	0	$-4,1*10^{-5}$	$-2,3*10^{-5}$	$-4,7*10^{-5}$
	MT 80 MF 90 Y MT 90 MF 90	0	$-4,1*10^{-5}$	$-2,3*10^{-5}$	$-4,7*10^{-5}$	
	Caso 2	Entre	Relave	MF	MT	MD
		MT 80 MF 50 Y MT 90 MF 50	$-2*10^{-5}$	$-5*10^{-5}$	$-3*10^{-5}$	$-6*10^{-5}$
		MT 80 MF 60 Y MT 90 MF 60	$-2*10^{-5}$	$-6*10^{-5}$	$-4*10^{-5}$	$-7*10^{-5}$
MT 80 MF 80 Y MT 90 MF 80		$-2*10^{-5}$	$-6*10^{-5}$	$-4*10^{-5}$	$-7*10^{-5}$	
MT 80 MF 90 Y MT 90 MF 90	$-2*10^{-5}$	$-5*10^{-5}$	$-4*10^{-5}$	$-7*10^{-5}$		

A partir del análisis de estas tablas se pueden obtener varias conclusiones, en especial luego de ver la tendencia a que se repitan elementos en las tablas de decrementos.

De la primera tabla se puede ver que existen decrementos en los caudales a medida que se aumenta la densidad relativa del material de filtro, principalmente cuando se pasa de 60% a 80% y que estos decrementos son más grandes para el caso 2.

Por lo que si uno se queda fijo en un modelo y caso particular es posible ver como a medida que se aumenta la densidad relativa de un material de filtro las pérdidas continúan lo que indica que en efecto el caudal se va reduciendo.

Si se mira además la segunda tabla para el modelo 1 y el caso 1 se puede ver que los decrementos para el material de filtro, transición y dren son muy parecidos a los decrementos del modelo 2 caso 1 o el modelo 3 caso 1 y el modelo 4 caso 1. Esto nos quiere decir que independiente de que el material de transición mantenga su densidad relativa fija y solo el material de filtro varíe su densidad relativa, entonces los decrementos de caudales estarán relacionados directamente con el cuanto se aumenta la densidad relativa.

De la segunda tabla se puede ver que existen decrementos en los caudales a medida que se aumenta la densidad relativa del material de transición y que las mayores pérdidas de caudal se producen cuando se compara el modelo 2 con el modelo 3, principalmente en el caso 2.

Al mirar con detalle la segunda tabla se puede ver que existe un comportamiento similar al descrito en la primera tabla, y es que al variar la densidad relativa de un material de transición mientras se mantiene constante un material de filtro entonces la pérdida de caudal que se genera es muy parecida siempre y cuando los incrementos en la densidad relativa sean iguales.

La unión de estas dos tablas dice que existe un decremento en los caudales que atraviesan el sistema de flujo y está relacionado con la naturaleza del material y cuanto se varía su densidad relativa.

Los comportamientos descritos anteriormente parecen indicar que las pérdidas de caudal producidas al variar un material no son tan dependientes del material que lo acompaña.

Los caudales son más fáciles apreciarlos en las siguientes figuras, que recogen los datos de caudales del caso 1 y 2.

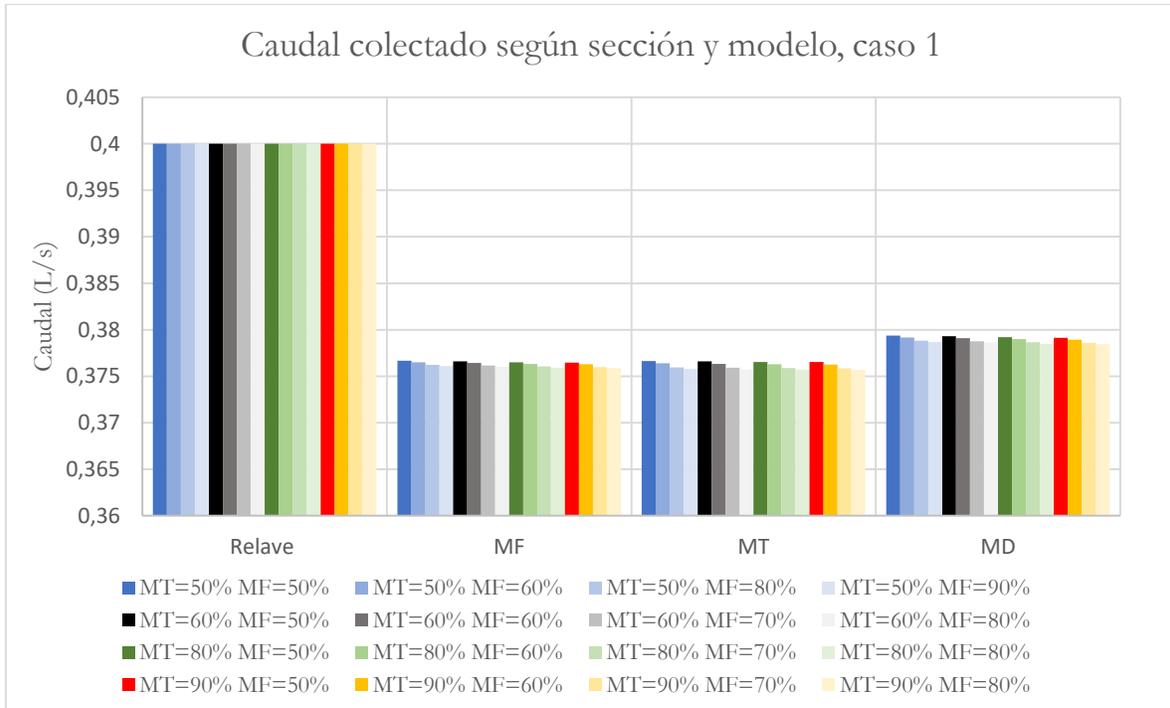


Figura 4-45. Caudales colectados en el sistema, caso 1. (Elaboración propia)

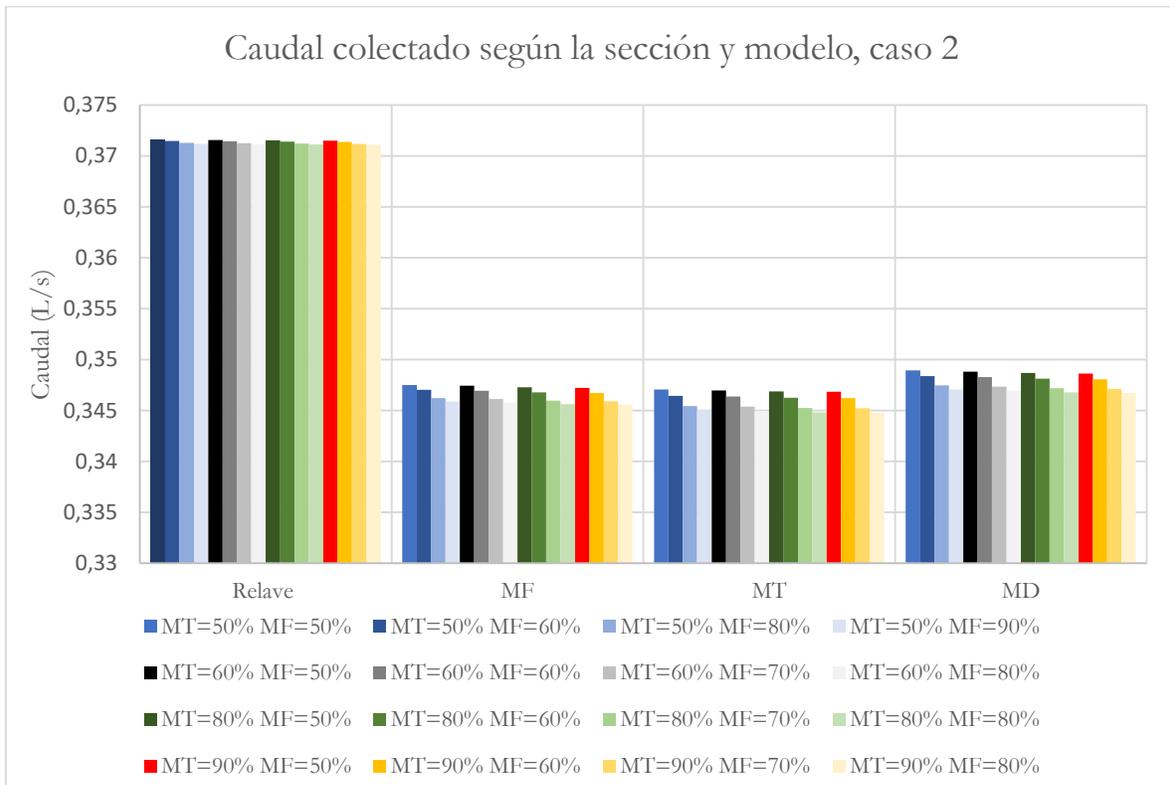


Figura 4-46. Caudales colectados en el sistema, caso 2. (Elaboración propia)

4.6.3 Modelos 5 al 7

Posterior a las simulaciones de los modelos 1, 2, 3 y 4 se ejecutaron los modelos 5, 6 y 7, los cuales corresponden a colocar el material de filtro y de transición como uno solo, cuya permeabilidad este regida por la información recogida anteriormente.

La figura 4-47 muestra cómo se ve un modelo para el caso 1 y la figura 4-48 como se ve ese mismo modelo para el caso 2, se van a omitir las demás imágenes ya que la geometría del modelo no cambia, solo los colores y propiedades de los materiales, sin embargo, en Anexos se podrán ver los modelos.

Luego se presentan en tres diferentes tablas los caudales recogidos por las diferentes secciones del sistema de drenaje para los modelos 5, 6 y 7, tanto para el caso 1 como el caso 2.

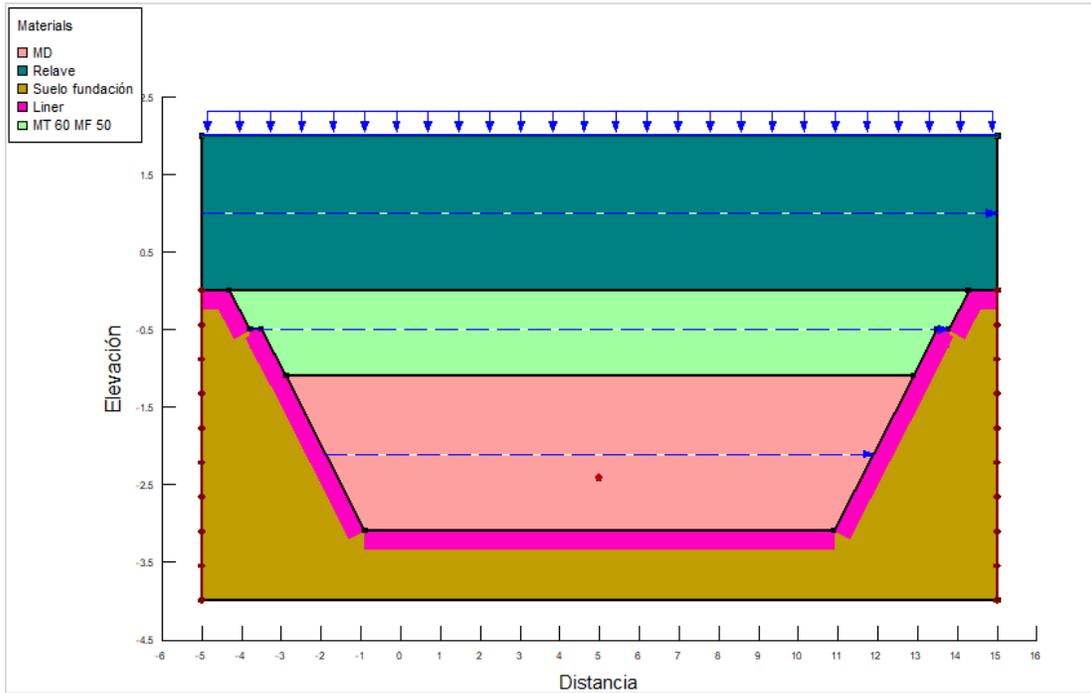


Figura 4-47. Vista del modelo 5 (MT=60% DR y MF variable) para el caso 1. (Elaboración propia)

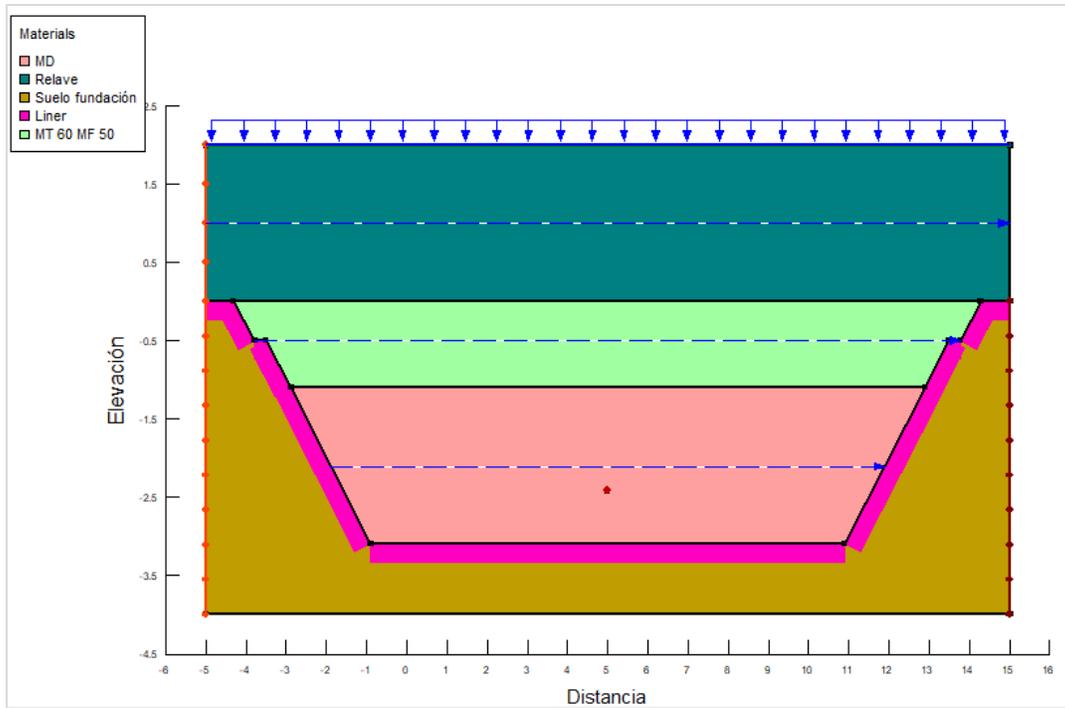


Figura 4-48. Vista del modelo 5 (MT=60% DR y MF variable) para el caso 2, notar el cambio en la condición límite. (Elaboración propia)

Tabla 4-56. Resultados de causales para modelo 5.
(Elaboración propia)

Modelo 5			
Configuración	CASO	Sección de flujo	Caudal corregido (L/s)
MT=60% MF=50%	1	Relave	0,40
		Mixto	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,37
		Mixto	0,35
		MD	0,35
MT=60% MF=60%	1	Relave	0,40
		Mixto	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,38
		Mixto	0,35
		MD	0,35
MT=60% MF=70%	1	Relave	0,40
		Mixto	0,38
		MD	0,37
	2	Relave	0,37
		Mixto	0,35
		MD	0,34
MT=60% MF=80%	1	Relave	0,40
		Mixto	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,37
		Mixto	0,344
		MD	0,34

Tabla 4-57. Resultados de causales para modelo 6.
(Elaboración propia)

Modelo 6			
Configuración	CASO	Sección de flujo	Caudal corregido (L/s)
MT=70% MF=50%	1	Relave	0,40
		Mixto	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,37
		Mixto	0,35
		MD	0,35
MT=70% MF=60%	1	Relave	0,40
		Mixto	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,37
		Mixto	0,35
		MD	0,35
MT=70% MF=70%	1	Relave	0,40
		Mixto	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,37
		Mixto	0,35
		MD	0,34
MT=70% MF=80%	1	Relave	0,40
		Mixto	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,37
		Mixto	0,34
		MD	0,34

Tabla 4-58. Resultados de caudales para modelo 7. (Elaboración propia)

Modelo 7			
Configuración	CASO	Sección de flujo	Caudal corregido (L/s)
MT=80% MF=50%	1	Relave	0,40
		Mixto	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,38
		Mixto	0,35
		MD	0,35
MT=80% MF=60%	1	Relave	0,40
		Mixto	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,37
		Mixto	0,35
		MD	0,34
MT=80% MF=70%	1	Relave	0,40
		Mixto	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,37
		Mixto	0,34
		MD	0,34
MT=80% MF=80%	1	Relave	0,40
		Mixto	0,38
		MD	0,38
	2	Relave	0,37
		Mixto	0,34
		MD	0,34

De estas tablas se puede ver que en general el caudal que pasa por las secciones delimitadas en los modelos va disminuyendo, sin embargo, para realizar un mejor análisis se calcula la disminución de caudal para un mismo modelo, así como entre modelos.

4.6.4 Pérdidas de caudal modelos 5 al 7

A continuación, se presentan dos tablas similares a las descritas anteriormente, es decir, la tabla 4-59 que permite ver cuánto es el caudal que se pierde al variar el material de filtro y la tabla 4-60 que permite ver cómo cambian los caudales cuando se varía la densidad relativa del material de filtro.

Tabla 4-59. Pérdidas de caudal para un mismo modelo. (Elaboración propia)

Diferencias de caudal (L/s)					
Modelo	CASO	Entre	Relave	Mixto	MD
5	Caso 1	MT 60 MF 50 y MT60 MF 60	0	-6,4*10 ⁻⁴	-6*10 ⁻⁵
		MtT60 MF 60 y MT 60 MF 70	0	-5,7*10 ⁻⁴	-5,3*10 ⁻⁴
		MT 60 MF 70 y MF 60 MF 80	0	-5,3*10 ⁻⁴	-4,9*10 ⁻⁴
	Caso 2	Entre	Relave	Mixto	MD
		MT 60 MF 50 y MT60 MF 60	-4*10 ⁻⁵	-1,6*10 ⁻³	-1,55*10 ⁻³
		MtT60 MF 60 y MT 60 MF 70	-3,5*10 ⁻⁴	-1,46*10 ⁻³	-1,37*10 ⁻³
MT 60 MF 70 y MF 60 MF 80	-3,1*10 ⁻⁴	-1,31*10 ⁻³	-1,24*10 ⁻³		
6	Caso 1	Entre	Relave	Mixto	MD
		MT70 MF 50 y MT 70 MF 60	0	-8*10 ⁻⁴	-7,5*10 ⁻⁴
		MT70 MF 60 y MT 70 MF 70	0	-7,3*10 ⁻⁴	-6,8*10 ⁻⁴
	MT70 MF 70 y MT 70 MF 80	0	-6,8*10 ⁻⁴	-6,3*10 ⁻⁴	
	Caso 2	Entre	Relave	Mixto	MD
		MT70 MF 50 y MT 70 MF 60	-5*10 ⁻⁴	-2,04*10 ⁻³	-1,94*10 ⁻³
MT70 MF 60 y MT 70 MF 70		-4,4*10 ⁻⁴	-1,85*10 ⁻³	-1,75*10 ⁻³	
MT70 MF 70 y MT 70 MF 80	-4*10 ⁻⁴	-1,7*10 ⁻³	-1,6*10 ⁻³		
7	Caso 1	Entre	Relave	Mixto	MD
		MT 80 MF50 y MT 80 MF 60	0	-8,4*10 ⁻⁴	-7,8*10 ⁻⁴
		MT 80 MF 60 y MT 80 MF 70	0	-7,6*10 ⁻⁴	-7,1*10 ⁻⁴
	MT 80 MF 70 y MT 80 MF 80	0	-7,1*10 ⁻⁴	-6,5*10 ⁻⁴	
	Caso 2	Entre	Relave	Mixto	MD
		MT 80 MF50 y MT 80 MF 60	-4,9*10 ⁻⁴	-2*10 ⁻³	-1,98*10 ⁻³
MT 80 MF 60 y MT 80 MF 70		-4,4*10 ⁻⁴	-1,88*10 ⁻³	-1,77*10 ⁻³	
MT 80 MF 70 y MT 80 MF 80	-4*10 ⁻⁴	-1,72*10 ⁻³	-1,61*10 ⁻³		

Tabla 4-60. Pérdidas de caudal para distintos modelos. (Elaboración propia)

Diferencias de caudal (L/s)						
Comparación	CASO	Entre	Relave	Mixto	MD	
Modelo 5 y 6	1	MT 60 MF 50 Y MT 70 MF 50	0	$7,4*10^{-5}$	$6,7*10^{-5}$	
		MT 60 MF 60 Y MT 70 MF 60	0	$-8,6*10^{-5}$	$-8,3*10^{-5}$	
		MT 60 MF 70 Y MT 70 MF 70	0	$-2,46*10^{-4}$	$-2,3*10^{-4}$	
		MT 60 MF 80 Y MT 70 MF 80	0	$-3,96*10^{-4}$	$-3,73*10^{-4}$	
	2	Entre	Relave	Mixto	MD	
		MT 60 MF 50 Y MT 70 MF 50	$1,70*10^{-5}$	$1*10^{-4}$	$8*10^{-5}$	
		MT 60 MF 60 Y MT 70 MF 60	$-8,30*10^{-5}$	$-3,4*10^{-4}$	$-3,1*10^{-4}$	
		MT 60 MF 70 Y MT 70 MF 70	$-1,73*10^{-4}$	$-7,3*10^{-4}$	$-6,9*10^{-4}$	
		MT 60 MF 80 Y MT 70 MF 80	$-2,63*10^{-4}$	$-1,12*10^{-3}$	$-1,05*10^{-3}$	
Modelo 6 y7	1	Entre	Relave	Mixto	MD	
		MT 70 MF 50 Y MT 80 MF 50	0	$-1,19*10^{-3}$	$-1,12*10^{-3}$	
		MT760 MF 60 Y MT 80 MF 60	0	$-1,23*10^{-3}$	$-1,15*10^{-3}$	
		MT 70 MF 70 Y MT 80 MF 70	0	$-1,26*10^{-3}$	$-1,18*10^{-3}$	
			MT 70 MF 80 Y MT 80 MF 80	0	$-1,29*10^{-3}$	$-1,2*10^{-3}$
	2	Entre	Relave	Mixto	MD	
		MT 70 MF 50 Y MT 80 MF 50	$-2,52*10^{-4}$	$-1,33*10^{-3}$	$-1,2*10^{-3}$	
		MT760 MF 60 Y MT 80 MF 60	$-2,42*10^{-4}$	$-1,29*10^{-3}$	$-1,24*10^{-3}$	
		MT 70 MF 70 Y MT 80 MF 70	$-2,42*10^{-4}$	$-1,32*10^{-3}$	$-1,26*10^{-3}$	
				MT 70 MF 80 Y MT 80 MF 80	$-2,42*10^{-4}$	$-1,34*10^{-3}$

Al igual que con las tablas anteriores se puede observar pérdidas de caudal a medida que se aumenta la densidad relativa del material de filtro o de transición.

Los caudales captados por el sistema en los diferentes modelos se resumen en la figura 4-49 para el caso 1 y figura 4-50 para el caso 2.

De la primera tabla se puede ver que existen decrementos en los caudales a medida que se aumenta la densidad relativa del material de filtro y que estos son menores a medida que aumenta la densidad relativa, lo cual se asemeja bastante con el comportamiento de las permeabilidades saturadas y que existe una sensibilidad. Los decrementos al igual que en el caso anterior son mayores en el caso 2.

De la segunda tabla se puede ver que en general existen decrementos en los caudales a medida que se aumenta la densidad relativa del material de transición y que las mayores pérdidas de caudal se producen cuando se aumenta la densidad relativa de los materiales de transición, esto quiere decir que a medida que se hace más denso el material de transición se va perdiendo más caudal, lo que retrata el efecto de la sobrecompactación.

Los decrementos de caudal para estos modelos no son tan parecidos entre sí como en los casos anteriores, lo que indicaría la importancia del material que acompaña.

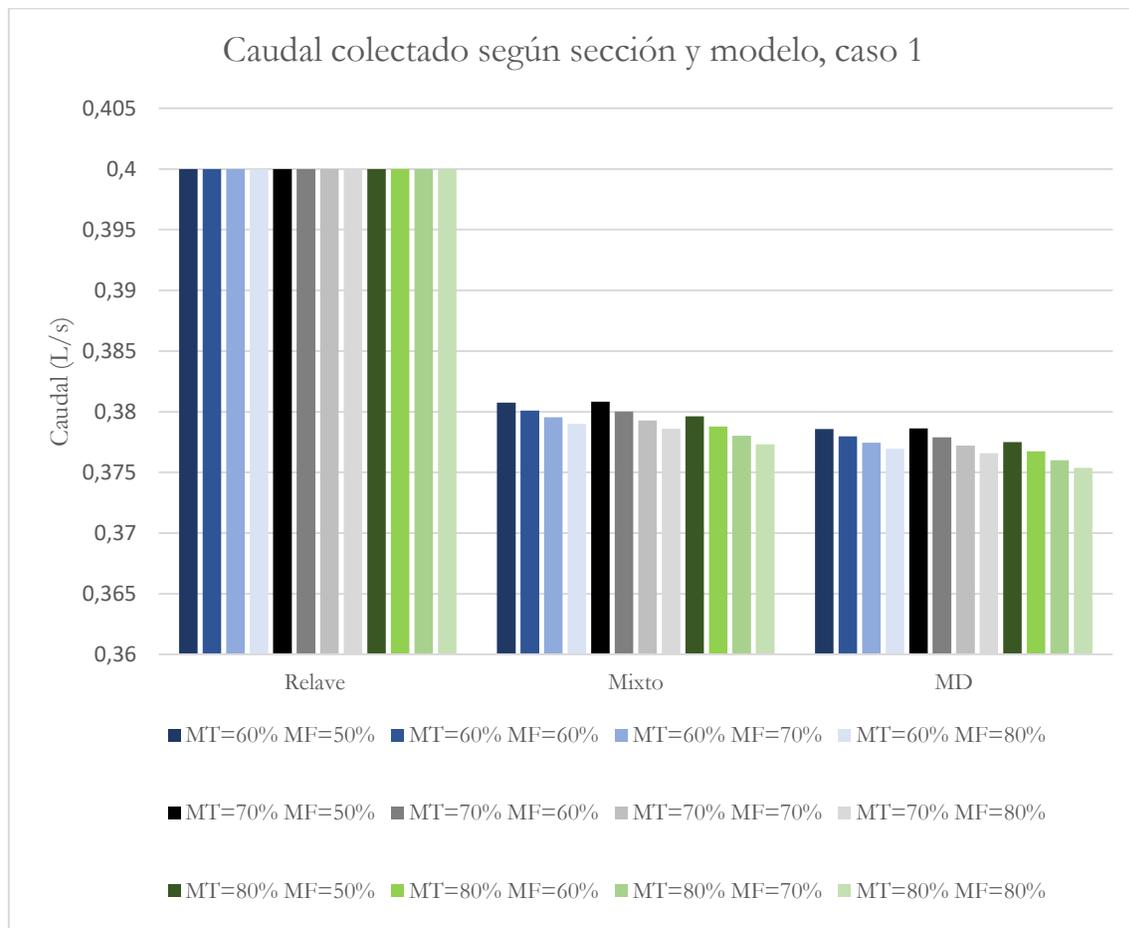


Figura 4-49. Caudales colectados por el sistema, caso 1. (Elaboración propia)

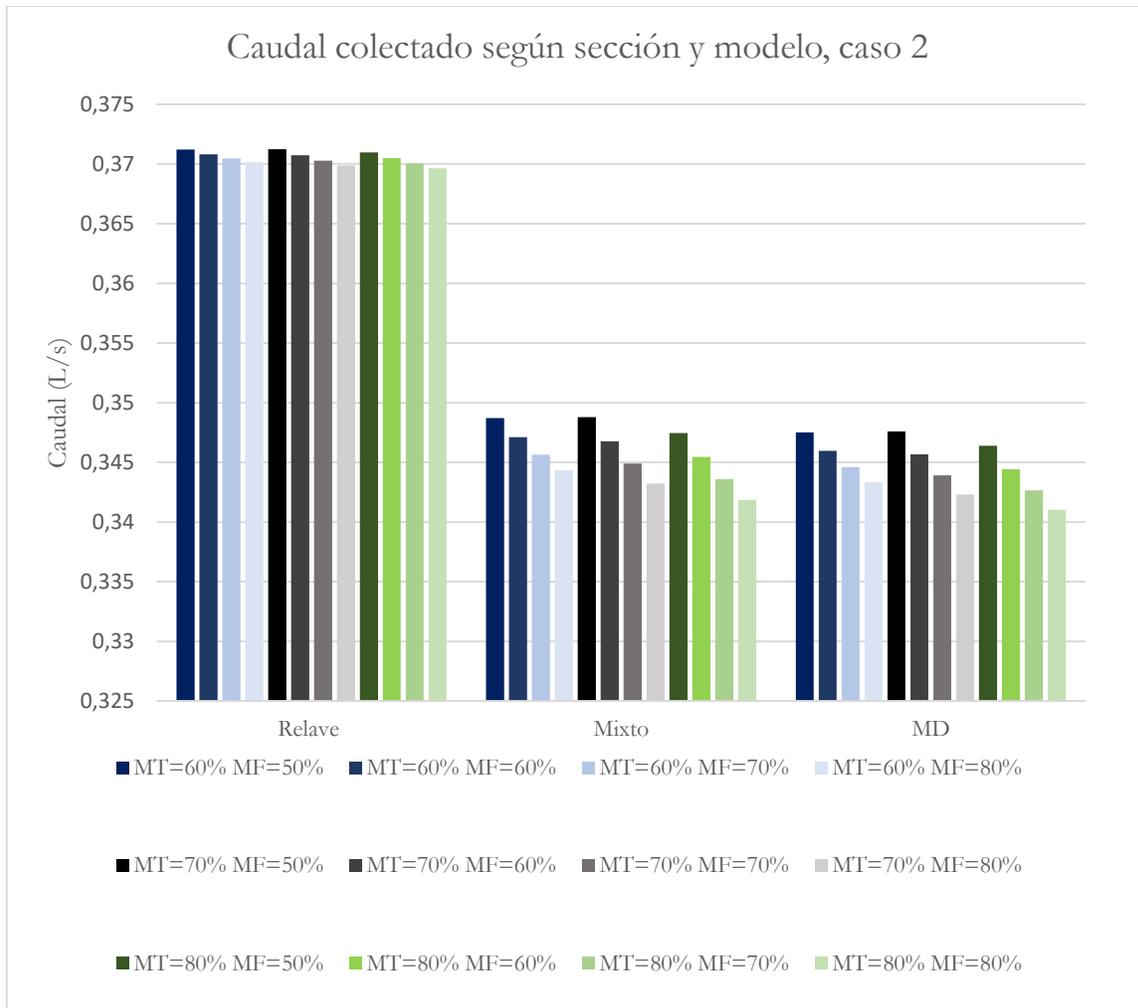


Figura 4-50. Caudales colectados por el sistema, caso 2. (Elaboración propia)

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

En esta sección se revisan las conclusiones respecto a lo desarrollado en la memoria, además de sugerir recomendaciones para investigaciones del mismo tipo o parecidas.

5.1 Conclusiones

Se realizó un estudio profundo acerca de las normativas internacionales a la hora de crear un sistema de drenaje, partiendo con curvas granulométricas de un relave y finalizando con propuestas para los diferentes materiales que componen un sistema de drenaje.

Dentro del estudio se analizó además las densidades máximas y mínimas de los materiales utilizados, llegando a comprender que tanto las densidades máximas y mínimas corresponden a valores sumamente importantes, por lo que es importante verificar la confiabilidad que entregan estos ensayos, de manera que se evite tener diferentes valores de densidad relativa para un mismo material.

Se realizaron estudios de permeabilidad para los materiales que componen el sistema de drenaje, obteniendo además algunas estimaciones indirectas en el camino. De dichos procesos se puede decir claramente que no es recomendable utilizar solo un estimador, sino que suele ser recomendable utilizar una gran variedad a fin de definir una banda de permeabilidad. Respecto a la estimación indirecta de la permeabilidad saturada se puede decir que mientras más complejo y completo sea el estimador más confiable serán los resultados.

De los ensayos de permeabilidad a carga constante para los materiales utilizados se concluyó que existe un espectro de valores de permeabilidad para un mismo nivel de acomodo o de densidad relativa, pero que en general el aumentar la densidad relativa de un material conducirá a que la permeabilidad saturada de un material disminuya de forma potencial siendo esta curva de disminución muy parecida a una asíntota cuando se alcanzan valores de densidad relativa superiores a 80%, siendo más evidente la disminución en valores altos de densidad relativa. Por lo que también se concluyó que los ajustes potenciales se adaptan bien al relacionar la permeabilidad saturada de un material con su densidad relativa.

Al ensayar los materiales de filtro y transición juntos se observa que los valores de permeabilidad saturada de estos sistemas se encuentran acotados entre las curvas globales de permeabilidad saturada de materiales de transición y filtro originales, y que el incrementar la densidad relativa del material de filtro o transición se generará una disminución en la capacidad de filtración.

El proceso de simulación ayudó a determinar que efectivamente existe una relación inversamente proporcional entre la densidad relativa y el caudal en el sistema de drenaje, y que el utilizar materiales sobrecompactados hace que las relaciones de permeabilidad descritas en la normativa internacional sean menores que las alcanzadas, lo que generará un sistema menos eficiente.

Además, es interesante señalar que si se desea buscar escenarios más conservadores puede ser buena idea considerar las variaciones que existen al modelar un sistema por partes separadas con propiedades individuales o como un todo con propiedades generales.

Aunque las diferencias entre caudales que se presentaron pueden parecer pequeñas, sin embargo, es modelo 2D, por lo que al considerar la longitud del sistema de drenaje y la cantidad de drenajes que existen dentro de una obra minera las diferencias de caudal se convierten en valores sumamente importantes, aún más si se consideran otros factores como:

- **Succión:** El modelo de SEEP/W creado no contempla la generación succión en las capas de filtro, factor que podría aumentar aún más la disminución de caudal entrante al dren.
- **Colmatación:** El modelo no contempla que las partículas más pequeñas (de diferentes sectores del dren) con el paso del tiempo migren hacia zonas del material más grueso, por lo que en la realidad las permeabilidades disminuyen con el paso del tiempo aún más.

Todos estos factores incrementarán las diferencias entre lo planificado y lo logrado en el sistema de drenaje, produciendo problemas de eficiencia, de estabilidad o incluso erosión interna.

5.2 Recomendaciones

Se pueden reconocer algunos temas o áreas en las que sería recomendable mejorar para futuras investigaciones, entre las cuales se encuentran:

- Condiciones de trabajo: Poder caracterizar de mejor manera los materiales a utilizar, puesto que al realizar una memoria en casa no siempre se puede disponer de la totalidad de los implementos de laboratorio o de los equipos.
- Estudio in situ: Poder realizar estudios aplicados a un sistema de drenaje existente, es decir, poder trabajar con materiales ya definidos y/o caracterizados.
- Diferentes normativas: Utilizar normativas distintas en la creación de filtros, aunque ICOLD es bastante conocido se sabe que existen diferentes criterios para la creación de filtros, por lo que sería interesante analizar la sensibilidad de alguno de esos casos.
- Complejizar los modelos: Una buena recomendación o continuación de esta investigación sería el hacer modelos más complejos o que se acerquen más a la realidad.

REFERENCIAS

- ASTM D 2434. (Sin fecha). *Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)*
- ASTM D 422. (Sin fecha). *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.*
- ASTM D 4254. (Sin fecha). *Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density*
- Blight, G. (2010). *Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities*. London: Taylor & Francis Group.
- Craig, R. F. (2004). *Craig's Soil Mechanics*. London: Spoon Press.
- Das, B. M. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. Cengage Learning Latin America.*
- Das, B. M. (2001). *Principios de Ingeniería en Cimentaciones*. International Thomson .
- Fell, R., M. P., Stapledon, D., Bell, G., & Foster, M. (2015). *Geotechnical Engineering of Dams*. London: CRC Press.
- Gallage, C., Kodikara, J., & Uchimura, T. (2013). *Laboratory measurement of hydraulic conductivity functions of two unsaturated sandy soils during drying and wetting processes. Soils and Foundations*, 417-430.
- ICOLD. (1994). Bulletin N°95: Embankments Dams granular filters and drains.
- ICOLD. (1996). *Bulletin N°97: Tailings dams design of drainage.*
- Metwaly, M., Khalil, M., Al-Sayed, E.-S., & Osman, S. (2006). *A hydrogeophysical study to estimate water seepage from northwestern Lake Nasser, Egypt. Journal of Geophysics and Engineering*, 21-27.
- NCh1726. (1980). Mecánica de suelos - Determinación de las densidades máxima y mínima y cálculo de la densidad relativa en suelos no cohesivos. En Norma Chilena NCh1726.Of 1980. Decreto Núm. 286. Chile: Instituto Nacional de Normalización, INN-Chile.
- Outlet Minero. (27 de Mayo de 2016). *Outlet MInero*. Obtenido de <http://outletminero.org/importancia-de-la-mineria-en-nuestras-vidas/>
- Robbins, B. A., & Griffiths, D. V. (November de 2018). *ResearchGate*. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/328675105>

- Sherard, J., L., Dunnigan, L. P. (1986). *Guide for determining the gradation of sand and gravel filters. Soil Mechanics Note 1, US Department of Agriculture, Soil Conservation Service.*
- Sullca, J., & Quispe, E. (2015). Cálculo de la confiabilidad de las ecuaciones de permeabilidad según Kozeny-Carman y Allen Hazen en arenas naturales. *Ciencia y Tecnología*, 73-84.
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1948). *Soil mechanics in engineering practice*. New York: J. Wiley.
- Thanikachalam, V. & Sakthivadivel (1974). *Rational Design Criteria for Protective Filters. Canadian Geotechnical Journal* 11.
- US Department of the Interior Bureau of Reclamation (1987). *Design Standards, Embankments Dms N°13.*
- Vick, S. G. (1990). *Planing, Design, and Analysis of Tailng Dams*. Vancouver: BīTech.
- Whitlow, R. (1995). *Basic soil mechanics (third edition)*. Addison Wesley Longman Limited.
- Ziems, J. (1968). *Beitrag zur Kontakterosion nitchbindiger Erdstoffe, Dissertation. TU Dresden.*

ANEXOS

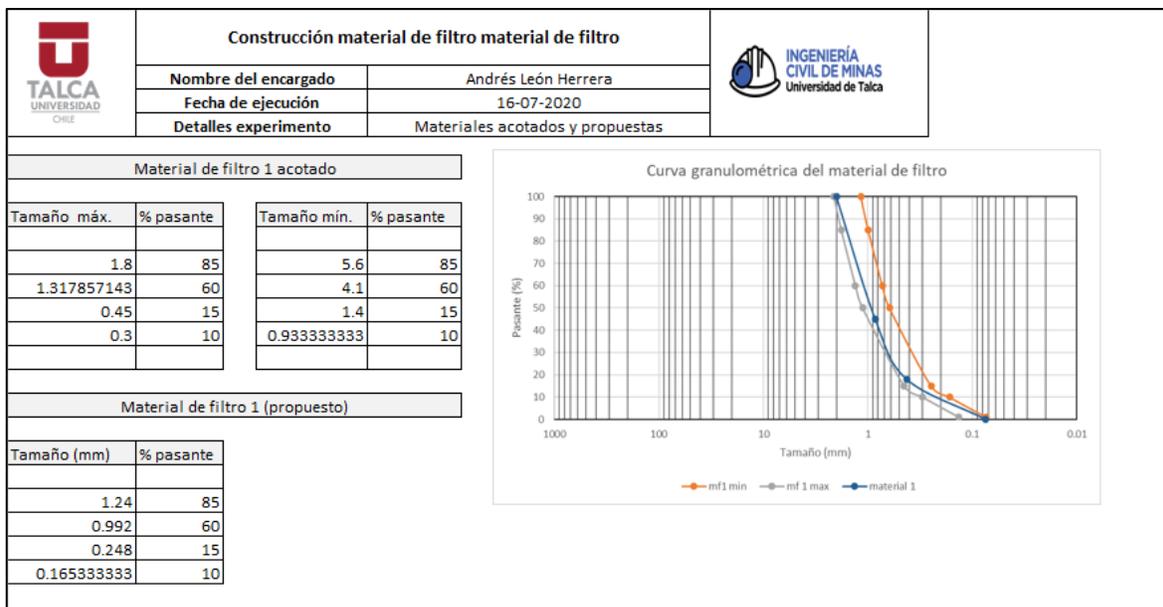
En esta sección se muestran tablas, fotografías, gráficas y cualquier tipo de información que sirva de ayuda a los temas mostrados en las secciones anteriores.

	Construcción material de filtro material de filtro				
	Nombre del encargado	Andrés León Herrera			
	Fecha de ejecución	18-06-2020			
	Detalles experimento	Diseño de materiales			
Información relave		Material de filtro 1			
Tamaño (mm)	% pasante	d15 máximo <	2	d10 máximo <	0.8267
0.5	85	d15 mínimo >	0.248	d10 mínimo >	0.1653
0.08	20	d15 máx. corregido <	1.24		
0.074	17			d60 máximo <	4.96
0.062	15	d85 máximo <	6.2	d60 mínimo >	0.992
0.05	13	d85 mínimo >	1.24		
0.02	10				
		Tamaño máx.	% pasante	Tamaño mín.	% pasante
		6.2	85	1.24	85
		4.96	60	0.992	60
		1.24	15	0.248	15
		0.826666667	10	0.165333333	10

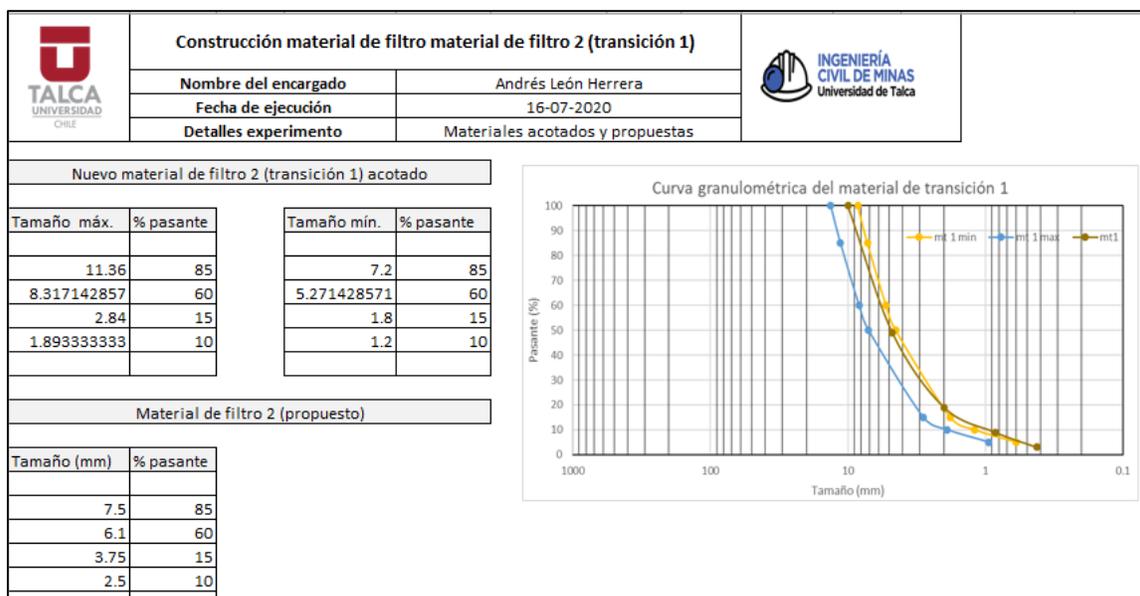
Anexo 1. Creación del material de filtro.

	Construcción material de filtro material de filtro 2 (transición 1)						
	Nombre del encargado	Andrés León Herrera					
	Fecha de ejecución	18-06-2020					
	Detalles experimento	Diseño de materiales					
Material de filtro 2 (considerando curva maxima)		Material de filtro 2 (considerando curva minima)					
d15 máximo <	24.8	d15 máximo <	4.96				
d15 mínimo >	4.96	d15 mínimo >	0.992				
d15 máx. corregido <	24.8	d15 máx. corregido <	4.96				
d85 máximo <	124	d85 máximo <	24.8				
d85 mínimo >	24.8	d85 mínimo >	4.96				
d10 máximo <	16.5333	d10 máximo <	3.306666667				
d10 mínimo >	3.30667	d10 mínimo >	0.661333333				
d60 máximo <	99.2	d60 máximo <	19.84				
d60 mínimo >	19.84	d60 mínimo >	3.968				
Tamaño máx.	% pasante	Tamaño mín.	% pasante	Tamaño máx.	% pasante	Tamaño mín.	% pasante
124	85	24.8	85	4.96	85	3.968	60
99.2	60	19.84	60	19.84	60	3.968	60
24.8	15	4.96	15	4.96	15	0.992	15
16.53333333	10	3.306666667	10	3.306666667	10	0.661333333	10

Anexo 2. Creación del material de filtro 2 (transición 1)



Anexo 3. Construcción de material de filtro.



Anexo 3. Detalles de creación material de transición.



Anexo 5. Sacos de arena utilizados en la creación de materiales de filtro y transición.



Anexo 6. Serie de tamices utilizados en el proceso de creación de materiales.



Anexo 7. Proceso de tamizado de sacos de arena



Anexo 8. Tipos de material proveniente de los sacos de arena.

Construcción de materiales							INGENIERÍA CIVIL DE MINAS Universidad de Talca						
TALCA UNIVERSIDAD CHILE		Nombre del encargado		Andrés León Herrera									
		Fecha de ejecución		01-08-2020 y 03-08-2020									
		Detalles experimento		Tamizaje de sacos									
Saco 1	Tamiz	Tamaño (mm)	Peso Seco (gr)	% Retenido	Ret. Acumulado	% pasante	Saco 3	Tamiz	Tamaño (mm)	Peso Seco (gr)	% Retenido	Ret. Acumulado	% pasante
20555	Nº 4	5	206.7	1.005614315	1.005614315	98.994386	20791.6	Nº 4	5	164.7	0.792146829	0.792146829	99.20785317
	Nº 10	2	160.1	0.778901073	1.784515388	98.215485		Nº 10	2	184.6	0.887858558	1.680005387	98.31999461
	Nº 20	0.85	258	1.255193485	3.039708873	96.960291		Nº 20	0.85	331.2	1.592950999	3.272956386	96.72704361
	Nº 40	0.5	2332.3	11.3468518	14.38656067	85.613439		Nº 40	0.5	3947	18.983628	22.25658439	77.74341561
	Nº 200	0.08	16792.8	81.69850058	96.08506125	3.9149387		Nº 200	0.08	16062.9	77.25668058	99.51326497	0.486735028
	Fino	0.001	804.7	3.914938749	100	0		Fino	0.001	101.2	0.486735028	100	0
Saco 2	Tamiz	Tamaño (mm)	Peso Seco (gr)	% Retenido	Ret. Acumulado	% pasante	Saco 4	Tamiz	Tamaño (mm)	Peso Seco (gr)	% Retenido	Ret. Acumulado	% pasante
19859	Nº 4	5	161.3	0.812242555	0.812242555	99.187757	19000	Nº 4	5	6175	32.5	32.5	67.5
	Nº 10	2	128.3	0.646067699	1.458310253	98.54169		Nº 10	2	4655	24.5	57	43
	Nº 20	0.85	248.6	1.251850584	2.710160837	97.289839		Nº 20	0.85	8170	43	100	0
	Nº 40	0.5	3269	16.46138197	19.17154281	80.828457		Fino	0.001	0	0	100	0
	Nº 200	0.08	15563.2	78.37007644	97.54161925	2.4583808							
	Fino	0.001	488.2	2.458380752	100	0							

Anexo 9. Detalles de contenido granulométrico de los sacos.



Anexo 10. Materiales de transición (izquierda) y de filtro (derecha).

		Ensayo densidad máxima y mínima						
		Nombre del encargado			Andrés León Herrera			
		Fecha de ejecución			10-08-2020			
		Detalles experimento			Material de filtro			
Densidad mínima seca								
Dato	Unidad	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 4	Experimento 5	Experimento 6	
Masa del molde	g	127.1	127.1	127.1	127.1	127.1	127.1	
Altura del molde	cm	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	
Diámetro del molde	cm	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	
Masa del molde+suelo	g	2874.4	2814.3	2870	2810.8	2890	2860.3	
Masa de suelo seca	g	2747.3	2687.2	2742.9	2683.7	2762.9	2733.2	
Volumen ocupado muestra	cc	1792.573133	1792.573133	1792.573133	1792.573133	1792.573133	1792.573133	
Densidad seca	g/cc	1.532601348	1.499074124	1.530146776	1.497121624	1.541303922	1.52473556	
Densidad mínima seca	g/cc	1.497121624						
Densidad máxima seca								
Dato	Unidad	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 4	Experimento 5	Experimento 6	
Masa del molde	g	127.1	127.1	127.1	127.1	127.1	127.1	
Altura de la muestra	cm	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	
Diámetro del molde	cm	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	
Masa del molde+suelo	g	2928.3	2989.6	2864.3	3007.1	2966.8	2839.6	
Masa de muestra	g	2801.2	2862.5	2737.2	2880	2839.7	2712.5	
Reducción de altura de muestra	cm	1.1	0.8	1.4	0.7	0.9	1.5	
Volumen ocupado muestra	cc	1585.012034	1641.619606	1528.404461	1660.488797	1622.750415	1509.53527	
Densidad seca	g/cc	1.767305194	1.743704808	1.790887209	1.734429046	1.749930225	1.796910648	
Densidad máxima seca	g/cc	1.796910648						

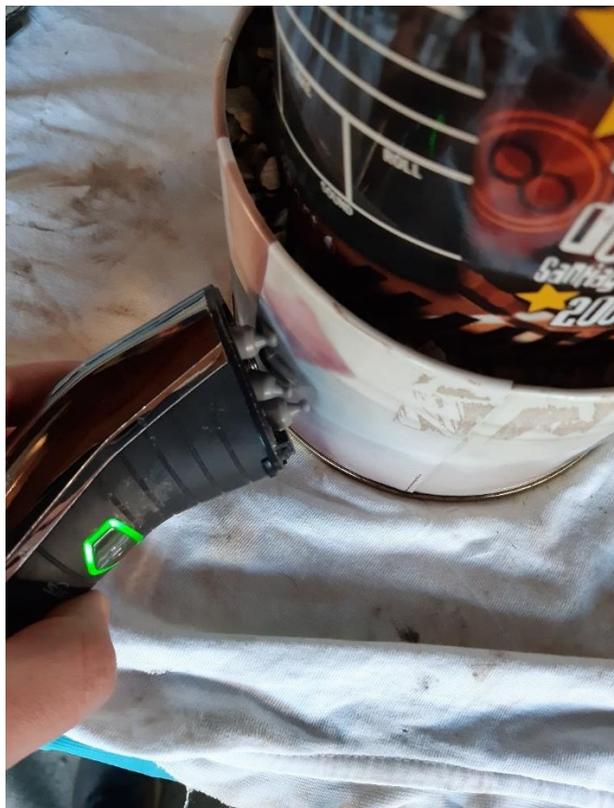
Anexo 11. Detalles ensayos de densidad máxima y mínima para material de filtro.

		Ensayo densidad máxima y mínima						
		Nombre del encargado			Andrés León Herrera			
		Fecha de ejecución			11-08-2020			
		Detalles experimento			Material de transición 1			
Densidad mínima seca								
Dato	Unidad	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 4	Experimento 5	Experimento 6	
Masa del molde	g	127.1	127.1	127.1	127.1	127.1	127.1	
Altura del molde	cm	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	
Diámetro del molde	cm	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	
Masa del molde+suelo	g	2618.2	2663.4	2673.8	2590.5	2643.2	2634.9	
Masa de suelo seca	g	2491.1	2536.3	2546.7	2463.4	2516.1	2507.8	
Volumen ocupado muestra	cc	1792.573133	1792.573133	1792.573133	1792.573133	1792.573133	1792.573133	
Densidad seca	g/cc	1.389678309	1.414893458	1.420695174	1.374225662	1.403624741	1.398994526	
Densidad mínima seca	g/cc	1.374225662						
Densidad máxima seca								
Dato	Unidad	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 4	Experimento 5	Experimento 6	
Masa del molde	g	127.1	127.1	127.1	127.1	127.1	127.1	
Altura de la muestra	cm	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	
Diámetro del molde	cm	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	
Masa del molde+suelo	g	2790.3	2717.9	2798.3	2746	2725.3	2727.5	
Masa de muestra	g	2663.2	2590.8	2671.2	2618.9	2598.2	2600.4	
Reducción de altura de muestra	cm	0.9	1.4	1	1.5	1.3	1.2	
Volumen ocupado muestra	cc	1622.750415	1528.404461	1603.881224	1509.53527	1547.273652	1566.142843	
Densidad seca	g/cc	1.64116427	1.695101046	1.665459985	1.734904809	1.679211688	1.660384946	
Densidad máxima seca	g/cc	1.734904809						

Anexo 12. Detalles ensayos de densidad máxima y mínima para material de transición 1.



Anexo 13. Realización de ensayo de densidad mínima.



Anexo 14. Realización ensayo de densidad máxima.

		Ensayo de permeabilidad de carga constante								
		Nombre del encargado	Andrés León Herrera							
		Fecha de ejecución	16-08-2020 y 17-08-2020							
		Detalles experimento	Material de filtro							
Densidad relativa (%)	50						Densidad relativa (%)	60		
Diámetro (m)	0.075						Diámetro (m)	0.075		
Largo (m)	0.222						Largo (m)	0.224		
H1 (m)	1.2						H1 (m)	1.2		
H2 (m)	0.43						H2 (m)	0.43		
A (m ²)	0.004417865						A (m ²)	0.004417865		
i	3.468468468						i	3.4375		
Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)		Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)
0.00015	18.82	7.97024E-06	0.0005201	4.E-04		0.00015	23.89	6.27878E-06	0.0004134	0.0003655
0.0003	47.77	6.28009E-06	0.0004098			0.0003	57.39	5.22739E-06	0.0003442	
0.00045	74.01	6.08026E-06	0.0003968			0.00045	87.43	5.14697E-06	0.0003389	
Densidad relativa (%)	80						Densidad relativa (%)	90		
Diámetro (m)	0.075						Diámetro (m)	0.075		
Largo (m)	0.23						Largo (m)	0.23		
H1 (m)	1.2						H1 (m)	1.2		
H2 (m)	0.43						H2 (m)	0.43		
A (m ²)	0.004417865						A (m ²)	0.004417865		
i	3.347826087						i	3.347826087		
Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)		Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)
0.00015	25.51	5.88005E-06	0.0003976	0.0003555		0.00015	27.49	5.45653E-06	0.0003689	0.0003239
0.0003	59.78	5.0184E-06	0.0003393			0.0003	67.13	4.46894E-06	0.0003022	
0.00045	92.34	4.87329E-06	0.0003295			0.00045	101.19	4.44708E-06	0.0003007	

Anexo 15. Detalles de ensayos de permeabilidad de carga constante para el material de filtro.

		Ensayo de permeabilidad de carga constante								
		Nombre del encargado	Andrés León Herrera							
		Fecha de ejecución	14-08-2020 y 15-08-2020							
		Detalles experimento	Material de transición 1							
Densidad relativa (%)	50						Densidad relativa (%)	60		
Diámetro (m)	0.075						Diámetro (m)	0.075		
Largo (m)	0.223						Largo (m)	0.225		
H1 (m)	1.2						H1 (m)	1.2		
H2 (m)	0.43						H2 (m)	0.43		
A (m ²)	0.004417865						A (m ²)	0.004417865		
i	3.452914798						i	3.422222222		
Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)		Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)
0.00015	4.25	3.52941E-05	0.0023137	0.00224		0.00015	4.38	3.42466E-05	0.0022651	0.0021285
0.0003	8.84	3.39367E-05	0.0022247			0.0003	9.61	3.12175E-05	0.0020648	
0.00045	13.6	3.30882E-05	0.0021691			0.00045	14.48	3.10773E-05	0.0020555	
Densidad relativa (%)	80						Densidad relativa (%)	90		
Diámetro (m)	0.075						Diámetro (m)	0.075		
Largo (m)	0.23						Largo (m)	0.23		
H1 (m)	1.2						H1 (m)	1.2		
H2 (m)	0.43						H2 (m)	0.43		
A (m ²)	0.004417865						A (m ²)	0.004417865		
i	3.347826087						i	3.347826087		
Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)		Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)
0.00015	4.46	3.36323E-05	0.0022740	0.0021122		0.00015	4.52	3.31858E-05	0.0022438	0.0020693
0.0003	10.1	2.9703E-05	0.0020083			0.0003	10.2	2.94118E-05	0.0019886	
0.00045	14.81	3.03849E-05	0.0020544			0.00045	15.4	2.92208E-05	0.0019757	

Anexo 16. Detalles de ensayos de permeabilidad de carga constante para el material de transición 1.

		Ensayo de permeabilidad de carga constante											
		Nombre del encargado		Andrés León Herrera									
		Fecha de ejecución		19-08-2020 y 20-08-2020									
		Detalles experimento		Material de filtro segunda serie de experimentos									
Densidad relativa (%)	50						Densidad relativa (%)	60					
Diámetro (m)	0.075						Diámetro (m)	0.075					
Largo (m)	0.192						Largo (m)	0.199					
H1 (m)	1.2						H1 (m)	1.2					
H2 (m)	0.43						H2 (m)	0.43					
A (m ²)	0.004417865						A (m ²)	0.004417865					
i	4.010416667						i	3.869346734					
Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)		Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)			
0.00015	19.31	7.768E-06	0.0004384	0.0004048		0.00015	21.245	7.06048E-06	0.0004130	0.0003483			
0.0003	41.92	7.15649E-06	0.0004039			0.0003	54.96	5.45852E-06	0.0003193				
0.00045	68.27	6.59148E-06	0.0003720			0.00045	84.25	5.34125E-06	0.0003125				
Densidad relativa (%)	80						Densidad relativa (%)	90					
Diámetro (m)	0.075						Diámetro (m)	0.075					
Largo (m)	0.2						Largo (m)	0.2					
H1 (m)	1.2						H1 (m)	1.2					
H2 (m)	0.43						H2 (m)	0.43					
A (m ²)	0.004417865						A (m ²)	0.004417865					
i	3.85						i	3.85					
Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)		Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)			
0.00015	24	0.00000625	0.0003675	0.0003177		0.00015	26.39	5.68397E-06	0.0003342	0.0003081			
0.0003	58.76	5.10551E-06	0.0003002			0.0003	57.71	5.19841E-06	0.0003056				
0.00045	92.64	4.85751E-06	0.0002856			0.00045	93.03	4.83715E-06	0.0002844				

Anexo 17. Detalles de ensayos de permeabilidad de carga constante para el material de filtro, segunda medición.

		Ensayo de permeabilidad de carga constante											
		Nombre del encargado		Andrés León Herrera									
		Fecha de ejecución		18-08-2020 y 19-08-2020									
		Detalles experimento		Material de transición 1 segunda serie de experimentos									
Densidad relativa (%)	50						Densidad relativa (%)	60					
Diámetro (m)	0.075						Diámetro (m)	0.075					
Largo (m)	0.19						Largo (m)	0.199					
H1 (m)	1.2						H1 (m)	1.2					
H2 (m)	0.43						H2 (m)	0.43					
A (m ²)	0.004417865						A (m ²)	0.004417865					
i	4.052631579						i	3.869346734					
Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)		Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)			
0.00015	3.84	3.90625E-05	0.0021818	0.00198		0.00015	4.256	3.52444E-05	0.0020618	0.0016759			
0.0003	8.9	3.37079E-05	0.0018827			0.0003	11.86	2.52951E-05	0.0014797				
0.00045	13.34	3.37331E-05	0.0018841			0.00045	17.713	2.54051E-05	0.0014862				
Densidad relativa (%)	80						Densidad relativa (%)	90					
Diámetro (m)	0.075						Diámetro (m)	0.075					
Largo (m)	0.199						Largo (m)	0.2					
H1 (m)	1.2						H1 (m)	1.2					
H2 (m)	0.43						H2 (m)	0.43					
A (m ²)	0.004417865						A (m ²)	0.004417865					
i	3.869346734						i	3.85					
Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)		Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)			
0.00015	5.03	2.98211E-05	0.0017445	0.0015103		0.00015	5.24	2.8626E-05	0.0016830	0.0014985			
0.0003	12.16	2.46711E-05	0.0014432			0.0003	12.42	2.41546E-05	0.0014201				
0.00045	19.6	2.29592E-05	0.0013431			0.00045	19	2.36842E-05	0.0013925				

Anexo 18. Detalles de ensayos de permeabilidad de carga constante para el material de transición 1, segunda medición.



Anexo 18. Configuración de reservorio de agua a nivel constante, logrado a través de un grifo que rebalsa un estanque con una llave de paso conectada al permeámetro.



Anexo 19. Realización de ensayo de permeabilidad.

		Ensayo mixto de permeabilidad de carga constante								
		Nombre del encargado		Andrés León Herrera						
		Fecha de ejecución		07-09-2020						
		Detalles experimento		Material de transición al 60%						
DR MT vs MF (%)	60/50						DR MT vs MF (%)	60/70		
Diámetro (m)	0.075						Diámetro (m)	0.075		
Largo (m)	0.219						Largo (m)	0.228		
H1 (m)	1.2						H1 (m)	1.2		
H2 (m)	0.43						H2 (m)	0.43		
A (m ²)	0.004417865						A (m ²)	0.004417865		
i	3.515981735						i	3.377192982		
Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	K Promedio ensayo (m/s)		Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	K Promedio ensayo (m/s)
0.00015	12.23	1.22649E-05	0.0007896	7.039 E-04		0.00015	17	8.82353E-06	0.0005914	5.159 E-04
0.0003	28.45	1.05448E-05	0.0006789							
0.00045	45.04	9.99112E-06	0.0006432							
DR MT vs MF (%)	60/60						DR MT vs MF (%)	60/80		
Diámetro (m)	0.075						Diámetro (m)	0.075		
Largo (m)	0.225						Largo (m)	0.229		
H1 (m)	1.2						H1 (m)	1.2		
H2 (m)	0.43						H2 (m)	0.43		
A (m ²)	0.004417865						A (m ²)	0.004417865		
i	3.422222222						i	3.362445415		
Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	K Promedio ensayo (m/s)		Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	K Promedio ensayo (m/s)
0.00015	14.34	1.04603E-05	0.0006919	5.833 E-04		0.00015	18.71	8.0171E-06	0.0005397	4.671 E-04
0.0003	36.2	8.28729E-06	0.0005481							
0.00045	58.38	7.70812E-06	0.0005098							

Anexo 20. Detalles de experimentos de permeabilidad de carga constante para sistema con materia de transición fijo al 60% de densidad relativa o escenario 1.

		Ensayo mixto de permeabilidad de carga constante								
		Nombre del encargado		Andrés León Herrera						
		Fecha de ejecución		08-09-2020						
		Detalles experimento		Material de transición al 70%						
DR MT vs MF (%)	70/50						DR MT vs MF (%)	70/70		
Diámetro (m)	0.075						Diámetro (m)	0.075		
Largo (m)	0.229						Largo (m)	0.23		
H1 (m)	1.2						H1 (m)	1.2		
H2 (m)	0.43						H2 (m)	0.43		
A (m ²)	0.00441786						A (m ²)	0.00441786		
i	3.36244541						i	3.34782609		
Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)		Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)
0.00015	12.6	1.1905E-05	0.0008014	7.248 E-04		0.00015	17.9	8.3799E-06	0.0005666	5.280 E-04
0.0003	28.5	1.0526E-05	0.0007086							
0.00045	45.6	9.8684E-06	0.0006643							
DR MT vs MF (%)	70/60						DR MT vs MF (%)	70/80		
Diámetro (m)	0.075						Diámetro (m)	0.075		
Largo (m)	0.229						Largo (m)	0.23		
H1 (m)	1.2						H1 (m)	1.2		
H2 (m)	0.43						H2 (m)	0.43		
A (m ²)	0.00441786						A (m ²)	0.00441786		
i	3.36244541						i	3.34782609		
Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)		Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)
0.00015	16.96	8.8443E-06	0.0005954	5.414 E-04		0.00015	20.07	7.4738E-06	0.0005053	4.562 E-04
0.0003	38.31	7.8309E-06	0.0005272							
0.00045	60.37	7.454E-06	0.0005018							

Anexo 21. Detalles de experimentos de permeabilidad de carga constante para sistema con materia de transición fijo al 70% de densidad relativa o escenario 2.

		Ensayo mixto de permeabilidad de carga constante							
		Nombre del encargado		Andrés León Herrera					
		Fecha de ejecución		09-09-2020					
		Detalles experimento		Material de transición al 70% segunda serie de experimentos					
DR MT vs MF (%)	80/50					DR MT vs MF (%)	80/70		
Diámetro (m)	0.075					Diámetro (m)	0.075		
Largo (m)	0.23					Largo (m)	0.23		
H1 (m)	1.2					H1 (m)	1.2		
H2 (m)	0.43					H2 (m)	0.43		
A (m ²)	0.004417865					A (m ²)	0.004417865		
i	3.347826087					i	3.347826087		
Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)	Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)
0.00015	19.93	7.52634E-06	0.0005089	4.562.E-04	0.00015	27.99	5.35906E-06	0.0003623	3.257.E-04
0.0003	45.65	6.57174E-06	0.0004443		0.0003	64.87	4.62463E-06	0.0003127	
0.00045	73.25	6.14334E-06	0.0004154		0.00045	100.7	4.46872E-06	0.0003021	
DR MT vs MF (%)	80/60					DR MT vs MF (%)	80/80		
Diámetro (m)	0.075					Diámetro (m)	0.075		
Largo (m)	0.23					Largo (m)	0.23		
H1 (m)	1.2					H1 (m)	1.2		
H2 (m)	0.43					H2 (m)	0.43		
A (m ²)	0.004417865					A (m ²)	0.004417865		
i	3.347826087					i	3.347826087		
Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)	Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)
0.00015	23.38	6.41574E-06	0.0004338	3.883.E-04	0.00015	28.71	5.22466E-06	0.0003533	3.252.E-04
0.0003	54.22	5.53301E-06	0.0003741		0.0003	65.74	4.56343E-06	0.0003085	
0.00045	85.19	5.28231E-06	0.0003571		0.00045	96.94	4.64205E-06	0.0003139	

Anexo 22. Detalles de experimentos de permeabilidad de carga constante para sistema con materia de transición fijo al 80% de densidad relativa o escenario 3.

		Ensayo mixto de permeabilidad de carga constante							
		Nombre del encargado		Andrés León Herrera					
		Fecha de ejecución		10-09-2020					
		Detalles experimento		Material de transición al 60% segunda serie de experimentos					
DR MT vs MF (%)	60/50					DR MT vs MF (%)	60/70		
Diámetro (m)	0.075					Diámetro (m)	0.075		
Largo (m)	0.225					Largo (m)	0.23		
H1 (m)	1.2					H1 (m)	1.2		
H2 (m)	0.43					H2 (m)	0.43		
A (m ²)	0.004417865					A (m ²)	0.004417865		
i	3.422222222					i	3.347826087		
Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)	Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)
0.00015	12.78	1.17371E-05	0.0007763	7.016.E-04	0.00015	16.35	9.17431E-06	0.0006203	5.476.E-04
0.0003	29.33	1.02284E-05	0.0006765		0.0003	38.39	7.81454E-06	0.0005284	
0.00045	45.66	9.85545E-06	0.0006519		0.00045	61.59	7.30638E-06	0.0004940	
DR MT vs MF (%)	60/60					DR MT vs MF (%)	60/80		
Diámetro (m)	0.075					Diámetro (m)	0.075		
Largo (m)	0.229					Largo (m)	0.23		
H1 (m)	1.2					H1 (m)	1.2		
H2 (m)	0.43					H2 (m)	0.43		
A (m ²)	0.004417865					A (m ²)	0.004417865		
i	3.362445415					i	3.347826087		
Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)	Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)
0.00015	15.51	9.67118E-06	0.0006510	5.665.E-04	0.00015	18.39	8.15661E-06	0.0005515	4.912.E-04
0.0003	37.21	8.06235E-06	0.0005427		0.0003	42.97	6.98162E-06	0.0004720	
0.00045	59.91	7.51127E-06	0.0005056		0.00045	67.58	6.65877E-06	0.0004502	

Anexo 23. Detalles de experimentos de permeabilidad de carga constante para sistema con materia de transición fijo al 60% de densidad relativa o escenario 1, segunda medición.

		Ensayo mixto de permeabilidad de carga constante								
		Nombre del encargado		Andrés León Herrera						
		Fecha de ejecución		11-09-2020						
		Detalles experimento		Material de transición al 70% segunda serie de experimentos						
DR MT vs MF (%)	70/50						DR MT vs MF (%)	70/70		
Diámetro (m)	0.075						Diámetro (m)	0.075		
Largo (m)	0.228						Largo (m)	0.23		
H1 (m)	1.2						H1 (m)	1.2		
H2 (m)	0.43						H2 (m)	0.43		
A (m ²)	0.004417865						A (m ²)	0.004417865		
i	3.377192982						i	3.347826087		
Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)		Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)
0.00015	11.93	1.25733E-05	0.0008427		7.375.E-04	0.00015	18.39	8.15661E-06	0.0005515	
0.0003	28.8	1.04167E-05	0.0006982			0.0003	43.59	6.88231E-06	0.0004653	
0.00045	44.9	1.00223E-05	0.0006717			0.00045	70.86	6.35055E-06	0.0004294	
DR MT vs MF (%)	70/60						DR MT vs MF (%)	70/80		
Diámetro (m)	0.075						Diámetro (m)	0.075		
Largo (m)	0.229						Largo (m)	0.23		
H1 (m)	1.2						H1 (m)	1.2		
H2 (m)	0.43						H2 (m)	0.43		
A (m ²)	0.004417865						A (m ²)	0.004417865		
i	3.362445415						i	3.347826087		
Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)		Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)
0.00015	15.76	9.51777E-06	0.0006407		5.710.E-04	0.00015	19.98	7.50751E-06	0.0005076	
0.0003	36.4	8.24176E-06	0.0005548			0.0003	47.66	6.29459E-06	0.0004256	
0.00045	58.55	7.68574E-06	0.0005174			0.00045	74.23	6.06224E-06	0.0004099	

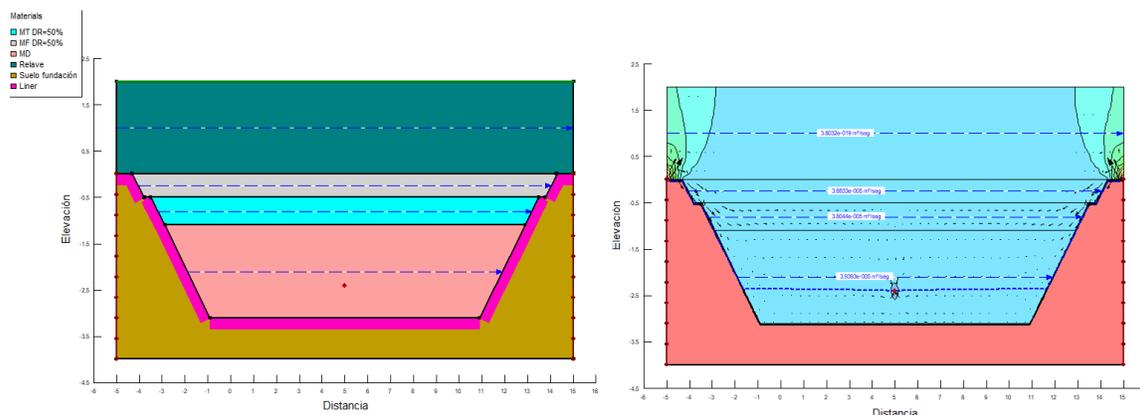
Anexo 24. Detalles de experimentos de permeabilidad de carga constante para sistema con materia de transición fijo al 70% de densidad relativa o escenario 2, segunda medición.

		Ensayo mixto de permeabilidad de carga constante								
		Nombre del encargado		Andrés León Herrera						
		Fecha de ejecución		13-09-2020						
		Detalles experimento		Material de transición al 80% segunda serie de experimentos						
DR MT vs MF (%)	80/50						DR MT vs MF (%)	80/70		
Diámetro (m)	0.075						Diámetro (m)	0.075		
Largo (m)	0.227						Largo (m)	0.23		
H1 (m)	1.2						H1 (m)	1.2		
H2 (m)	0.43						H2 (m)	0.43		
A (m ²)	0.004417865						A (m ²)	0.004417865		
i	3.392070485						i	3.347826087		
Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)		Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)
0.00015	17.36	8.64055E-06	0.0005766		5.341.E-04	0.00015	25.35	5.91716E-06	0.0004001	
0.0003	37.54	7.99148E-06	0.0005333			0.0003	60.02	4.99833E-06	0.0003379	
0.00045	60.98	7.37947E-06	0.0004924			0.00045	93.92	4.79131E-06	0.0003240	
DR MT vs MF (%)	80/60						DR MT vs MF (%)	80/80		
Diámetro (m)	0.075						Diámetro (m)	0.075		
Largo (m)	0.229						Largo (m)	0.23		
H1 (m)	1.2						H1 (m)	1.2		
H2 (m)	0.43						H2 (m)	0.43		
A (m ²)	0.004417865						A (m ²)	0.004417865		
i	3.362445415						i	3.347826087		
Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)		Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)
0.00015	21.47	6.98649E-06	0.0004703		4.136.E-04	0.00015	27.64	5.42692E-06	0.0003669	
0.0003	50.84	5.90087E-06	0.0003972			0.0003	60.83	4.93178E-06	0.0003334	
0.00045	81.19	5.54255E-06	0.0003731			0.00045	92.9	4.84392E-06	0.0003275	

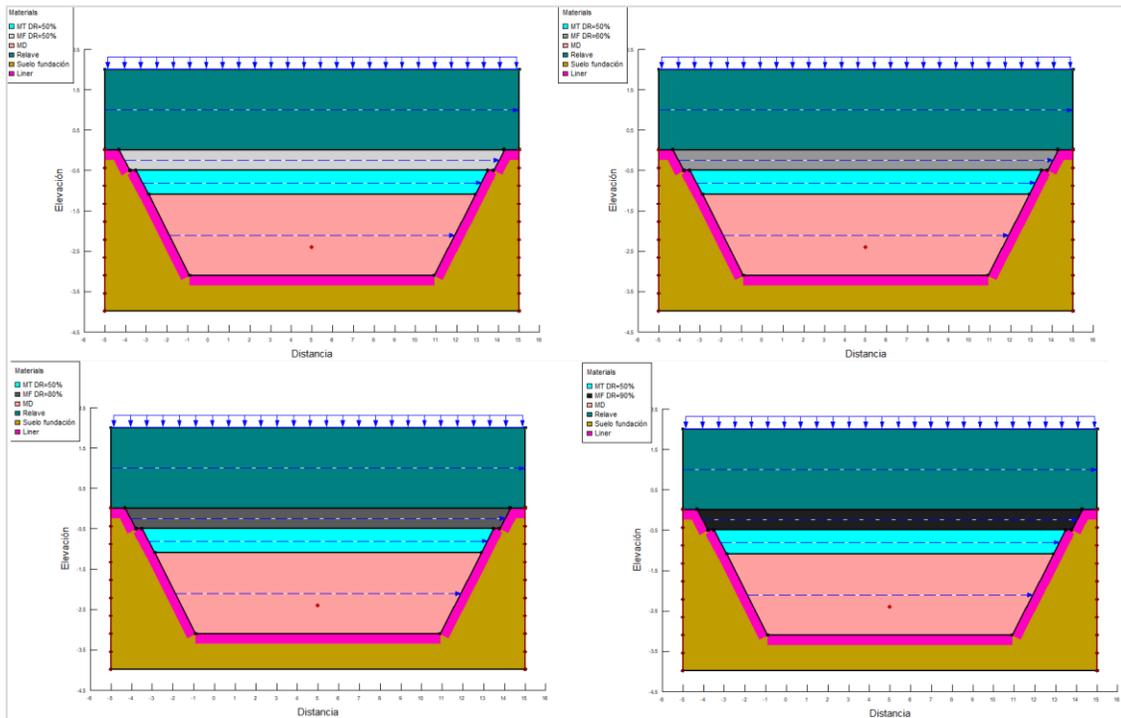
Anexo 25. Detalles de experimentos de permeabilidad de carga constante para sistema con materia de transición fijo al 80% de densidad relativa o escenario 3, segunda medición.

TALCA UNIVERSIDAD		Ensayo mixto de permeabilidad de carga constante				INGENIERÍA CIVIL DE MINAS Universidad de Talca					
		Nombre del encargado		Andrés León Herrera							
		Fecha de ejecución		16-09-2020							
		Detalles experimento		Ensayos extra de verificación							
DR MT vs MF (%)	60/70					DR MT vs MF (%)	70/60				
Diámetro (m)	0.075					Diámetro (m)	0.075				
Largo (m)	0.22					Largo (m)	0.22				
H1 (m)	1.2					H1 (m)	1.2				
H2 (m)	0.43					H2 (m)	0.43				
A (m ²)	0.004417865					A (m ²)	0.004417865				
i	3.5					i	3.5				
Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)		Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)	
0.00015	13	1.1538E-05	0.000746221			0.00015	17.02	8.81316E-06	0.000569969		
0.0003	27.5	1.0909E-05	0.000705518	0.00072052		0.0003	34.19	8.7745E-06	0.000567468	0.000567989	
0.00045	41	1.0976E-05	0.00070982			0.00045	51.37	8.75998E-06	0.000566529		
DR MT vs MF (%)	80/60										
Diámetro (m)	0.075										
Largo (m)	0.22										
H1 (m)	1.2										
H2 (m)	0.43										
A (m ²)	0.004417865										
i	3.5										
Volumen evacuado (m ³)	Tiempo (s)	Q (m ³ /s)	K (m/s)	k promedio ensayo (m/s)							
0.00015	20	0.0000075	0.000485044								
0.0003	42.17	7.1141E-06	0.000460084	0.000469761							
0.00045	62.7	7.177E-06	0.000464157								

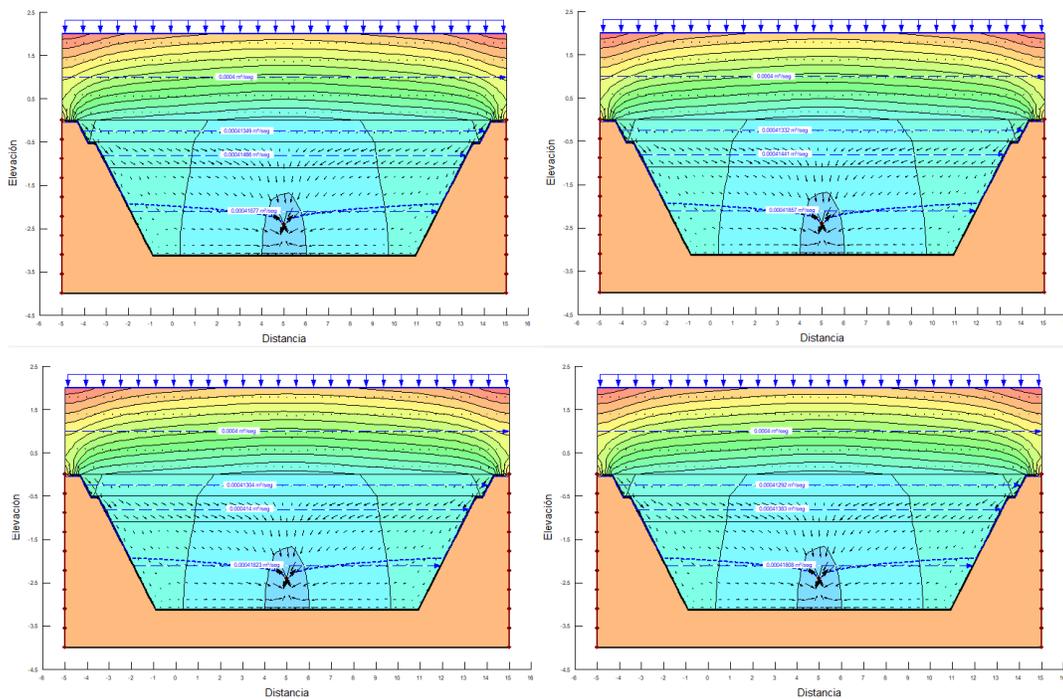
Anexo 26. Detalles de ensayos de permeabilidad a carga constante extras.



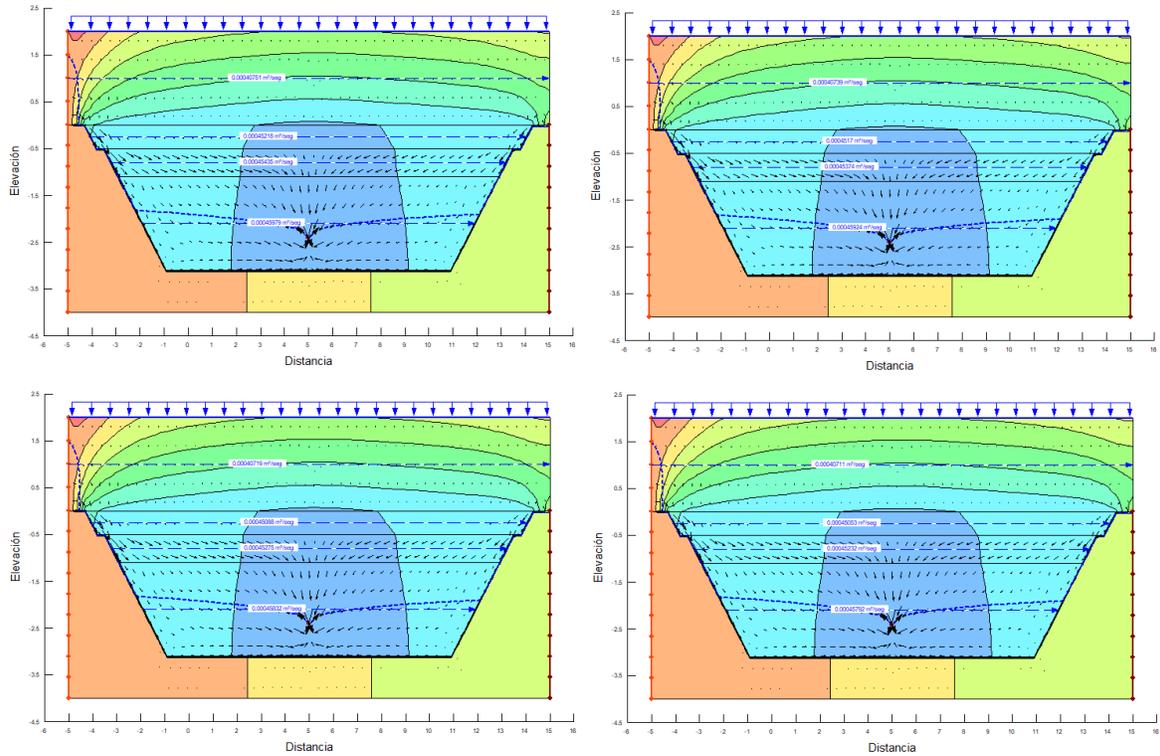
Anexo 27. Definición y resultados del caso base para el modelo 1, caso 1 de SEEP/W.



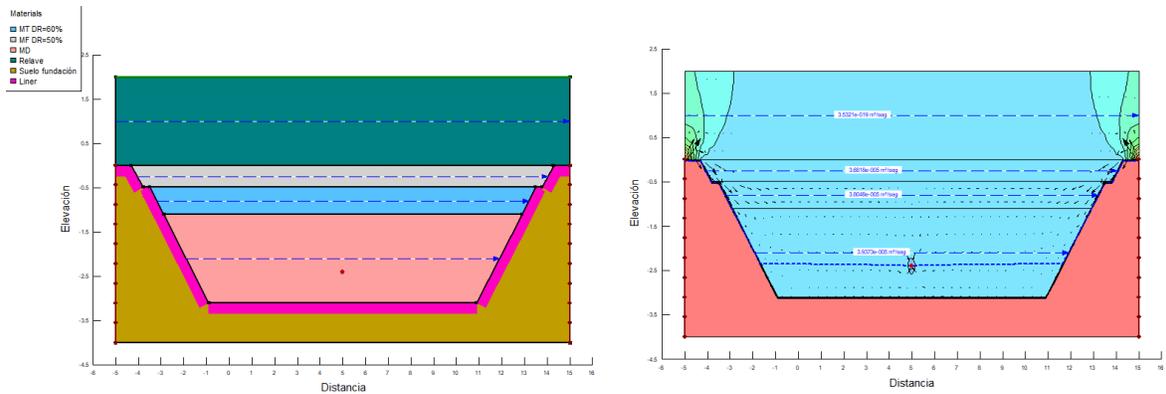
Anexo 28. Definiciones del modelo 1 caso 1, MT con DR fijo al 50% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 80% y 90%.



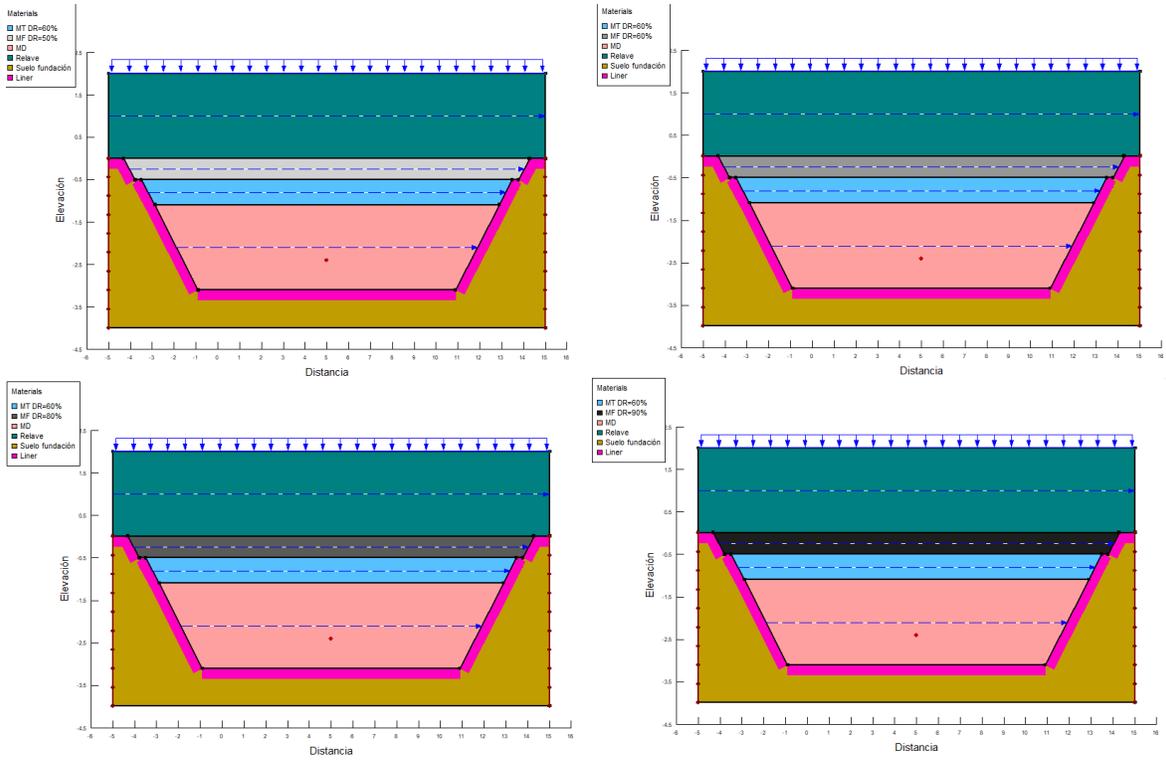
Anexo 29. Resultados del modelo 1 caso 1, MT con DR fijo al 50% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 80% y 90%.



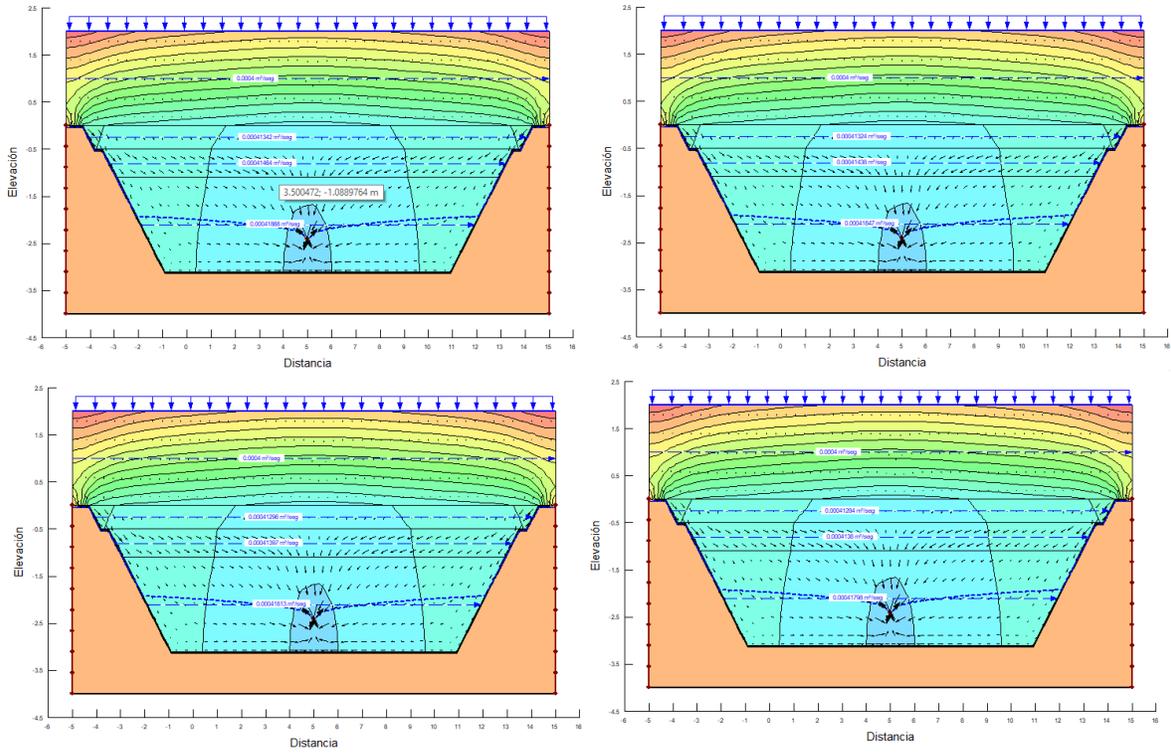
Anexo 32. Resultados del modelo 1 caso 2, MT con DR fijo al 50% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 80% y 90%.



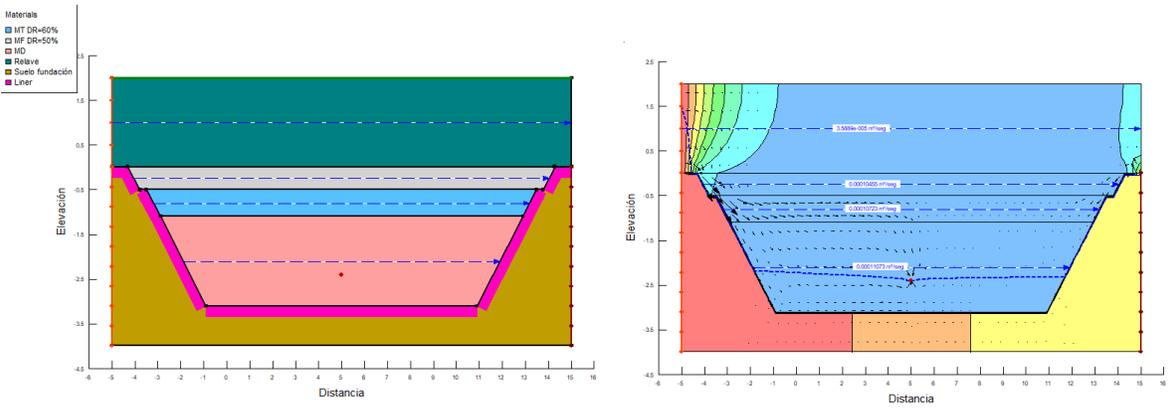
Anexo 33. Definición y resultados del caso base para el modelo 2, caso 1 de SEEP/W.



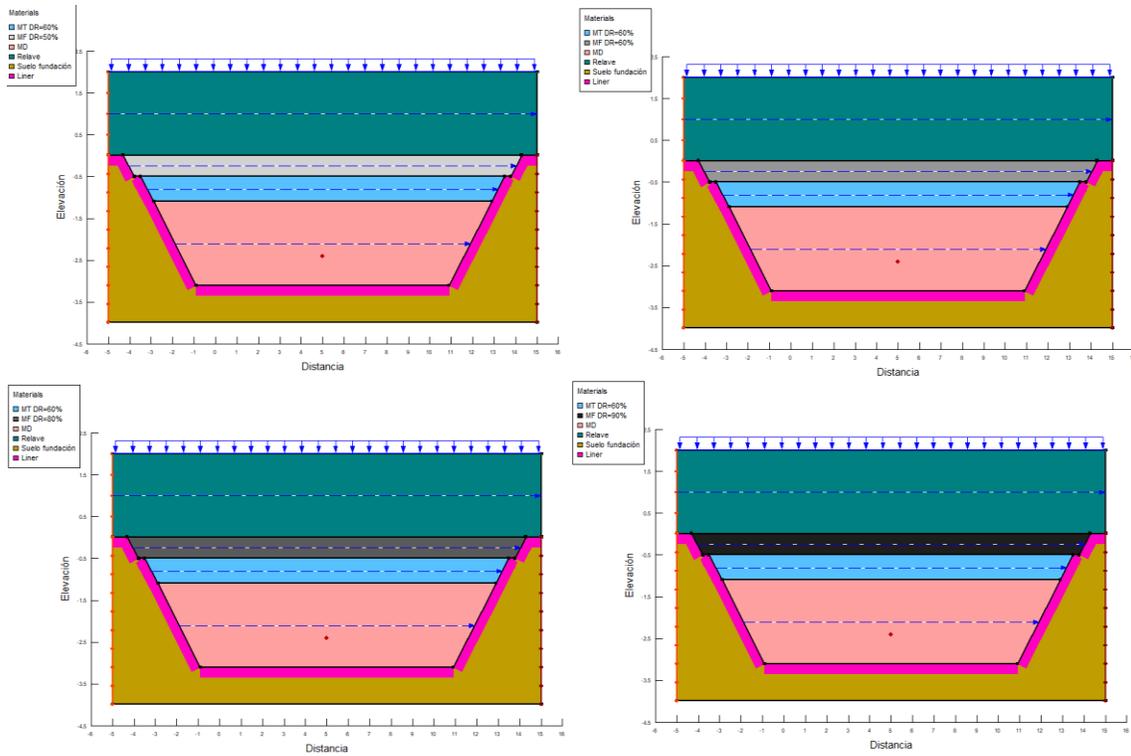
Anexo 34. Definiciones del modelo 2 caso 1, MT con DR fijo al 60% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 80% y 90%.



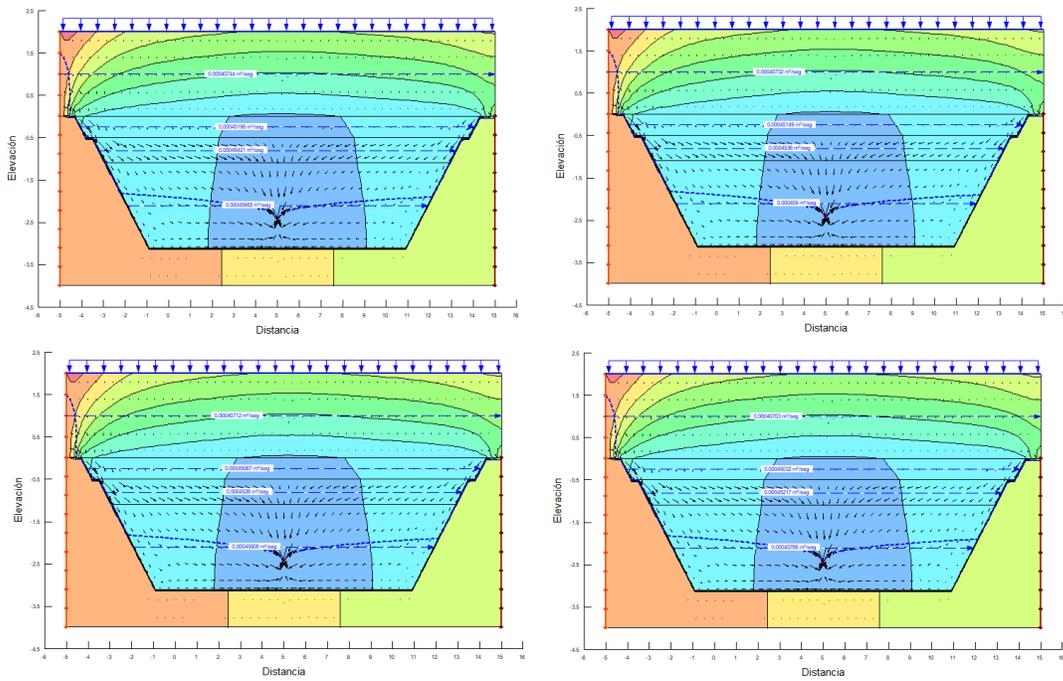
Anexo 35. Resultados del modelo 2 caso 1, MT con DR fijo al 60% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 80% y 90%.



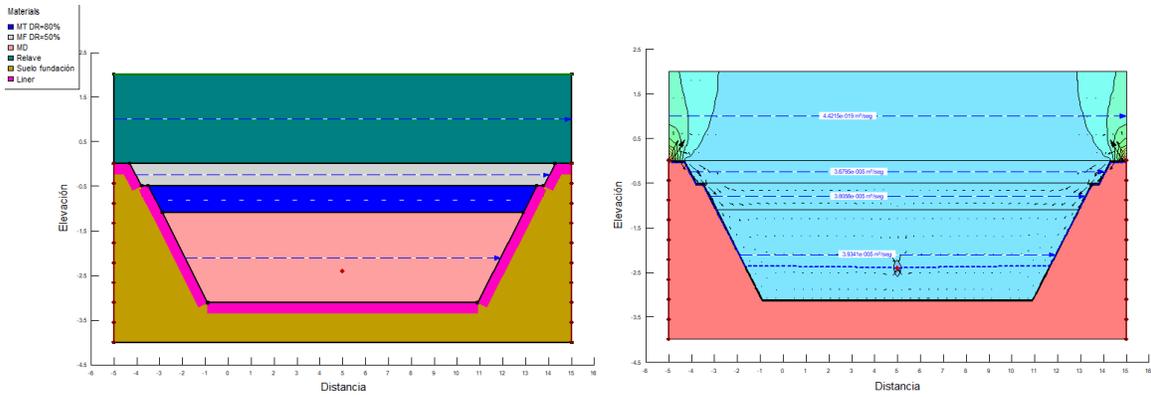
Anexo 36. Definición y resultados del caso base para el modelo 2, caso 2 de SEEP/W.



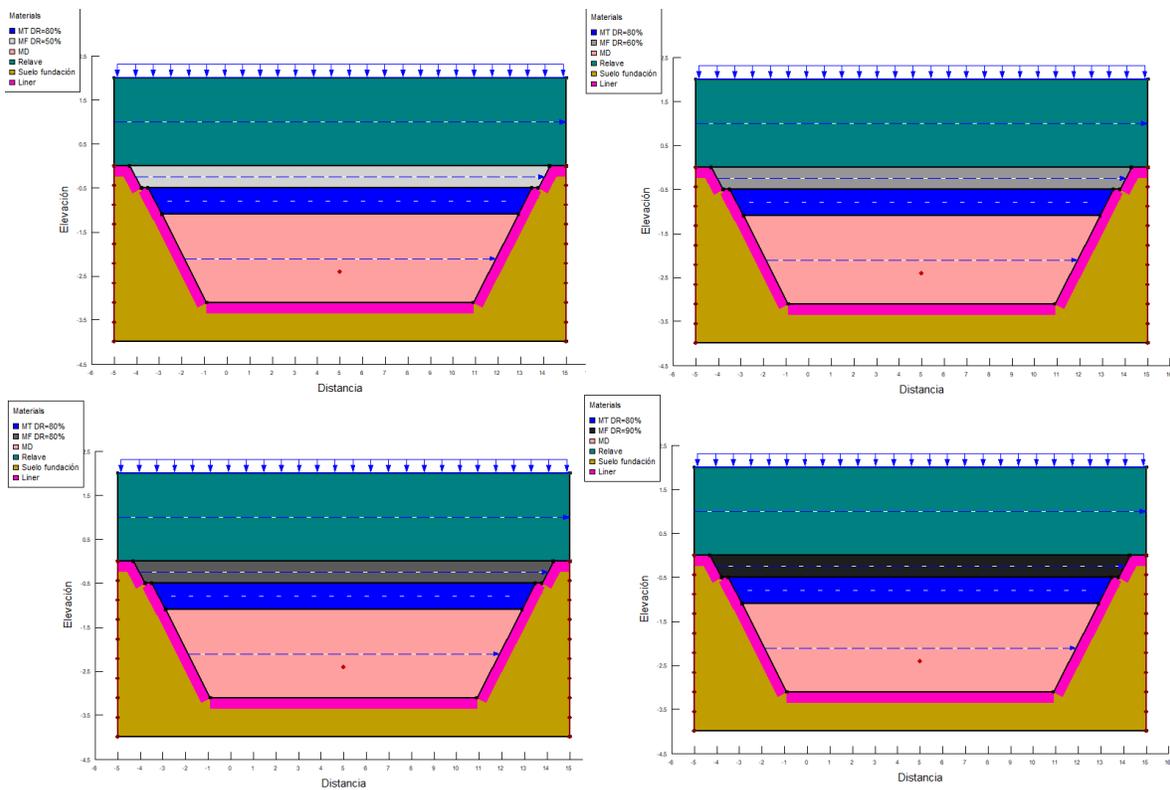
Anexo 37. Definiciones del modelo 2 caso 2, MT con DR fijo al 60% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 80% y 90%.



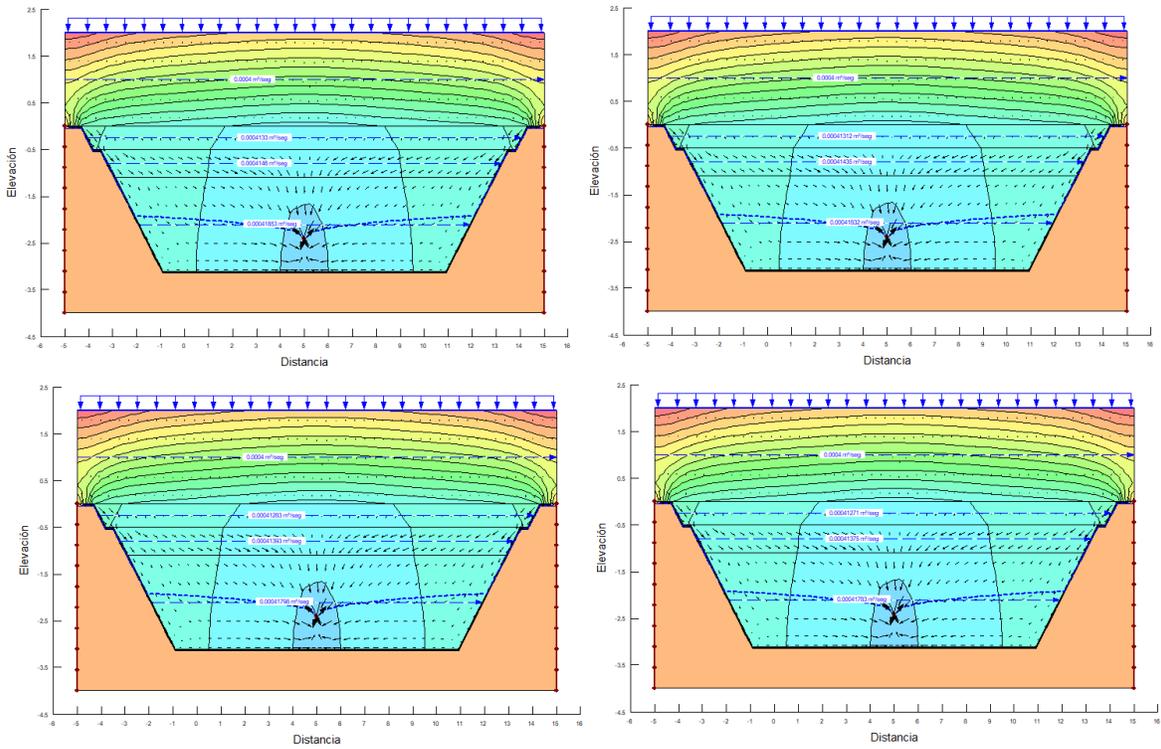
Anexo 38. Resultados del modelo 2 caso 2, MT con DR fijo al 60% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 80% y 90%.



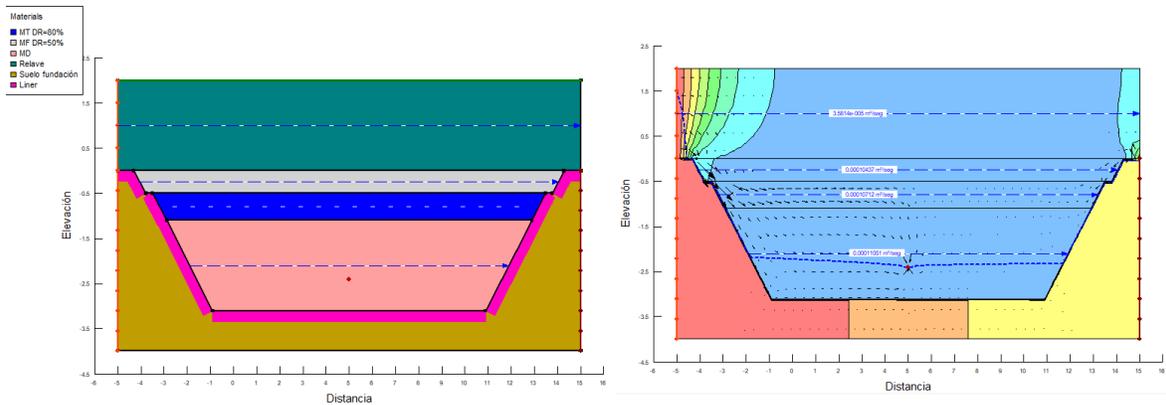
Anexo 38. Definición y resultados del caso base para el modelo 3, caso 1 de SEEP/W.



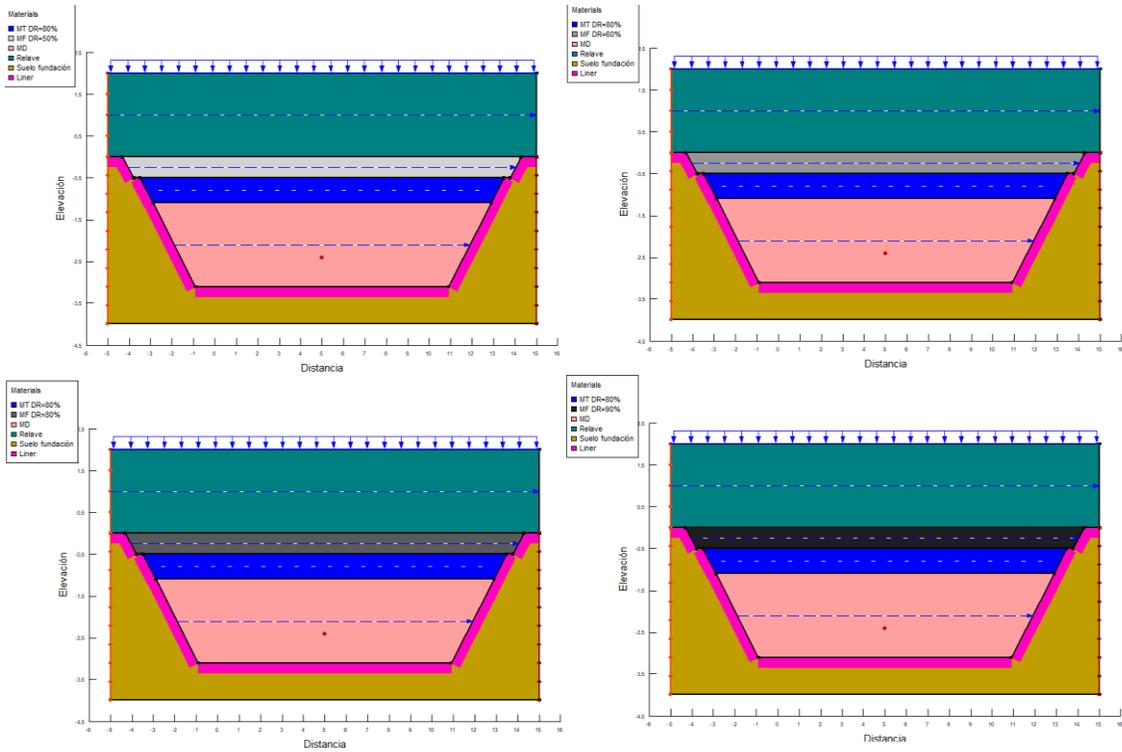
Anexo 39. Definiciones del modelo 3 caso 1, MT con DR fijo al 80% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 80% y 90%.



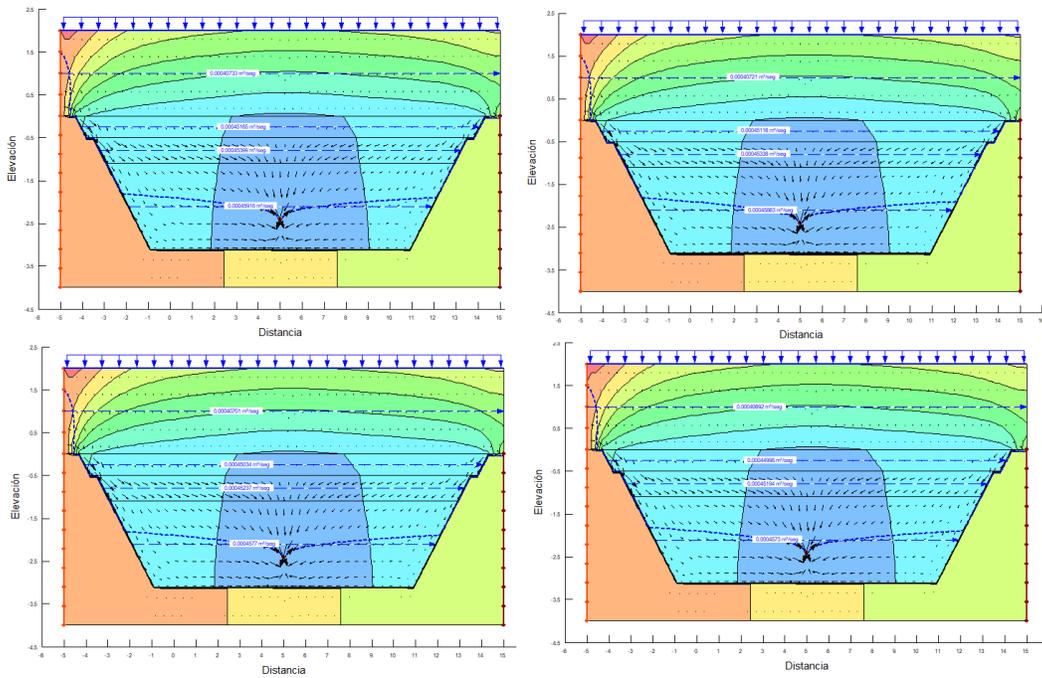
Anexo 40. Resultados del modelo 3 caso 1, MT con DR fijo al 80% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 80% y 90%.



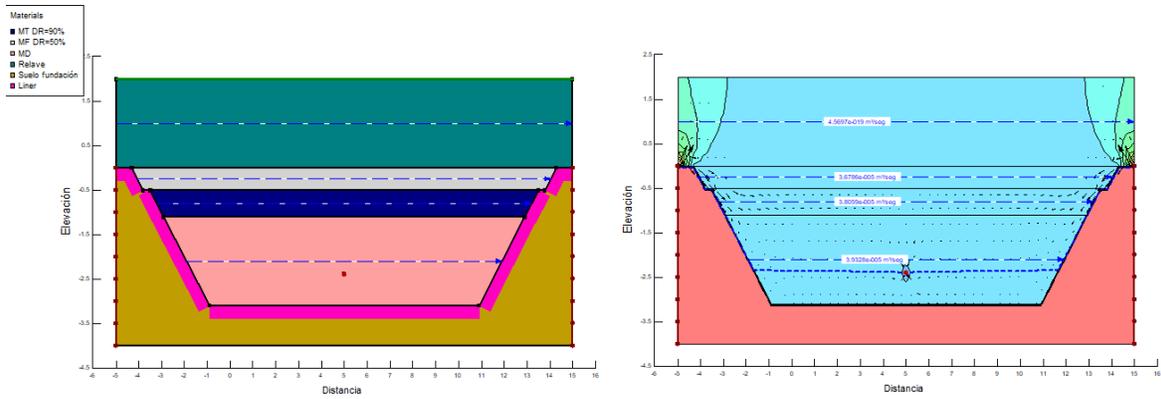
Anexo 41. Definición y resultados del caso base para el modelo 3, caso 2 de SEEP/W.



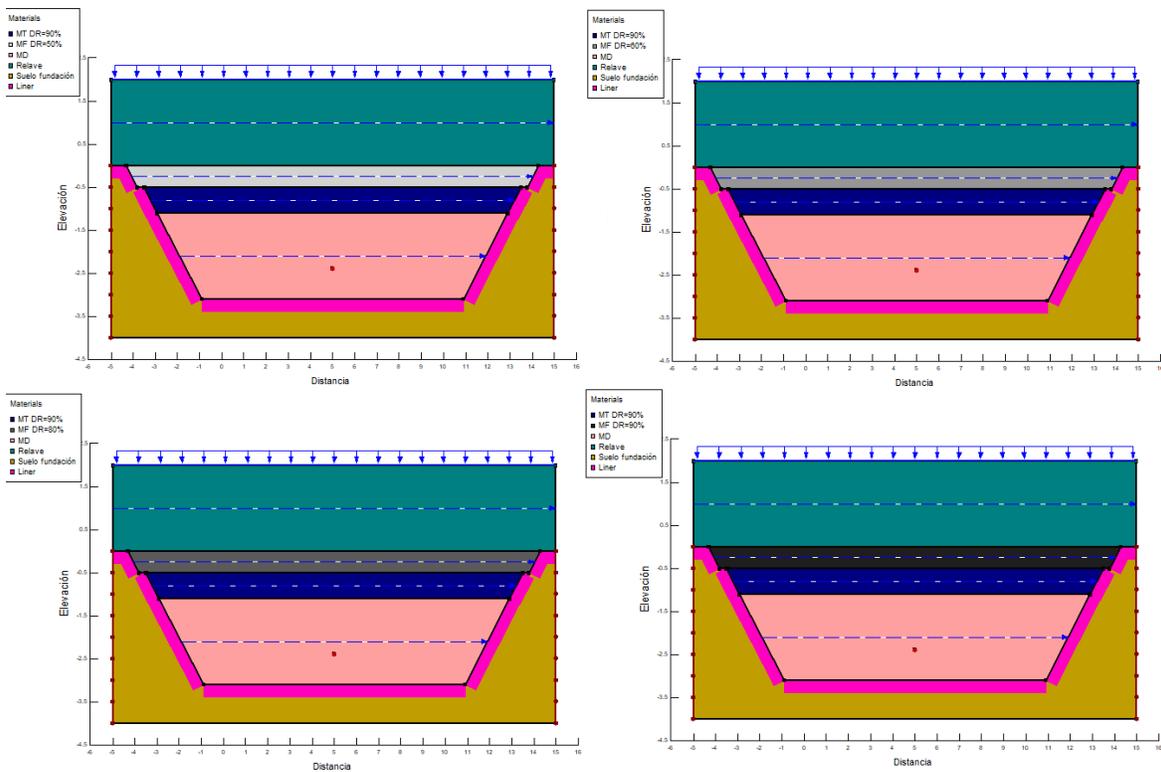
Anexo 42. Definiciones del modelo 3 caso 2, MT con DR fijo al 80% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 80% y 90%.



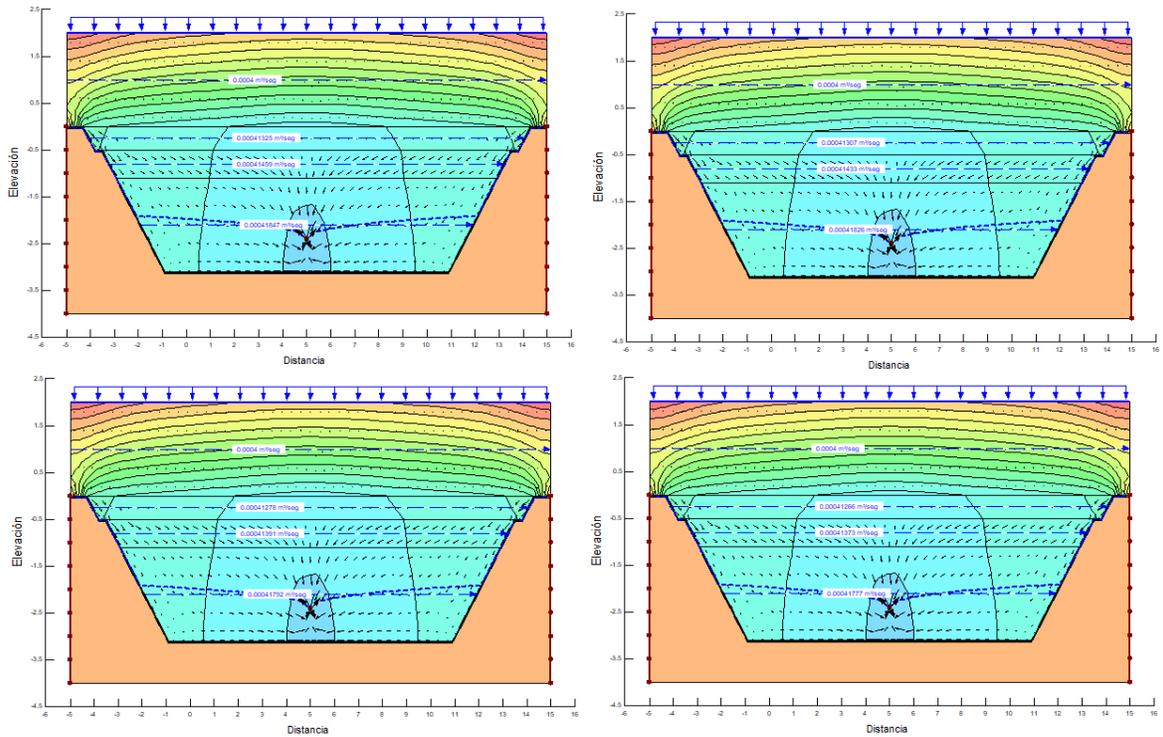
Anexo 43. Resultados del modelo 3 caso 2, MT con DR fijo al 80% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 80% y 90%.



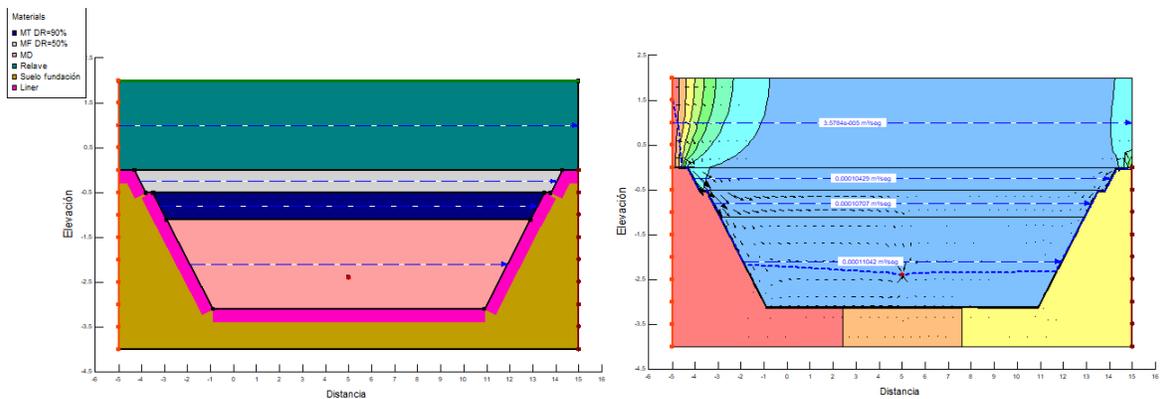
Anexo 44. Definición y resultados del caso base para el modelo 4, caso 1 de SEEP/W.



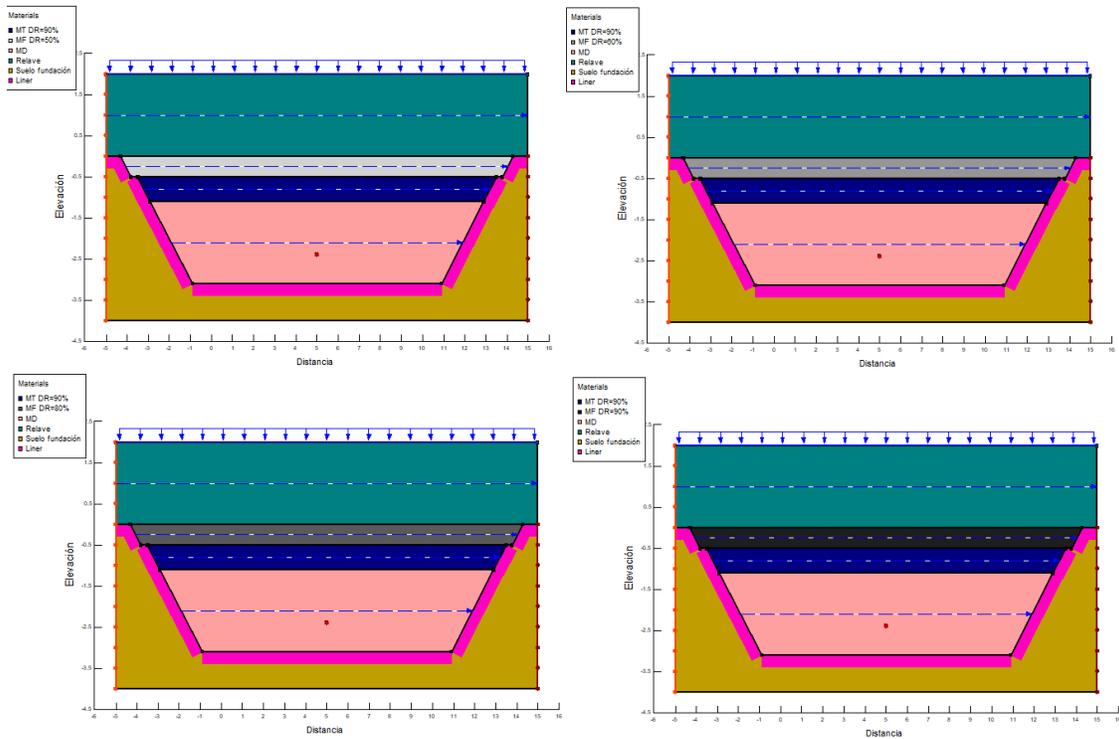
Anexo 45. Definiciones del modelo 4 caso 1, MT con DR fijo al 90% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 80% y 90%.



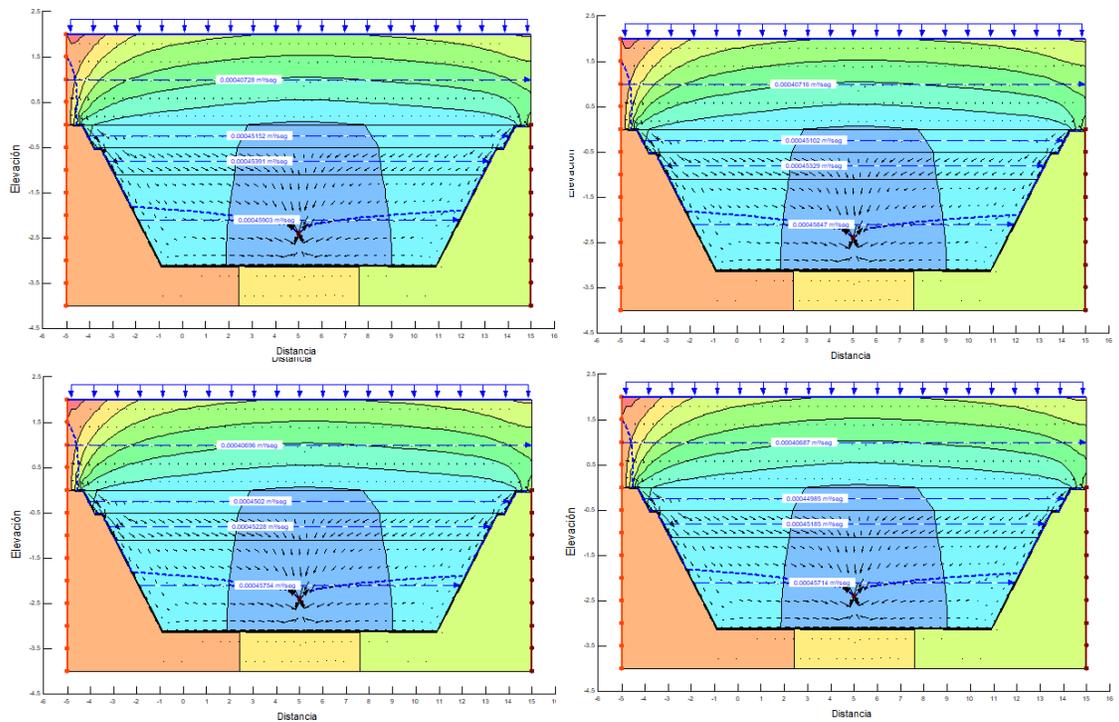
Anexo 46. Resultados del modelo 4 caso 1, MT con DR fijo al 90% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 80% y 90%.



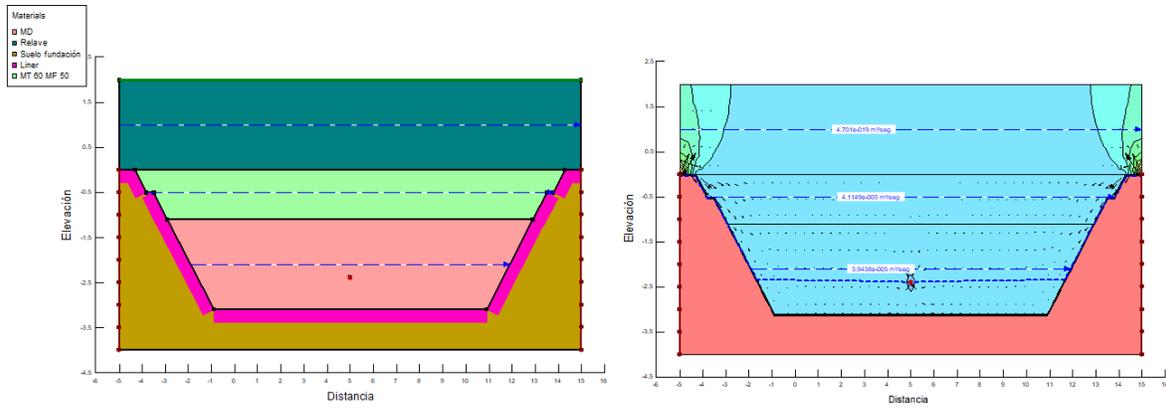
Anexo 47. Definición y resultados del caso base para el modelo 4, caso 2 de SEEP/W.



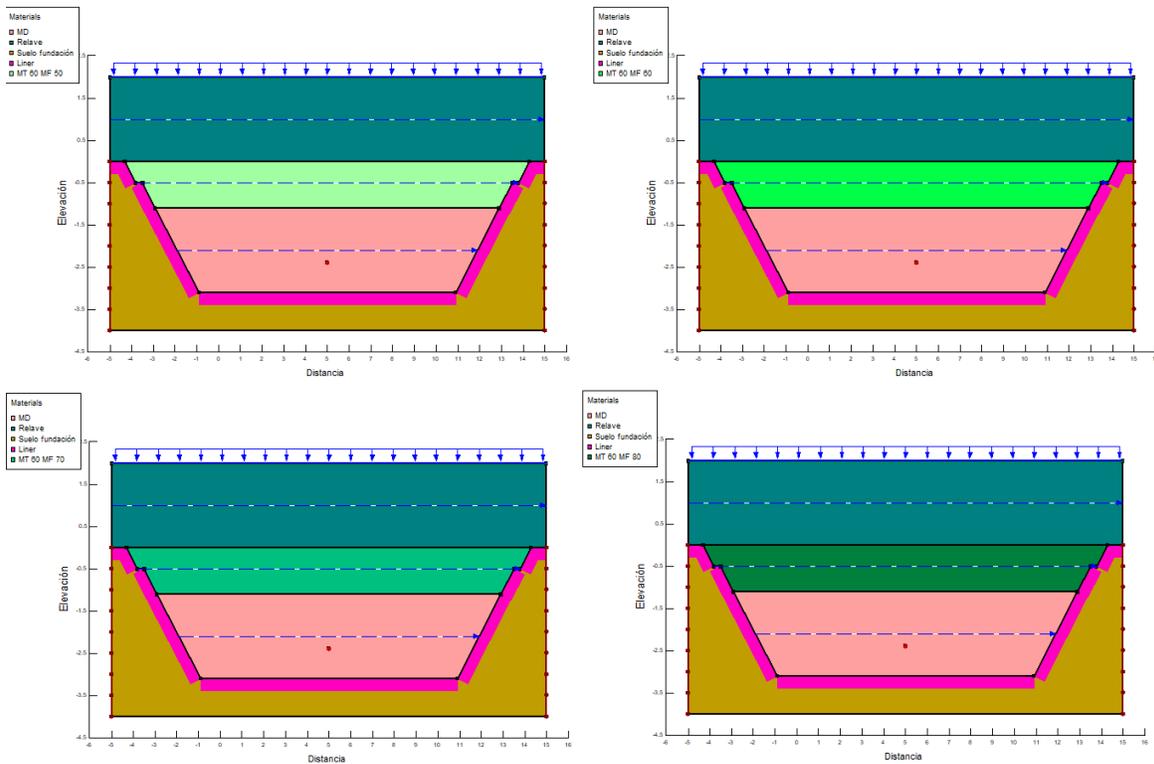
Anexo 48. Definiciones del modelo 4 caso 2, MT con DR fijo al 90% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 80% y 90%.



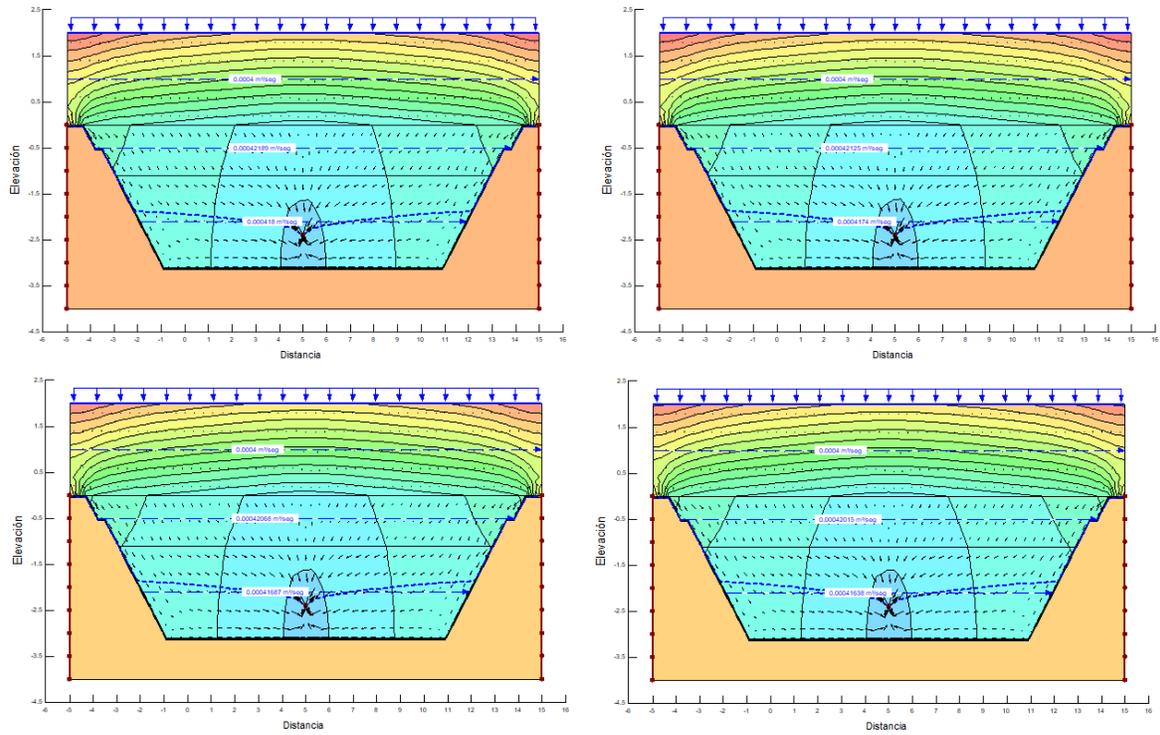
Anexo 49. Resultados del modelo 4 caso 2, MT con DR fijo al 90% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 80% y 90%.



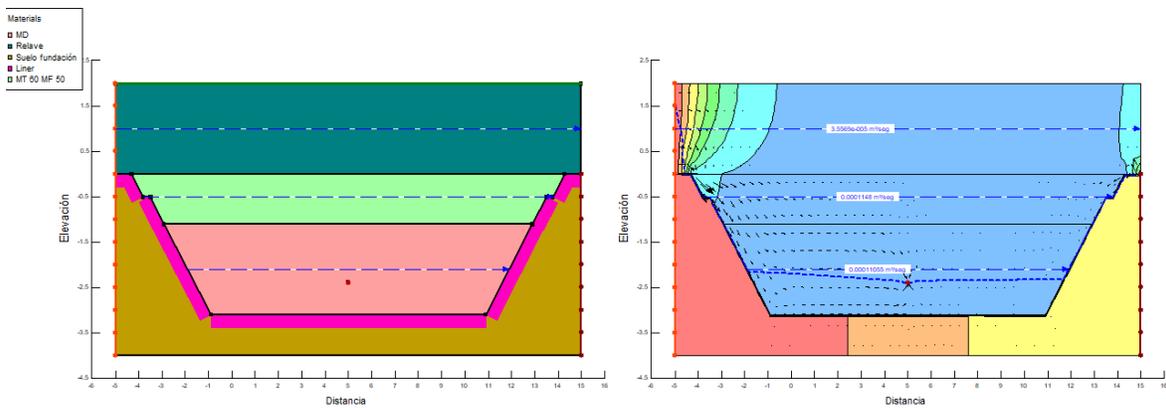
Anexo 50. Definición y resultados del caso base para el modelo 5, caso 1 de SEEP/W.



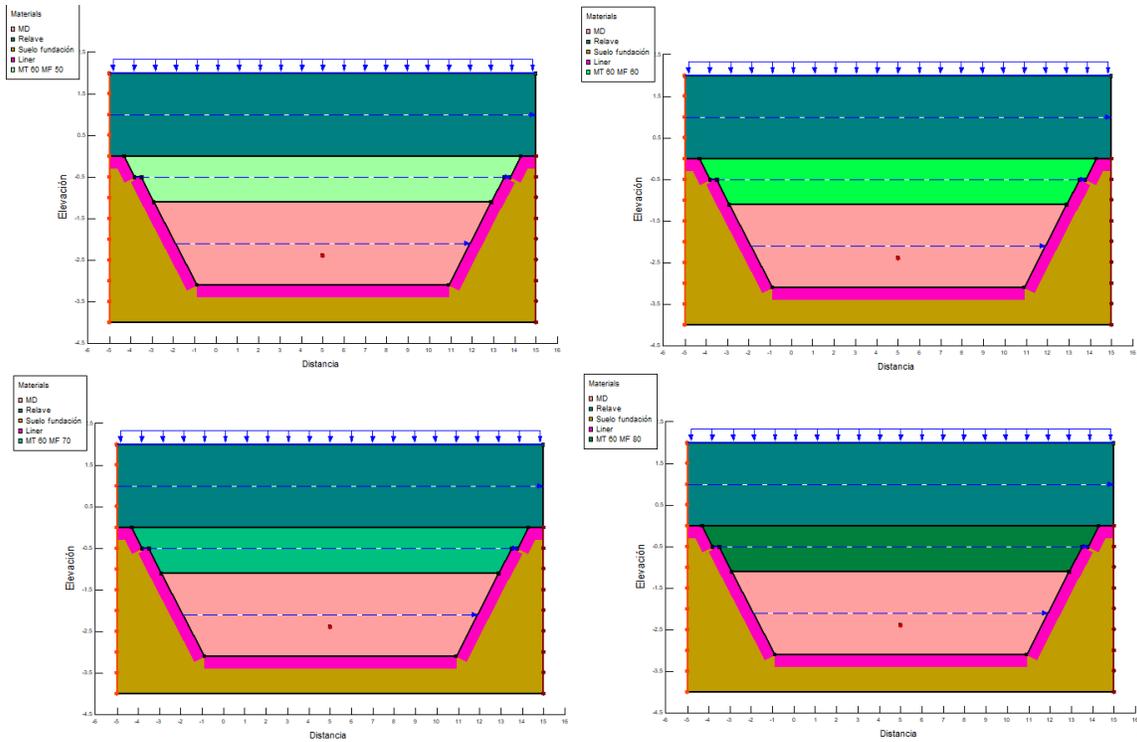
Anexo 51. Definiciones del modelo 5 caso 1, MT con DR fijo al 60% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 70% y 80%.



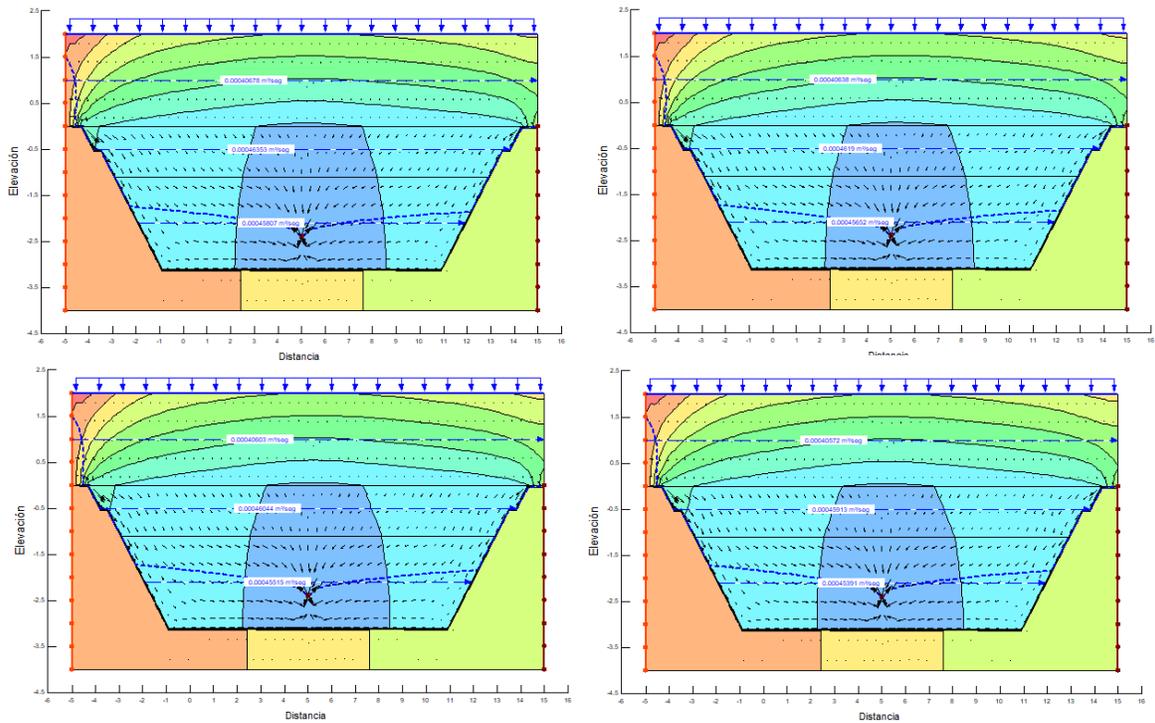
Anexo 52. Resultados del modelo 5 caso 1, MT con DR fijo al 60% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 70% y 80%.



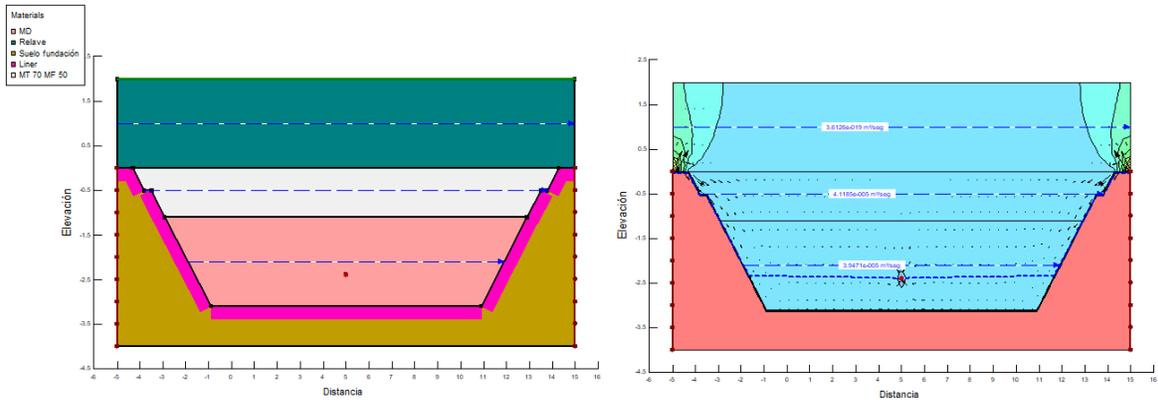
Anexo 53. Definición y resultados del caso base para el modelo 5, caso 2 de SEEP/W.



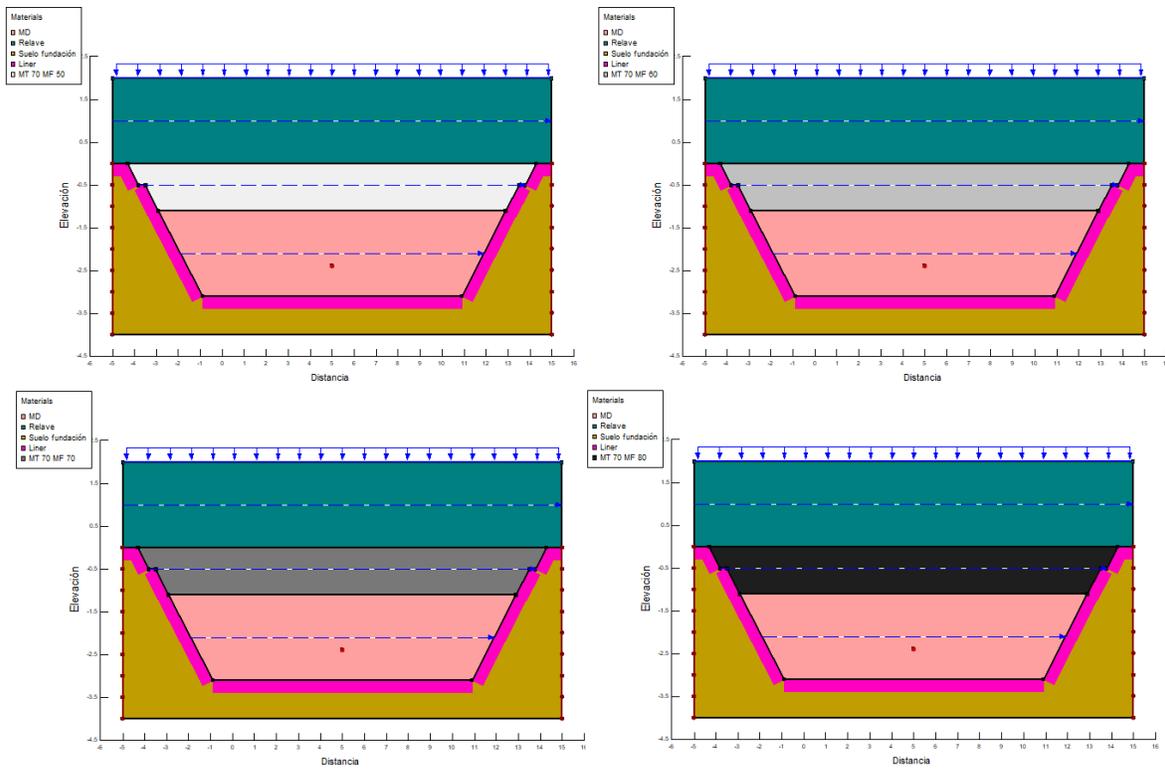
Anexo 54. Definiciones del modelo 5 caso 2, MT con DR fijo al 60% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 70% y 80%.



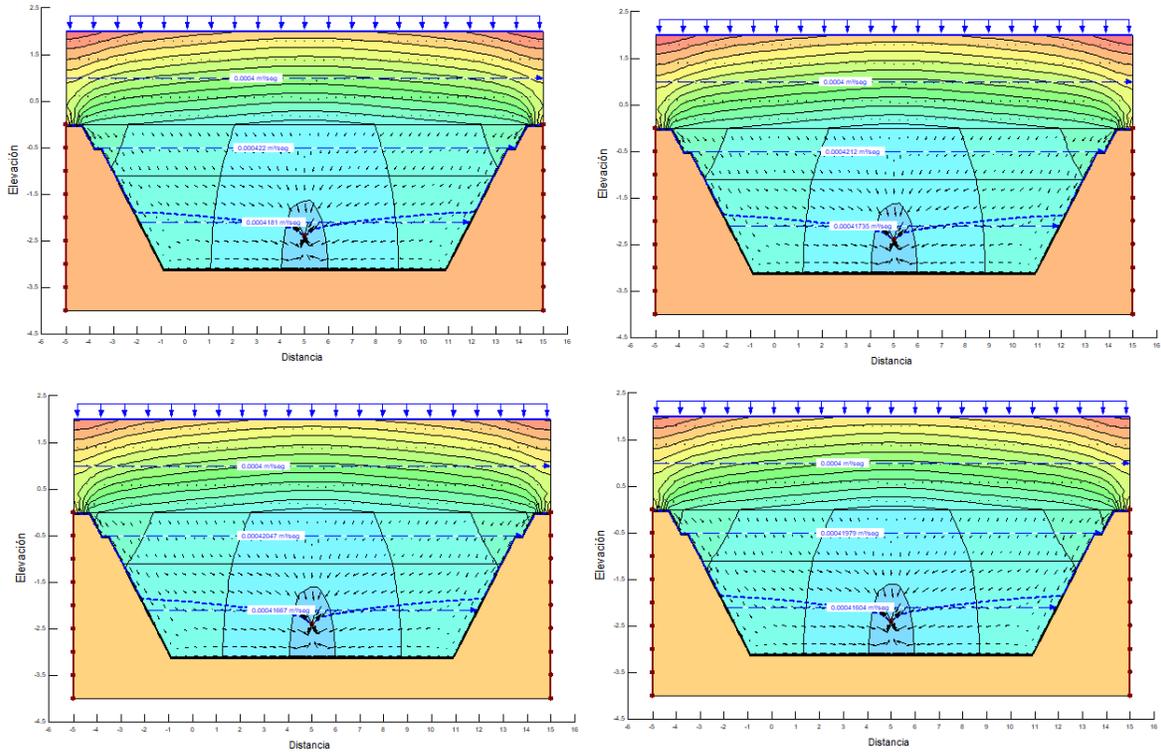
Anexo 55. Resultados del modelo 5 caso 2, MT con DR fijo al 60% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 70% y 80%.



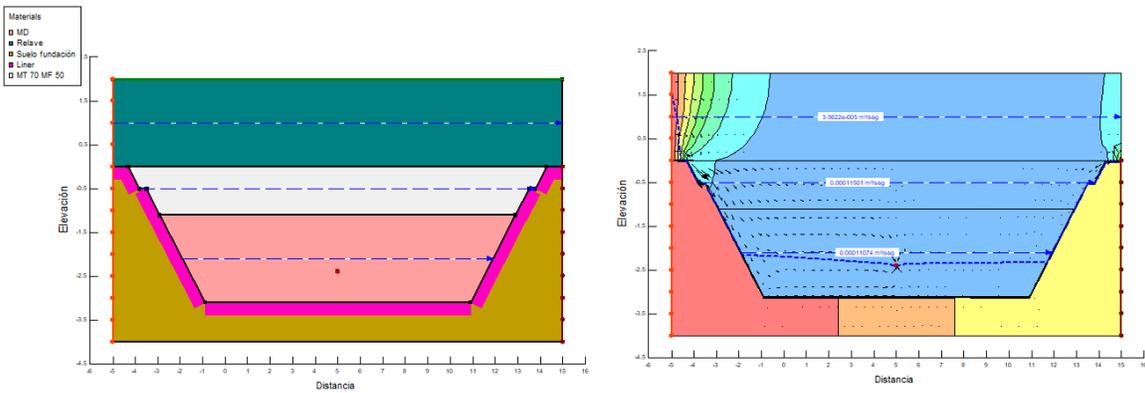
Anexo 56. Definición y resultados del caso base para el modelo 6, caso 1 de SEEP/W.



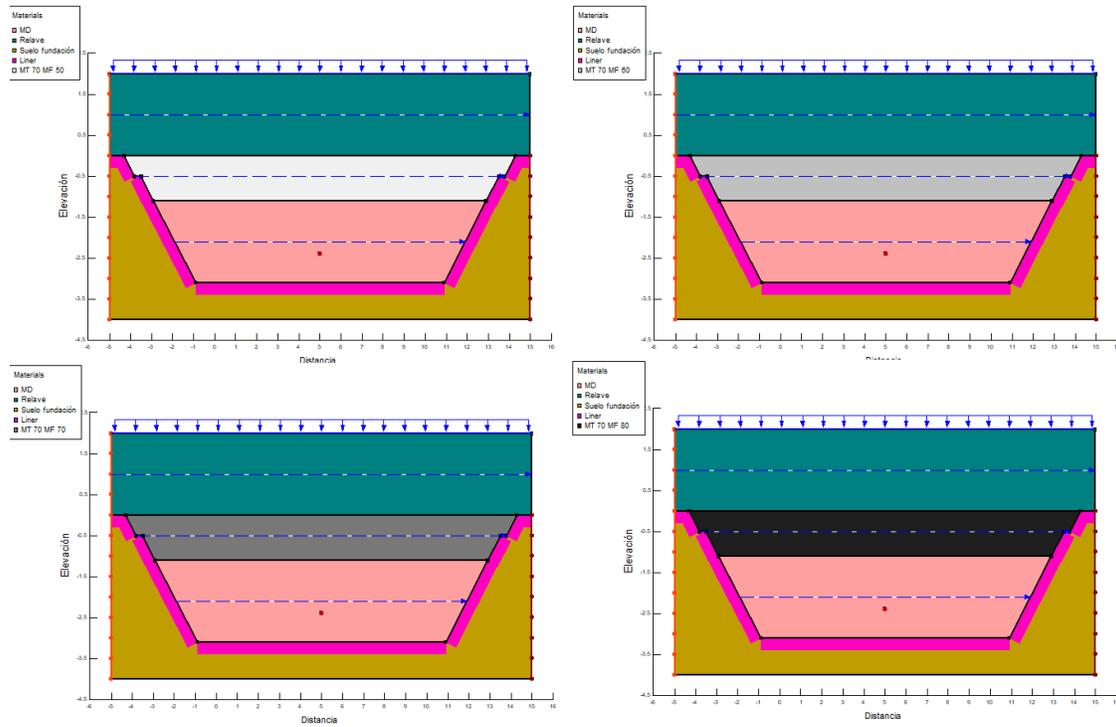
Anexo 57. Definiciones del modelo 6 caso 1, MT con DR fijo al 70% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 70% y 80%.



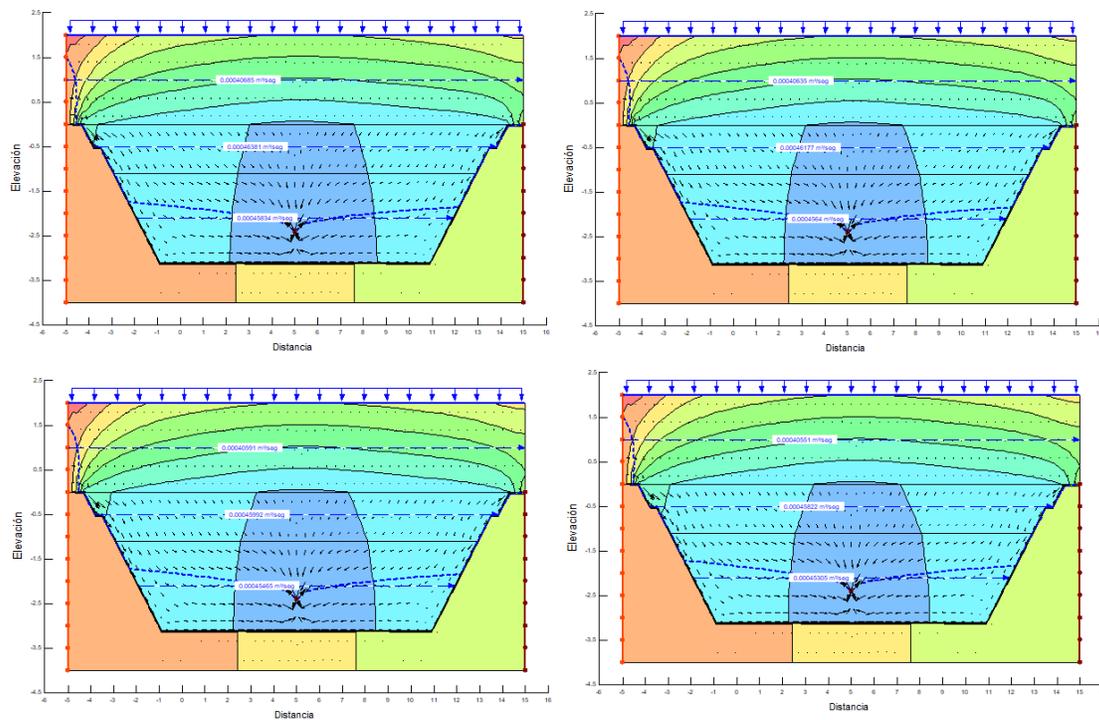
Anexo 58. Resultados del modelo 6 caso 1, MT con DR fijo al 70% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 70% y 80%.



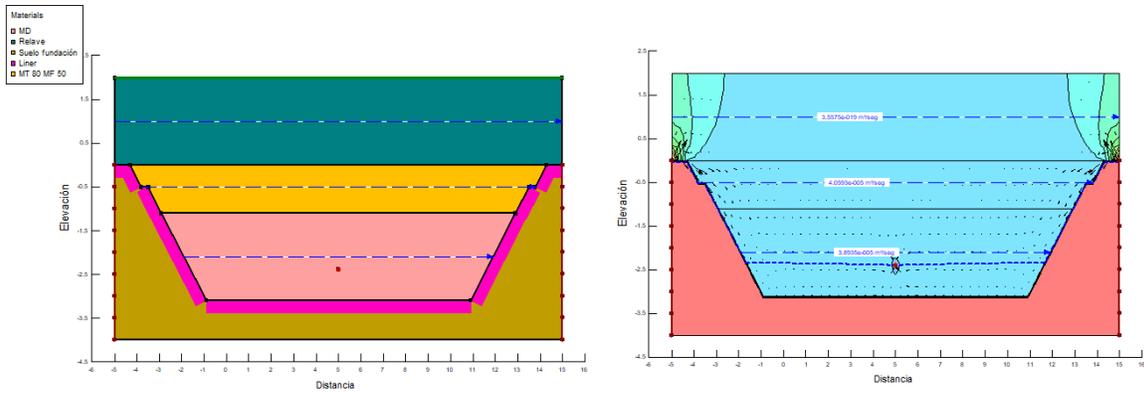
Anexo 59. Definición y resultados del caso base para el modelo 6, caso 2 de SEEP/W.



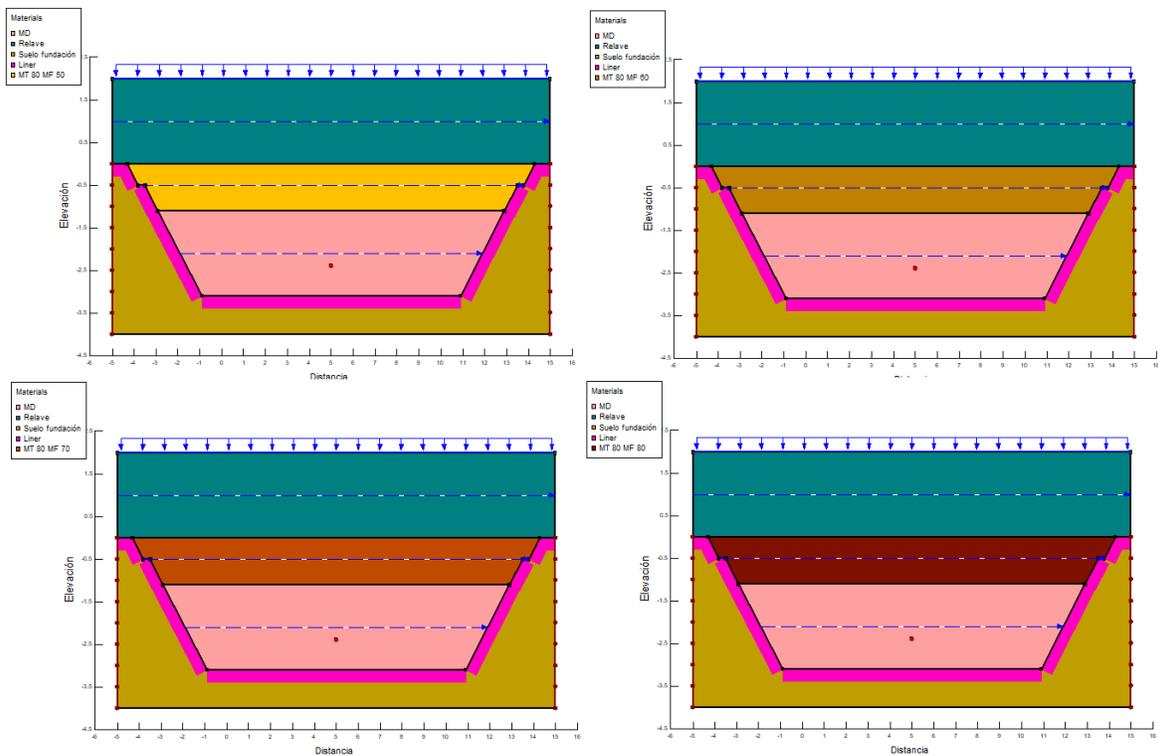
Anexo 60. Definiciones del modelo 6 caso 2, MT con DR fijo al 70% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 70% y 80%.



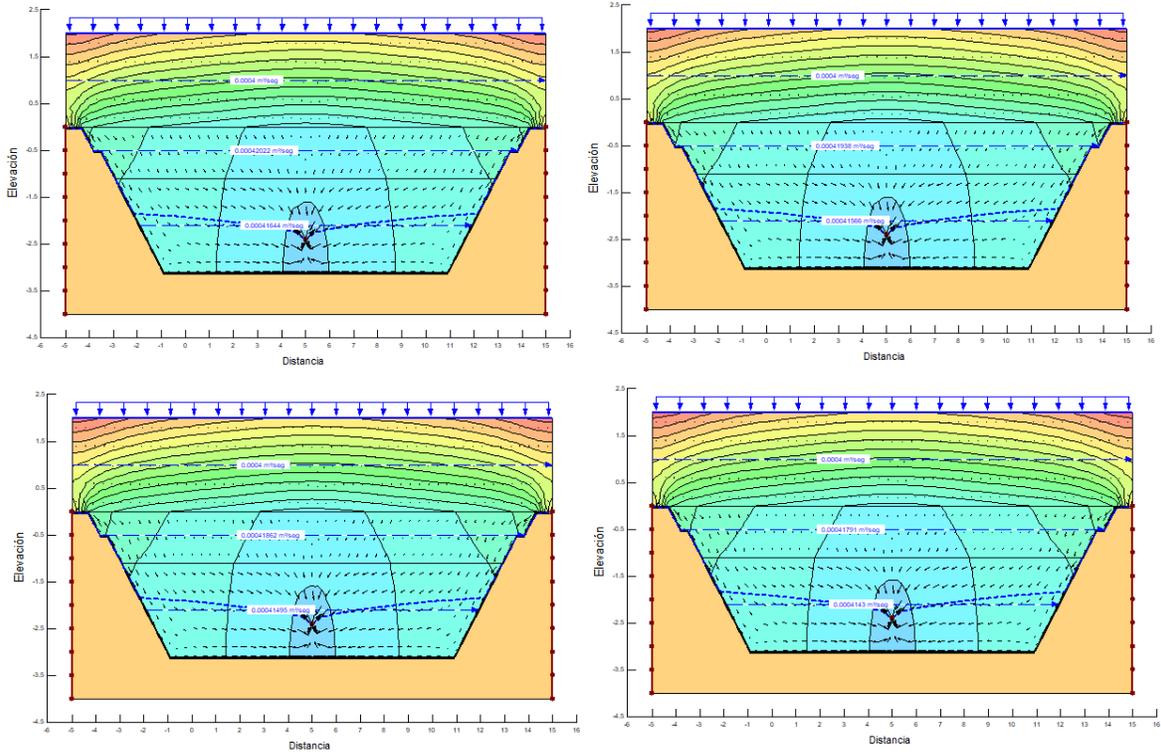
Anexo 61. Resultados del modelo 6 caso 2, MT con DR fijo al 70% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 70% y 80%.



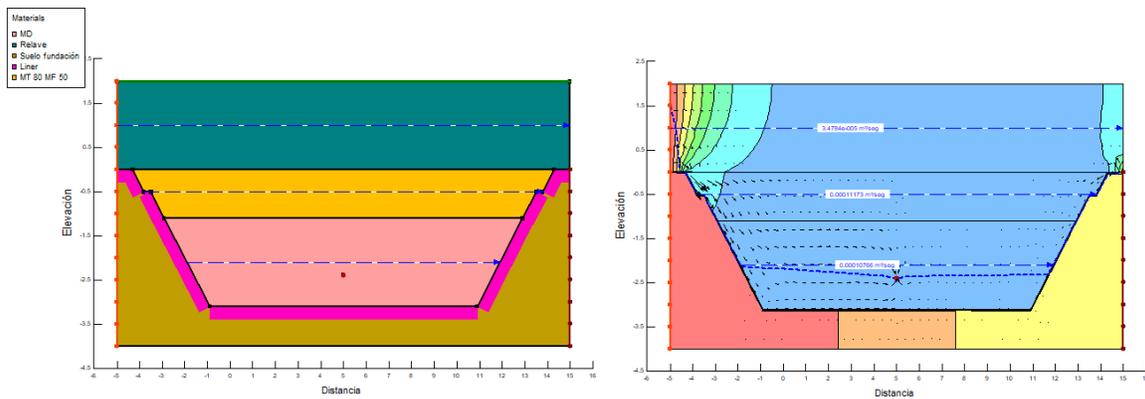
Anexo 62. Definición y resultados del caso base para el modelo 7, caso 1 de SEEP/W.



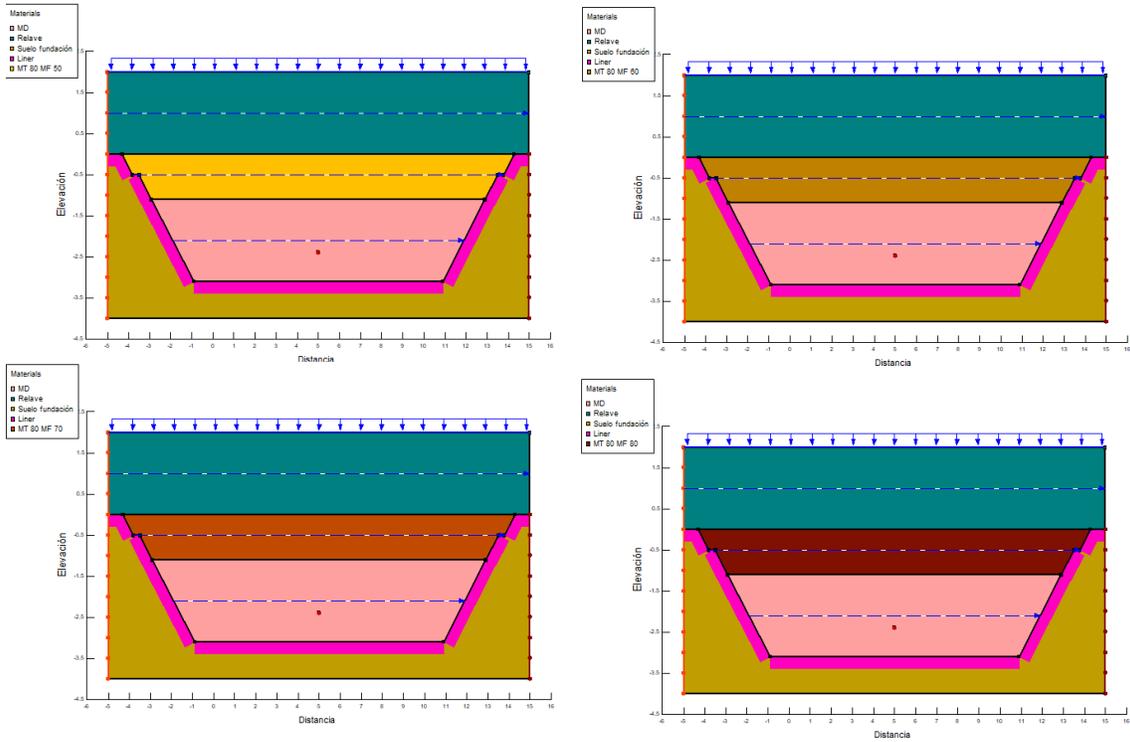
Anexo 63. Definiciones del modelo 7 caso 1, MT con DR fijo al 80% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 70% y 80%.



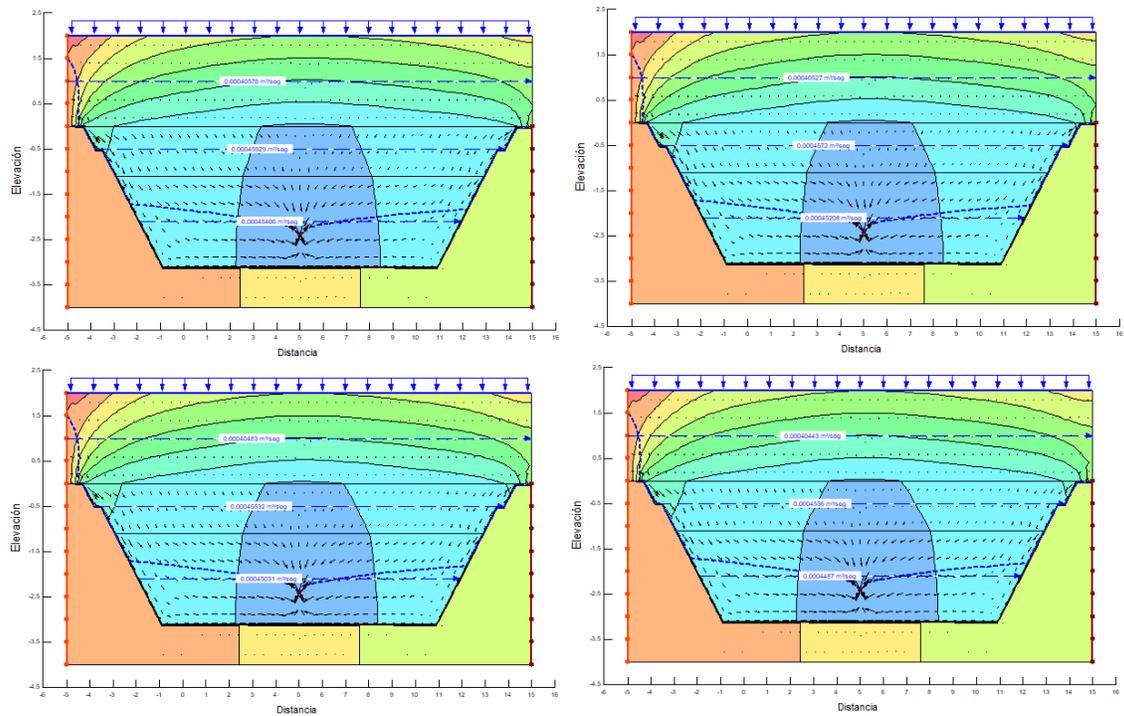
Anexo 64. Resultados del modelo 7 caso 1, MT con DR fijo al 80% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 70% y 80%.



Anexo 65. Definición y resultados del caso base para el modelo 7, caso 2 de SEEP/W.



Anexo 66. Definiciones del modelo 7 caso 2, MT con DR fijo al 80% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 70% y 80%.



Anexo 67. Resultados del modelo 7 caso 2, MT con DR fijo al 80% y MF variable, desde arriba a la izquierda hacia la derecha respectivamente MF=50%, 60%, 70% y 80%.