

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCION**  
Facultad de Ingeniería  
Departamento Ingeniería Metalúrgica

**Profesor Patrocinante**  
Sr. René Gómez Puigpinos

**CARACTERIZACIÓN DE BARRO DE MINA**  
**DIABLO REGIMIENTO, DIVISIÓN EL TENIENTE**



**JAVIER IGNACIO MUSIET WAGHORN**

Informe de Memoria de Título

para optar al Título de

Ingeniero Civil de Minas

Mayo, 2020



## RESUMEN

Uno de los mayores riesgos asociados al método Block/Panel Caving son los estallidos de barro. Estos se definen como la entrada repentina de la mezcla entre material fino y agua hacia labores mineras originada por alguna perturbación, pudiendo generar daño a personas y/o equipos, retraso en la producción o inclusive cierre de sectores productivos.

Dicho lo anterior, es clave identificar y caracterizar el material que conforma esta mezcla de barro para poder estudiar su comportamiento. En particular, este trabajo tiene como objetivo caracterizar el material de la mina Diablo Regimiento, El Teniente, operación la cual ha sufrido este tipo de fenómenos. La caracterización de este material se realizará en base a ensayos granulométricos, de densidad, de corte y de permeabilidad.

Los ensayos se realizaron sobre dos muestras, una de color café (asociada a óxidos) y otra de color gris (asociada a sulfuros). En relación a los ensayos de granulometría, las muestras presentan categorías similares entre ellas, ambas contienen un porcentaje relevante de arcilla y limo, un 28% (material café) y 30% (material gris). Además, tanto el material café como el gris, contienen arena (desde fina a gruesa) y grava. En cuanto a los ensayos de densidad y resistencia al corte las muestras se diferenciaron. Se clasificó al fino de las muestras como arcillas plásticas para el material café con una densidad de  $2.83 \text{ [g/cm}^3\text{]}$  y expansivas para el material gris con una densidad de  $2.87 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ . Por otro lado, de los ensayos de corte resultó que las muestras presentan una pre consolidación y se pueden clasificar como arcilla y limo.

Los ensayos de permeabilidad demostraron que la principal característica de los suelos que favorece la retención de agua es la granulometría, ya que determina la cantidad y/o el tamaño de vacíos que contiene la estructura en el ordenamiento de partículas. La conductividad hidráulica promedio que se obtuvo para la muestra café y gris son  $2.44\text{E-}05 \text{ [cm/s]}$  y  $3.78\text{E-}05 \text{ [cm/s]}$  respectivamente.

Se concluye principalmente que las bajas conductividades hidráulicas que se obtuvieron, implican una mayor posibilidad de formación de bolsones de barro en la columna de quebrado al no permitir el drenaje, creando un potencial riesgo de estallido de barro.



## ABSTRACT

One of the biggest risks associated with the Block/Panel Caving method is mud rushes. These are defined as the sudden entry of the combination between fine material and water into mining work caused by some disturbance, which may cause damage to people and / or equipment, delay in production or even the closure of productive sectors.

Having said that, it is key to identify and characterize the material that makes up this mud combination in order to study its behavior. In particular, this work aims to characterize the material from the Diablo Regimiento mine, El Teniente, an operation that has suffered this type of phenomenon. The characterization of this material will be carried out based on particle size, density, shear and permeability tests.

The tests were carried out for two samples, one brown (associated with oxides) and one gray (associated with sulfides). In relation to the granulometry tests, the samples have similar characteristics between them; both contain a relevant percentage of clay and silt, approximately 28% (brown material) and 30% (gray material). Furthermore, both brown and gray material contain sand (from fine to coarse) and gravel. Regarding the density and shear resistance tests, the samples were slightly different. The fine of the samples was classified as plastic clays for the brown material with a density of 2.83 [g/cm<sup>3</sup>] and expansive clays for the gray material with a density of 2.87 [g/cm<sup>3</sup>]. On the other hand, from the shear tests it turned out that the samples present a pre-consolidation and can be classified as clay and silt.

Permeability tests showed that the main characteristic of soils that favors water retention is granulometry, since it determines the amount and/or size of voids that the structure contains in the particle ordering. The average hydraulic conductivity obtained for the brown and gray sample are 2.44E-05 [cm / s] and 3.78E-05 [cm / s] respectively.

It is mainly concluded that the low hydraulic conductivities that were obtained, imply a greater possibility of formation of mud pockets in the broken column by not allowing drainage, creating a potential risk of mud rushes.



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CAPÍTULO 1:</b> Introducción .....	1
1.1 Antecedentes .....	2
1.2 Objetivo General .....	3
1.3 Objetivos Específicos .....	4
1.4 Metodología de Trabajo .....	4
<b>CAPÍTULO 2:</b> Revisión Bibliográfica.....	6
2.1 Estallido de Barro.....	6
2.1.1 Factores desencadenantes .....	7
2.1.2 Mecanismos de ingreso de barro.....	8
2.2 Hidrogeología.....	9
2.2.1 Acuíferos.....	10
2.3 Permeabilidad.....	13
2.3.1 Ley de Darcy .....	14
2.3.2 Métodos para determinar la conductividad hidráulica.....	18
<b>CAPÍTULO 3:</b> Diseño y Construcción de Permeámetros.....	29
3.1 Diseño.....	29
3.2 Construcción.....	30
<b>CAPÍTULO 4:</b> Caracterización de los Barros.....	32
4.1 Granulometría.....	33
4.1.1 Método de tamizado.....	34
4.1.2 Método por difracción de rayos láser.....	36
4.1.3 Resultados .....	36
4.2 Densidad.....	38



4.2.1	Picnometría .....	39
4.2.2	Resultados .....	42
4.3	Resistencia al Corte .....	43
4.3.1	Ensayo de corte directo .....	44
4.3.2	Resultados .....	45
4.4	Conductividad Hidráulica .....	46
4.4.1	Método del permeámetro .....	47
4.4.2	Resultados .....	50
<b>CAPÍTULO 5: Análisis de resultados .....</b>		<b>51</b>
5.1	Representatividad de los Ensayos .....	51
5.2	Granulometría.....	52
5.2.1	Clasificación .....	52
5.2.2	Comparación de materiales café y gris .....	53
5.3	Densidad.....	53
5.4	Envolvente Mohr-Coulomb.....	53
5.5	Ensayo de Permeabilidad .....	54
5.5.1	Representatividad de los permeámetros construidos .....	54
5.5.2	Densidad aparente .....	54
5.5.3	Clasificación .....	55
5.5.4	Índice de vacíos.....	55
5.5.5	Conductividad hidráulica práctica y teórica .....	56
<b>CAPÍTULO 6: Conclusiones y recomendaciones.....</b>		<b>59</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>		<b>61</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>65</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Bombeos de barro ocurridos en división El Teniente [1] .....	2
Tabla 2: Matriz de criticidad de El Teniente para bombeo de barro [6].....	3
Tabla 3: Normas ASTM utilizadas .....	5
Tabla 4: Valores del coeficiente C, en función de la porosidad n [31].....	24
Tabla 5: Dimensiones de la celda de los permeámetros .....	29
Tabla 6: Clasificación de suelos según tamaño de partículas [13] .....	34
Tabla 7: Masas de muestras para ensayo granulométrico.....	34
Tabla 8: Indicadores de granulometría .....	38
Tabla 9: Densidad de materiales [40] .....	39
Tabla 10: Masas de las muestras para picnometría.....	41
Tabla 11: Datos registrados en picnometría .....	42
Tabla 12: Resultados de la picnometría.....	42
Tabla 13: Valores típicos de ángulos de fricción para distintos suelos [43].....	44
Tabla 14: Angulo de fricción y cohesión para muestras café y gris .....	46
Tabla 15: Clasificación de suelos según su conductividad hidráulica [13] .....	46
Tabla 16: Masas de muestras en permeámetros.....	49
Tabla 17: Conductividades hidráulicas.....	50
Tabla 18: Densidades aparentes.....	54
Tabla 19: Índices de vacíos en los permeámetros.....	55
Tabla 20: Comparación de la conductividad hidráulica con ecuación de Hazen .....	58



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Diamante de estallido de barro [7] .....	7
Ilustración 2: Ciclo hidrológico [9] .....	9
Ilustración 3: Esquematización de un acuífero colgado [10].....	12
Ilustración 4: (a) Confinados, (b) no confinados, (c) colgados, (d) semiconfinados [12] .....	13
Ilustración 5: Permeámetro de carga constante, equipo similar al utilizado por Darcy. ....	15
Ilustración 6: Relación experimental de velocidad del fluido y el gradiente hidráulico [12]...	17
Ilustración 7: Ensayo de carga constante [8] .....	19
Ilustración 8: Ensayo de carga variable [8] .....	20
Ilustración 9: Comparación entre la ecuación de Hazen y datos experimentales [31] .....	23
Ilustración 10: Relación de la permeabilidad con el tamaño de partícula [35].....	25
Ilustración 11: Permeabilidad v/s tamaño de partícula para diferentes texturas [35] .....	26
Ilustración 12: Esquema de permeámetros .....	30
Ilustración 13: Sistema de permeámetros .....	31
Ilustración 14: Muestras extraídas de Diablo Regimiento, (a) café, (b) gris .....	32
Ilustración 15: Distribución granulométrica general de la muestra café y gris .....	35
Ilustración 16: Distribución granulométrica completa para las muestras café y gris .....	37
Ilustración 17: Picnómetro.....	40
Ilustración 18: Aplicación de esfuerzos en el equipo de corte .....	45
Ilustración 19: Envoltentes de falla de material café y gris .....	45
Ilustración 20: Permeámetro 4, muestra mal compactada .....	48
Ilustración 21: Permeámetro 2, (a) ensayo 1; (b) ensayo 2 .....	49
Ilustración 22: Esquema de caso flotante (matriz y partículas sobre tamaño) [44] .....	51
Ilustración 23: Clasificación del material café según tamaño de partículas .....	52
Ilustración 24: Clasificación del material gris según tamaño de partículas.....	52
Ilustración 25: Conductividad hidráulica experimental de muestras café y gris .....	56
Ilustración 26: Conductividad hidráulica experimental y teórica de muestras café y gris .....	57



## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A: Mecanismos externos de ingreso de barro .....	65
Anexo B: Mecanismos internos de ingreso de barro .....	68
Anexo C: Materiales del sistema de permeámetros .....	71
Anexo D: Construcción del sistema de permeámetros .....	72
Anexo E: Ensayos Granulométricos .....	74
Anexo F: Picnometría .....	80
Anexo G: Ensayo de corte .....	82
Anexo H: Ensayos de permeabilidad .....	83
Anexo I: Graficas volumen vs tiempo .....	84
Anexo J: Índice de vacíos .....	88
Anexo K: Calculo conductividades hidráulicas teóricas .....	89





## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Uno de los métodos de extracción que se utiliza cada vez más hoy en día en minería es el Block/Panel Caving debido a la gran cantidad de yacimientos que se encuentran en profundidad. Además, es un método de explotación de hundimiento de bajo costo y con una alta tasa de extracción en comparación con otros, lo que lo hace económicamente atractivo para explotar yacimientos masivos [1].

El método Block/Panel Caving corresponde a un método de explotación subterránea, en donde, mediante la acción de perforaciones y tronaduras iniciales, se produce un corte el que induce una falla en el macizo rocoso desde su base, creando un vacío que inicia el hundimiento por efecto de la gravedad. El hundimiento se propaga a través del cuerpo mineralizado hasta que se genera la subsidencia. Luego el material fracturado es extraído desde los puntos de extracción en el nivel de producción [2].

Un punto importante en relación al método Block/Panel Caving, y en general, en métodos de hundimiento, es el ingreso de aguas en las labores subterráneas, tanto aguas superficiales como subterráneas. Esto es producto del cráter de subsidencia que se forma en la superficie, el que propicia la acumulación de aguas provenientes de precipitaciones o deshielos, y que posteriormente se filtran en la mina o hacia acuíferos próximos. A lo anterior se suma la condición inherente de este método que es la generación de material fino a causa de la fragmentación secundaria que ocurre en la columna de quebrado. Estos dos sucesos (ingreso de agua y formación de fino) al mezclarse conforman barro, que al acumularse en la columna de quebrado puede colapsar como consecuencia de una perturbación (por alguna actividad de la misma explotación del yacimiento o por sismos) y entrar violenta y repentinamente a diferentes labores mineras. Este fenómeno descrito se le conoce como estallido o bombeo de barro [3].

Los estallidos o bombeos de barro son uno de los principales riesgos o problemas a los que se enfrenta la industria minera, siendo cada vez más frecuente. Las operaciones, bajo estas circunstancias, están expuestas a peligros, tanto económicos como de salud, que pueden causar retrasos en la extracción del mineral, daño en equipos mineros, e incluso, pérdidas de vidas humanas.



Es por lo anterior que se hace imprescindible evaluar las distintas características y mecanismos que provocan estas situaciones. Una de estas características recae en el material o el suelo en el que se desarrolla la explotación. Así, caracterizar el material que acumulará o transmitirá el agua, en especial, su permeabilidad y/o conductividad hidráulica, toma importante relevancia en este trabajo.

## 1.1 Antecedentes

El Teniente es un complejo minero-metalúrgico, operado por CODELCO, ubicado a 50 kilómetros al este de la ciudad de Rancagua. Se considera la mina de cobre subterránea más grande del mundo. El método de explotación que utiliza es Block/Panel Caving mecanizado con palas LHD para extraer y transportar el mineral a los piques de traspaso [4].

Actualmente la división el Teniente posee ocho minas o sectores con operaciones activas, dentro de ellas, la mina Diablo Regimiento. Esta se localiza en el nivel sub 5 de producción, al sur del yacimiento, con una cota en el nivel de hundimiento de 2210 [msnm] [5].

La Mina Diablo Regimiento utiliza Panel Caving, por lo que esta propensa a sufrir bombeos de barro al estar conectada con la superficie, facilitando el ingreso de agua y agregando las condiciones propias del método.

A lo largo de la historia de El Teniente ha habido varios eventos de bombeo de barro, los que, en algunos casos, han implicado consecuencias fatales. En la Tabla 1 se presenta un resumen de los eventos desde 1989 hasta 2015.

**Tabla 1: Bombeos de barro ocurridos en división El Teniente [1]**

Sector	Fecha	Tipo de barro
Teniente 4 Norte	Sep - 1989	Acuoso
Teniente Sub 4 Dacita	Dic - 1995	Acuoso
Teniente 6 Quebrada Teniente	Oct - 1999	Acuoso
Teniente 4 Regimiento	Oct - 2007	Pastoso
Teniente 6 Quebrada Andes	May - 2008	Acuoso
Teniente 6 Pipa Enlace	May - 2009	Acuoso
Teniente 6 Recursos Norte	Mar - 2010	Acuoso
Teniente Sub 5 Esmeralda Sur	Dic - 2015	Acuoso



División El Teniente ha tomado diferentes medidas para combatir los eventos de bombeos de barro, sin embargo, en ocasiones esto supone la pérdida de reservas planificadas. La Tabla 2 muestra la matriz de criticidad que ha sido desarrollada para El Teniente como medida de prevención, donde se relaciona la granulometría con el contenido de humedad del material. Esta tabla se basa en datos históricos de siete eventos ocurridos.

**Tabla 2: Matriz de criticidad de El Teniente para bombeo de barro [6]**

Contenido de humedad (H)	G: Tamaño de grano ( $\leq 25$ cm)		
	G < 30% (Dominado por granulometría gruesa)	$30\% \leq G < 70\%$	G $\geq 70\%$ (Dominado por granulometría fina)
< 4%			
$4\% \leq H < 7\%$			
$7\% \leq H < 10\%$			
$H \geq 10\%$			

	Condición normal
	En observación
	Riesgo crítico

Las tres categorías presentadas en la tabla con diferentes colores, suponen las condiciones para definir la continuidad de las operaciones de extracción. El color verde indica que no hay riesgo de bombeos, por ende, se continúa trabajando de forma normal. Para el color amarillo los trabajos se debiesen hacer con mayor precaución y para el color rojo se debe hacer una inspección con personal técnico para que estudie la situación, en la que incluso, se puede llegar a la conclusión de cerrar el punto de extracción en cuestión.

## 1.2 Objetivo General

- ❖ Caracterizar y analizar las muestras de barro obtenidas de la mina Diablo Regimiento, El Teniente, enfocado en las variables críticas para el estallido de barro.



### 1.3 Objetivos Específicos

- ❖ Diseñar y construir permeámetros para determinar la conductividad hidráulica de las muestras, utilizando agua como fluido.
- ❖ Determinar la granulometría, densidad y resistencia al corte.
- ❖ Clasificar los materiales (café y gris).
- ❖ Relacionar la granulometría de las muestras con la conductividad hidráulica obtenida.
- ❖ Comparar los resultados de conductividad hidráulica entre las muestras y observar las diferencias frente a ecuaciones empíricas.

### 1.4 Metodología de Trabajo

Resumen de los principales contenidos de esta memoria.

- Revisión bibliográfica: En este capítulo se presentan los conceptos más relevantes y que ayudan a comprender la problemática, la descripción de los eventos de estallido de barro en minas subterráneas, y el análisis de este trabajo. También, como el foco de este trabajo está principalmente en la conductividad hidráulica, se tiene la explicación de cómo el agua llega a ser parte de este problema a través del ciclo hidrológico, definiendo conceptos fundamentales, como acuíferos. Finalmente se hizo una revisión sobre la “permeabilidad” como la base de esta memoria, la que incluye varios estudios de distintos autores.
- Diseño y construcción de permeámetros: Se describe el diseño y la construcción especial de los permeámetros, puesto que no se contaba con estos equipos en los laboratorios para determinar la conductividad hidráulica.
- Caracterización de los barros: Se introduce la relevancia de los diferentes ensayos para caracterizar los materiales obtenidos de la mina y se describe como se realizaron. En cada ensayo se presentan los resultados con su respectiva interpretación y/o comentario. Los ensayos fueron realizados en base a las normas de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM). En la Tabla 3 se presentan las normas utilizadas para los ensayos realizados.



***Tabla 3: Normas ASTM utilizadas***

Norma	Ensayo
ASTM C136	Granulometría
ASTM D854	Picnometría
ASTM D3080	Corte directo
ASTM D5084	Conductividad hidráulica

- Análisis de resultados: Se analizan los resultados y se responde a los objetivos planteados.
- Conclusiones y recomendaciones: Se concluye sobre el trabajo realizado, en base al análisis de los resultados y se indican recomendaciones para trabajos futuros similares que no se consideraron en este.





## **CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Estallido de Barro**

En minería, se le llama estallido o bombeo de barro a la entrada repentina de una mezcla de finos y agua en puntos de extracción o en otras aberturas subterráneas. El barro entra de forma tan rápida que el personal no tiene tiempo para escapar [7]. Los estallidos de barro, aparte de poder tener consecuencias en vidas humanas, también pueden dañar considerablemente la infraestructura y equipos en labores subterráneas, lo que significaría detener la producción.

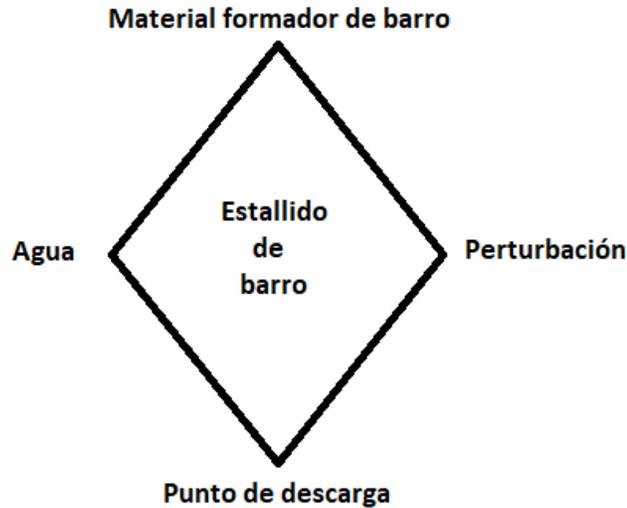
La mayor parte de los casos de estallidos de barro ocurren en minas que aplican métodos de hundimiento, como Block Caving o Sublevel Caving. Estos métodos están más susceptibles a la formación de barro debido a que conectan la superficie con las excavaciones subterráneas, entonces se hace más fácil la entrada de agua y barro. Los métodos de excavación por bloques pueden acumular agua, generar finos y proporcionar perturbaciones y puntos de descarga, por lo tanto, es importante la evaluación de riesgo en estos.

Existen algunas clasificaciones de barro en función de su movilidad, se puede hablar de un barro fluido cuando contiene un 50% de agua y puede fluir a distancias horizontales sobre los 500 [m]. Este se asemeja más a una descarga de agua que a un flujo de barro, fluye fácilmente. Por otro lado, se habla de barro viscoso cuando el barro tiene bajo contenido de humedad, entre un 17% a 23%. Este no fluirá libremente por gravedad, pero si es sometido a esfuerzos y bajo ciertas condiciones, puede ser movilizadado y expulsado fuera del punto de extracción. El barro viscoso puede ser destructivo y ocurrir en cualquier abertura disponible [3].



### 2.1.1 Factores desencadenantes

Basado en hechos, para que ocurra un estallido de barro, deben estar presente cuatro elementos, que se presentan en la Ilustración 1.



*Ilustración 1: Diamante de estallido de barro [7]*

El material formador de barro se caracteriza principalmente por ser fino de tipo arcilloso, este se puede desplazar desde la superficie o de la misma zona en donde se realiza la excavación. Este tipo de material es inevitable en métodos de hundimiento.

El agua puede fluir desde fuentes internas, como acuíferos, aguas provenientes de labores mineras antiguas y de la misma agua utilizada en minería. El agua también puede fluir desde fuentes externas, como precipitaciones, deshielos, lagos, tranques de relave y en general de fuentes que se acumulan sobre la superficie.

Los puntos de descarga pueden ser cualquier abertura dentro del ámbito minero por donde puede fluir libremente el agua barro, la mayor parte del tiempo son puntos de extracción.

Se puede hablar de dos tipos de perturbaciones: cuando están relacionadas con los mismos trabajos de minería, por ejemplo, extracción del mineral o tronaduras, y cuando son provocadas por algún suceso externo como es en el caso de sismos. Todo este tipo de eventos o perturbaciones pueden desencadenar un estallido de barro.



### 2.1.2 Mecanismos de ingreso de barro

Son los tipos de formación de barro que intervienen en las minas subterráneas. Según desde donde provenga el barro, los mecanismos de falla se clasifican en externos e internos [7].

Los mecanismos externos ocurren cuando el barro es formado fuera del ambiente minero subterráneo. El barro puede ingresar a labores subterráneas desde el cráter de subsidencia a través de flujos de relaves con finos y avanzar por la columna de quebrado formando arcos inestables que pueden liberarse de forma violenta. Otras razones pueden ser por el deslizamiento de taludes de minas a cielo abierto que se encuentren sobre la actividad subterránea o por alguna falla de rellenos de mala calidad (ver Anexo A).

Por otro lado, los mecanismos internos son aquellos en que el barro se produce dentro de la mina subterránea. El barro se puede formar cuando el material diluyente entra lateralmente en la columna de quebrado, luego debido a la extracción se produce conminución secundaria, la cual genera finos que taponean los espacios vacíos del material (en la columna) en conjunto con aguas subterráneas y/o superficiales, lo que provoca la formación de bolsones que por cualquier perturbación pueden ceder y causar el flujo de barro (ver Anexo B).

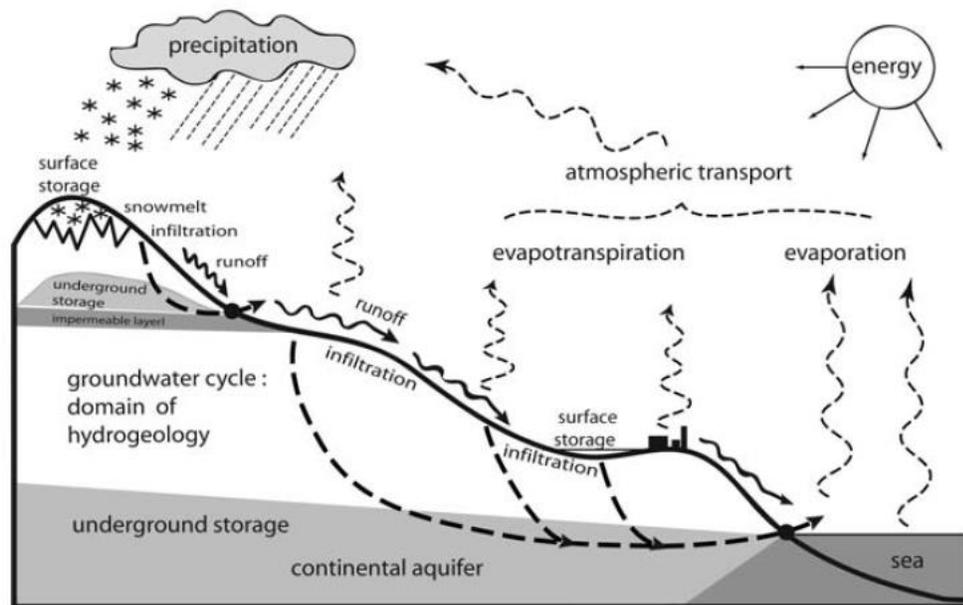
Otro mecanismo de generación de barro internos ocurre cuando se forman arcos estables que posteriormente colapsan compactando el barro que luego es descargado, y también cuando se reduce el drenaje en la columna de material tapado por estéril (ver Anexo B).

Existen casos donde el fenómeno se puede dar como una combinación de ambas fuentes.

## 2.2 Hidrogeología

La hidrogeología es la disciplina encargada del estudio del agua subterránea sobre su origen, distribución, propiedades, sus estados (líquido, sólido, gaseoso) y también sobre las rocas y suelos que la rodean, ya que los procesos que ocurren en el interior de estos rigen su movimiento.

El ciclo hidrológico se considera como la circulación continua del agua en la superficie. El agua de la superficie se evapora y eleva hacia la atmósfera donde se condensa y posteriormente precipita directamente en los océanos y superficies con vegetación donde vuelve a comenzar la evaporización y evapotranspiración respectivamente. Sin embargo, parte del agua precipitada se infiltra en el suelo y rocas subyacentes para formar aguas subterráneas [8]. En la Ilustración 2 se esquematiza el funcionamiento del ciclo hidrológico.



*Ilustración 2: Ciclo hidrológico [9]*

Hay que hacer una distinción entre agua subsuperficial (o agua bajo la superficie) y agua subterránea, pues generalmente cuando se habla de agua subterránea, se refiere al agua que está contenida en zonas saturadas (donde todos los espacios vacíos están ocupados por agua), no obstante, también existe agua contenida en zonas no saturadas (donde solo parte de los espacios vacíos contienen agua), llamada agua freática [11]. El término “agua subsuperficial” incluye los otros dos



términos. Casi el 99% de las aguas dulces se encuentran como aguas subterráneas, lo que implica un especial interés en el estudio de estas [10].

### 2.2.1 Acuíferos

Los acuíferos son las principales unidades hidrogeológicas debido a su importancia con respecto a la producción de aguas subterráneas [8]. Un acuífero es una formación geológica porosa completamente saturada en agua, que puede transmitir cantidades significativas de esta, bajo un gradiente hidráulico ordinario. Por lo tanto, los acuíferos tienen suficiente permeabilidad para transmitir agua (además de bombearla) y así poder obtener importantes beneficios económicos [10-12]. Los acuíferos se caracterizan por su geometría y por las características intrínsecas de las rocas que lo forman, como litología, porosidad, permeabilidad, fracturación y homogeneidad [9].

Existen cuatro tipos principales de formaciones rocosas que sirven como acuíferos, tales como la arena y grava no consolidadas, arenisca, rocas carbonatadas y rocas volcánicas fracturadas. Así, el término acuífero se usa para formaciones que tienen una permeabilidad relativamente mayor que las formaciones a su alrededor [8].

Los acuíferos forman parte del ciclo hidrológico. Estos reciben agua a través de precipitaciones, filtraciones de ríos y arroyos, por transferencias laterales provenientes de otro acuífero y por fugas de acuíferos situados por arriba o abajo. Por otro lado, así como recibe agua también descarga, y lo hace generalmente en manantiales, ríos o arroyos, hacia acuíferos laterales, por fugas hacia acuíferos sobre o bajo de este y por pozos artificiales hechos por el hombre [8]. El tiempo de residencia del agua en los acuíferos puede ser desde pocas horas hasta miles de años [9].

Las formaciones geológicas que se ubican entre los acuíferos se denominan acuitardos y acuicludos. Los acuitardos son formaciones geológicas con baja permeabilidad, por lo que transmite el agua a una velocidad muy baja en comparación a los acuíferos, por lo tanto, actúan como una barrera parcial al flujo de aguas subterráneas entre los acuíferos que se localizan sobre estos. El material que contienen los acuitardos puede ser similar al de los acuíferos, pero con mayor cantidad de finos, o con menor cantidad de fracturas [8, 12]. En cambio, los acuicludos son unidades geológicas saturadas de tan baja permeabilidad, que son incapaces de transmitir cantidades significativas de agua bajo gradientes hidráulicos ordinarios, y pueden actuar como una barrera para el flujo de aguas subterráneas regionales. Principalmente, los acuicludos están formados por arcillas gruesas y rocas ígneas no



fracturadas [8, 10]. Para terminar, se define el concepto (poco utilizado) de acuífugo, como una formación impermeable que no contiene ni transmite agua [12].

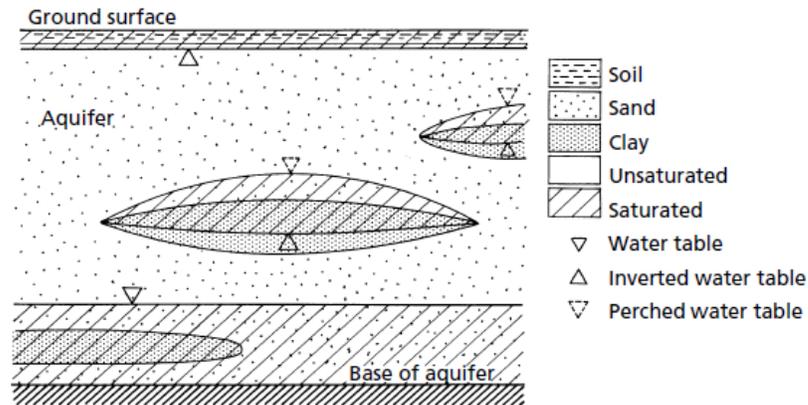
Las condiciones del agua subterránea están fuertemente influenciadas por las posiciones de las unidades litológicas y por su estructura geológica. Así, los acuíferos se pueden clasificar en cuatro tipos según su comportamiento hidráulico. Entre estos se encuentran los acuíferos no confinados y confinados como los principales, y como casos más particulares, los acuíferos “colgados” y semiconfinados (o con fuga). Estos dependen de la existencia de un acuitardo o un acuicludo por encima de ellos.

Si la superficie del acuífero está limitada por un techo impermeable que impide el paso del agua, a este se le nombra “acuífero confinado”. El agua se encuentra “encerrada” entre dos acuitardos o entre un acuitardo y un acuicludo por encima y por debajo. Esta agua retenida genera presión hidrostática, creada por el propio peso del agua y de las formaciones geológicas suprayacentes [8]. El nivel de agua en un pozo perforado en un acuífero confinado, se elevará por encima de la parte superior de este debido a su alta presión (ver Ilustración 4 (a)). El agua fluirá hacia la superficie terrestre y se desbordará, en estas condiciones se dice que se está en presencia de un flujo artesiano [9]. Es por esto que a este tipo de acuíferos también se les nombra como acuíferos artesianos. A diferencia de los acuíferos no confinados, los acuíferos confinados no tienen una superficie freática, pero si una superficie piezométrica [11]. Los acuíferos artesianos o confinados son comunes en lugares con glaciares, donde un cuerpo de arena y grava puede haber estado cubierto por arcillas o sedimentos lacustres de una glaciación posterior [11].

Los acuíferos no confinados existen cuando no hay capas confinadas sobre ellos (ni un acuitardo, ni un acuicludo), es decir, no hay medio que obstaculice el libre paso del agua hacia ellos para recargarse [8]. En otras palabras, se trata de un acuífero no confinado cuando este está limitado desde arriba por una superficie freática de agua en contacto con la atmosfera. Cuando el flujo del acuífero es principalmente horizontal, la superficie freática coincide con la superficie piezométrica [12]. Si se hiciera un pozo desde la superficie terrestre hacia este tipo de acuíferos, el nivel de agua que alcance el pozo sería el mismo que en el acuífero, esto se ve en la Ilustración 4 (b).

Los acuíferos colgados son un caso especial de acuíferos no confinados. Por definición, un acuífero colgado es una zona con agua subterránea saturada la cual se encuentra dentro de una zona

no saturada que lo separa de otro acuífero por debajo [8]. Estos se asientan sobre una capa semipermeable o de materiales impermeables como la arcilla, que permite que el agua se mantenga, creando una capa freática “colgada” como se muestra en la Ilustración 3. Como la capa freática ocurre en condiciones donde el agua subterránea está a presión atmosférica, las capas freáticas invertidas ocurren en la base del lente de agua colgada en la capa de arcilla [10].

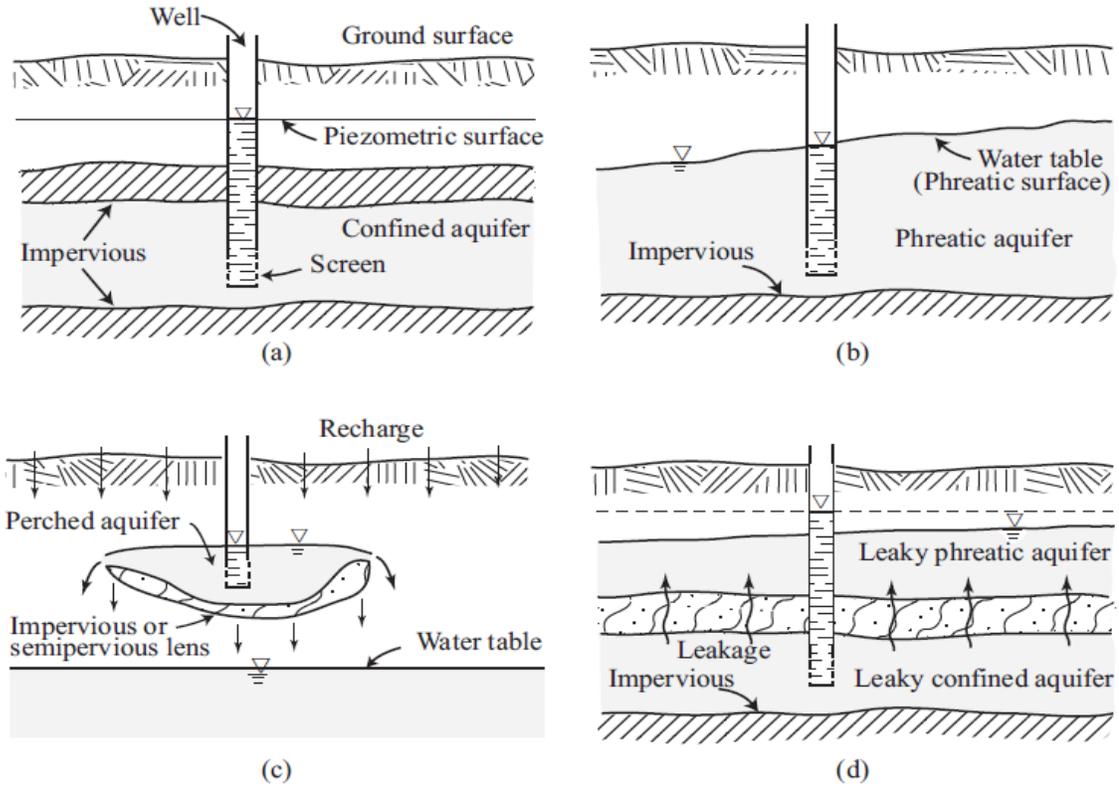


**Ilustración 3: Esquemática de un acuífero colgado [10]**

Los acuíferos colgados tienen un área de extensión reducida y existen solo por un periodo limitado de tiempo, pues el agua que contiene se va drenando hacia el acuífero subyacente [12].

Los acuíferos semiconfinados o con fuga son un caso particular de acuíferos confinados. Cuando un acuífero es confinado por un acuitardo en lugar de un acuicludo, se le conoce como “acuífero semiconfinado”. Por lo general, posee propiedades comunes a un acuífero confinado, como una superficie piezométrica alta, pero parte del agua fluirá dentro o fuera del acuífero a través de los acuitardos [11]. Hay casos en que los acuíferos no confinados también presentan fugas por debajo. Esto ocurre ya que en lugar de estar limitados por una capa impermeable (como acuicludo), están limitados por un acuitardo, como se ve en la Ilustración 4 (d) [12].

Para una mayor comprensión, en la Ilustración 4 se presenta un resumen esquemático de cada tipo de acuífero mencionado con un pozo perforado.



*Ilustración 4: (a) Confinados, (b) no confinados, (c) colgados, (d) semiconfinados [12]*

## 2.3 Permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad o facilidad con la que un material permite el paso de un fluido a través de él, sin alterar su estructura interna. Se dice que un material es permeable si contiene vacíos continuos, debido a que dicho vacío está contenido en todos los suelos, incluidas las arcillas más rígidas [13]. También se afirma que un material es permeable cuando pasa una cantidad de fluido significativa a través de él en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable.

En los suelos todos los poros están conectados entre sí, los poros aislados son imposibles en una agrupación de partículas, sin importar su forma. Incluso en los suelos de grano más fino todos los huecos están interconectados, por esto el agua puede fluir a través de los suelos naturales más compactos [14].



Diferentes factores inciden directamente en los resultados cuando se requiere medir la permeabilidad de un suelo, entre los cuales se destaca la distribución granulométrica. El tamaño promedio de los poros es proporcional con respecto al tamaño promedio de los granos, facilitando o dificultando la creación de canales para el paso del fluido. También ha sido demostrado que el tamaño de los granos más finos en el suelo es el principal factor de su permeabilidad [13].

Por otro lado, existen factores que se relacionan con el fluido, entre estos, la temperatura es el que toma mayor relevancia, ya que afecta la viscosidad del fluido. La temperatura está inversamente relacionada con la viscosidad, por lo tanto, a mayor temperatura, el fluido tendrá mayor fluidez y aumentará la conductividad hidráulica.

Otros factores como la densidad, la rugosidad y/o forma de los granos, el grado de saturación y la estructura interna del suelo también varían los resultados de la conductividad hidráulica. Más adelante se distinguen los términos permeabilidad y conductividad hidráulica.

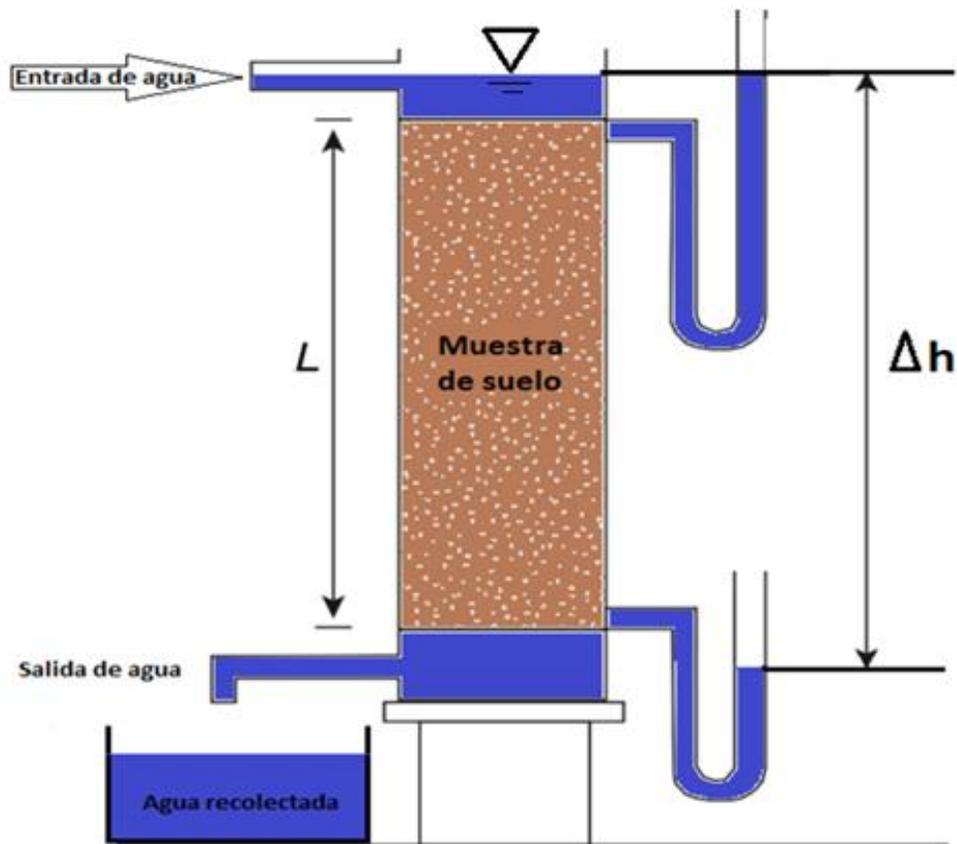
### **2.3.1 Ley de Darcy**

Henry Philibert Gaspard Darcy, fue un ingeniero francés que trabajó muchos años en el abastecimiento de agua en Dijon, Francia. Darcy investigó sobre el flujo de agua a través de los medios porosos, ya que se utilizaban filtros de arena para depurar el agua. En 1856 presentó el primer estudio sistemático sobre el tema, en el cual se incluía la descripción de sus experimentos y la obtención de la ley (Ley de Darcy) [15, 16]. Tal anexo puede considerarse como el comienzo de la hidrogeología como ciencia, su ley ha sido la base para varios campos de estudio sobre el flujo del aguas subterráneas [17].

#### **2.3.1.1 El experimento**

Henry Darcy, estaba experimentando con filtros de arena para un sistema de suministro de agua para la ciudad de Dijon. Luego de varios experimentos con tubos llenos de arena para estudiar las propiedades del flujo de agua, pudo determinar los factores que controlaban el caudal de agua a través de la arena [16, 18].

Darcy desarrolló un equipo parecido al de la Ilustración 5, en donde a cierta muestra de arena le hizo pasar agua manteniendo un nivel constante. Este equipo hoy en día se conoce como permeámetro de carga constante.



*Ilustración 5: Permeámetro de carga constante, equipo similar al utilizado por Darcy.*

Darcy estableció con estos experimentos que la tasa o velocidad de flujo del fluido es directamente proporcional al gradiente hidráulico, lo que hoy se conoce como Ley de Darcy, que permite describir el comportamiento de un fluido a través de un medio poroso con la siguiente ecuación:

$$v = k i \quad (1)$$

Donde  $v$  es la velocidad de flujo del fluido en [cm/s],  $k$  es la conductividad hidráulica en [cm/s] e  $i$  es el gradiente hidráulico (adimensional). El gradiente hidráulico se define como la pérdida de energía por unidad de longitud del medio poroso que atravesó el fluido y se expresa de la siguiente manera:

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (2)$$



Donde  $\Delta h$  es la diferencia entre las alturas de los niveles de agua en los piezómetros en [cm] y  $L$  es el largo de la muestra en [cm].

Para aclarar los términos permeabilidad y conductividad hidráulica, se define el término "permeabilidad intrínseca". Este término está ligado a los parámetros propios o internos del suelo, lo que independiza el resultado obtenido del fluido pasante por la muestra (filtro). Por otro lado, hablamos de la "conductividad hidráulica" o de Darcy, como función de la permeabilidad intrínseca junto con los parámetros del fluido [19]. De acuerdo con el "Comittee on Terminology of the Soil Society of America" la conductividad hidráulica se utiliza para referirse a una característica de un medio poroso específico con un fluido específico, en cambio la permeabilidad intrínseca solo para el medio poroso [20].

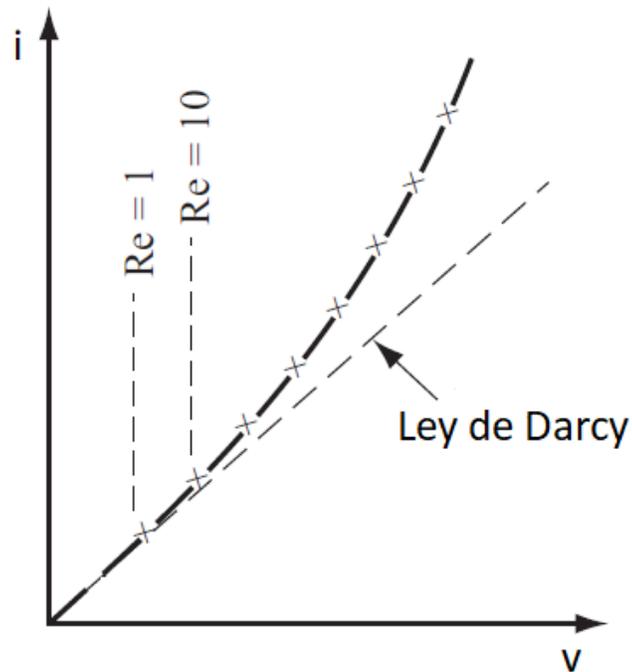
Hubbert en 1956 [21] mostró que el coeficiente de permeabilidad de Darcy,  $k$ , es una función de propiedades del medio poroso y del fluido que pasa a través de él. Esto se da en la siguiente ecuación:

$$k = K \frac{\gamma}{\mu} \quad (3)$$

Donde  $\gamma$  es el peso específico del fluido en  $[\text{N}/\text{cm}^3]$ ,  $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido en  $[\text{Ns}/\text{cm}^2]$  y  $K$  es la permeabilidad del medio poroso (suelo) en  $[\text{cm}^2]$ . Cabe destacar que permeabilidad o permeabilidad intrínseca se refiere a lo mismo. Para evitar confusiones en este trabajo, en el caso de que se hable de permeabilidad, nos referiremos a la conductividad hidráulica,  $k$ .

### 2.3.1.2 Validez de la Ley de Darcy

Numero de Reynolds: Los experimentos en tubos, como los realizados por Darcy, indican que a medida que aumenta la descarga específica (velocidad del fluido), su relación con el gradiente hidráulico se desvía gradualmente de la relación lineal expresada por la Ley de Darcy, por lo que la ley fue asumida para flujos laminares. En la Ilustración 6 se puede ver la desviación [12, 22].



**Ilustración 6: Relación experimental de velocidad del fluido y el gradiente hidráulico [12]**

En la mecánica de fluidos, cuando se considera el flujo a través de conductos, el número de Reynolds,  $Re$ , se usa como criterio para distinguir entre el flujo laminar que ocurre a bajas velocidades y el flujo turbulento que ocurre a altas velocidades [23]. Este número expresa la relación entre las fuerzas inerciales y viscosas que actúan sobre un fluido en movimiento. En las tuberías, el valor crítico de  $Re$ , que indica la transición del flujo laminar al turbulento, suele ser de aproximadamente 2000 [12]. El número de Reynolds se define para el flujo por medios porosos como:

$$Re = \frac{v D}{\nu_c} \quad (4)$$

Donde  $D$  es una longitud representativa que caracteriza el espacio vacío en [cm] y  $\nu_c$  es la viscosidad cinemática del fluido en [ $\text{cm}^2/\text{s}$ ]. Aunque, para los flujos en tuberías,  $D$  es el diámetro de la sección transversal, por analogía,  $D$  debe ser una longitud que caracterice la sección transversal de un conducto del medio poroso. Es habitual, para los medios porosos no consolidados, utilizar para  $D$  una longitud característica de los granos, pues se mide fácilmente. Normalmente se usa el diámetro medio de partículas del medio poroso para  $D$  en la ecuación (4) [12].



Suelos completamente saturados: La Ley de Darcy ha sido obtenida en condiciones donde solo un fluido pase a través del medio poroso. En los suelos que no se encuentran totalmente saturados existirán dos fluidos en los vacíos entre las partículas: el aire y el agua. Por lo que en estos casos la Ley de Darcy no sería aplicable.

Las burbujas de aire estorban en algunos poros y dificultan el paso del fluido, por ello la conductividad hidráulica se vería afectada (disminuida) en suelos parcialmente saturados [24].

### **2.3.2 Métodos para determinar la conductividad hidráulica**

Para medir la conductividad hidráulica existen diferentes métodos, en general se clasifican en dos categorías, los directos y los indirectos.

#### **2.3.2.1 Métodos directos**

Son aquellos en los que se realizan pruebas y cuyo objetivo principal es medir la conductividad hidráulica. Entre ellos se encuentran los ensayos in-situ y los ensayos de laboratorio.

##### **2.3.2.1.1 Ensayos in-situ**

A través de la excavación de pozos superficiales se puede obtener la conductividad hidráulica de un suelo directamente. Una de las técnicas es realizar pruebas de agotamiento y recuperación, las cuales consisten en perforar un pozo que llegue a la napa de aguas subterráneas, donde se procede a extraer el agua con bombas y luego se va midiendo la recuperación de la napa.

Otras pruebas son las de infiltración. En estas se infiltra agua hasta cierta altura y posteriormente se mide cuánto ha descendido el nivel del agua en distintos tiempos. En algunos casos es posible obtener una medida de la conductividad hidráulica del suelo, mientras que en otros se obtiene la tasa de infiltración, la que se relaciona directamente con la conductividad hidráulica [25].

##### **2.3.2.1.2 Ensayos de laboratorio**

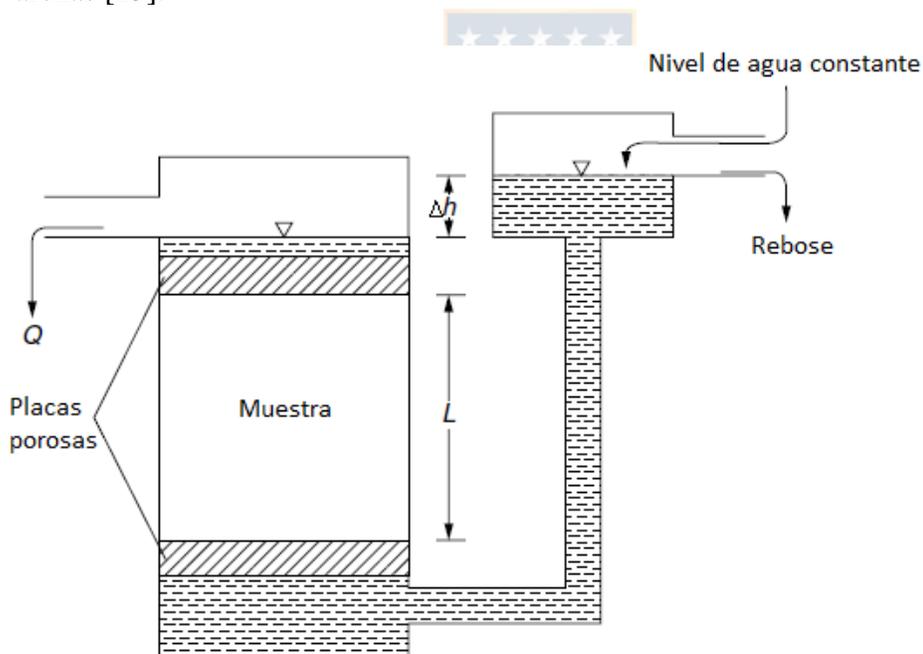
En estos ensayos se simulan las condiciones del terreno con muestras representativas. Estos se realizan para tener mayor facilidad y/o rapidez para la obtención de la conductividad hidráulica. El instrumento para medir en laboratorio la conductividad hidráulica de forma directa es denominado permeámetro, el cual consiste en una celda donde se ubica la muestra de suelo (medio poroso), a la cual se la hace circular agua. El sistema de entrada y salida del agua (según tipo de ensayo) y en

algunos casos, los piezómetros, depende del tipo de permeámetro que se requiera. Dentro de los ensayos de laboratorio se encuentran dos tipos de permeámetros, de carga constante y de carga variable.

### A. Permeámetro de carga constante

El permeámetro va conectado en un extremo por un estanque de agua a nivel constante que permite la circulación de esta a través de una muestra saturada (de dimensiones conocidas) gracias al gradiente hidráulico que se produce debido a las diferencias de alturas entre los extremos. Por el otro extremo, que se encuentra a menor altura que el estanque, se vierte el agua que puede ser en una probeta graduada para medir directamente el volumen. En la Ilustración 7 se presenta un esquema típico de este tipo de ensayos.

Este equipo se utiliza para obtener permeabilidades altas, para sedimentos no cohesivos como rocas o arenas [25].



*Ilustración 7: Ensayo de carga constante [8]*

La Ley de Darcy (ecuación (1)), también se puede expresar a través de la cantidad de agua drenada en un determinado tiempo, donde se tiene lo siguiente:

$$Q = k i A \quad (5)$$

Donde  $Q$  es el caudal de salida en  $[\text{cm}^3/\text{s}]$  y  $A$  la sección transversal por donde se filtra el agua en la muestra en  $[\text{cm}^2]$ .

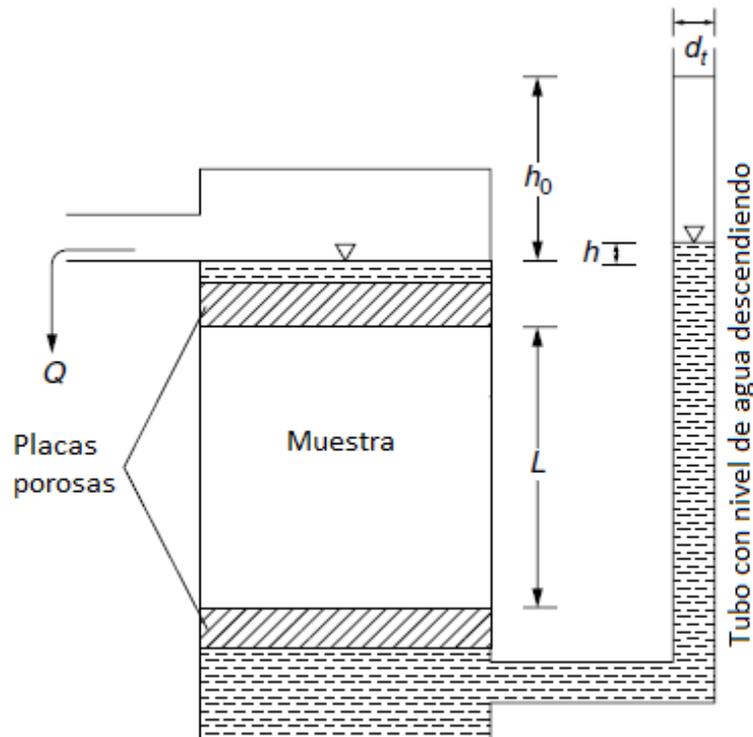
Luego, para el cálculo de  $k$  (conductividad hidráulica), se determina primero el caudal circulante por el permeámetro, este caudal se consigue cuando el agua después de atravesar la muestra es recolectada por probetas graduadas, obteniendo un cierto volumen ( $V$ , en  $[\text{cm}^3]$ ) en un determinado tiempo ( $t$ , en  $[\text{s}]$ ).

Finalmente, la ecuación que determina la conductividad hidráulica es la siguiente:

$$k = \frac{V L}{\Delta h A t} \quad (6)$$

### B. Permeámetro de carga variable

Para este caso, el extremo donde va conectado el estanque de agua, es reemplazado por un tubo vertical donde el nivel del agua desciende a medida que esta atraviesa la muestra [13]. Este equipo se utiliza para obtener permeabilidades bajas, con mayor exactitud para sedimentos cohesivos como las arcillas o limos [25]. En la Ilustración 8 se presenta un esquema típico de un ensayo de carga variable.



*Ilustración 8: Ensayo de carga variable [8]*



El cálculo de la conductividad hidráulica ( $k$ ) en estos permeámetros es completamente diferente al equipo anterior, ya que el agua que atraviesa la muestra se mide de forma indirecta.

El caudal entrante al permeámetro es expresado en función de la velocidad de caída del agua en el tubo vertical y el área de éste, como se nota a continuación:

$$Q_{in} = v_{in} a \quad (7)$$

Siendo  $Q_{in}$  el caudal entrante en [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ],  $v_{in}$  la velocidad de caída del agua en el tubo en [ $\text{cm}/\text{s}$ ] y  $a$  es el área del tubo vertical en [ $\text{cm}^2$ ]. A su vez,  $v_{in}$  se puede expresar en función del diferencial de altura y de tiempo:

$$v_{in} = -\frac{dh}{dt} \quad (8)$$

El signo negativo se debe a que la altura disminuye con el aumento del tiempo [26].

Luego, igualando la ecuación (5) con la ecuación (7), como los caudales de entrada y salida deben ser iguales (ley de conservación de la energía) [27], se tiene lo siguiente:

$$Q_{out} = Q_{in} \quad (9)$$

Reemplazando:

$$k \frac{h}{L} A = -\frac{dh}{dt} a \quad (10)$$

Reordenando términos e integrando se obtiene:

$$-a \int_{h_1}^{h_2} \frac{1}{h} dh = \frac{k A}{L} \int_{t_1}^{t_2} dt \quad (11)$$

Luego, la ecuación para determinar la conductividad hidráulica en permeámetros de carga variable es:



$$k = \frac{a L}{\Delta t A} \ln \left[ \frac{h_1}{h_2} \right] \quad (12)$$

Cabe destacar que los permeámetros (ya sea de carga variable o carga constante) pueden ser de pared rígida o flexible. Para el primer caso, la celda que contiene la muestra no permite deformaciones, en el segundo si se permiten, lo que evita la creación de canales preferenciales entre la muestra y la pared del permeámetro [28].

### 2.3.2.2 Métodos indirectos:

En estos métodos se obtiene la conductividad hidráulica de forma empírica. Estos métodos se basan principalmente en la Ley de Poiseuille, ya que la velocidad media del agua obedece las mismas leyes que determinan el escurrimiento de agua en tubos rectos de sección constante [24].

Los vacíos de una muestra de suelo con cierta porosidad aumentan directamente en relación con el tamaño de las partículas, así, es posible que la conductividad hidráulica se exprese en función del tamaño de las partículas [13] como:

$$k = C D^2 \quad (13)$$

Donde  $C$  es un coeficiente empírico y  $D$  es un diámetro característico de las partículas en [cm], ambos dependen de cada autor.

#### 2.3.2.2.1 Método de Hazen

Allen Hazen fue la primera persona en obtener una ecuación empírica para calcular la conductividad hidráulica y la estimó a partir de la curva granulométrica tomando en cuenta un tamaño característico designado como el diámetro efectivo de las partículas.

Hazen determinó que el diámetro característico era  $D_{10}$ , o sea, el diámetro por el cual pasa el 10% más fino de una muestra (en masa) [29]. Hazen concluyó la siguiente ecuación:

$$k = C (D_{10})^2 \quad (14)$$

El coeficiente empírico  $C$ , relaciona la forma de los poros. Hay diversas investigaciones que lo proponen desde 1 hasta 1000 pero usualmente se utiliza un  $C$  igual a 100. Esta ecuación es aplicable generalmente para un  $D_{10}$  entre 0.1 [mm] y 0.3 [mm] [30].



La Ilustración 9 presenta los datos experimentales de Hazen junto a datos basados en su ecuación, donde el diámetro efectivo  $D_{10}$  se relaciona con la conductividad hidráulica.

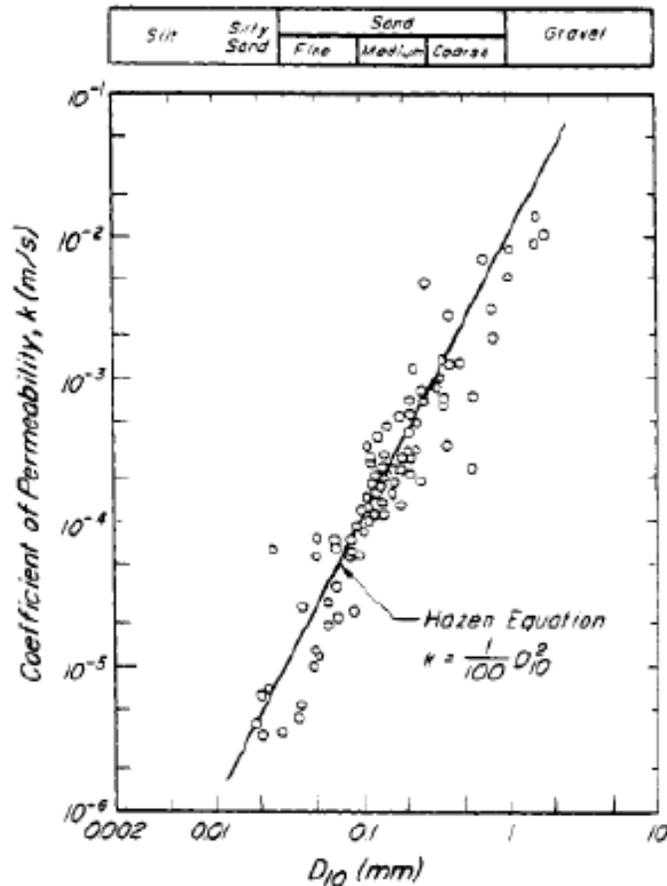


Ilustración 9: Comparación entre la ecuación de Hazen y datos experimentales [31]

La ecuación (14) puede ser modificada. Hazen descubrió que la resistencia al flujo (la fricción) también varía con la temperatura, “siendo el doble en el punto de congelación comparado con el calor de verano” [32]. Así, la ecuación se denota de la siguiente manera:

$$k = C (0.7 + 0.03 T) (D_{10})^2 \quad (15)$$

Donde  $T$  es la temperatura en  $^{\circ}\text{C}$ .

Cabe destacar que la ecuación de Hazen fue desarrollada para purificar agua, esto quiere decir que las arenas utilizadas en sus experimentos tenían propiedades muy particulares [13].



### 2.3.2.2.2 Método de Schlichter

Schlichter estimó la conductividad hidráulica de forma muy parecida a la ecuación de Hazen, pero agregándole una corrección por compacidad [33]:

$$k = \frac{771 (D_{10})^2}{C} \quad (16)$$

Esta relación se obtiene para muestras de arenas, utilizando partículas uniformes y esféricas. De acuerdo a la distribución de estas partículas, el volumen de vacíos varía entre un 26% y un 46% del total del peso de la muestra. Luego, el coeficiente  $C$  varía con respecto a la porosidad  $n$  (adimensional). En la Tabla 4 se pueden ver los valores para  $C$ .

**Tabla 4: Valores del coeficiente  $C$ , en función de la porosidad  $n$  [31]**

n	0.26	0.28	0.30	0.34	0.38	0.42	0.46
C	84.3	65.9	52.5	34.7	24.1	17.3	12.8

Al igual que la ecuación de Hazen, esta también puede modificarse tomando en cuenta la temperatura, así la ecuación queda en:

$$k = \frac{771 (D_{10})^2}{C} (0.7 + 0.03 T) \quad (17)$$

### 2.3.2.2.3 Método de Terzaghi:

Terzaghi introduce una constante que toma en cuenta la porosidad y también el tipo de suelo, basada en la diferencia de anchura de los canales de flujo por la no uniformidad y forma de las partículas [31]. La ecuación semi empírica que desarrolló Terzaghi es la siguiente:

$$k = C_1 (0.7 + 0.03 T) (D_{10})^2 \quad (18)$$

Con:

$$C_1 = C_0 \left( \frac{n - 0.13}{\sqrt[3]{1 - n}} \right)^2 \quad (19)$$

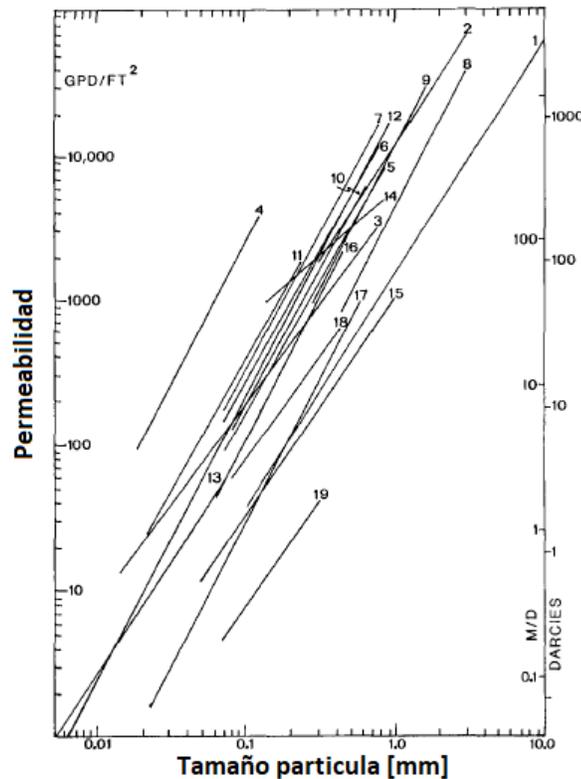


Donde  $C_0$  es el coeficiente que depende del suelo y  $n$  es la porosidad. Los valores de  $C_0$  varían entre 800 para arenas redondeadas y 460 para arenas angulares. Cuando las arenas contienen limos se considera un  $C_0$  menor que 400.

Los valores 800 y 460 fueron obtenidos a partir de ensayos en arenas con partículas bien pulidas y redondeadas, y arenas con partículas irregulares y rugosas respectivamente [34].

#### 2.3.2.2.4 Método de Shepherd:

Shepherd realizó una serie de análisis estadísticos de regresión de potencia en 19 conjuntos de datos publicados sobre la conductividad hidráulica de sedimentos no consolidados en relación al diámetro de la partícula. Los datos analizados por Shepherd se muestran en la Ilustración 10 [35].



*Ilustración 10: Relación de la permeabilidad con el tamaño de partícula [35]*

En la Ilustración 10 cada curva tiene su propia pendiente, esto quiere decir que cada tamaño de partícula tiene su propio exponente en la ecuación de Hazen. Para los sets de datos con partículas uniformes y esféricas, Shepherd observó que los valores de  $C$  eran mayores, y para los sets de datos de suelos con alta gradación y partículas angulares, menores [35].



Con estos resultados Shepherd propuso la siguiente ecuación para la conductividad hidráulica [34]:

$$k = C (D_{50})^{1.65 \text{ a } 1.85} \quad (20)$$

Donde  $D_{50}$  es el tamaño medio de los granos en [mm], y el rango de 1.65 a 1.85 se refiere al exponente que toma  $D_{50}$  que depende de la forma y uniformidad de los granos, donde para suelos naturales toma valores cercanos 1.65 y para suelos con granos redondeados toma valores alrededor de 1.85 [35].

La Ilustración 11 presenta una relación entre la conductividad hidráulica y el tamaño medio de los granos para suelos con diferente textura.

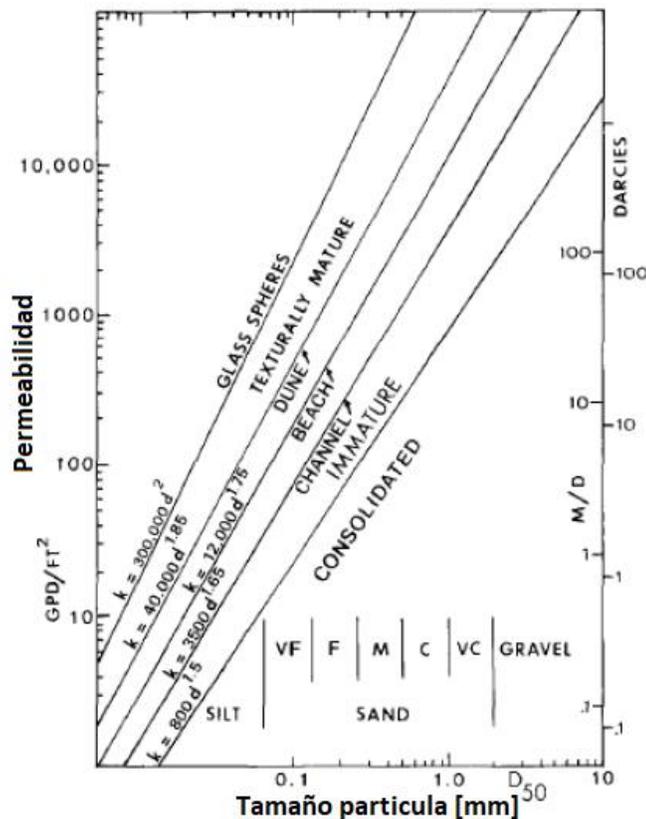


Ilustración 11: Permeabilidad v/s tamaño de partícula para diferentes texturas [35]



### 2.3.2.2.5 Método de Kozeny-Carman

Josef Kozeny y Philip Carman desarrollaron una ecuación semi empírica para determinar la conductividad hidráulica, que se basa en la superficie específica del suelo (por medio de toda la distribución granulométrica de este), el índice de vacíos y la forma de las partículas [30]. La expresión es la siguiente:

$$k = \left(\frac{\gamma}{\mu}\right) \left(\frac{1}{C_{K-C}}\right) \left(\frac{1}{S_0^2}\right) \left(\frac{e^3}{1+e}\right) \quad (21)$$

Donde  $\gamma$  es el peso específico del fluido en  $[\text{N}/\text{cm}^3]$ ,  $\mu$  es la viscosidad del fluido en  $[\text{Ns}/\text{cm}^2]$ ,  $C_{K-C}$  es un coeficiente empírico de Kozeny-Carman,  $e$  es el índice de vacíos (adimensional) y  $S_0$  es la superficie específica por unidad de volumen en  $[\text{cm}^{-1}]$ .

Carman resolvió que el valor de  $C_{K-C}$  es  $4.8 \pm 0.3$  para esferas uniformes; usualmente  $C_{K-C}$  se toma igual a 5 [36]. Así, cuando el fluido que atraviesa el suelo es agua a  $20^\circ\text{C}$ , entonces la ecuación (21) se convierte en:

$$k = 1.99 \times 10^4 \left(\frac{1}{S_0^2}\right) \left(\frac{e^3}{1+e}\right) \quad (22)$$

A lo largo del tiempo se ha demostrado que esta ecuación es más precisa que la ecuación de Hazen [31], sin embargo, se utiliza con menos frecuencia. Esto se debe a la dificultad de poder calcular la superficie específica [30]. A pesar de ello, la superficie específica ( $S_0$ ) puede ser simplemente estimada a través de la distribución granulométrica para partículas esféricas uniformes de diámetro  $D$  [30], como:

$$S_0 = \frac{\text{Área}}{\text{Volumen}} = \frac{\pi D^2}{\frac{\pi D^3}{6}} = \frac{6}{D} \quad (23)$$

Luego la ecuación (22) cambia a:

$$k = 552 D^2 \left(\frac{e^3}{1+e}\right) \quad (24)$$



En caso de que la muestra de suelo no contenga partículas uniformemente esféricas, el diámetro efectivo ( $D_{eff}$ ) puede ser calculado a partir de la distribución granulométrica [30] como:

$$D_{eff} = \frac{100 \%}{\sum \frac{f_i}{D_{ave i}}} \quad (25)$$

Donde  $f_i$  es la fracción de partículas entre dos tamaños de tamices.

$$D_{ave i} = \sqrt{(D_{li} D_{si})} \quad (26)$$

Donde  $D_{ave i}$  es el diámetro promedio de partículas entre dos tamaños de tamices; el más largo es  $l$  y el más pequeño es  $s$ .

Así, la superficie específica para suelos con partículas no uniformemente esféricas,  $S_0$ , se expresa como:

$$S_0 = \frac{6}{D_{eff}} \quad (27)$$

Obviamente, las partículas más pequeñas tienen la mayor influencia en el  $D_{eff}$  calculado y  $S_0$ . Finalmente, para tener en cuenta la angulosidad de cada partícula del suelo, se puede introducir un factor de forma  $SF$ :

$$S_0 = \frac{SF}{D_{eff}} \quad (28)$$

Luego, reuniendo todos los términos, la ecuación de Kozeny-Carman queda expresada de la siguiente forma:

$$k = 1.99 \times 10^4 \left( \frac{100 \%}{\sum \frac{f_i}{\sqrt{(D_{li} D_{si})}}} \right)^2 \frac{1}{SF^2} \left( \frac{e^3}{1 + e} \right) \quad (29)$$



## CAPÍTULO 3: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PERMEÁMETROS

### 3.1 Diseño

Para construir el permeámetro, el diseño se basó en normas que permitieron que el ensayo de permeabilidad se realice, en lo posible, bajo condiciones ideales. Sin embargo, hay diferencias que se explican más adelante debido a la logística y elementos disponibles.

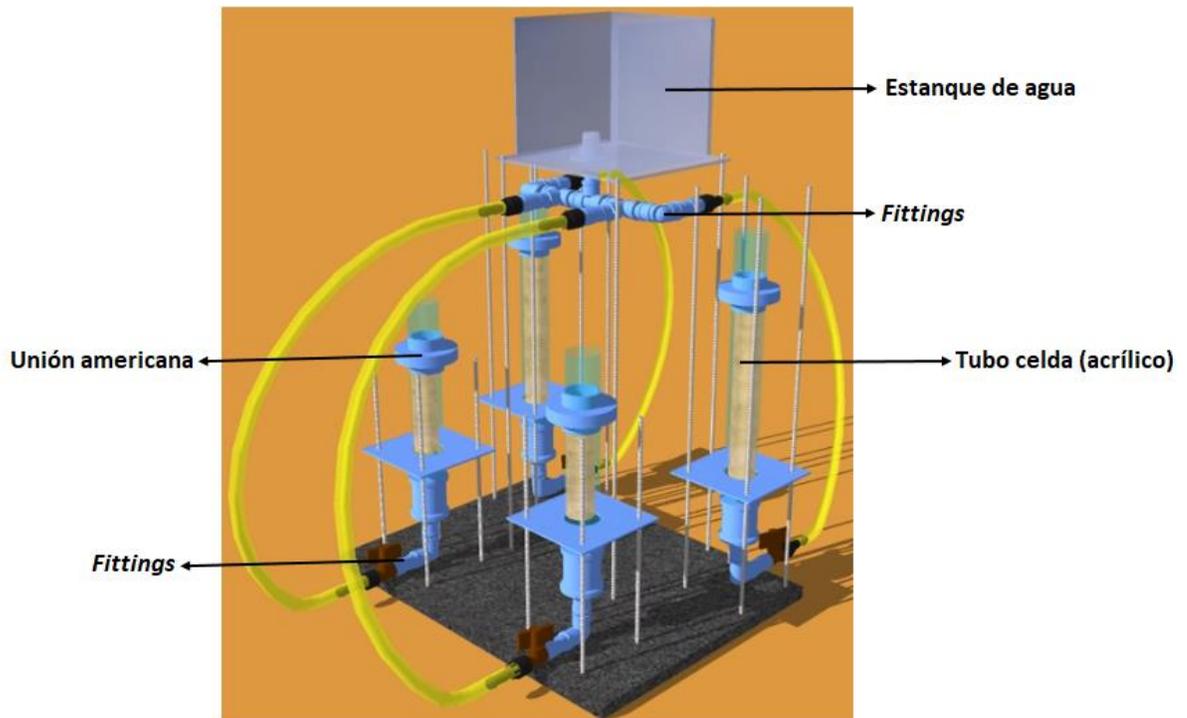
Para tener una mayor representatividad de los resultados se decidió construir cuatro permeámetros (dos ensayos por cada material) con la finalidad de hacer los ensayos al mismo tiempo y con un mismo estanque en común. Los permeámetros están conectados por la parte inferior al estanque, lo que permite que, si hay aire atrapado en la muestra, este pueda escapar o salir del sistema a medida que el agua circule a través del permeámetro, evitando la posible formación de burbujas producto de que el aire es más liviano que el agua. Es importante tener en cuenta lo recién mencionado puesto que los resultados del ensayo pueden variar considerablemente.

El estanque de agua se diseñó con cierta área considerado dos aspectos. Al ser cuatro permeámetros, el gasto de agua sería mayor teniendo en cuenta el tiempo que se pensaba que el sistema trabajaría, y además no se quiso hacer un estanque de gran altura por temas de manipulación.

De los cuatro permeámetros, se diseñaron dos “pequeños” y dos “grandes” (ver Ilustración 12), todos de forma cilíndrica y con el mismo diámetro. Dado lo anterior, se podría ver que la longitud de la celda, donde se coloca la muestra de los permeámetros contruidos, no tiene efecto sobre los resultados. En la Tabla 5 se presentan las dimensiones de los cuatro permeámetros que, para efectos prácticos, se nombraron como permeámetro 1, 2, 3 y 4.

**Tabla 5: Dimensiones de la celda de los permeámetros**

Permeámetro	1	2	3	4
Diámetro [mm]	46			
Longitud [cm]	12.8	12.8	23.8	23.6



*Ilustración 12: Esquema de permeámetros*

Los permeámetros y el estanque se fijaron a una base para que no variara la altura durante el ensayo y para mantener un punto de referencia al hacer las medidas de las distintas longitudes necesarias, con el objetivo de obtener la carga hidráulica.

Los materiales utilizados para construir los permeámetros se encuentran en el Anexo C junto con sus respectivos comentarios.

### **3.2 Construcción**

- 1) En primer lugar, se perforó el centro de placas de 15 [cm] x 15 [cm] (ver Anexo D) para poner sobre esta zona una malla y tuviera cierta firmeza con el fin de soportar la muestra.
- 2) Se ensamblaron las piezas de *fittings* las cuales permiten la distribución del agua desde el estanque hacia el permeámetro. Por un lado, las piezas que van conectadas con el estanque, y por otro lado, las piezas que se conectan con el permeámetro (ver Anexo D).
- 3) Los tubos de acrílico, utilizados como celda de la muestra de dimensiones ya señaladas, se pegaron en las placas dejando las perforaciones en su interior. Por la parte inferior de la placa también se pegó un tubo para facilitar la conexión con el sistema compuesto por *fittings* (ver Anexo D).





## CAPÍTULO 4: CARACTERIZACIÓN DE LOS BARROS

Se realizaron ensayos sobre las principales características de un suelo y que son críticas para generar un estallido de barro. Estas son, granulometría, densidad, resistencia al corte y permeabilidad. En particular, según la literatura, la granulometría tiene implicancia en la permeabilidad, por lo que es importante realizar esos ensayos antes para tener una aproximación sobre esta última.

Se extrajeron muestras de barro de dos lugares distintos del sector Diablo Regimiento, división El Teniente, CODELCO. Las muestras son de diferentes colores, café y gris (que se asocian principalmente a óxidos y sulfuros respectivamente), por lo que para términos prácticos serán nombrados de esa forma durante este trabajo. En la Ilustración 14 se pueden ver las muestras café y gris.

Cabe destacar que todos los ensayos se realizaron en los laboratorios del Departamento de Ingeniería Metalúrgica en las dependencias de la Universidad de Concepción.



*Ilustración 14: Muestras extraídas de Diablo Regimiento, (a) café, (b) gris*



## 4.1 Granulometría

Para cualquier muestra de suelo, los tamaños de las partículas varían considerablemente. La granulometría es un parámetro y a la vez la propiedad más importante de los suelos granulares, que se relaciona directamente con el comportamiento del mismo, ya que influye sobre la aireación, retención y movimiento de agua [37].

En ocasiones, los filtros de material granular bien gradados ayudan a que los suelos muy finos, arrastrados por el agua que circula a través del suelo, no saturan los sistemas de subdrenaje con sedimentos. La gradación adecuada de estos materiales, denominados filtros, puede ser establecida a partir de su análisis granulométrico [38].

Con el análisis granulométrico de un suelo se puede obtener la distribución por tamaño de las partículas de áridos finos y gruesos. En general, es un procedimiento manual por medio del cual se dividen las partículas de una cierta muestra según sus tamaños, de esta forma se podrá conocer la cantidad en masa de cada tamaño y saber el porcentaje que se obtiene según la masa total de la muestra. La información obtenida en los ensayos granulométricos puede ser utilizada para predecir los movimientos del agua a través del suelo por medio de ecuaciones empíricas.

Este método consiste en pasar una muestra representativa de masa conocida a través de tamices (ensamblados en una columna) con tamaño de aberturas progresivamente menores, siendo el tamiz superior el de mayor tamaño (por donde se ingresa el material). Luego la columna es sometida a vibración y movimientos rotatorios intenso en un tamizador mecánico.

Al cabo de unos minutos se retira la columna de tamices y se pesa por separado el material retenido en cada tamiz (la suma de estas masas debería ser igual al peso ingresado inicialmente por conservación de masa, pero es posible que existan pérdidas por manipulación). Así, el material se agrupa por rangos de tamaño, donde el material retenido en cierto tamiz consiste en partículas de varios tamaños, pero menores al tamaño de la última malla que atravesó y mayores al tamaño de malla en donde fue retenido.

Al terminar se puede obtener la curva granulométrica calculando los porcentajes (tanto parciales como acumulados) de material pasante y retenido de cada tamiz en base a la masa total ingresada inicialmente.



En esta memoria se refiere a material fino como partículas de suelo que están bajo (o pasan) el tamiz #50 ( $< 0.3$  [mm]). En la Tabla 6 se presenta la clasificación de suelos en rangos, basado en el tamaño de partículas.

**Tabla 6: Clasificación de suelos según tamaño de partículas [13]**

Suelo		Diámetro [mm]
Rocas		$> 300$
Bolos		$300 - 75$
Grava	Gruesa	$75 - 19$
	Fina	$19 - 4.76$
Arena	Gruesa	$4.76 - 2.0$
	Media	$2.0 - 0.42$
	fina	$0.42 - 0.074$
Limo		$0.074 - 0.002$
Arcilla		$< 0.002$

#### 4.1.1 Método de tamizado

Antes de realizar el ensayo de granulometría, se determina una muestra representativa de cada muestra (café y gris) por medio de roleo y cuarteo. Se necesitó una muestra de aproximadamente 400 [g]. En el Anexo E se puede ver el procedimiento de roleo y cuarteo.

Para un total de 1825 [kg] de material café y 2240 [kg] de material gris se obtuvo una muestra representativa de 415.15 [g] y de 390.64 [g] respectivamente. Luego, las muestras fueron secadas en horno a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 10 minutos, y como resultado de la deshidratación las muestras perdieron un poco de masa. Se detallan las masas finales en la Tabla 7.

**Tabla 7: Masas de muestras para ensayo granulométrico**

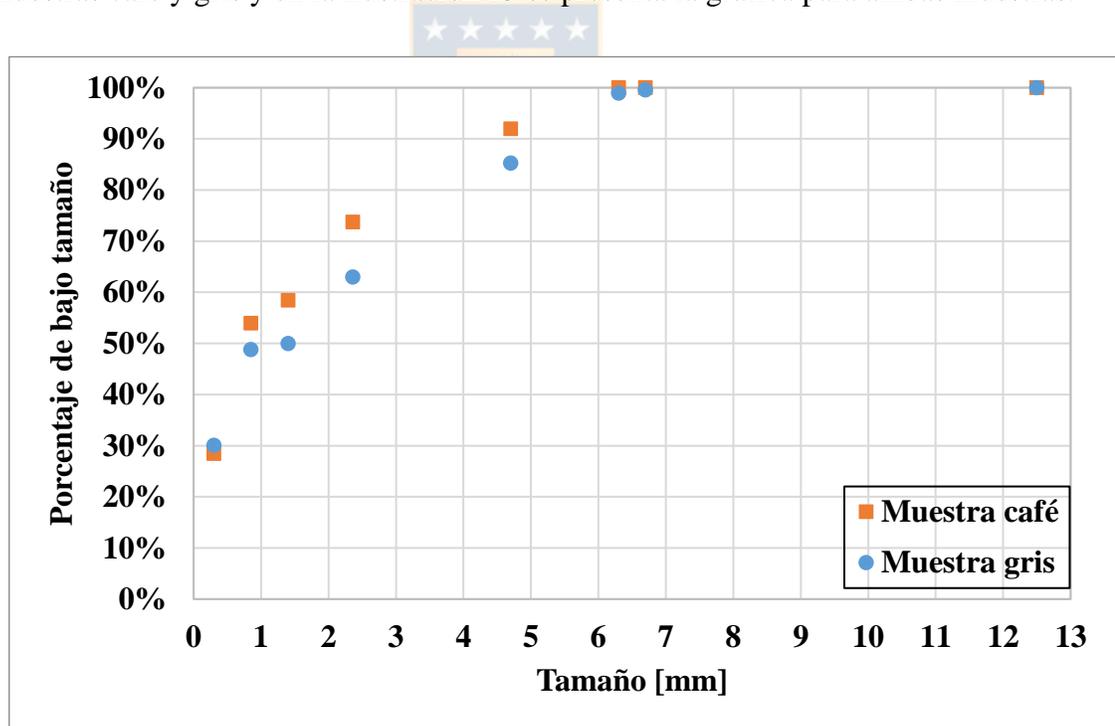
Nombre de la muestra	Muestra representativa final [g]
Barro café	410.52
Barro gris	381.56



Posteriormente las muestras se ingresaron en una columna de ocho tamices (ver Anexo E) con los siguientes números: 1/2", 0.265", 1/4", #4, #8, #14, #20, #50. Las muestras fueron procesadas en un tamizador mecánico durante 15 minutos cada una.

Previo a que las muestras pasaran a través de los tamices, cada tamiz fue pesado (incluyendo el fondo) para que más adelante cuando las muestras estuvieran ya tamizadas estas se pudieran pesar junto con el tamiz y así evitar errores por pérdida de masa al traspasarlas a otro recipiente. Los tamices y las muestras fueron pesadas en una balanza con 0.01 [g] de legibilidad. En el Anexo E se ve las masas retenidas en cada tamiz para las muestras café y gris.

Una vez ya obtenidas las masas de cada muestra en cada tamiz se puede calcular los porcentajes parciales y acumulados de material bajo (material que se encuentra bajo cierto tamiz) y material retenido (material que se encuentra sobre cierto tamiz). En el Anexo E se detallan los datos obtenidos para las muestras café y gris y en la Ilustración 15 se presenta la gráfica para ambas muestras.



**Ilustración 15: Distribución granulométrica general de la muestra café y gris**

De la gráfica anterior, en el caso de la muestra café, los tres tamices de mayor abertura no retuvieron ninguna partícula, por otro lado, en el caso de la muestra gris, el tamiz de mayor abertura fue el único que no retuvo partículas.



#### 4.1.2 Método por difracción de rayos láser

Posteriormente, para un análisis más completo y ver con más detalle la granulometría del fino, se tomó aproximadamente 10 [g] del material que permaneció en el fondo después del tamizado de ambas muestras y se llevó a análisis granulométrico por medio de un sistema láser que consiste en un tubo láser que genera un haz de luz con una potencia de 5 [mW] máximo. Además, cuenta con un censor para mediciones de tamaño por difracción, y con lentes de medición para distintos rangos.

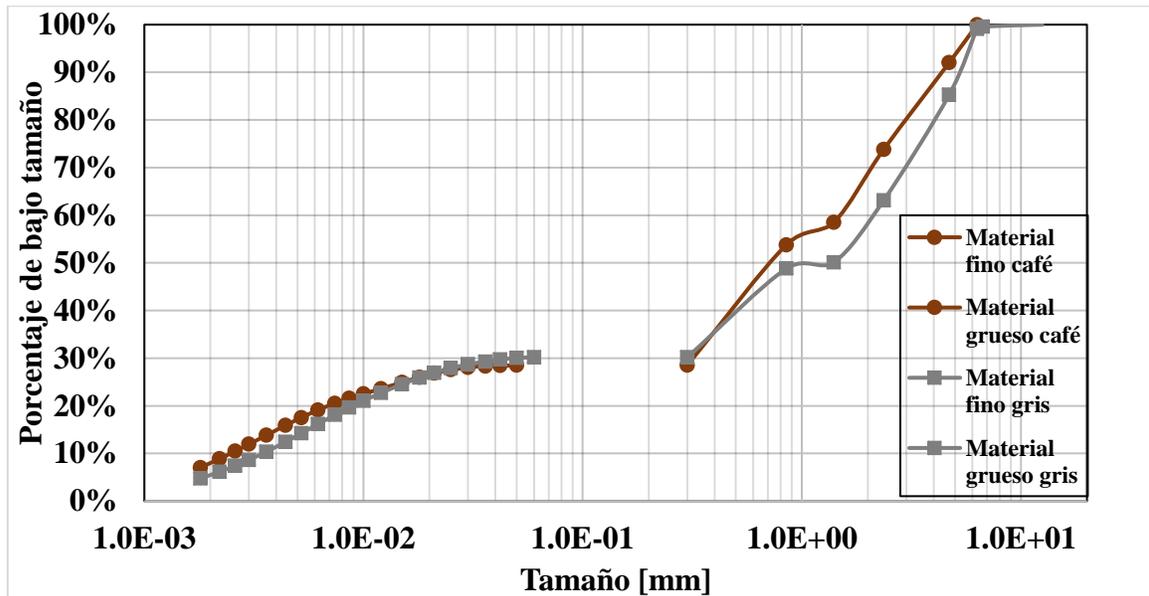
El nombre del equipo en el cual se llevó a cabo este ensayo es Helos-Rodos. Los resultados obtenidos se expresan usando el límite superior del rango del tamaño de las partículas, por lo tanto, el “porcentaje bajo” que aparezca para cada tamiz será el porcentaje de las partículas que están bajo ese tamaño y todo lo contrario para el “porcentaje sobre”. En el Anexo E se detallan los resultados para las muestras café y gris. Hay que precisar que el equipo permite solo muestras de bajas cantidades.

El tamaño máximo del fino que se obtuvo de la muestra café fue de 50 [ $\mu\text{m}$ ], en cambio para la muestra gris fue de 60 [ $\mu\text{m}$ ].

Es importante indicar que las muestras llevadas a análisis granulométrico por rayos láser, son representativas para todo el material que fue retenido en el fondo después del tamizado. Dado lo anterior se hicieron los caculos respectivos para tener el resultado completo de la granulometría (ver Anexo E).

#### 4.1.3 Resultados

Reuniendo los datos obtenidos del tamizado y de difracción de rayos laser, ya se puede obtener un resultado completo de la granulometría de las muestras café y gris. En el Anexo E se tiene el detalle tabulado de datos de la distribución granulometría de gruesos y finos de las muestras café y gris. En la Ilustración 16 se presentan las curvas granulométricas completa de las muestras café y gris.



*Ilustración 16: Distribución granulométrica completa para las muestras café y gris*

En la ilustración anterior, en la muestra café, para el tamaño de 300 [μm] hay 0% de bajo parcial, esto se debe a que no hay material con tamaño bajo 300 [μm] y sobre 50 [μm]. Aun así, este límite fue incluido ya que sí hay material con tamaño bajo 850 [μm] y sobre 300 [μm]. Esto ocurre porque justo 300 [μm] es el límite que divide el grueso del fino, y si este límite no se hubiera incluido, el rango de tamaño con 25.30% hubiera sido muy amplio (de 50 [μm] a 850 [μm]).

Al igual que en la muestra café, para la muestra gris, el límite de 300 [μm] tiene 0%, sucede lo mismo, la única diferencia es que el límite menor que le sigue es de 60 [μm].

La inclinación de las curvas granulométricas de los dos materiales (café y gris) indican una buena gradación, no obstante, hay un salto importante en cada curva, lo que da cuenta a una discontinuidad de tamaños.

Existen características de la distribución de tamaño de partículas que sirven como indicadores para el suelo, entre estas hay ciertos diámetros característicos, como el  $D_{60}$ ,  $D_{30}$  y  $D_{10}$  que corresponden al diámetro del 60%, 30% y 10% respectivamente del material más fino de una muestra, que se obtienen a través de la curva granulométrica. Otros indicadores son los coeficientes de uniformidad ( $C_u$ ) y de curvatura ( $C_c$ ) que permiten conocer el nivel de gradación de las muestras que se consiguen de los diámetros característicos mediante las siguientes ecuaciones [13]:



$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (30)$$

$$C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{10}D_{60}} \quad (31)$$

En la Tabla 8 se presentan los indicadores de la distribución de tamaño para los materiales café y gris.

**Tabla 8: Indicadores de granulometría**

Material	Café	Gris
D <sub>60</sub>	1.6 [mm]	2.167 [mm]
D <sub>30</sub>	0.325 [mm]	0.050 [mm]
D <sub>10</sub>	0.0025 [mm]	0.0035 [mm]
C <sub>U</sub>	640	619
C <sub>C</sub>	26	0.33

## 4.2 Densidad

Dentro del suelo quedan vacíos formados entre partículas pequeñas con un volumen total del orden de magnitud del volumen ocupado por ellas. Los vacíos pueden estar llenos de agua (suelos saturados) o con aire y agua (suelos semi saturados). Por lo mismo el suelo puede constituir un sistema de tres fases diferenciales: sólida (partículas minerales), líquida (generalmente agua) y gaseosa (aire o gas) [14].

Algunas de las expresiones que relacionan las distintas fases son la porosidad, la relación de vacíos y el grado de saturación. La porosidad es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total. Por otro lado, la relación de vacíos es el cociente entre el volumen de vacíos y el de partículas sólidas. El grado de saturación es el porcentaje del volumen de vacíos que contienen agua [14].

Las expresiones para calcular la porosidad, relación de vacíos y el grado de saturación se presentan a continuación en función de los volúmenes [13].



Porosidad (n):

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (32)$$

Relación de vacíos (e):

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (33)$$

Grado de saturación (S):

$$S = \frac{V_w}{V_v} \quad (34)$$

En la práctica, el volumen de un material particulado puede ser obtenido fácilmente poniéndolo en un vaso graduado, pero este volumen no será real, más bien será un volumen aparente (incluye los poros), es por esto que se hace necesario obtener la densidad real del material y así poder conocer el volumen real que ocupa cierto material, en cualquier ocasión, conociendo su masa.

La densidad de los sólidos se obtiene como la relación entre el peso de un material y el volumen que ocupa dicho material (utilizando el volumen del agua como referencia). En la Tabla 9 se enlistan densidades típicas de distintos materiales de suelos.

**Tabla 9: Densidad de materiales [40]**

Material	Valor de densidad [g/cm <sup>3</sup> ]
Arcilla de origen volcánico	2.20 – 2.50
Suelos granulares	2.63 – 2.68
Limos inorgánicos	2.67 – 2.73
Arcillas poco plásticas	2.72 – 2.78
Arcillas plásticas	2.78 – 2.86
Arcillas expansivas	2.86 – 2.92

#### 4.2.1 Picnometría

Uno de los métodos más sencillos para determinar con precisión la densidad real es la picnometría. Este método permite el cálculo de la densidad de distintos materiales por medio de un picnómetro tomando tres pesos de referencia.



El picnómetro es un recipiente usualmente de vidrio, de boca esmerilada y con un tapón biselado provisto de un tubo capilar en su interior abierto a la atmosfera (ver Ilustración 17). Se destaca por mantener un volumen fijo y conocido. Su diseño es fundamental puesto que, al llenarlo con líquido, las burbujas de aire ascienden hacia el cuello, siendo expulsadas al poner el tapón.

En términos simples, con el picnómetro lo que principalmente se hace es comparar las densidades de un material con respecto a un fluido de densidad conocida, como por ejemplo el agua.

Se comienza con la calibración del picnómetro, procedimiento donde se comprueba si se ha mantenido su volumen, esto se hace para tener una mayor precisión y porque depende del fluido que se utilice (en este caso agua desairada). Luego se preparan las muestras de material fino y se hacen las mediciones de los distintos pesos para obtener la densidad de la muestra.



*Ilustración 17: Picnómetro*

Calibración del picnómetro:

- 1) El picnómetro se limpió y secó para luego pesarlo vacío (recipiente y tapón) con una sensibilidad de 0.01 [g]. Se registró la masa ( $M_p$ ).
- 2) Se llenó el picnómetro con agua desairada y se registró la masa del picnómetro más el agua desairada ( $M_{p+a}$ ). (El picnómetro se secó por fuera ya que el agua rebosa al cerrarlo con el tapón).
- 3) Se determinó la masa del agua de la siguiente forma:  $M_a = M_{p+a} - M_p$ , con  $M_a$ : masa del agua,  $M_{p+a}$ : masa del picnómetro más el agua y  $M_p$ : masa del picnómetro.



- 4) Se calculó el volumen del picnómetro de la siguiente forma:  $V_p = M_a/\rho_a$ , con  $V_p$ : volumen del picnómetro,  $M_a$ : masa del agua,  $\rho_a$ : densidad del agua (1.00 [g/cm<sup>3</sup>]).

Luego de la calibración, para determinar la densidad de un material con el método del picnómetro, se necesita la masa del mismo en tres situaciones diferentes.

Se tomaron cuatro muestras de aproximadamente 10 [g], previamente secadas en horno a 110°C, dos para el material café y dos para el material gris. La Tabla 10 contiene las masas de las cuatro muestras.

**Tabla 10: Masas de las muestras para picnometría**

Muestra	Café [g]	Gris [g]
1	10.43	10.42
2	10.23	11.28

Metodología:

- 1) Se pesó el picnómetro vacío con la misma balanza de la calibración:  $M_p$ .
- 2) Se colocó el embudo en el picnómetro, se introdujo la muestra y se pesó nuevamente el picnómetro:  $M_{p+s}$ .
- 3) Con la piseta se vertió agua desairada en el picnómetro hasta la mitad de altura de su volumen y se agitó para formar una pulpa (ver Anexo F).
- 4) Se colocó el picnómetro en el desecador y se conectó al vacío por una hora, agitando la pulpa cada quince minutos.
- 5) Pasada la hora se retiró el picnómetro y se llenó con agua desairada, donde con el tapón rebosó algo de agua que fue secada.
- 6) Finalmente se pesa el picnómetro lleno con el contenido de agua y sólido en su interior:  $M_{p+s+a}$ .

Las muestras iniciales tuvieron un leve cambio de su masa al traspasarlas al picnómetro, aun así, se pudieron obtener sus masas. También se tenían dos picnómetros que para efectos prácticos se nombraron como picnómetro 1 y 2. Como eran dos muestras para cada material, las mediciones se repitieron cuatro veces.



Es importante saber que los líquidos varían su volumen con la temperatura, por ende, la densidad también varía. En este ensayo no se considera dicha variación.

En la Tabla 11, se detallan los registros de volúmenes de los picnómetros obtenidos en la calibración y las masas del picnómetro vacío, con el material sólido, y con el material sólido y el agua.

**Tabla 11: Datos registrados en picnometría**

Picnómetro	1		2	
Volumen picnómetro, $V_p$ [cm <sup>3</sup> ]	49.78		51.27	
Material	Café		Gris	
Muestra	1	2	1	2
Masa picnómetro, $M_p$ [g]	36.4	36.4	31.12	31.12
Masa picnómetro y sólido, $M_{p+s}$ [g]	46.82	46.71	41.53	42.38
Masa picnómetro, sólido y agua, $M_{p+s+a}$ [g]	92.90	92.86	89.22	89.68

#### 4.2.2 Resultados

Luego, con los datos anteriores se obtiene finalmente la densidad real de cada muestra. Para las muestras del mismo material se consideró el promedio.

En la Tabla 12 se presentan los resultados de la picnometría, donde se nota, como se dijo anteriormente, que la masa de las muestras disminuyó al traspasarlas al picnómetro. Los cálculos pertinentes a estos resultados se pueden ver en el Anexo F.

**Tabla 12: Resultados de la picnometría**

Material	Café		Gris	
	1	2	1	2
Masa sólido, $M_s$ [g]	10.42	10.31	10.41	11.26
Masa agua, $M_a$ [g]	46.08	46.15	47.69	47.3
Volumen agua, $V_a$ [cm <sup>3</sup> ]	46.08	46.15	47.69	47.3
Volumen sólido, $V_s$ [cm <sup>3</sup> ]	3.7	3.63	3.58	3.97
Densidad sólido, $\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2.82	2.84	2.91	2.84
Promedio $\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2.83		2.87	



De la Tabla 12 se observa que el material gris tiene una densidad relativamente mayor que el café. Este ensayo es muy sensible, sin embargo, de las dos muestras se obtuvo un resultado coherente y dentro de lo esperado.

### 4.3 Resistencia al Corte

La resistencia al esfuerzo cortante es un aspecto fundamental a considerar dentro de la mecánica de suelos. Diferentes obras y/o construcciones se ven afectadas por la resistencia al corte, por lo que su determinación correcta es indispensable para tener éxito en la estabilidad de estas [41].

La resistencia al corte de un suelo es la tensión máxima que puede soportar el mismo suelo antes de fallar. Esta, en base a la teoría de falla de Mohr-Coulomb, se consigue en función de distintos estados de esfuerzos, obteniendo una relación entre esfuerzos de corte y esfuerzos normales. Estos se representan en una gráfica la cual contiene la curva o envolvente de falla que indica la resistencia máxima de un suelo.

Para lograr la envolvente de falla se necesitan al menos dos puntos (o dos estados de esfuerzos), aunque por lo general se utilizan tres. De esta forma, se puede encontrar los parámetros característicos de un suelo ( $c$  y  $\phi$ ), aplicando la siguiente ecuación que obedece la recta (o envolvente de falla):

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (35)$$

Donde  $\tau$  es el esfuerzo de corte,  $\sigma_n$  es el esfuerzo normal,  $c$  es la cohesión producto de las fuerzas internas que mantienen unidas las partículas del suelo y  $\phi$  es el ángulo de fricción o de resistencia al corte como resultado del contacto y roce entre las partículas cuando se someten a esfuerzos normales.

Cuando el suelo se encuentra saturado de agua, contiene una fase de partículas y otra de poros llenos de agua. Cualquier esfuerzo que se le aplique a estos suelos será recibido por las partículas y la presión en el agua. Normalmente, la estructura del suelo reaccionará con un esfuerzo normal y de corte entre partículas, y el agua con la presión hidrostática. Los esfuerzos ejercidos por las partículas y los esfuerzos hidrostáticos del agua se denominan como “esfuerzo efectivo” y “presión de poros” respectivamente. Entonces, solo los esfuerzos efectivos son los que controlarán el comportamiento del suelo y no los esfuerzos totales [42].



En base a la Tabla 13 se puede hacer una clasificación del suelo según el valor de su ángulo de fricción.

**Tabla 13: Valores típicos de ángulos de fricción para distintos suelos [43]**

Clasificación	Ángulos de fricción, $\phi$
Arena (granos redondeados)	27° a 38°
Arena (granos angulares)	30° a 45°
Grava con arena	34° a 48°
Arcillas consolidadas	20° a 30°
Limos	26° a 35°

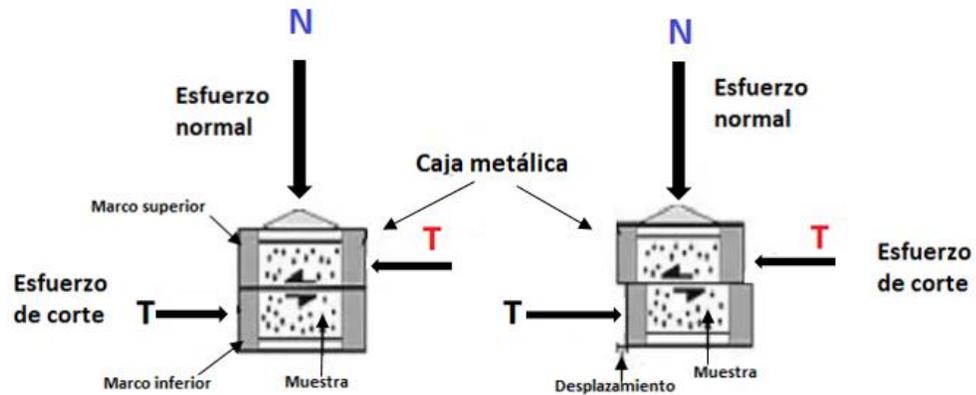
#### 4.3.1 Ensayo de corte directo

Este método es uno de los más simples y rápidos de realizar en laboratorios para determinar características mecánicas del suelo. Los resultados del ensayo son aplicables para estimar la resistencia al corte en condiciones idealizadas induciendo la ocurrencia de una falla a través de un plano sobre el cual actúan un esfuerzo normal debido a una carga vertical y un esfuerzo de corte debido a una carga horizontal. Con estos resultados se determinan los parámetros de resistencia, la cohesión y el ángulo de fricción [38].

Este equipo también permite obtener las deformaciones o desplazamientos verticales y horizontales de la muestra.

El ensayo consistió en colocar una muestra de cada material (café y gris) a temperatura ambiente en la caja de corte que es encerrada por una placa superior y otra inferior. Esta caja se divide en dos partes, un marco inferior y uno superior que permiten que se desarrolle el esfuerzo de corte. Luego, se instaló una carga o peso por encima de la placa superior para que esta aplicara un esfuerzo vertical o normal constante sobre la muestra. Posteriormente se empleó un esfuerzo de corte que fue en aumento hasta que se produjera la falla del suelo.

En la Ilustración 18 se ejemplifica la aplicación de los esfuerzos en el equipo, en una situación inicial (parte izquierda) y en una situación más avanzada (parte derecha), donde ya existe desplazamiento horizontal de la muestra.

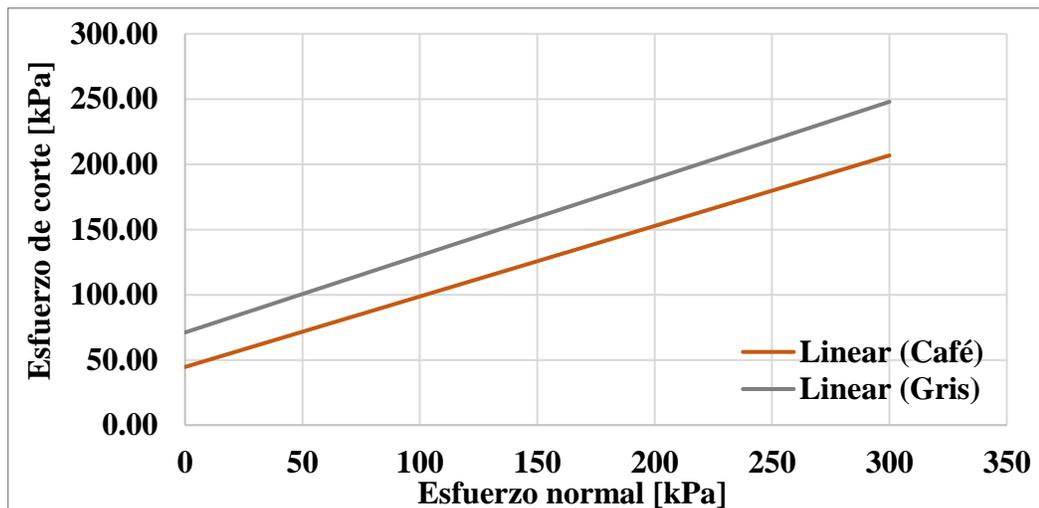


*Ilustración 18: Aplicación de esfuerzos en el equipo de corte*

Este ensayo se repitió seis veces, tres para el material café y tres para el material gris. Para cada material se aplicaron ensayos con cargas normales de 5 [kg], 15 [kg] y 30 [kg]. La velocidad de corte fue de 0.2 [mm/min].

### 4.3.2 Resultados

Los resultados entregados por el equipo, de acuerdo al esfuerzo normal y que permiten obtener la envolvente de falla, se encuentran en el Anexo G. Las envolventes de falla para los materiales café y gris se presentan en la Ilustración 19.



*Ilustración 19: Envolventes de falla de material café y gris*



En todos los ensayos la falla ocurrió en casi una hora desde el inicio, menos en los casos de 30 [kg], donde se produjo más rápido. A medida que se aumentaba el esfuerzo normal aplicado, también aumentaba la resistencia al esfuerzo de corte. En la Tabla 14 se ve el ángulo de fricción y la cohesión de cada material, obtenido de la gráfica anterior.

**Tabla 14: Ángulo de fricción y cohesión para muestras café y gris**

Muestra	Ángulo de fricción ( $\phi$ )	Cohesión (c)
Café	28.4°	44.6 [kPa]
Gris	30.5°	71.1 [kPa]

Se observa que ambos materiales presentan una envolvente bastante parecida con respecto a su pendiente, esto se debe a que los ángulos de fricción son muy parecidos.

#### 4.4 Conductividad Hidráulica

Como se explicó antes, en el punto 2.3, la conductividad hidráulica es una propiedad que depende tanto del medio poroso como del fluido que lo atraviesa. Se utiliza este concepto ya que en los procesos hidrogeológicos el agua es el fluido predominante. La conductividad hidráulica es un parámetro crucial al querer modelar el flujo de aguas subterráneas para entender su comportamiento. En la Tabla 15 se ven las clasificaciones de los suelos según su conductividad hidráulica (con agua).

**Tabla 15: Clasificación de suelos según su conductividad hidráulica [13]**

Conductividad hidráulica, k [m/s]												
	10 <sup>0</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-11</sup>
Drenaje	Bueno					Pobre			Prácticamente impermeable			
Tipos de suelos	Gravilla limpia.	Arena limpia, mezcla de arena y gravilla limpia.			Arena muy fina, limo orgánico e inorgánico, mezcla de arena limo y arcilla, till glaciario, depósitos de arcilla estratificada.				Suelos impermeables, arcillas homogéneas debajo de la zona de meteorización.			



#### 4.4.1 Método del permeámetro

Los métodos ya se describieron en el punto 2.3.2.1.2 de esta memoria, sin embargo, bajo las condiciones en que se realizaron estos ensayos, los cálculos se modificaron en pro de la representatividad, estos se detallan más adelante.

Se confeccionaron muestras en un homogeneizador, las cuales fueron relleno los permeámetros (de pared rígida), de acuerdo al ensayo proctor modificado, con el propósito de asemejarse a la compactación in-situ o real del suelo (ver Anexo H). La herramienta utilizada para compactar las muestras poseía un área de dimensiones similares a estas para que fuera uniforme.

La muestra se limitó por arriba y por abajo a través de mallas que se colocan antes de comenzar el ensayo (ver Anexo H).

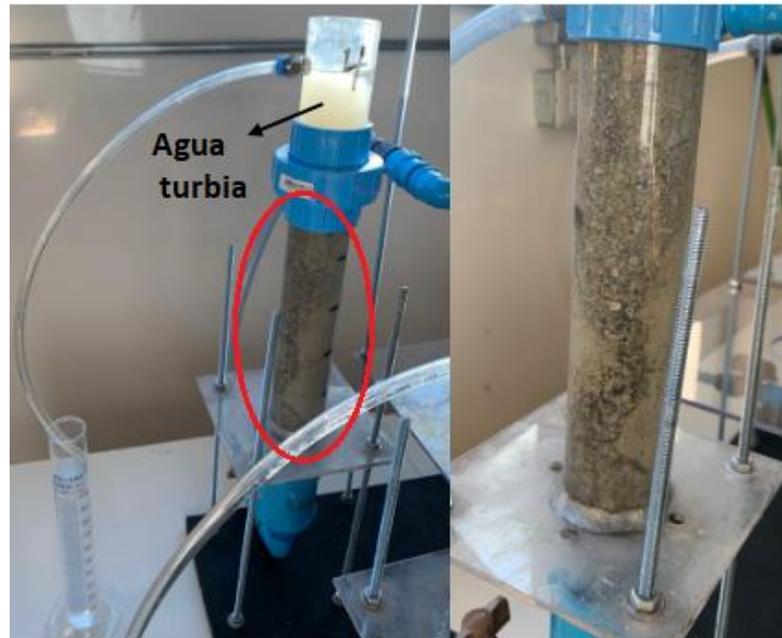
El ensayo comienza cuando se abren las llaves de paso y el agua comienza a circular desde el estanque hacia los permeámetros debido a las diferencias de alturas. Para estos ensayos se utilizó agua potable. Primero se espera a que las muestras se encuentren completamente saturadas y posteriormente a que el agua llegue al punto por donde se vierte hacia la probeta graduada.

Para el tipo de materiales que se hizo el ensayo, tanto el café como el gris, debido a sus granulometrías, se esperan permeabilidades relativamente bajas, por lo que se deberían obtener los resultados utilizando un sistema variable (permeámetro de carga variable). Sin embargo, como se querían hacer las pruebas de las 4 muestras simultáneamente, con un estanque en común, como se explicó en el punto 3.1, era imposible saber las diferencias de volumen (en el estanque) para cada permeámetro.

Por lo dicho anteriormente, y teniendo en consideración que el flujo de agua sería intermitente, se tomaron medidas de los volúmenes acumulados en cada probeta de la siguiente manera. Primeramente, se anotó la hora en que se recolectó por primera vez agua en cada probeta, considerando ese tiempo como el tiempo inicial ( $t_0$ ) y se tomó lectura del nivel de agua en el estanque. Luego, cada vez que caía agua en las probetas (cuando se estaba presente), se anotaba la hora, el nivel de agua en el estanque y el volumen acumulado en las probetas. Se tomaron los datos cada vez que el agua caía, con el fin de otorgar una mayor exactitud en las mediciones.



Este ensayo se elaboró dos veces, o sea, un total de 8 muestras. En el primer ensayo hubo problemas relacionados a la compactación, principalmente en el permeámetro 4, donde se notaron canales preferenciales como se logra ver en la Ilustración 20.



***Ilustración 20: Permeámetro 4, muestra mal compactada***

En la ilustración anterior también se puede notar que sobre la muestra el agua es turbia, lo que indica que hay partículas de la muestra que traspasaron la malla al no estar bien compactada.

Por lo anterior, en el segundo ensayo se confeccionaron las muestras aumentando la cantidad de golpes de compactación. En la Ilustración 21 se puede ver la diferencia entre los ensayos.



*Ilustración 21: Permeámetro 2, (a) ensayo 1; (b) ensayo 2*

En la Tabla 16 se presentan las masas de las muestras que se ingresaron en cada permeámetro para los dos ensayos. Cabe destacar que en el ensayo 1 el material gris fue ingresado en los permeámetros 1 y 4 y el material café se ingresó en los permeámetros 2 y 3. En el segundo ensayo ocurrió todo lo contrario.

De ahora en adelante, los recuadros de las tablas que tengan sombreado de color café o gris, representarán el material utilizado (obviamente los colores café y gris para los materiales café y gris respectivamente).

*Tabla 16: Masas de muestras en permeámetros*

Permeámetro	1	2	3	4
Ensayo 1	366.12 [g]	335.89 [g]	630.64 [g]	661.57 [g]
Ensayo 2	375.25 [g]	383.53 [g]	708.55 [g]	682.85 [g]



#### 4.4.2 Resultados

Los resultados de las conductividades hidráulicas que se presentan en la Tabla 17 (con agua potable como fluido permeante) se basan en el volumen acumulado final para cada prueba, ya que representa perfectamente lo que ocurrió durante todo el ensayo.

**Tabla 17: Conductividades hidráulicas**

Permeámetro	1	2	3	4
Ensayo 1	4.42E-05 [cm/s]	6.38E-05 [cm/s]	5.69E-05 [cm/s]	4.27E-02 [cm/s]
Ensayo 2	1.88E-05 [cm/s]	3.67E-05 [cm/s]	3.88E-05 [cm/s]	2.99E-05 [cm/s]

En la Tabla 17, en el primer ensayo para el permeámetro 4 (material gris), es fácil observar que su orden de magnitud es diferente a los demás resultados, esto da cuenta de lo enseñado en la Ilustración 20, donde aquella muestra no tuvo una buena compactación. Este dato se considera como un “outlier”, ya que no representa en lo absoluto al valor real.

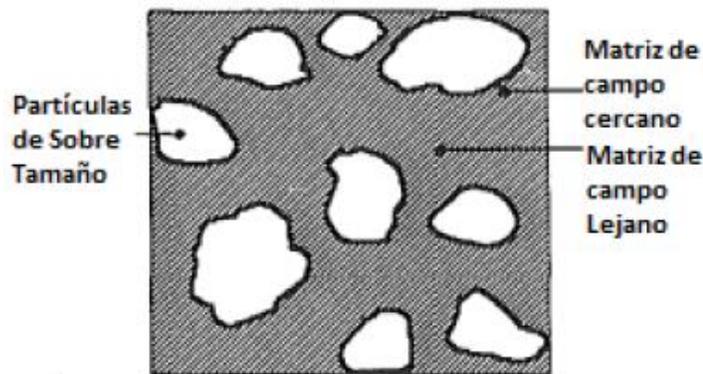
De la tabla anterior, también se ve que las conductividades hidráulicas disminuyeron en el segundo ensayo con respecto al primero, sin importar el material. Considerando solo el segundo ensayo y el promedio entre los resultados, se tiene una conductividad hidráulica de 3.78E-05 [cm/s] y 2.44E-05 [cm/s] para el material gris y café respectivamente.

Cabe señalar que los cálculos se hicieron como permeámetro de carga constante, pero para el gradiente hidráulico, las diferencias de alturas se obtuvieron mediante un promedio entre cada intervalo en el que se tomaron los datos. Se consideró el promedio, puesto que las gráficas que relacionaban el volumen recolectado en la probeta con el tiempo en el que transcurría, representaban funciones lineales, estas se pueden observar en el Anexo I.

## CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 Representatividad de los Ensayos

Hay casos en que los ensayos están limitados por el tamaño máximo de partículas que admiten, por ende, no se utiliza la granulometría completa del suelo. De los ensayos realizados, en el ensayo para obtener la densidad, picnometría, se permiten partículas de hasta 4.75 [mm] o que pasan la malla #4. Sin embargo, según Fragaszy, el método se puede realizar y representara al suelo siempre y cuando el sobre tamaño o los tamaños de partículas que no se incluyen para este ensayo, correspondan a menos del 65% del suelo (en masa), ya que Fragaszy considera a este tipo de situación como un caso flotante, donde la matriz permite el poco contacto entre partículas de sobre tamaño. La Ilustración 22 muestra el suelo compuesto por la matriz (distinguiendo la matriz cercana de la lejana) y las partículas de sobre tamaño para el caso flotante [44].



*Ilustración 22: Esquema de caso flotante (matriz y partículas sobre tamaño) [44]*

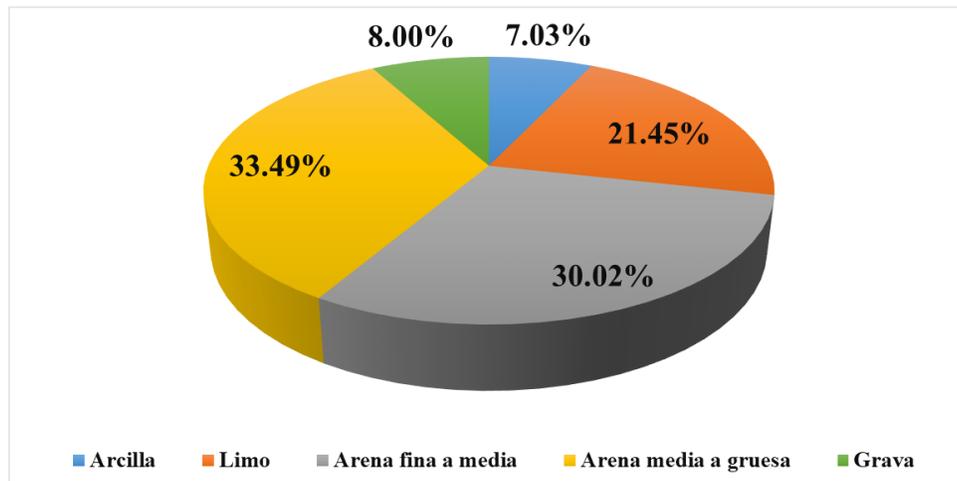
Como en el ensayo de picnometría, el sobre tamaño representaba menos del 65%, cumplía con la condición de la matriz (caso flotante). Cabe destacar que en el resto de ensayos que se realizaron, se utilizó el total de la granulometría, por lo tanto, todos cumplían con la condición anterior.



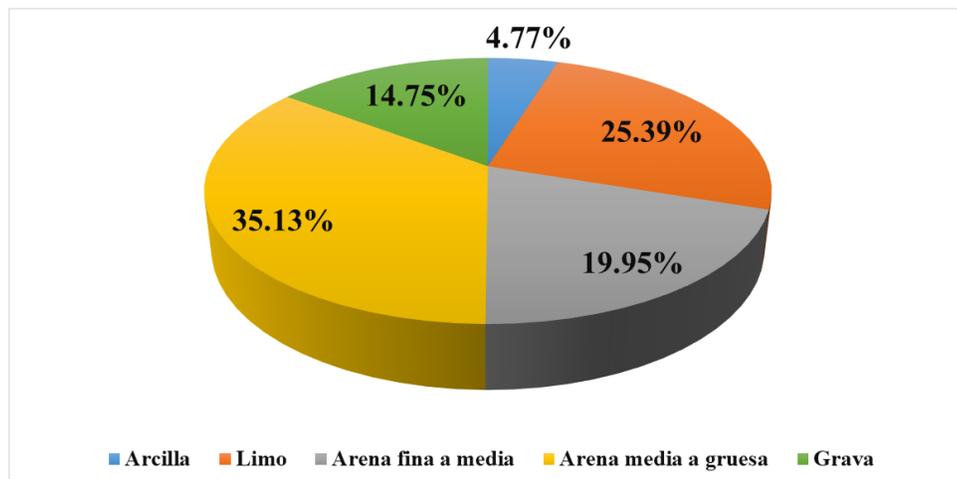
## 5.2 Granulometría

### 5.2.1 Clasificación

En relación a los resultados del análisis granulométrico, se hace una clasificación de acuerdo al tamaño de partículas según las categorías previamente expuestas en la Tabla 6. La Ilustración 23 e Ilustración 24 muestran el porcentaje de cada categoría para clasificar las muestras café y gris respectivamente.



*Ilustración 23: Clasificación del material café según tamaño de partículas*



*Ilustración 24: Clasificación del material gris según tamaño de partículas*



Como se muestra en las ilustraciones anteriores, en ambos materiales cerca del 70% corresponde a gravas y arenas, sin embargo, hay un porcentaje no menor de arcillas y limos.

### **5.2.2 Comparación de materiales café y gris**

En relación a la Ilustración 16 se observa que ambas curvas son muy parecidas, especialmente en el rango de material fino. Además, se puede ver que las curvas están inclinadas, lo que indicaría una buena gradación del tamaño de partículas para los dos materiales. Esto se confirma con los valores de los indicadores en la Tabla 8, donde los coeficientes de uniformidad son suficientemente elevados y similares para ambos materiales, o sea, estos suelos se encuentran bien gradados. Sin embargo, los coeficientes de curvatura son bastante diferentes. Lo anterior se debe principalmente al salto que hay en las curvas, donde el  $D_{30}$ , en el caso de la muestra café, está comprendido en la zona del grueso, en cambio, para la muestra gris, en la zona del fino.

Los valores de los coeficientes de curvatura se justifican puesto que las muestras de barro, tanto la café como la gris, contienen un amplio rango de tamaños, desde arcillas hasta gravas y cada una con un salto importante. Por lo tanto, las muestras de barro tienen una buena gradación, pero, discontinua.

### **5.3 Densidad**

Según el trabajo de Sepúlveda [45], donde se estudió la granulometría y plasticidad de distintos sectores de El Teniente, entre ellos Diablo Regimiento, la capacidad de retención de agua depende en gran medida de la presencia de arcillas expansivas. Si se observan los resultados de la densidad real de los materiales café y gris (Tabla 12), se aprecia que según la Tabla 9 las muestra café y gris corresponderían a arcillas plásticas y expansivas respectivamente. Bajo este conocimiento el material gris tendría mayor capacidad de retener agua, sin embargo, basándose en la granulometría, el material café presenta mayor contenido de arcillas, de modo que, en cierto punto ambos materiales podrían equipararse con respecto a sus permeabilidades.

### **5.4 Envolvente Mohr-Coulomb**

En base a los ángulos, según la Tabla 13 los materiales café y gris se encuentran en la categoría entre arcillas y limos, lo que indicaría la influencia del material fino en estas pruebas.



Por otro lado, la cohesión en el caso del material gris es mayor que en el café, pero los dos tienen una cohesión mayor que cero, por ende, las partículas de ambos materiales presentarían una pre consolidación.

Cabe destacar que estos ensayos no se hicieron sobre muestras saturadas, bajo esa condición los resultados cambiarían. Como estos suelos tienen baja permeabilidad, si se aplica un esfuerzo normal en presencia de agua, la resistencia de estos suelos sería inferior, ya que estaríamos bajo una condición con poco drenaje o incluso sin, y como se dijo en el punto 4.3, la presión de poros restaría el esfuerzo normal y el esfuerzo efectivo es el que controlaría el comportamiento del suelo.

## 5.5 Ensayo de Permeabilidad

### 5.5.1 Representatividad de los permeámetros construidos

Para la conductividad hidráulica, se obtuvo el mismo orden de magnitud para los valores obtenidos en los dos ensayos para las dos muestras, a excepción de uno que ya se explicó anteriormente. Además de esto, si se comparan los valores del primer ensayo con el segundo, por permeámetro, no hay tendencias en ninguno de estos más que por las características propias del material y la compactación, por lo tanto, se puede decir que los permeámetros no pueden ni deben ser influyentes en los resultados.

### 5.5.2 Densidad aparente

Si se observa la Tabla 16, se puede notar la diferencia de densidades entre los materiales, ya que la cantidad de masa ingresada para la muestra gris fue mayor en comparación a la café para los permeámetros del mismo largo de celda, es decir, para un mismo volumen se ingresó mayor masa en los permeámetros ocupados por material gris. En la Tabla 18 se ven las densidades aparentes de las muestras, en donde las muestras grises siguen teniendo mayor densidad por cada ensayo.

**Tabla 18: Densidades aparentes**

Permeámetro	1	2	3	4
Ensayo 1	1.72 [g/cm <sup>3</sup> ]	1.58 [g/cm <sup>3</sup> ]	1.59 [g/cm <sup>3</sup> ]	1.69 [g/cm <sup>3</sup> ]
Ensayo 2	1.76 [g/cm <sup>3</sup> ]	1.80 [g/cm <sup>3</sup> ]	1.79 [g/cm <sup>3</sup> ]	1.74 [g/cm <sup>3</sup> ]



### 5.5.3 Clasificación

Con los resultados de la conductividad hidráulica para los materiales café y gris, se puede hacer una clasificación con respecto a la Tabla 15. Ambos materiales se encuentran en el rango de conductividad hidráulica entre un orden de magnitud de  $10^{-6}$  y  $10^{-7}$  [m/s], contienen arenas finas, limos y arcillas. Por lo tanto, si se vuelve a la clasificación con respecto a la granulometría, se advierte que de alguna forma coinciden las clasificaciones, con un porcentaje relevante de material fino o bajo tamaño, lo que implica el pobre drenaje del agua al pasar por este tipo de filtros.

### 5.5.4 Índice de vacíos

Sabiendo las cantidades de masas ingresadas en cada permeámetro (Tabla 16), las dimensiones de las celdas (Tabla 5) y con las densidades de los materiales café y gris obtenidas en el punto 4.2.2, se pueden calcular los índices de vacíos en cada permeámetro con la ecuación (33). En el Anexo J se explica el cálculo de los volúmenes implicados. En la Tabla 19 se exponen los índices de vacíos para los cuatro permeámetros en los dos ensayos

*Tabla 19: Índices de vacíos en los permeámetros*

Permeámetro	1	2	3	4
Ensayo 1	0.668	0.792	0.775	0.702
Ensayo 2	0.604	0.592	0.602	0.626

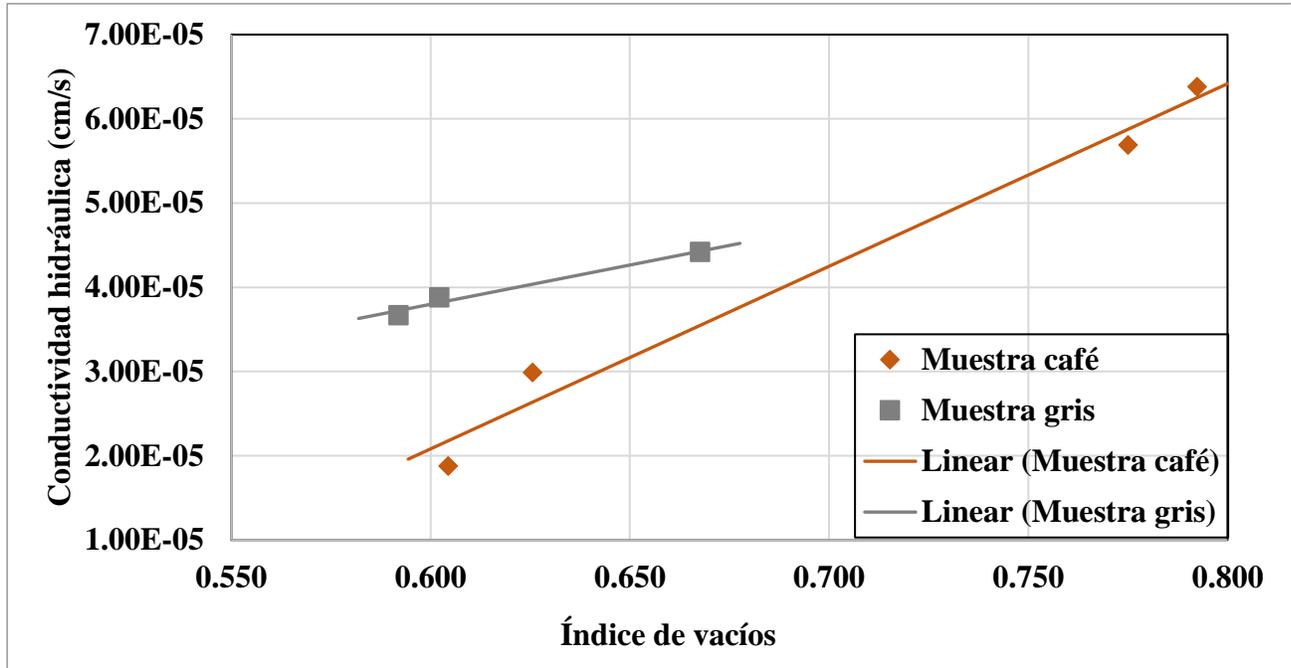
En primer lugar, los índices indican la diferencia de compacidad entre el primer y segundo ensayo, y a su vez explica los cambios en los valores de la conductividad hidráulica entre estos.

Por otra parte, se ve que la muestra gris del permeámetro 4 en el ensayo 1, tiene un menor índice de vacíos que las muestras cafés, aun así, esa fue la muestra que le afectó más la mala compactación, que posteriormente arrojó un resultado erróneo y completamente diferente a los demás. Si bien es cierto, la muestra en cuestión tiene menor índice de vacíos, no obstante, la compactación en esta, más allá de no haberse realizado correctamente, no fue homogénea, lo que generó, como se ve en la Ilustración 20, un notorio canal preferencial a lo largo de toda la celda. En el caso de las muestras restantes en el ensayo 1, se notó una menor compactación que en el ensayo 2, pero no canales preferenciales.



### 5.5.5 Conductividad hidráulica práctica y teórica

En general todas las ecuaciones empíricas relacionan, en mayor o menor medida, la permeabilidad de un suelo con la granulometría y/o el índice de vacíos de este mismo al basarse en la Ley de Poiseuille. En la Ilustración 25 se presenta la gráfica de comparación entre los resultados experimentales de las muestras café y gris



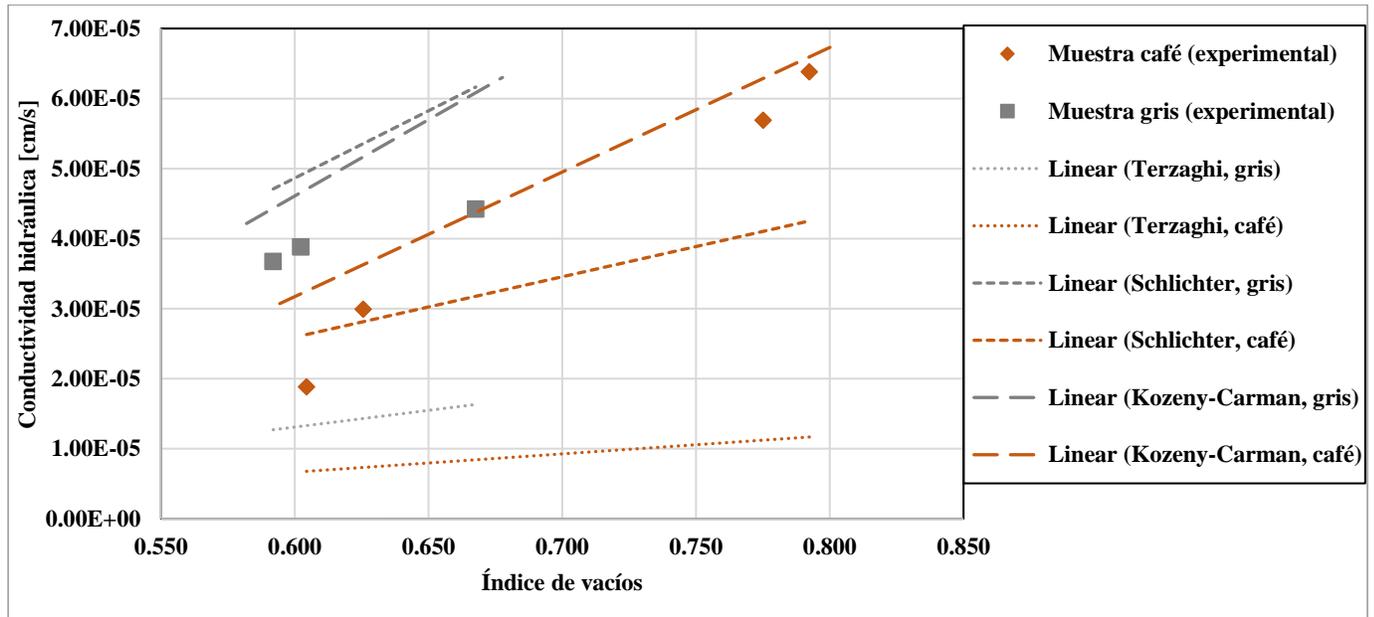
*Ilustración 25: Conductividad hidráulica experimental de muestras café y gris*

En la Ilustración 25 se puede comprobar que el índice de vacíos sí tiene relación directa con la conductividad hidráulica para cada muestra, pero es clara la diferencia si se compara las conductividades hidráulicas de las dos muestras para un mismo índice de vacíos, incluso llegando a ser casi el doble una de la otra. Esto quiere decir que, si bien el índice de vacíos es una buena forma de predecir las conductividades, no es la única variable, también tiene que ver con la mineralogía del material y su afinidad con el agua, lo cual es muy importante cuando se tienen estos porcentajes de material fino. Según Baumer y Brasher [46] cuando el contenido de arcillas es superior a 10%, la mineralogía es una variable fundamental a tener en cuenta en la retención de agua.

También se puede apreciar que las curvas tienen pendientes diferentes, siendo mayor para la muestra café, es decir, en este caso para el material café el índice de vacíos fue más preponderante que para el material gris.



En la Ilustración 26 se presenta la gráfica de las conductividades hidráulicas obtenidas para las muestras café y gris comparándolas con valores estimados a partir del índice de vacíos según algunos autores.



**Ilustración 26: Conductividad hidráulica experimental y teórica de muestras café y gris**

Analizando la ilustración anterior, todos los resultados teóricos se diferencian de los experimentales, sin embargo, las curvas propuestas por la ecuación de Kozeny-Carman son las que más se acercan a los resultados obtenidos de los ensayos, teniendo una tendencia similar, especialmente para el material café. En cambio, en las curvas formadas por la ecuación de Schlichter, los valores son relativamente cercanos, pero no se aprecian tendencias parecidas. Para las curvas obtenidas de la ecuación de Terzaghi, los valores predichos por esta son menores y más alejados que en los casos anteriores, no obstante, hay que recalcar que el coeficiente  $C$  tiene relevancia en esta ecuación, y para este caso se consideró un  $C_0$  igual a 100.

Según Chapuis, los resultados de la conductividad hidráulica con fórmulas empíricas, pueden estar entre un tercio a tres veces el valor real [19], lo que coincide con los resultados obtenidos en los ensayos, ya que están dentro de ese rango para las ecuaciones de Kozeny-Carman y Schlichter. A diferencia de los anteriores, la ecuación de Terzaghi no lo está, la cual predijo conductividades más bajas.



Cabe destacar que se consideraron los dos ensayos para las gráficas anteriores pero el segundo ensayo representa con mayor exactitud la realidad de los suelos. Sin embargo, no se consideró el resultado del primer ensayo con el permeámetro 4.

Ahora, si se utiliza la ecuación empírica de Hazen, que se basa solo en un diámetro característico, se tienen los siguientes resultados expuestos en la Tabla 20.

**Tabla 20: Comparación de la conductividad hidráulica con ecuación de Hazen**

Material	Café	Gris
Hazen	8.13e-06 [cm/s]	1.59E-05 [cm/s]
Experimental (promedio)	2.44E-05 [cm/s]	3.78E-05 [cm/s]

Considerando el promedio de las conductividades hidráulicas obtenidas en el ensayo 2 para cada material, la ecuación de Hazen entrega resultados más bajos, pero cumple solo en el caso de la muestra gris con el criterio de Chapuis anteriormente mencionado.

Los cálculos y/o consideraciones asociados a la Ilustración 26 y Tabla 20 se encuentran en el Anexo K.

Hay que destacar que la ecuación de Kozeny-Carman fue la que mejor se ajustó a los resultados prácticos obtenidos, tomando en cuenta que es la ecuación más precisa, ya que considera la forma y toda la distribución de tamaño de partícula y el índice de vacíos.



## CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con las bajas conductividades hidráulicas que se obtuvieron en este estudio, tanto para el material café como el gris, cuando estos materiales están presentes en la mina, la formación de bolsones de barro en la columna de quebrado se hará más frecuente, ya que con tales conductividades los bolsones no se drenaran, por lo que se acumularan, propiciando el riesgo de un estallido de barro.

Tanto de la revisión bibliográfica como de los resultados, se puede concluir que la característica más importante de los suelos o agregados granulares (en este estudio, de la parte sólida del barro) en cuanto a su capacidad para transmitir el agua, es su granulometría, especialmente el contenido más fino, porque será la fracción con mayor influencia en su comportamiento.

Con respecto a la comparación entre los materiales café y gris, sobre la distribución granulométrica, las muestras son muy similares, a pesar de que la muestra gris contenía uno y dos límites más en la fracción fina y gruesa respectivamente. Ambos materiales contienen alrededor de un 30% de fino y en general los dos contienen arcilla, limo, arena (desde fina a gruesa) y grava.

En relación a la conductividad hidráulica, en las dos muestras se obtuvieron resultados muy bajos, los cuales estaban dentro de lo esperado en base a la experiencia teórica, o sea, el valor de la conductividad hidráulica puede relacionarse con un cierto diámetro o tamaño característico de las partículas que componen la muestra de suelo.

Los resultados obtenidos son independientes de los permeámetros, o en específico, de la longitud de las muestras y también del gradiente hidráulico, aunque este último hasta cierto punto, pues no puede ser excesivo. Esto porque cada vez que se aumenta la velocidad del fluido, la conductividad hidráulica pierde relación con el gradiente hidráulico, entonces hay que mantener un flujo laminar y cumplir tal condición de la Ley de Darcy. Por lo tanto, la conductividad hidráulica depende netamente de las propiedades del suelo y del fluido que lo atravesará, en este caso agua.

De acuerdo con el resultado erróneo (ensayo 1, permeámetro 4), como se originó un canal preferente, se puede decir que la estructura del suelo se tiene que ver como un espacio anisotrópico, es decir, no presenta las mismas propiedades para diferentes direcciones.

La conductividad hidráulica promedio de la muestra gris fue de  $3.78E-05$  [cm/s], casi 1.5 veces el valor de la muestra café de  $2.44E-05$  [cm/s]. En el segundo ensayo se lograron índices de vacíos



casi iguales entre los dos materiales, aun así, los resultados de las conductividades fueron diferentes. Las muestras tienen características o propiedades muy parecidas, pero las diferencias que tienen se asocian principalmente a su mineralogía. Visualmente, la única diferencia es en cuanto a su color, que se relaciona con el contenido de óxidos y sulfuros. Por lo que se recomienda realizar ensayos mineralógicos y de plasticidad para comprobar realmente el grado de influencia de los minerales presentes en las muestras en los estallidos de barro.

En los métodos subterráneos, el agua que provoca los estallidos de barro normalmente no es potable, por lo que hacer un estudio con el fluido que realmente atraviesa los suelos, o agua con características similares, tendría mayor exactitud con la realidad.

En los ensayos de permeabilidad se vio que la compactación sí tuvo importancia en los resultados, es por esto que se recomienda que la compactación sea estándar y que el índice de vacíos dependa exclusivamente del reordenamiento de las partículas provocado por la misma granulometría de la muestra.

En relación a la matriz de criticidad de El Teniente (Tabla 2), esta se sustenta en eventos pasados y se desarrolla en base a dos variables, granulometría y humedad. Entonces, se sugiere tener en cuenta también la mineralogía del material, ya que conforme avanza la excavación, los minerales en el macizo también van variando.

Por último, de acuerdo al análisis entre los resultados experimentales y teóricos de la conductividad hidráulica, se recomienda utilizar la ecuación de Kozeny-Carman para predecir conductividades hidráulicas en el sector Diablo Regimiento, pues fue la que más se asemeja a los resultados experimentales.



## REFERENCIAS

- [1] A. Perez, "Cuantificación del riesgo de ingreso de agua-barro en El Teniente," Universidad de Chile, 2017.
- [2] N. Montecino, "Modelo de mezcla de fragmentación secundaria en minería de Block/Panel Caving," Universidad de Chile, 2011.
- [3] J. Jakubec, R. Clayton, and A. Guest, "Mudrush Risk Evaluation," *Proc. Massmin*, 2012.
- [4] K. Basaure, "Caracterización geotécnica de mineral saturado de mina Diablo Regimiento, CODELCO, division El Teniente," Universidad de Chile, 2014.
- [5] I. Soto, "Estudio y análisis de estrategias de extracción de agua-barro en la fase II de mina Diablo Regimiento," Universidad de Chile, 2018.
- [6] C. Becerra, "Controlling Drawpoints Prone to Pumping - El Teniente Mine." International Seminar on Geology for the Mining Industry, 2011.
- [7] R. Butcher, W. Joughin, and T. R. Stacey, *Methods of combating mudrushes in diamond and base metal mines*. 2000.
- [8] J. Lehr, J. Keeley, and J. Lehr, *Water encyclopedia, Ground Water*. 2005.
- [9] E. Gilli, C. Mangan, and J. Mudry, *Hydrogeology, objectives, methods, applications*. 2012.
- [10] K. Hiscock and V. Bense, *Hydrogeology, principles and practice, Second*. 2014.
- [11] D. Leap, "Geological occurrence of groundwater," in *The handbook of groundwater engineering*, 2016.
- [12] J. Bear and A. Cheng, *Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [13] K. Terzaghi, R. Peck, and G. Mesri, *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [14] W. Lambe and R. Whitman, "Mecánica de Suelos," p. 582, 2002.



- [15] C. T. Simmons, "Henry Darcy (1803 – 1858): Immortalised by his scientific legacy," no. September, 2008.
- [16] G. O. Brown, "Henry Darcy and the making of a law," no. July 2002.
- [17] J. Sánchez, "Flujo en medios porosos: Ley de Darcy," *Univ. Salamanca (España), Dep. Geol.*, 2008.
- [18] H. Darcy, "Les fontaines publiques de la ville de Dijon : exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau," *Recherche*, 1856.
- [19] R. P. Chapuis, "Predicting the coefficient of permeability of soils using the Kozeny-Carman equation," no. October, 2003.
- [20] J. Lutin, "Drenajes de Tierras Agrícolas: Teoría y Aplicación," pp. 67, 449, 460, 1967.
- [21] M. K. Hubbert, "The Journal of Geology," vol. 68, 1940.
- [22] J. . Delleur, *The handbook of groundwater engineering*. 2010.
- [23] J. Bear and Y. Bachmat, "Introduction to modeling of transport phenomena in porous media," *Introd. to Model. Transp. Phenom. porous media*, 1990.
- [24] S. Angelone, M. T. Garibay, and M. Cauhapé C., "Geología y Geotecnia - Permeabilidad de suelos," *Univ. Nac. Rosario*, p. 39, 2006.
- [25] C. Espinoza, "Ley de Darcy." 2006.
- [26] D. W. Taylor, "Fundamentals of Soil Mechanics." New york, 1948.
- [27] G. K. Mikhailov, "Daniel bernoulli, hydrodynamica (1738)," in *Landmark Writings in Western Mathematics 1640-1940*, 2005.
- [28] C. Carmi, "Variación de la permeabilidad y parámetros consolidación en relaves tratados con agua de mar," 2013.
- [29] A. Hazen, *Discussion of "Dams on Sands Foundations,"* 73rd ed. Transactions, American



- Society of Civil Engineers, 1911.
- [30] W. D. Carrier, "Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman," no. November, pp. 1054–1056, 2003.
- [31] A. Loudon, "The computation of permeability from simple soil tests," *Geotechnique*, vol. 3, no. 4, pp. 165–183, 1952.
- [32] A. Hazen, "Some physical properties of sand and gravel, with their special reference to their use in filtration.," in *Massachusetts State Board of Health*, 1892.
- [33] E. Juárez and A. Rico, *Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. 2005.
- [34] E. J. Lopez, "Estudio experimental de la permeabilidad de materiales depositados en pilas de lixiviación." Santiago, Chile, 2012.
- [35] R. G. Shepherd, "Correlations of permeability and grain size," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, vol. 27, no. 2, 1989.
- [36] P. Carman, *Flow of gases through porous media*. London: Butterworths scientific Publications, 1956.
- [37] D. Gabriels and D. Lobo L., "Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo," *Venesuelos*, vol. 14, no. 1, pp. 37–48, 2011.
- [38] J. E. Bowles, *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*. McGraw-Hill, 1981.
- [39] O. Correa, F. García, and D. Escobar, "Representación de estados y trayectorias volumétricas y gravimétricas en suelos," *Rev. Av. Investig. en Ing.*, vol. 10, no. 1, 2013.
- [40] D. Arroyo, "Manual de laboratorio de mecánica de suelos I," Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco, 2016.
- [41] E. Juárez and A. Rico, "Mecánica de suelos:," *Fundamentos de la mecánica de suelos*. p. 644, 2005.
- [42] J. Suarez, "Resistencia al cortante," in *Deslizamientos: Analisis geotecnico*, 2009.
- [43] B. M. Das, *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Thomson Learning, 2001.

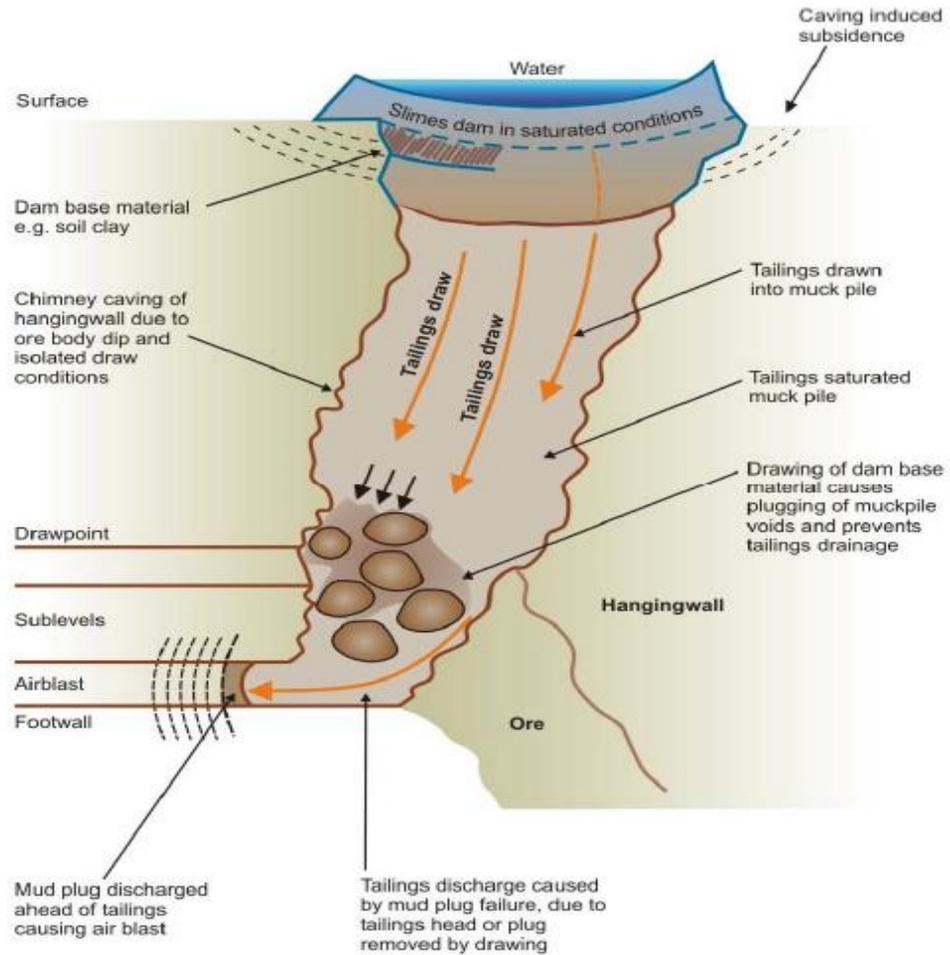


- [44] R. J. Fragaszy, "Modeling strength of sandy gravel," *J. Geotech. Eng.*, vol. 118, no. 7, pp. 981–995, 1992.
- [45] M. P. Sepúlveda, R. González, and Ú. Kelm, "Caracterización granulométrica y mineralógica del material con potencial de generar barro en los sectores productivos de mina El Teniente," no. 80, pp. 319–322, 2011.
- [46] O. . Baumenr and B. . Brasher, "Prediction of water content at selected suctions," 1982.

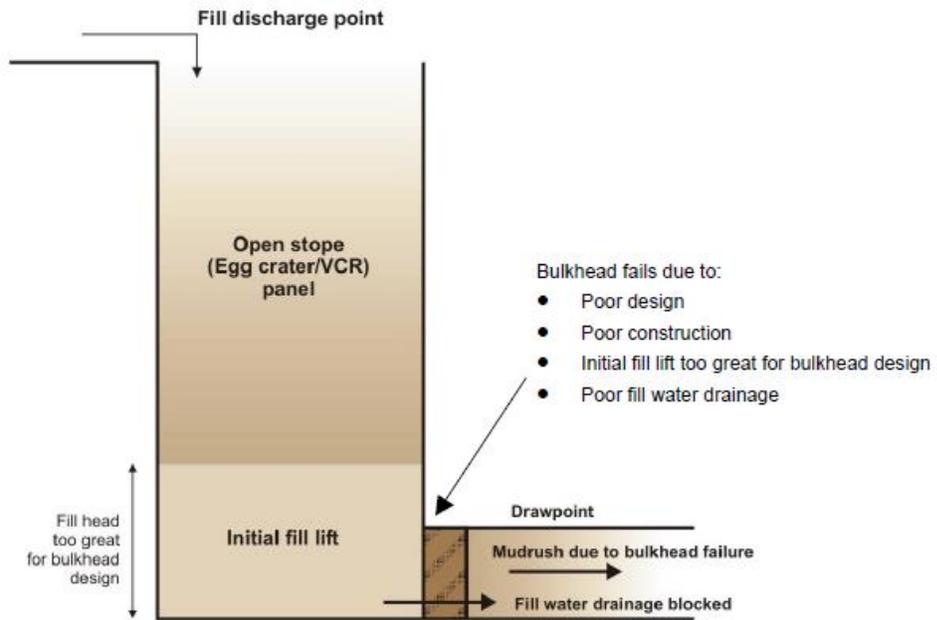


## ANEXOS

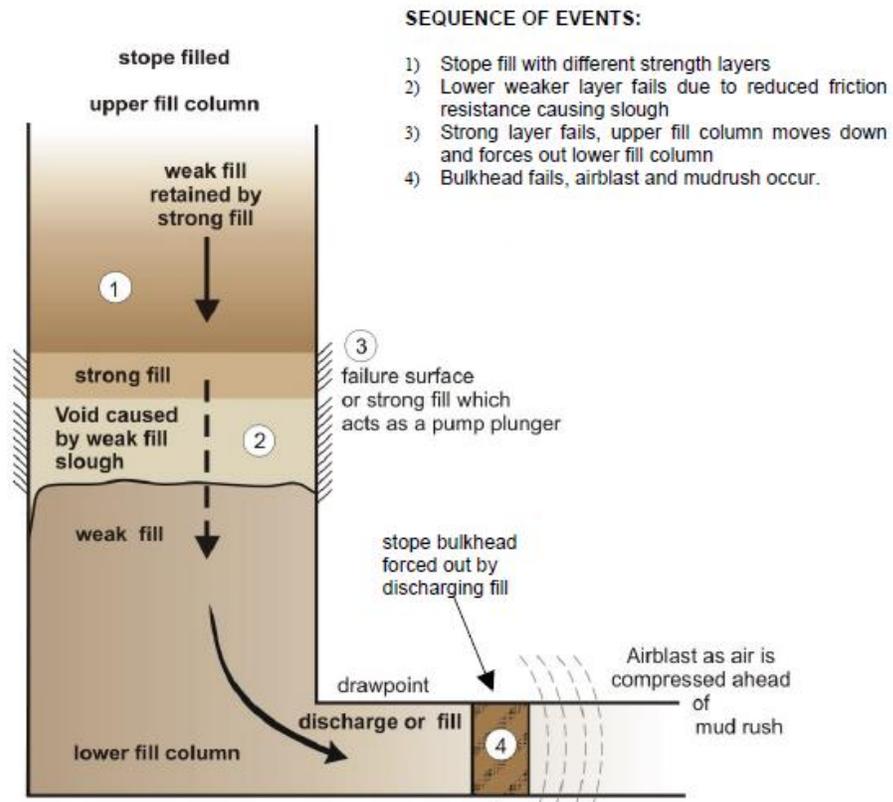
### Anexo A: Mecanismos externos de ingreso de barro



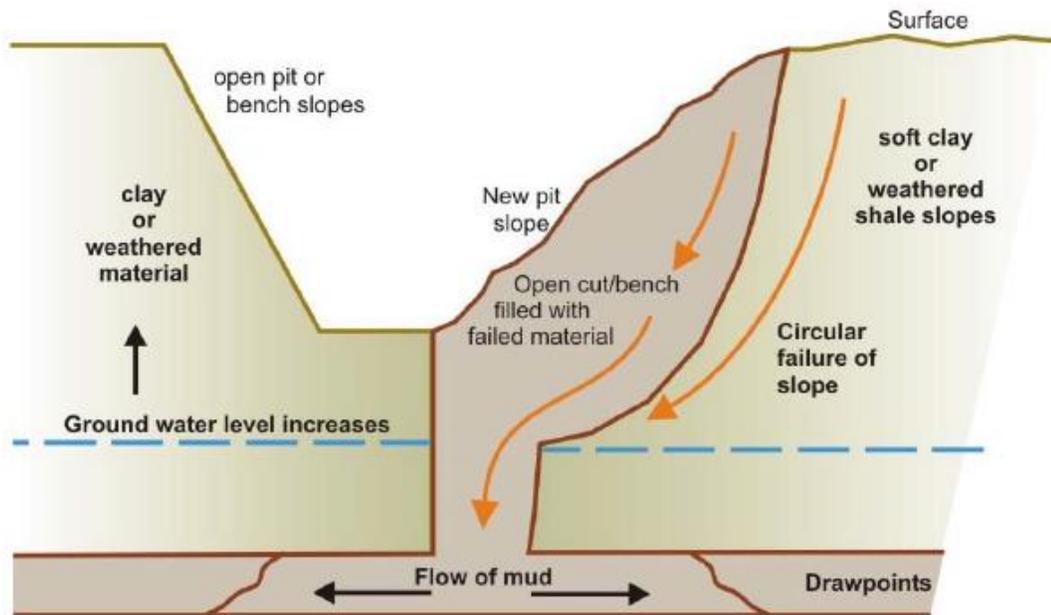
*Ilustración A1: Extracción directa de lodo y relaves [7]*



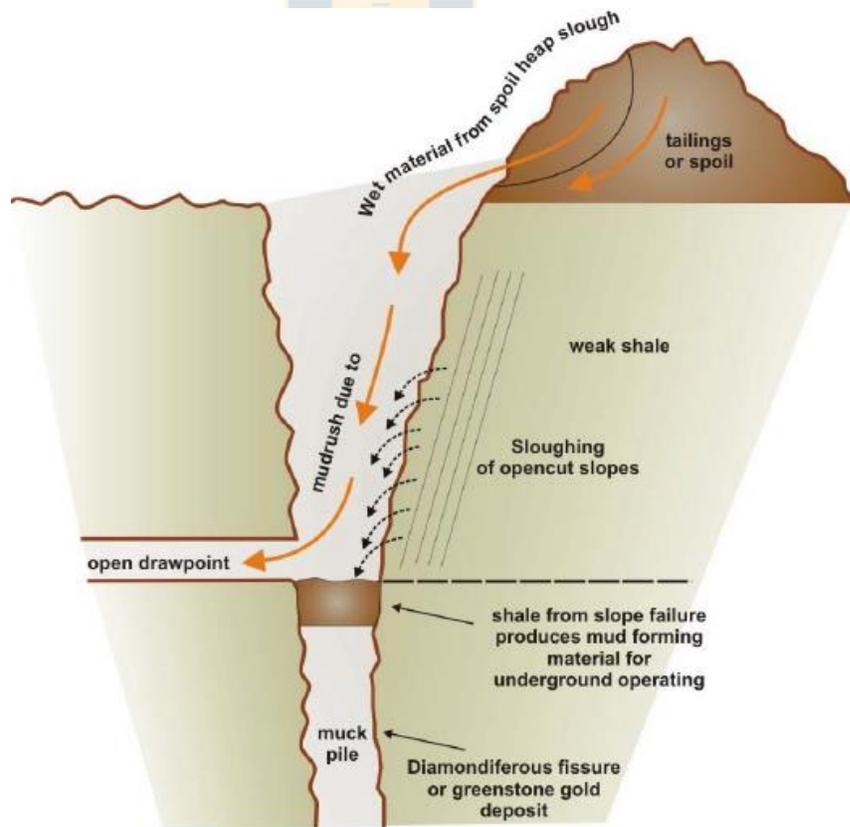
*Ilustración A2: Falla del relleno que resulta en barrores localizados [7]*



*Ilustración A3: Falla posterior al relleno que provoca el barro [7]*

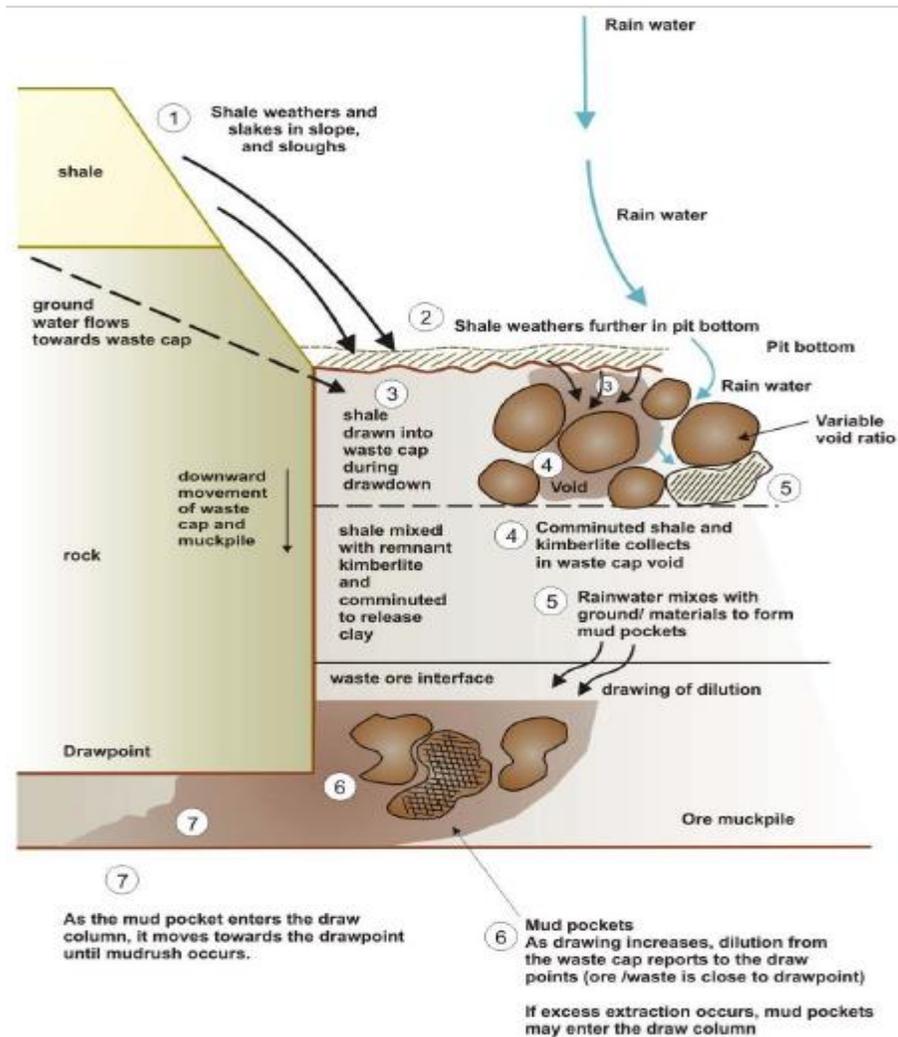


*Ilustración A4: Barros resultantes de la falla del talud del material blando [7]*



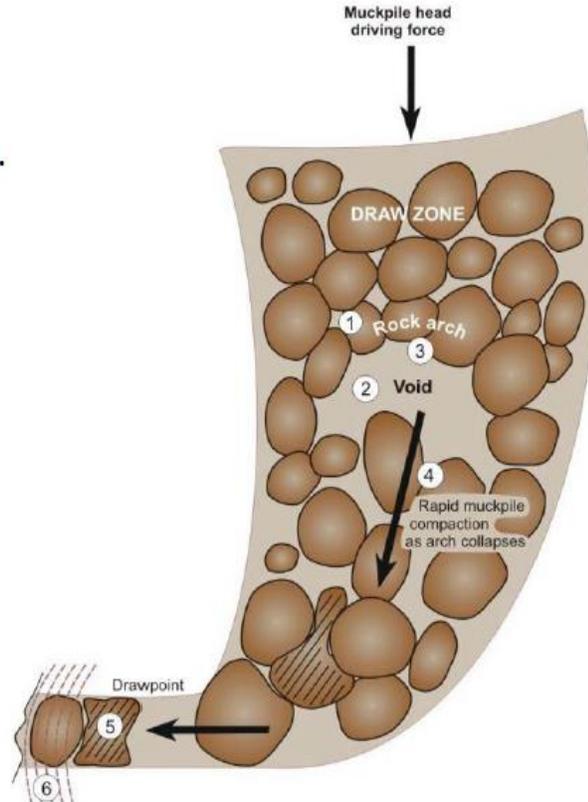
*Ilustración A5: Efecto indirecto de la falla del talud en formación de barros [7]*

## Anexo B: Mecanismos internos de ingreso de barro



*Ilustración B1: Mecanismo primario, columna de barro [7]*

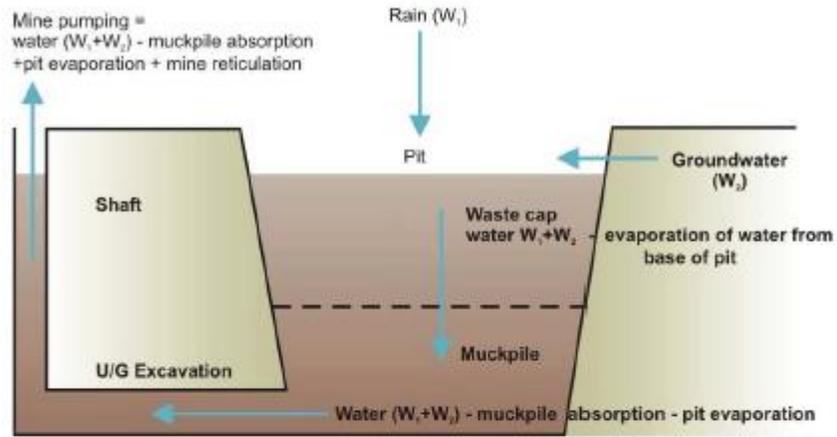
- Secuencia de Eventos:**
1. Se produce un arco estable en la columna de extracción.
  2. Se genera un vacío bajo el arco debido a la extracción.
  3. El arco de roca impide el movimiento de la columna.
  4. El arco colapsa debido a la extracción bajo el mismo o en puntos adyacentes.
  5. La columna de extracción compacta el barro y este es descargado.



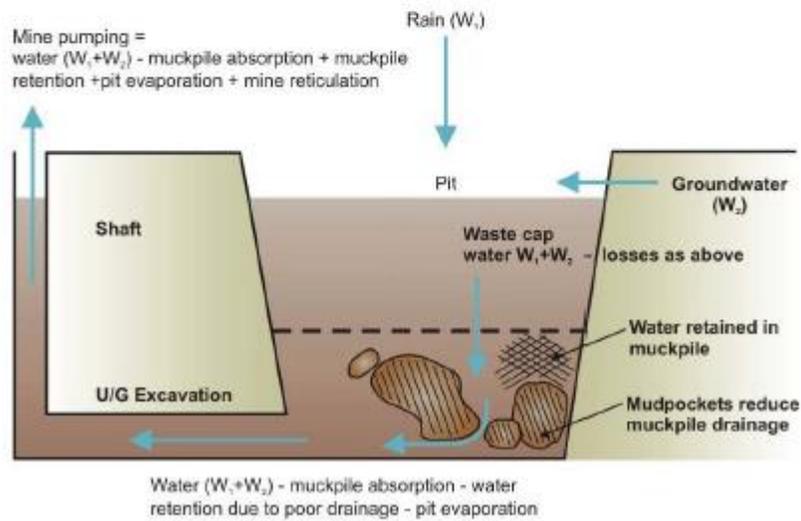
*Ilustración B2: Mecanismo secundario, compactación rápida del barro [7]*



### Beginning of mine life



### Reduced muckpile / waste cap drainage



*Ilustración B3: Mecanismo secundario, drenaje reducido de la columna tapado por estéril [7]*



## Anexo C: Materiales del sistema de permeámetros

*Tabla C1: Lista de materiales*

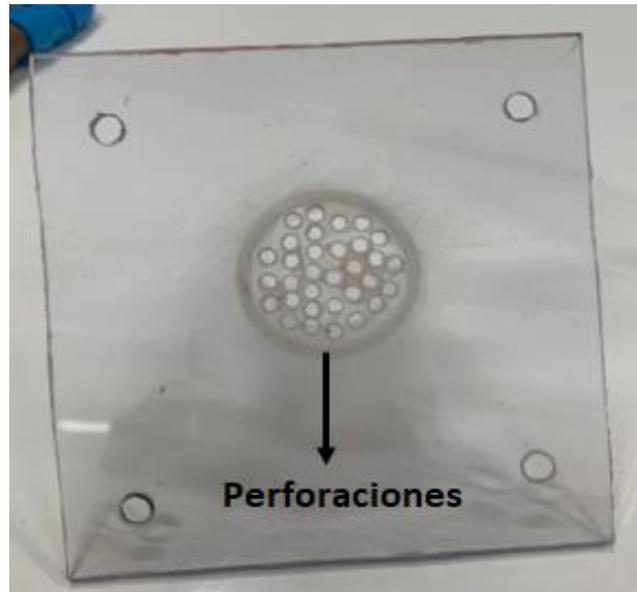
<i>Fittings</i>
Placas de policarbonato
Tubo de acrílico
Hilo metálico rosca
Mangueras plásticas
Huinchas de medir
Malla metálica (#100)
Teflón
Adhesivo epóxico
Adhesivo PVC
Silicona
Conector rápido neumático

### Comentarios:

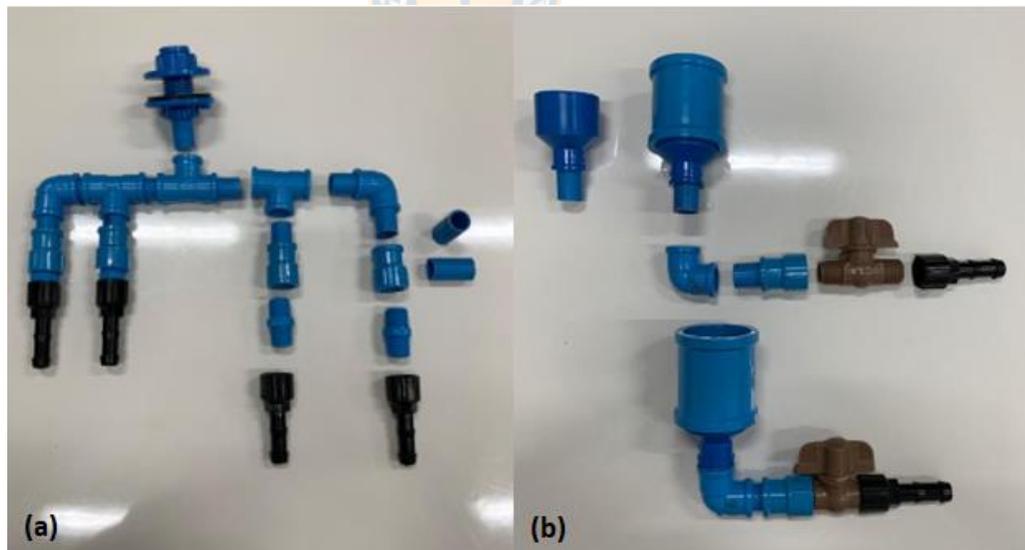
- Dentro de los *fittings* se incluyen: Llaves de paso, terminales, tubos, uniones americanas, uniones estanques, tees, codos, bujes de reducción, coplas y niples.
- La huincha se fijó en el estanque de agua para ir midiendo las variaciones de la carga hidráulica de forma más rápida.
- La malla de #100 se eligió luego de compararla con la malla #200, donde se reconoció que para el ensayo de permeabilidad era más indicada. Las mallas se utilizan para, de alguna forma, “sellar” la muestra.
- Las placas de policarbonato se utilizaron principalmente para la construcción del estanque de agua y para darle soporte a los permeámetros como se verá a más adelante.
- Los materiales como teflón y silicona se utilizaron para reforzar los permeámetros en caso de filtraciones.
- Las uniones americanas se componen de dos partes.



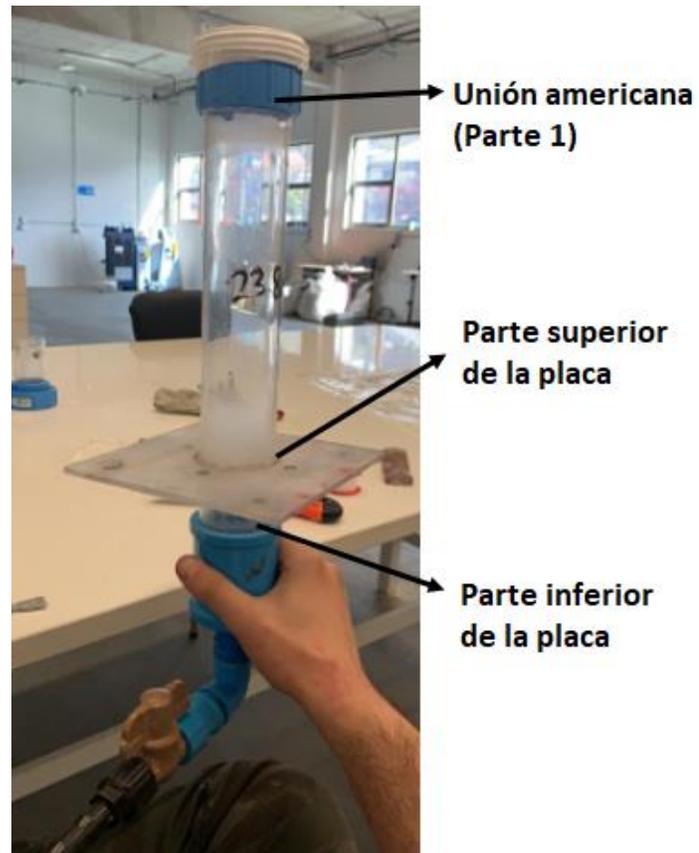
### Anexo D: Construcción del sistema de permeámetros



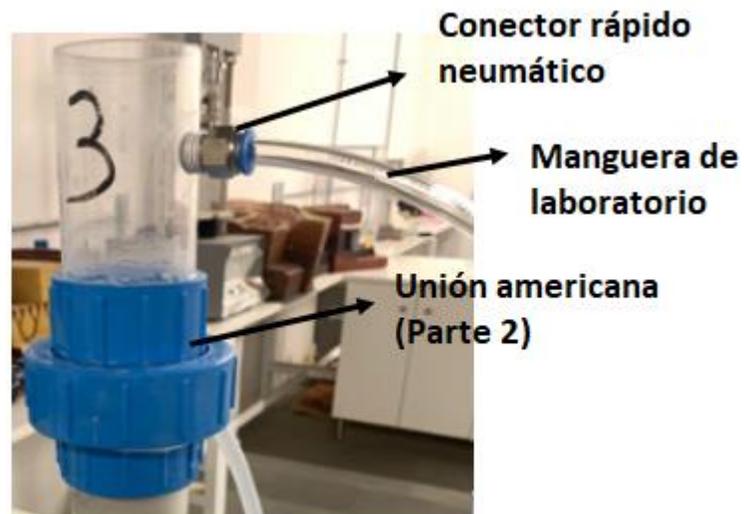
*Ilustración D1: Placa perforada del permeámetro*



*Ilustración D2: Fittings, (a) conexión al estanque, (b) conexión al permeámetro*



*Ilustración D3: Permeámetro (parte media e inferior)*



*Ilustración D4: Permeámetro (parte superior)*



## Anexo E: Ensayos Granulométricos



*Ilustración E1: Roleo y cuarteo*



*Ilustración E2: Columna de tamices*



**Tabla E1: Masas retenidas en los tamices**

Numero de tamiz	Peso del tamiz [g]	Peso muestra café		Peso muestra gris	
		Con tamiz [g]	Sin tamiz [g]	Con tamiz [g]	Sin tamiz [g]
1/2"	798.67	798.67	0	798.67	0
0.265"	513.34	513.34	0	514.88	1.54
1/4"	779.62	779.62	0	781.6	1.98
#4	510.11	542.95	32.84	562.87	52.76
#8	439.48	514.24	74.76	524.02	84.54
#14	432.32	495.04	62.72	481.82	49.5
#20	412.57	431.93	19.36	417.65	5.08
#50	364.54	468.42	103.88	435.58	71.04
Fondo	364.86	481.82	116.96	479.98	115.12

**Tabla E2: Distribución granulométrica general de la muestra café**

Numero de tamiz	% Retenido		% Bajo acumulado
	Parcial	Acumulado	
1/2"	0.00	0	100.00
0.265"	0.00	0	100.00
1/4"	0.00	0	100.00
#4	8.00	8.00	92.00
#8	18.21	26.21	73.79
#14	15.28	41.49	58.51
#20	4.72	46.20	53.80
#50	25.30	71.51	28.49
Fondo	28.49	100.00	0.00



**Tabla E3: Distribución granulométrica general de la muestra gris**

Numero de tamiz	% Retenido		% Bajo acumulado
	Parcial	Acumulado	
1/2"	0.00	0.00	100.00
0.265"	0.40	0.40	99.60
1/4"	0.52	0.92	99.08
#4	13.83	14.75	85.25
#8	22.16	36.91	63.09
#14	12.97	49.88	50.12
#20	1.33	51.21	48.79
#50	18.62	69.83	30.17
Fondo	30.17	100.00	0.00

**Tabla E4: Distribución granulométrica para el fino de las muestras café**

Tamaño (Límite superior) [ $\mu\text{m}$ ]	% Bajo parcial	% Bajo acumulado	% Sobre acumulado
1.8	24.68	24.68	75.32
2.2	6.43	31.11	68.89
2.6	5.7	36.81	63.19
3	5.06	41.87	58.13
3.6	6.6	48.47	51.53
4.4	7.25	55.72	44.28
5.2	5.77	61.49	38.51
6.2	5.6	67.09	32.91
7.4	4.96	72.05	27.95



8.6	3.64	75.69	24.31
10	3.27	78.96	21.04
12	3.8	82.76	17.24
15	4.69	87.45	12.55
18	3.78	91.23	8.77
21	2.91	94.14	5.86
25	2.6	96.74	3.26
30	1.75	98.49	1.51
36	0.89	99.38	0.62
42	0.4	99.78	0.22
50	0.22	100	0

**Tabla E5: Distribución granulométrica para el fino de la muestra gris**

Tamaño (Límite superior) [ $\mu\text{m}$ ]	% Bajo parcial	% Bajo acumulado	% Sobre acumulado
1.8	15.8	15.8	84.2
2.2	4.51	20.31	79.69
2.6	4.28	24.59	75.41
3	4.05	28.64	71.36
3.6	5.67	34.31	65.69
4.4	6.81	41.12	58.88
5.2	5.99	47.11	52.89
6.2	6.43	53.54	46.46
7.4	6.34	59.88	40.12
8.6	5.09	64.97	35.03
10	4.78	69.75	30.25



12	5.42	75.17	24.83
15	6.15	81.32	18.68
18	4.55	85.87	14.13
21	3.39	89.26	10.74
25	3.22	92.48	7.52
30	2.63	95.11	4.89
36	1.95	97.06	2.94
42	1.34	98.4	1.6
50	1.22	99.62	0.38
60	0.38	100	0

- **Cálculo de los porcentajes de los límites del material fino**

Los porcentajes obtenidos en el ensayo para material fino, se consideran como porcentajes dentro del porcentaje total de material fino. Entonces, para obtener el porcentaje de cada límite de material fino para el total de la muestra, se utilizó la siguiente ecuación de proporcionalidad:

$$\frac{X_i Y}{100\%} = Z_i \quad (36)$$

Donde X toma valores de los porcentajes obtenidos en el ensayo para material fino, Y es el porcentaje total de fino y Z es el porcentaje parcial de cada límite del fino para el total de la muestra.



**Tabla E6: Distribución granulométrica de la muestra café**

Tamaño (Límite superior) [ $\mu\text{m}$ ]	% Bajo parcial	% Bajo acumulado	% Sobre acumulado
1.80E+00	7.03	7.03	92.97
2.20E+00	1.83	8.86	91.14
2.60E+00	1.62	10.49	89.51
3.00E+00	1.44	11.93	88.07
3.60E+00	1.88	13.81	86.19
4.40E+00	2.07	15.87	84.13
5.20E+00	1.64	17.52	82.48
6.20E+00	1.60	19.11	80.89
7.40E+00	1.41	20.53	79.47
8.60E+00	1.04	21.56	78.44
1.00E+01	0.93	22.49	77.51
1.20E+01	1.08	23.58	76.42
1.50E+01	1.34	24.91	75.09
1.80E+01	1.08	25.99	74.01
2.10E+01	0.83	26.82	73.18
2.50E+01	0.74	27.56	72.44
3.00E+01	0.50	28.06	71.94
3.60E+01	0.25	28.31	71.69
4.20E+01	0.11	28.43	71.57
5.00E+01	0.06	28.49	71.51
3.00E+02	0.00	28.49	71.51
8.50E+02	25.30	53.79	46.21
1.40E+03	4.72	58.51	41.49
2.36E+03	15.28	73.79	26.21
4.70E+03	18.21	92.00	8.00
6.30E+03	8.00	100.00	0.00

**Tabla E7: Distribución granulométrica de la muestra gris**

Tamaño (Límite superior) [ $\mu\text{m}$ ]	% Bajo parcial	% Bajo acumulado	% Sobre acumulado
1.80E+00	4.77	4.77	95.23
2.20E+00	1.36	6.13	93.87
2.60E+00	1.29	7.42	92.58
3.00E+00	1.22	8.64	91.36
3.60E+00	1.71	10.35	89.65



4.40E+00	2.05	12.41	87.59
5.20E+00	1.81	14.22	85.78
6.20E+00	1.94	16.16	83.84
7.40E+00	1.91	18.07	81.93
8.60E+00	1.54	19.60	80.40
1.00E+01	1.44	21.05	78.95
1.20E+01	1.64	22.68	77.32
1.50E+01	1.86	24.54	75.46
1.80E+01	1.37	25.91	74.09
2.10E+01	1.02	26.93	73.07
2.50E+01	0.97	27.90	72.10
3.00E+01	0.79	28.70	71.30
3.60E+01	0.59	29.29	70.71
4.20E+01	0.40	29.69	70.31
5.00E+01	0.37	30.06	69.94
6.00E+01	0.11	30.17	69.83
3.00E+02	0.00	30.17	69.83
8.50E+02	18.62	48.79	51.21
1.40E+03	1.33	50.12	49.88
2.36E+03	12.97	63.09	36.91
4.70E+03	22.16	85.25	14.75
6.30E+03	13.83	99.08	0.92
6.70E+03	0.52	99.60	0.40
1.25E+04	0.40	100.00	0.00

## Anexo F: Picnometría

*Tabla F1: Materiales para picnometría*

Picnómetro
Balanza
Piseta con agua desairada
Desecador
Bomba de vacío
Embudo de vidrio



*Ilustración F1: Picnómetros con pulpa*

- **Cálculo densidad del sólido**

Para obtener la densidad del sólido se necesita el volumen y la masa del sólido. La masa en [g] se obtiene directamente de los datos registrado, como:

$$M_s = M_{p+s} - M_p \quad (37)$$

Para obtener el volumen del sólido en [cm<sup>3</sup>], antes hay que conocer el volumen del agua de la siguiente forma:

$$V_a = \frac{M_a}{\rho_a} \quad (38)$$

Con:  $\rho_a = 1.00 \text{ [g/cm}^3\text{]}$

$$M_a = M_{p+s+a} - M_{p+s} \quad (39)$$

$\rho_a$ : Densidad del agua [g/cm<sup>3</sup>]



Luego el volumen del sólido se obtiene como:

$$V_s = V_p - V_a \quad (40)$$

Finalmente se obtiene la densidad:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (41)$$

### Anexo G: Ensayo de corte

*Tabla G1: Esfuerzos de corte*

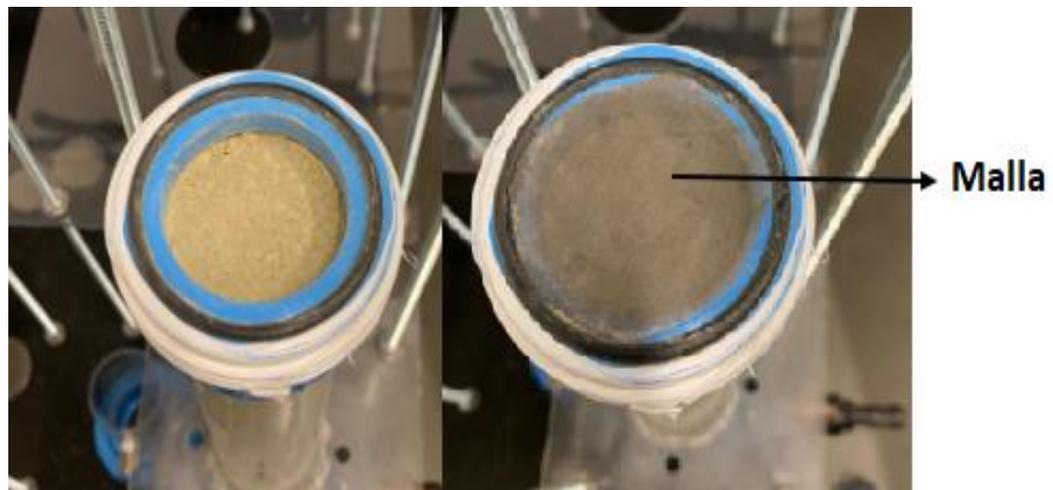
Material	Café			Gris		
Esfuerzo normal [kPa]	5	15	30	5	15	30
Esfuerzo de corte [kPa]	63.86	138.60	201.62	73.79	204.06	230.11



## Anexo H: Ensayos de permeabilidad



*Ilustración H1: Compactación por ensayo proctor modificado*

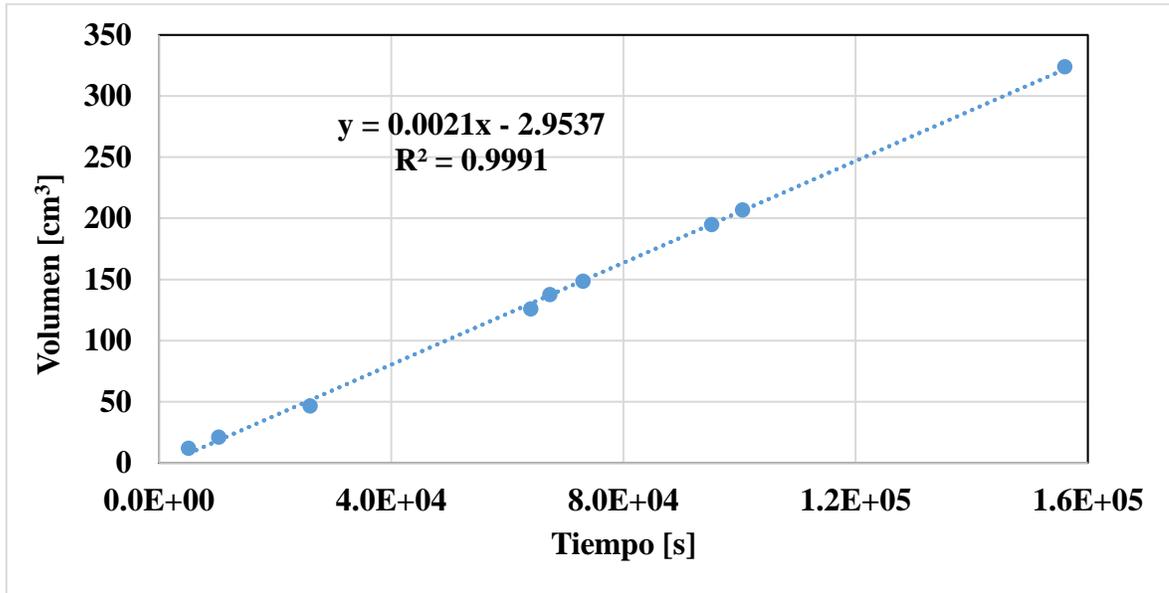


*Ilustración H2: Muestra compactada "cerrada" por mallas*

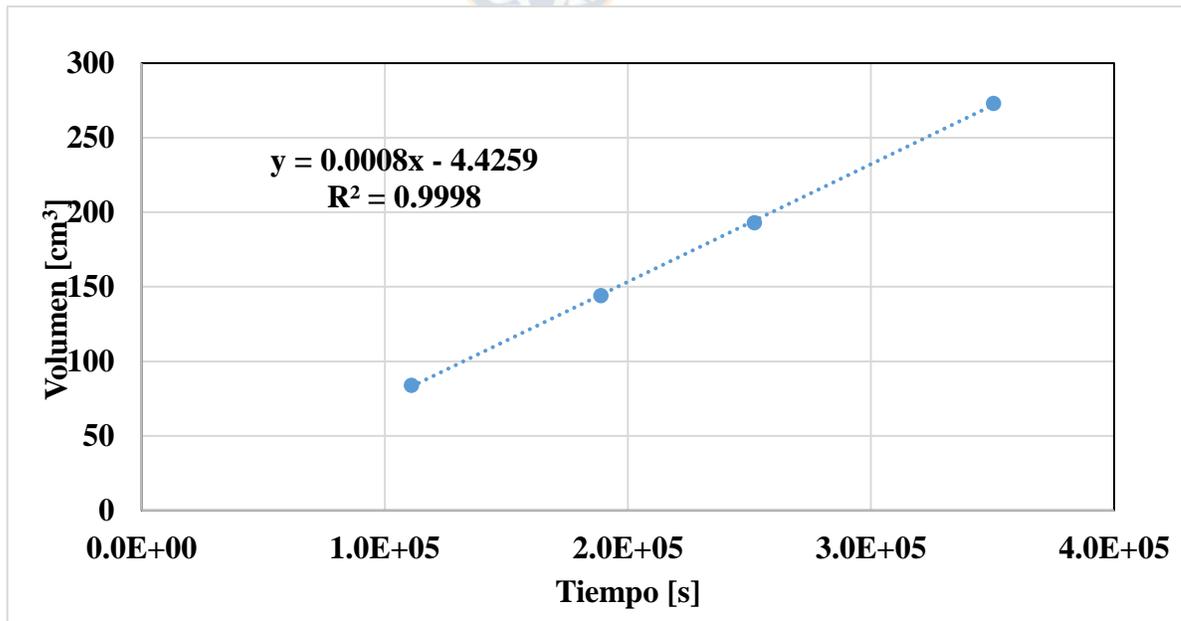


## Anexo I: Graficas volumen vs tiempo

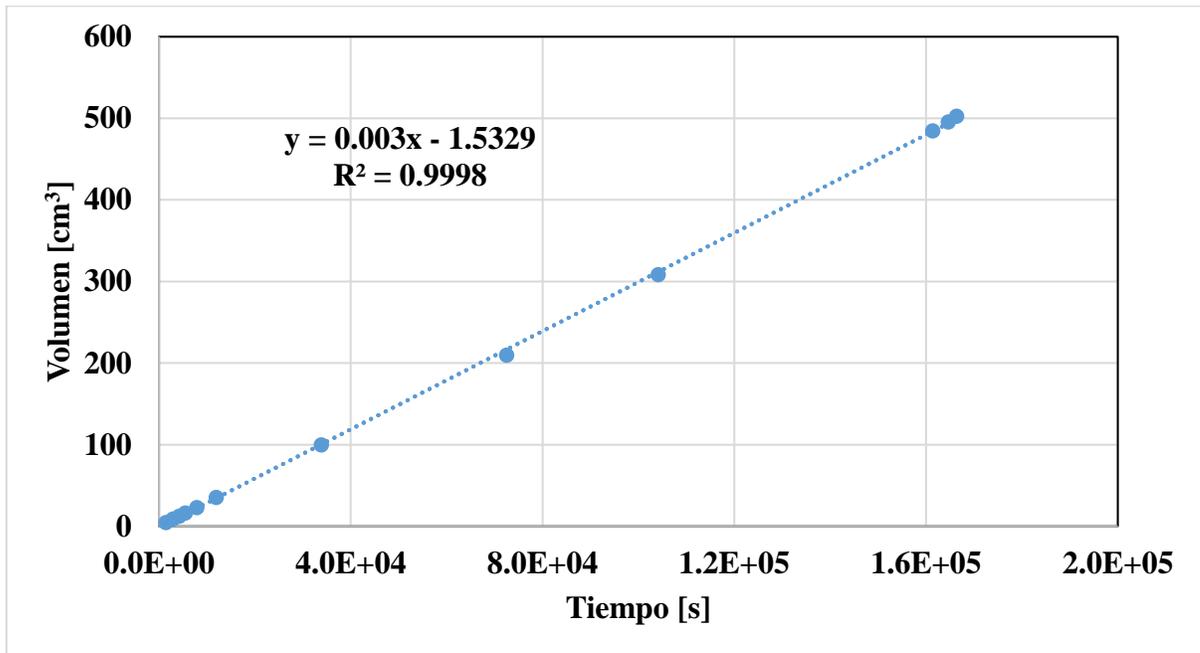
A continuación, se presentan los gráficos de los datos registrados en los ensayos de permeabilidad, volumen v/s tiempo (acumulado).



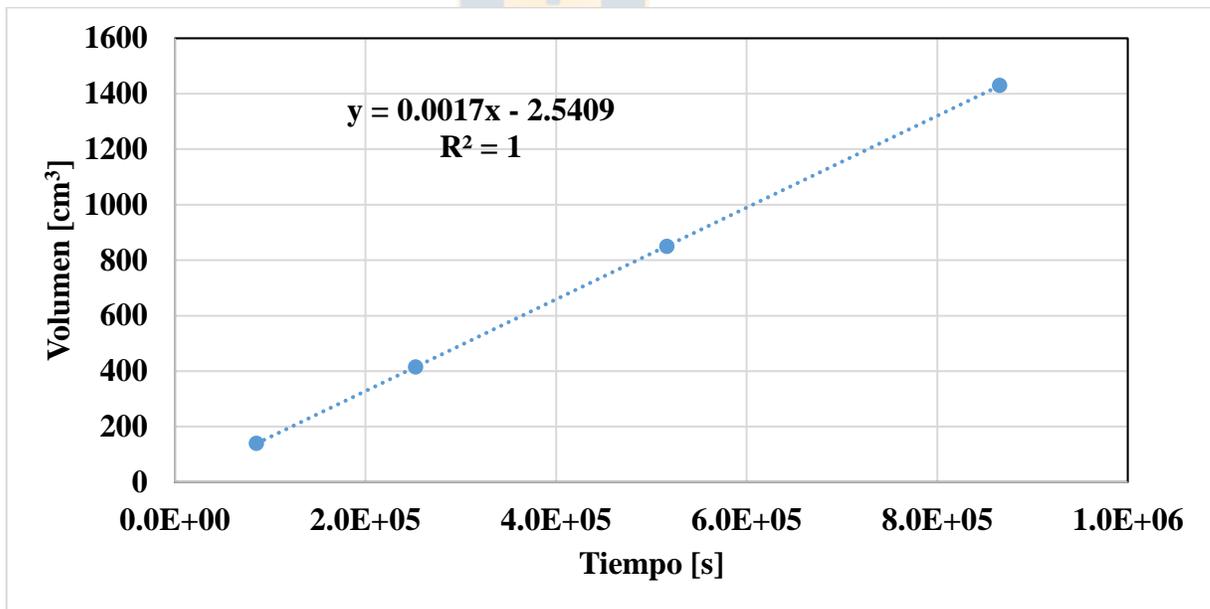
*Ilustración I1: Gráfico permeámetro 1, ensayo 1*



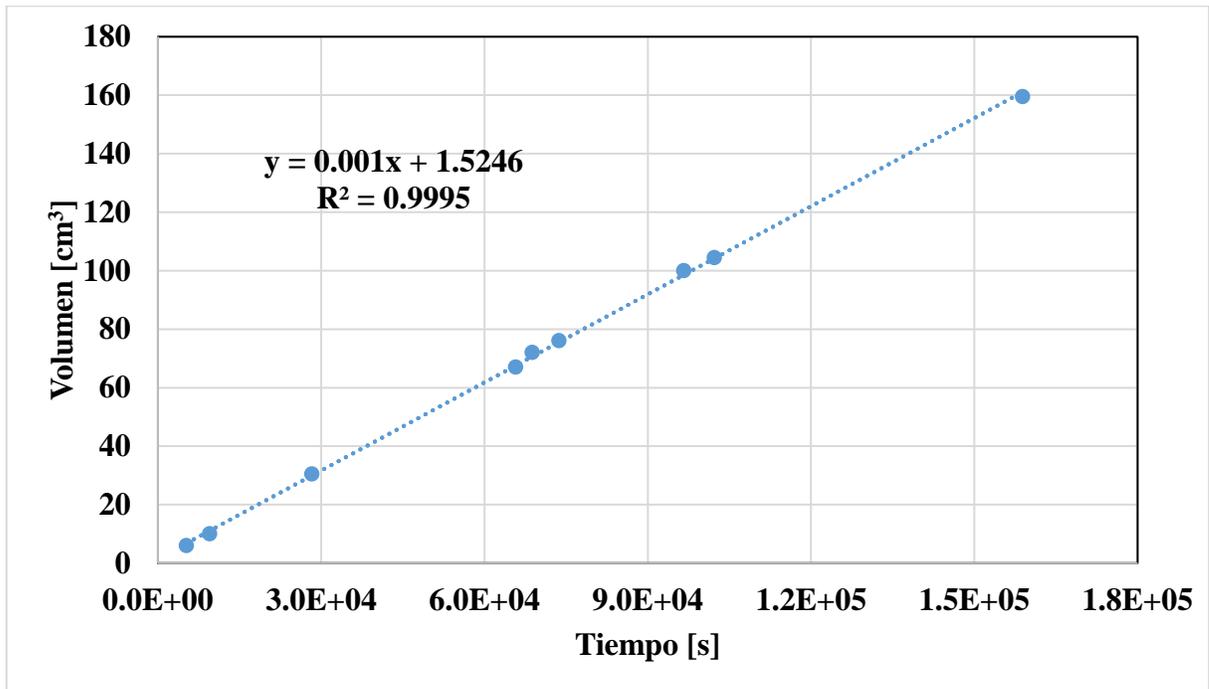
*Ilustración I2: Gráfico permeámetro 1, ensayo 2*



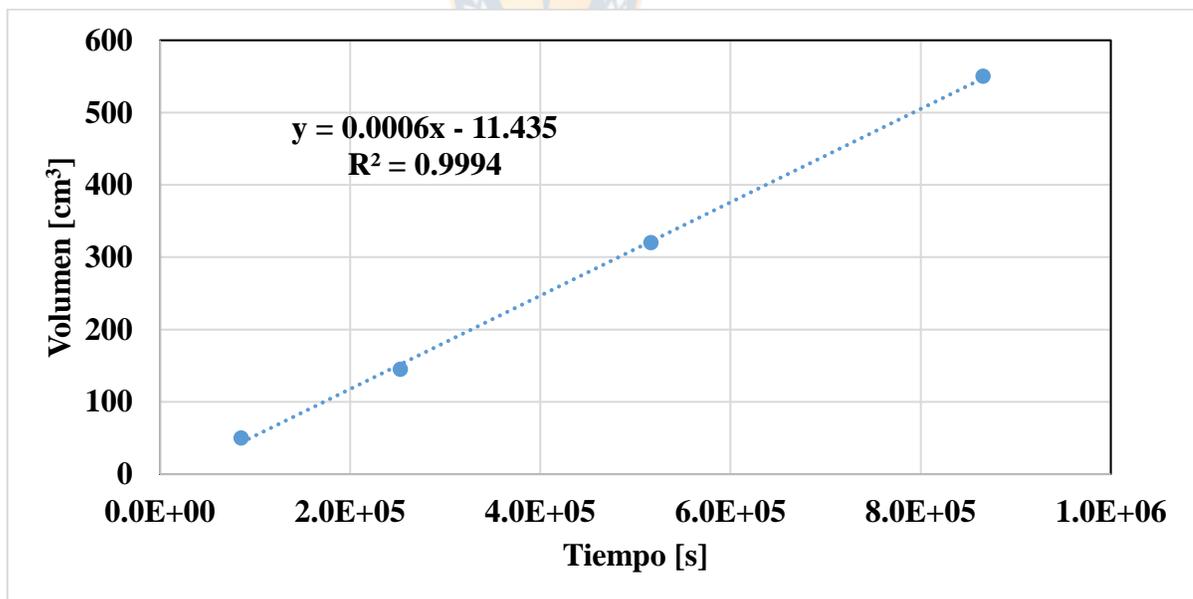
*Ilustración I3: Gráfico permeámetro 2, ensayo 1*



*Ilustración I4: Gráfico permeámetro 2, ensayo 2*



*Ilustración 15: Gráfico permeámetro 3, ensayo 1*



*Ilustración 16: Gráfico permeámetro 3, ensayo 2*

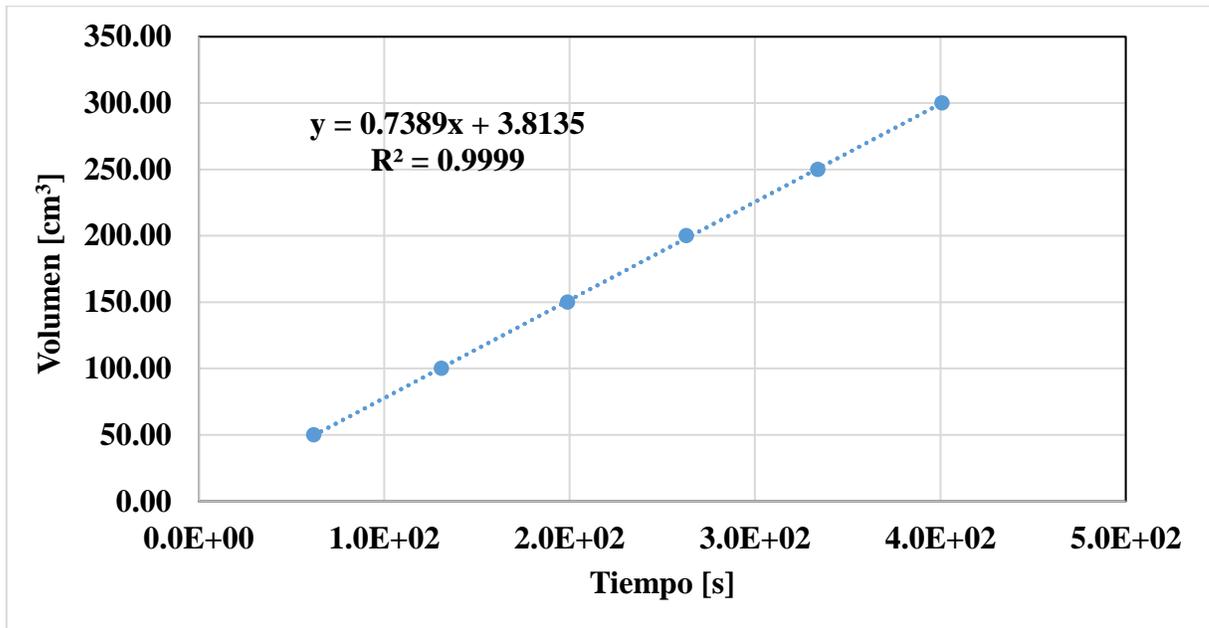


Ilustración I7: Gráfico permeámetro 4, ensayo 1

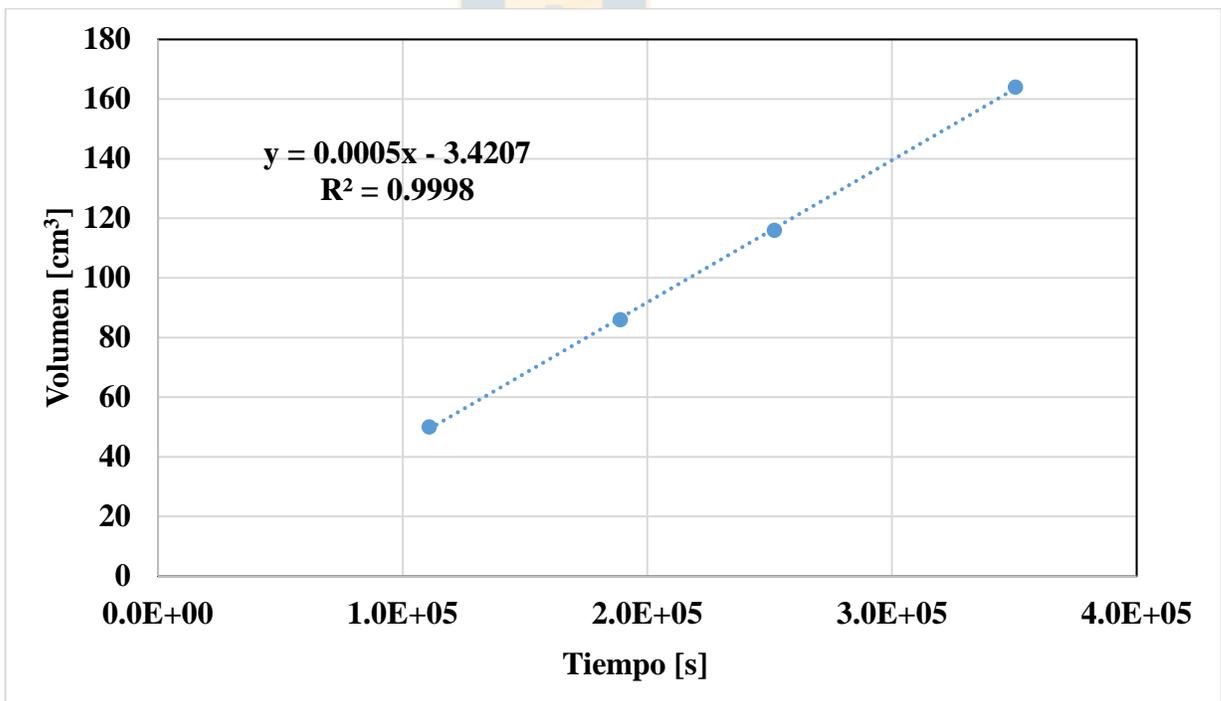


Ilustración I8: Gráfico permeámetro 4, ensayo 2



## Anexo J: Índice de vacíos

El volumen total o de cada celda de los permeámetros, se calcula como se expone en la ecuación (42). Las dimensiones de área y longitud se encuentran en Tabla 5.

$$V = A L \quad (42)$$

Con V: Volumen total de la celda [cm<sup>3</sup>]

A: Área de la celda [cm<sup>2</sup>]

L: Longitud o largo de la celda [cm]

Luego, sabiendo las masas ingresadas en cada permeámetro y las densidades de los materiales, se puede calcular los volúmenes del sólido de la siguiente forma:

$$V_s = \frac{M_s}{\rho_s} \quad (43)$$

Con V<sub>s</sub>: Volumen del sólido [cm<sup>3</sup>]

M<sub>s</sub>: Masa del sólido [g]

ρ<sub>s</sub>: Densidad del sólido [g/cm<sup>3</sup>]



Finalmente, el volumen de vacíos no es más que la resta entre el volumen total y el volumen del sólido, como se ve a continuación:

$$V_v = V - V_s \quad (44)$$

Con V<sub>v</sub>: Volumen de vacíos [cm<sup>3</sup>]



## Anexo K: Calculo conductividades hidráulicas teóricas

Para las ecuaciones propuestas por Hazen, Schlichter y Terzaghi se utilizó el  $D_{10}$  obtenido de la Ilustración 16. En el caso de Schlichter y Terzaghi se calculó la porosidad conociendo el índice de vacíos (Tabla 19) y utilizando la siguiente relación:

$$n = \frac{e}{e + 1} \quad (45)$$

Con n: Porosidad

e: Índice de vacíos

- **Conductividad hidráulica por ecuación de Hazen**

Se utilizó la ecuación modificada de Hazen (ecuación (15)), considerando un  $C$  igual a 100 y una temperatura de 20°C.

- **Conductividad hidráulica por ecuación de Schlichter**

Se utilizó la ecuación modificada de Schlichter (ecuación (17)) con una temperatura de 20°C y  $C$  se obtuvo según la Tabla 4 en base a la ecuación (45).

- **Conductividad hidráulica por ecuación de Terzaghi**

Se utilizó la ecuación de Terzaghi (ecuación (18)) con una temperatura de 20°C y para obtener el  $C_1$  se consideró un  $C_0$  de 100 en la ecuación (19) y la porosidad se obtuvo de la ecuación (45).

- **Conductividad hidráulica por ecuación de Kozeny-Carman**

Se utilizó la ecuación de Kozeny-Carman (ecuación (22)), donde para obtener  $S_0$  (ecuación (28)), se consideró un  $SF$  de 10 y el  $D_{eff}$  se obtuvo de toda la distribución granulométrica con la ecuación (25), para el material café y gris resultó ser 10.95 [ $\mu\text{m}$ ] y 13.09 [ $\mu\text{m}$ ] respectivamente.