



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA PERMEABILIDAD DE MATERIALES  
DEPOSITADOS EN PILAS DE LIXIVIACIÓN**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE  
MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
MENCION INGENIERÍA GEOTÉCNICA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**EMILIO JOSÉ LÓPEZ ALFARO**

**PROFESOR GUÍA:  
RAMÓN VERDUGO ALVARADO**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
CLAUDIO FONCEA NAVARRO  
LENART GONZÁLEZ LAGOS  
LUIS PAREDES ACEVEDO**

**SANTIAGO DE CHILE  
ENERO, 2012**

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR  
AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS  
DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN  
INGENIERÍA GEOTÉCNICA Y AL TÍTULO  
DE INGENIERO CIVIL  
POR: EMILIO LÓPEZ ALFARO.  
FECHA: 28/12/2011  
PROF. GUÍA: SR. RAMÓN VERDUGO A.

### **ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA PERMEABILIDAD DE MATERIALES DEPOSITADOS EN PILAS DE LIXIVIACIÓN**

La lixiviación en pilas es uno de los métodos mineros utilizados para extraer cobre desde la roca chancada en minerales de baja ley. El método consiste en formar pilas de gran extensión, y en algunos casos de gran altura, con el mineral chancado que contiene cobre, las que son regadas en su parte superior con soluciones cuyo compuesto principal es ácido sulfúrico. El flujo descendente genera así una solución rica en cobre en la parte inferior de la pila, la que es extraída mediante un sistema de tuberías previamente instaladas para estos efectos. La práctica ha mostrado que existen cambios de permeabilidad de estos depósitos durante el proceso de lixiviación, lo cual afecta la colección de las soluciones y la estabilidad estática y sísmica de las pilas. En este contexto, la presente investigación se ha centrado en los aspectos asociados a la evaluación de la permeabilidad para lograr un buen desempeño de las pilas desde el punto de vista de flujo de las soluciones.

Se realizaron ensayos de permeabilidad en laboratorio a tres diferentes materiales provenientes de tres obras mineras, incluyendo ensayos con soluciones compuestas de ácido sulfúrico y agua, a fin de analizar los efectos de éstas en la permeabilidad de los depósitos. Para realizar estos ensayos se construyó un permeámetro de pared flexible cuyos componentes son resistentes a la acción del ácido sulfúrico.

Los resultados de los ensayos permiten concluir que no existen significativas variaciones en la permeabilidad al utilizar soluciones ácidas respecto a los ensayos convencionales realizados con agua. Resultados deficientes o contradictorios que pudieran haberse obtenido en experiencias anteriores en este tipo de suelos, se estima están asociadas a la utilización de equipos inadecuados construidos con piezas de metales lixiviables al contacto con ácido sulfúrico. Por otra parte, dos de los materiales estudiados presentan granulometrías que propician inestabilidad interna frente al flujo. Consistentemente, en los ensayos realizados sobre estas muestras se ha observado migración de partículas. Estos resultados permiten concluir que la mayoría de los cambios globales de permeabilidad en las pilas se debe a la localización de partículas finas en determinados planos, constituyendo substratos de menor permeabilidad dentro de los depósitos.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres, por todo su esfuerzo y apoyo durante toda mi formación académica.

A mi profesor guía, Ramón Verdugo, por el apoyo para terminar este trabajo.

Al profesor Claudio Fonca por sus valiosos comentarios para mejorar la presentación de este trabajo.

A mis inseparables compañeros: Eloy, Abelardo, Tomás y Daniela por su gran compañía durante toda la carrera.

A Omar, Ana y Javier por su gran amistad durante los últimos años de la carrera.

A Víctor por la ayuda en la construcción del permeámetro.

A Carlos Avendaño por la ayuda prestada en la comprensión del fenómeno de la lixiviación al comienzo de este trabajo y por facilitarme las muestras de El Tesoro.

Y a Catalina que me acompañó y apoyó durante el desarrollo de esta investigación.

# Índice de Contenidos

---

<b>1</b>	<b>OBJETIVOS Y ALCANCES .....</b>	<b>1</b>
1.1	Introducción .....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.3	Contenido por capítulos .....	2
<b>2</b>	<b>FLUJO UNIDIMENSIONAL EN MEDIOS POROSOS .....</b>	<b>4</b>
2.1	Introducción .....	4
2.2	Coeficiente de permeabilidad .....	5
2.3	Ensayos de laboratorio para determinar la permeabilidad .....	10
2.3.1	Ensayos de carga constante.....	10
2.3.2	Ensayos de carga variable.....	12
2.3.3	Factores que afectan el valor de la permeabilidad medido en laboratorio .....	13
2.4	Métodos indirectos para determinar la permeabilidad de suelos granulares .....	15
2.4.1	Método de Hazen.....	15
2.4.2	Método de Shepherd .....	18
2.4.3	Método de Slichter .....	20
2.4.4	Método de Fair y Hatch.....	21
2.4.5	Método de Terzaghi .....	22
2.4.6	Método de Kozeny-Carman .....	23
2.4.7	Hazen versus Kozeny-Carman.....	25
2.4.8	Observaciones a los métodos indirectos en suelos granulares .....	25
2.5	Permeabilidad de mezclas de arena y arcilla .....	29
2.6	Inestabilidad interna.....	34
2.6.1	Definición .....	34
2.6.2	Método de Kezdi .....	36
2.6.3	Método de Kenney and Lau.....	37
2.6.4	Otros estudios empíricos de inestabilidad interna .....	39
<b>3</b>	<b>LIXIVIACIÓN EN PILAS.....</b>	<b>42</b>
3.1	Introducción .....	42

3.2	Conceptos generales de pilas de lixiviación .....	43
3.3	Etapas del proceso de lixiviación en pilas .....	46
3.3.1	Chancado .....	46
3.3.2	Aglomeración .....	49
3.3.3	Lixiviación.....	52
3.3.4	Extracción por solventes (SX).....	52
3.3.5	Electrobtención (EW) .....	54
3.4	Proceso Químico de la Lixiviación .....	55
3.5	Factores que afectan el drenaje de la pila.....	57
3.5.1	Granulometría y permeabilidad del mineral .....	58
3.5.2	Tasa de riego .....	63
3.5.3	Sistemas de riego .....	66
3.5.4	Modalidad de riego .....	68
3.5.5	Utilización de material de cover .....	68
3.5.6	Tuberías de colección y drenaje .....	69
3.5.7	Sistema de apilamiento del mineral aglomerado.....	70
3.5.8	Altura de la pila .....	72
3.5.9	Tiempo de lixiviación.....	73
3.5.10	Hierro presente en el mineral.....	74
3.6	Consecuencias de un mal drenaje .....	75
<b>4</b>	<b>PROGRAMA DE ENSAYOS .....</b>	<b>77</b>
4.1	Introducción .....	77
4.2	Suelos utilizados .....	77
4.3	Ensayos realizados.....	78
4.4	Equipos utilizados .....	80
4.4.1	Ensayos mineralógicos .....	80
4.4.2	Análisis granulométricos .....	81
4.4.3	Límites de Atterberg.....	82
4.4.4	Ensayos de permeabilidad en pared flexible .....	83
4.5	Metodologías .....	90
4.5.1	Ensayos mineralógicos .....	90
4.5.2	Análisis granulométricos .....	90

4.5.3	Límites de Atterberg.....	93
4.5.4	Ensayos de permeabilidad en pared flexible .....	94
<b>5</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>97</b>
5.1	Introducción .....	97
5.2	Composición mineralógica.....	97
5.3	Análisis granulométricos, límites de Atterberg y clasificación USCS .....	102
5.4	Ensayos de permeabilidad .....	106
5.4.1	Suelo proveniente de la mina Spence .....	106
5.4.2	Suelo proveniente de la mina Collahuasi .....	115
5.4.3	Suelo proveniente de la mina El Tesoro .....	121
5.5	Resumen permeabilidad versus densidad .....	128
5.6	Efecto de la granulometría en la permeabilidad .....	129
5.7	Granulometrías post ensayo.....	131
5.8	Estabilidad interna de los suelos estudiados.....	135
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>141</b>
6.1	General .....	141
6.2	Conclusiones .....	142
6.3	Recomendaciones para futuras investigaciones .....	144
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>146</b>

## **Anexos**

---

ANEXO A: Ensayos de permeabilidad

## **Índice de Tablas**

---

Tabla 2.1:	Valores del coeficiente C.....	17
Tabla 2.2:	Coeficiente K1 en función de la porosidad .....	21
Tabla 2.3:	Propiedades del material morrénico del embalse El Yeso (Órdenes, 2008) .....	40

Tabla 4.1: Condiciones iniciales de los suelos utilizados .....	78
Tabla 4.2: Ensayos realizados .....	79
Tabla 4.3: Ensayos de permeabilidad .....	80
Tabla 4.4: Tamices utilizados.....	81
Tabla 5.1: Composición mineralógica, suelo proveniente de Spence.....	98
Tabla 5.2: Composición mineralógica, suelo proveniente de Collahuasi .....	98
Tabla 5.3: Composición mineralógica, suelo proveniente de El Tesoro .....	99
Tabla 5.4: Clasificación USCS de los suelos utilizados.....	105
Tabla 5.5: Condiciones de ensayo de las muestras de suelos proveniente de la mina Spence .....	106
Tabla 5.6: Permeabilidades de las muestras de suelos provenientes de la mina Spence .....	113
Tabla 5.7: Condiciones de ensayo de las muestras de suelo provenientes de la mina Collahuasi.....	115
Tabla 5.8: Permeabilidades de las muestras de suelos provenientes de la mina Collahuasi.....	119
Tabla 5.9: Condiciones de ensayo de las muestras del suelo proveniente de mina El Tesoro .....	121
Tabla 5.10: Coeficientes de uniformidad, El Tesoro.....	127
Tabla 5.11: Parámetros granulométricos .....	129
Tabla 5.12: Porcentajes de finos de las muestras ensayadas.....	134
Tabla 5.13: Análisis de estabilidad interna mediante el método de Kezdi (1979) y Kenney and Lau (1985) .....	139

## **Índice de Figuras**

---

Figura 2.1: Influencia de la gradación en la permeabilidad de suelos granulares (Terzaghi, Peck and Mesri, 1996). .....	6
Figura 2.2: Relación entre la permeabilidad y el grado de saturación para varias arenas (Wallace, 1948). .....	7

Figura 2.3: Rango de permeabilidades y drenaje para distintos tipos de suelos (Holtz and Kovacs, 1981).....	9
Figura 2.4: Permeámetro de carga constante .....	11
Figura 2.5: Permeámetro de carga variable .....	12
Figura 2.6: Comparación entre la ecuación de Hazen y datos experimentales (Louden, 1952) .....	16
Figura 2.7: Datos analizados por Shepherd (Shepherd, 1989).....	18
Figura 2.8: Relación de Shepherd (Shepherd, 1989) .....	19
Figura 2.9: Permeabilidad de minerales arcillosos que contienen sodio, medida en ensayos utilizando agua (Mesri and Olson, 1971).....	26
Figura 2.10: Permeabilidad de minerales arcillosos que contienen sodio, medida en ensayos utilizando carbón tetra clorhídrico o benceno (Mesri and Olson, 1971) .....	26
Figura 2.11: Índice de vacíos versus permeabilidad para diversos suelos compactados (García-Bengochea et al., 1979).....	29
Figura 2.12: Permeabilidad de bentonita en agua fresca y agua salada (Terzaghi, Peck and Mesri, 1996) .....	30
Figura 2.13: Resultados de compactación y ensayos de permeabilidad en mezclas de arena y bentonita (Terzaghi, Peck and Mesri, 1996) .....	32
Figura 2.14: Permeabilidad de mezclas de arena y bentonita (Terzaghi, Peck and Mesri, 1996).....	33
Figura 2.15: Método de Kezdi .....	37
Figura 2.16: Método de Kenney y Lau .....	39
Figura 2.17: Método de Kenney y Lau .....	41
Figura 3.1: Componentes de una pila de lixiviación .....	44
Figura 3.2: Circuito de chancado cerrado (Mimica, 2002) .....	48
Figura 3.3: Método de riego de un ciclo de lixiviación .....	53
Figura 3.4: Método de riego de dos ciclo de lixiviación .....	54
Figura 3.5: Diagrama de flujo de una planta de tratamiento de minerales de cobre oxidados .....	55



Figura 3.6: Variación de la granulometría debido a “chancado químico” (Bard y Campaña, 2004) .....	60
Figura 3.7: Permeabilidad versus densidad seca (Bard y Campaña, 2004) .....	62
Figura 3.8: Flujo en medio parcialmente saturado, efecto de la magnitud de la tasa de irrigación .....	64
Figura 3.9: Porcentajes del total de agua aplicada que escurre por cada una de las partes (gruesa y fina) .....	65
Figura 3.10: Conos sin riego según permeabilidad .....	67
Figura 3.11: Jarositas formadas en ensayos de columna .....	75
Figura 3.12: Pérdida de resistencia al corte por incremento de las presiones de poros .....	76
Figura 4.1: Equipo para análisis granulométrico .....	82
Figura 4.2: Permeámetro y muestra ensayada .....	84
Figura 4.3: Sistema para mantención de carga constante .....	86
Figura 4.4: Medición de carga hidráulica.....	87
Figura 4.5: Sistema de aplicación de carga .....	87
Figura 4.6: Aplicación de presión de cámara .....	88
Figura 4.7: Medición del equipo .....	89
Figura 5.1: Granulometrías, partículas con diámetro sobre 0,074 mm .....	102
Figura 5.2: Granulometrías, partículas con diámetros menores a 0,074 mm .....	103
Figura 5.3: Granulometrías integrales de los materiales .....	103
Figura 5.4: Efecto del ácido y el secado al horno en la plasticidad de los finos.....	104
Figura 5.5: Permeabilidad en el tiempo, muestra S-3.....	108
Figura 5.6: Permeabilidad en el tiempo, muestra S-6.....	109
Figura 5.7: Comparación muestras S-3 y S-6 .....	110
Figura 5.8: Permeabilidad en el tiempo, muestra S-1.....	111
Figura 5.9: Permeabilidad versus densidad seca, Spence .....	112
Figura 5.10: Permeabilidad en el tiempo, Spence.....	114

Figura 5.11: Efecto de la acidez de la solución, Collahuasi.....	116
Figura 5.12: Permeabilidad en el tiempo, muestra C-1 .....	117
Figura 5.13: Permeabilidad versus densidad seca, Collahuasi .....	118
Figura 5.14: Permeabilidad en el tiempo, Collahuasi .....	120
Figura 5.15: Comparación muestras ET-4 y ET-5, El Tesoro .....	123
Figura 5.16: Finos en soluciones ácidas y en caps, muestra ET-6.....	124
Figura 5.17: Efecto de la adición de hipoclorito, El Tesoro.....	125
Figura 5.18: Efecto de la granulometría en la permeabilidad – Granulometrías post ensayo, El Tesoro.....	126
Figura 5.19: Resumen permeabilidad versus densidad.....	128
Figura 5.20: Efecto de la granulometría en la permeabilidad .....	129
Figura 5.21: Efecto del diámetro medio en la permeabilidad.....	131
Figura 5.22: Granulometrías post ensayo, Spence .....	132
Figura 5.23: Granulometrías post ensayo, Collahuasi.....	132
Figura 5.24: Granulometrías post ensayo, El Tesoro .....	133
Figura 5.25: Análisis de estabilidad interna por el método de Kezdi (1979), Spence .....	136
Figura 5.26: Análisis de estabilidad interna por el método de Kenney & Lau (1985), Spence .....	136
Figura 5.27: Análisis de estabilidad interna por el método de Kezdi (1979), Collahuasi ...	137
Figura 5.28: Análisis de estabilidad interna por el método de Kenney and Lau (1985), Collahuasi.....	137
Figura 5.29: Análisis de estabilidad interna por el método de Kezdi (1979), El Tesoro ....	138
Figura 5.30: Análisis de estabilidad interna por el método de Kenney & Lau (1985), El Tesoro .....	138

# **1 OBJETIVOS Y ALCANCES**

## **1.1 Introducción**

La lixiviación en pilas es uno de los métodos utilizados para extraer el cobre de los minerales que lo contienen y que en los últimos años ha sido ampliamente implementado para minerales de baja ley. Básicamente, el método consiste en formar pilas de gran extensión, y en algunos casos de gran altura, con el mineral que contiene el cobre, las que son regadas en su parte superior con soluciones ácidas, cuyo compuesto principal es el ácido sulfúrico. Este último provoca que el cobre sea lixiviado, es decir, que sea traspasado desde el mineral a la solución ácida. Para recuperar las soluciones, previo a la formación de la pila se impermeabiliza el suelo de fundación, en general con geomembranas, y se colocan tuberías ranuradas a través de las cuales se colectan las soluciones.

Actualmente, el diseño de pilas de lixiviación se realiza considerando sólo variables metalúrgicas, no obstante, la experiencia ha mostrado la necesidad de incorporar variables geotécnicas en el diseño, principalmente por dos condiciones:

- Necesidad de flujo de las soluciones ácidas.
- Estabilidad estática y sísmica.

La presente investigación se ha centrado en los aspectos asociados con el buen desempeño de la pila, y para ello se han estudiado los aspectos relativos a la permeabilidad del material, teniendo en consideración el tipo de fluido. Para esto se han realizado ensayos de permeabilidad, utilizando soluciones ácidas compuestas de ácido sulfúrico y agua destilada, reproduciendo las utilizadas en los procesos de lixiviación. Para realizar los ensayos se debió construir un permeámetro con materiales adecuados, resistentes a la acción del ácido sulfúrico. Los ensayos fueron realizados en tres minerales provenientes de las minas Collahuasi, Spence y El Tesoro. Algunos de ellos corresponden a minerales

que no han sido sometidos a la acción de soluciones ácidas, mientras que otros corresponden a ripios lixiviados. Además de los ensayos con soluciones ácidas, se han realizado ensayos con agua destilada, con el fin de cuantificar diferencias entre estos dos ensayos. Por otra parte, se evaluó la variación de la permeabilidad con la acidez de la solución utilizada. En esta investigación también se han incluido ensayos en los cuales las muestras han estado expuestas al flujo de las soluciones ácidas por cerca de un mes, realizando mediciones aproximadamente diarias de la permeabilidad.

## **1.2 Objetivos**

En definitiva el marco de esta investigación es avanzar en la comprensión del fenómeno de flujos en pilas de lixiviación. Los objetivos específicos de esta investigación se enumeran a continuación:

- Observar posibles diferencias en los resultados de ensayos de permeabilidad ejecutados con soluciones ácidas, respecto a los ensayos estándar realizados con agua destilada.
- Observar cómo afectan diversas variables en la permeabilidad de minerales de cobre, tales como: acidez de la solución, densidad, mineralogía, granulometría y tiempo de exposición a las soluciones ácidas.

## **1.3 Contenido por capítulos**

Esta investigación se compone de seis capítulos. Los Capítulos 2 y 3 corresponden al marco teórico. El Capítulo 2 presenta todo lo relativo a flujo en medios porosos. En este capítulo se exponen las leyes físicas que gobiernan el flujo de soluciones en medios porosos, concluyendo en la ley de Darcy. Luego se realiza un análisis de las principales variables que afectan la permeabilidad de un suelo, incluyendo también, las variables que deben tenerse en consideración al realizar ensayos de laboratorio. En este capítulo también se analizan las formas

de medir la permeabilidad en laboratorio y formas de estimar este parámetro por medio de modelos teóricos y empíricos, incluyendo una discusión de la utilización de éstos. Por último, se ha incluido un acápite de inestabilidad interna, ya que en el transcurso de la investigación se observó que este fenómeno es relevante en las observaciones de esta investigación.

El Capítulo 3 presenta los conceptos necesarios para entender el funcionamiento y la filosofía del diseño de las pilas de lixiviación, incluyendo las distintas etapas del proceso y los distintos tipos de pilas. Además, se revisan y discuten los distintos parámetros que afectan el drenaje de una pila y la filosofía de diseño con la que se define cada uno de ellos.

Los capítulos que siguen tienen relación a los ensayos realizados en esta investigación. El Capítulo 4 presenta el programa de ensayos, incluyendo suelos utilizados, ensayos realizados, equipos y metodologías de ensayo. En el Capítulo 5 se presentan los resultados de los ensayos de laboratorio y el análisis de éstos; y en el Capítulo 6 se recogen las conclusiones a partir de los resultados obtenidos, y recomendaciones para futuras investigaciones relativas a este tema.

## 2 FLUJO UNIDIMENSIONAL EN MEDIOS POROSOS

### 2.1 Introducción

El flujo unidimensional corresponde a aquel en que todos los parámetros del fluido, tales como presión, velocidad, temperatura, etc., se mantienen constantes en una sección perpendicular a la dirección del flujo. El flujo puede ser denominado, además, como laminar si las líneas de flujo son paralelas y el fluido no se mezcla, o dicho de otra forma, si existe un movimiento continuo del fluido en capas o láminas. Por el contrario, el flujo puede ser denominado turbulento si existe mezcla del fluido, o dicho de manera más simple, si existe un movimiento tridimensional al azar.

La relación entre velocidad y gradiente hidráulico en un medio poroso fue obtenida experimentalmente en 1856 por el Ingeniero francés Henry Darcy. Este ingeniero mostró que para arenas limpias, saturadas, y bajo flujo laminar, la tasa de flujo es proporcional al gradiente hidráulico. Esta ley suele escribirse como:

$$Q = v \cdot A = k \cdot i \cdot A = k \cdot \frac{\Delta h}{l} \cdot A \quad (2-1)$$

Donde:

Q = caudal;

A = Sección transversal a la muestra;

l = Largo de la muestra; y

k = Constante de proporcionalidad denominada coeficiente de permeabilidad.

La constante de permeabilidad de un suelo representa la facilidad con la que un fluido puede escurrir en él. A mayor valor de la permeabilidad se dirá que un suelo es más permeable.

En este trabajo no se describen los conceptos básicos que rigen el flujo unidimensional. Para más detalles sobre este tema, se recomienda revisar el libro

“An Introduction to Geotechnical Engineering”, de Holtz y Kovacs (Holtz and Kovacs, 1981), que contiene un estudio completo y didáctico sobre este tema.

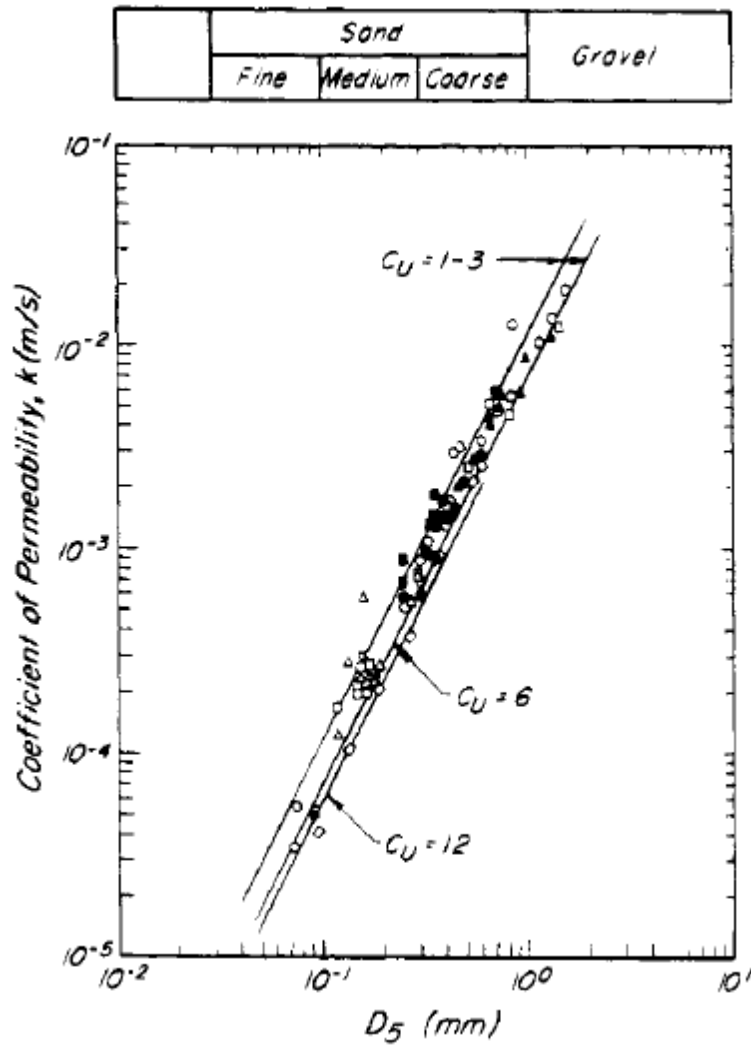
## **2.2 Coeficiente de permeabilidad**

Lo primero que es importante establecer, es que la constante de permeabilidad no es una función que sólo depende de las propiedades del suelo, sino que también es una función de las propiedades del fluido que pasa a través de él. Los factores del suelo que influyen en la permeabilidad son variados, como se ve a continuación.

El tamaño de los granos es el factor con mayor influencia en la permeabilidad. Mientras menor es el tamaño de éstos, mayor es la superficie de contacto con el fluido contenido en los poros; este aumento en el área superficial provoca un incremento en la resistencia friccional al flujo, lo que disminuye la permeabilidad del suelo.

La gradación del suelo es otra variable que tiene influencia en la permeabilidad, no obstante, diversas investigaciones desarrolladas en esta área han concluido que en un suelo con distintos tamaños de granos, la permeabilidad depende principalmente del tamaño de las partículas más pequeñas. La Figura 2.1 presenta, a modo de ejemplo, una correlación entre la permeabilidad y el  $D_5$  (Diámetro por el que pasa el 5% del suelo). En esta figura se observa que la gradación tiene una influencia pequeña en comparación al tamaño de las partículas más pequeñas. De todos modos, es posible probar que si seleccionamos un tamaño fijo del diámetro medio de los granos, la permeabilidad del suelo será mayor mientras más uniforme sea el suelo (Terzaghi, 1925). Lo anterior se debería a que en suelos bien graduados, los granos de menor tamaño ocuparán parte de los poros del suelo, disminuyendo la permeabilidad de éste.

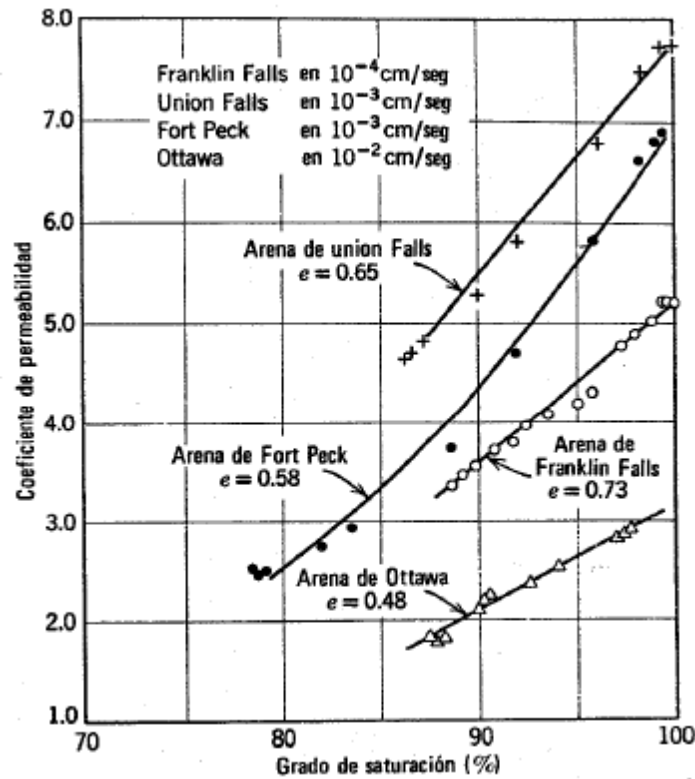
Figura 2.1: Influencia de la gradación en la permeabilidad de suelos granulares (Terzaghi, Peck and Mesri, 1996).



En suelos parcialmente saturados, el grado de saturación también influye en la permeabilidad. Burbujas de aire atrapadas en el suelo bloquean el paso de fluido por los canales de flujo, haciendo disminuir el valor de la permeabilidad. Además, debido a que las burbujas de aire disminuyen su tamaño con la presión del fluido, la permeabilidad también aumenta con el aumento de la presión del fluido. La Figura 2.2 presenta la influencia del grado de saturación en distintas arenas, donde se observa un aumento de la permeabilidad con el grado de saturación. La magnitud de este aumento es distinta para las diferentes arenas consideradas.



Figura 2.2: Relación entre la permeabilidad y el grado de saturación para varias arenas (Wallace, 1948).



Otros factores del suelo que afectan la permeabilidad, son la forma de los vacíos y la trayectoria del flujo a través de los poros, llamada tortuosidad.

La propiedad del fluido que afecta mayormente el valor de la permeabilidad es la viscosidad, la cual es inversamente proporcional a la permeabilidad. A su vez, la viscosidad decrece con el aumento de la temperatura.

Pese a todos los factores que influyen en la permeabilidad, diversos autores han llevado a cabo análisis matemáticos y mediciones de flujo a través de medios permeables con el fin de conocer las propiedades más influyentes. En éstos se ha demostrado que la permeabilidad es determinada, principalmente, por las áreas de los poros individuales normales a la dirección del flujo, la forma de los poros a lo largo de la dirección del flujo, y el área total de poros por unidad de área normal a la dirección del flujo (Terzaghi, Peck and Mesri, 1996). El tamaño de las partículas

de suelo determina el tamaño de los poros individuales. La forma y arreglo de las partículas determinan la forma de los poros. Y el tamaño, forma y arreglo de los poros en conjunto, determinan la porosidad.

En esta investigación se estudió cómo es afectada la permeabilidad de minerales utilizados en el proceso de lixiviación por tres factores: la acidez del fluido, el tipo de suelo (granulometría y plasticidad de los finos) y la densidad. Estos resultados son presentados en el Capítulo 5.0.

En la literatura es posible encontrar valores referenciales para diversos tipos de suelos, la cual debe ser utilizada sólo como referencia debido a la gran variación que puede presentar la permeabilidad de un suelo, con pequeñas variaciones de los parámetros que la afectan. Se debe notar además, que muchos de los valores que se encuentran en la bibliografía no corresponden a suelos naturales. Rangos típicos de valores de permeabilidad para distintos tipos de suelos se presentan en la Figura 2.3, la cual fue desarrollada por Casagrande (Holtz and Kovacs, 1981). En esta figura también se incluyen las características de drenaje para los distintos rangos de permeabilidad.

Figura 2.3: Rango de permeabilidades y drenaje para distintos tipos de suelos (Holtz and Kovacs, 1981)

		Coeficiente de permeabilidad, (cm/s)											
		100	10	1	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$	$10^{-9}$
Drenaje		Bueno					Pobre			Prácticamente impermeable			
Tipo de suelo	Grava limpia	Arenas limpias y mezclas limpias de arena y grava			Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena, limo y arcilla, morenas glaciares, depósitos de arcilla estratificada					Suelos "impermeables", es decir, arcillas homogéneas situadas por debajo de la zona de descomposición			
							Suelos "impermeables", modificados por la vegetación o la descomposición. <sup>d</sup>						
Determinación directa de k	Ensayo directo del suelo "in situ" por ensayos de bombeo. Se requiere mucha experiencia, pero bien realizados son bastante exactos.												
	Permeámetro de carga hidráulica constante. No se requiere mayor experiencia.												
Determinación indirecta de k	Permeámetro de carga hidráulica decreciente. No se requiere mayor experiencia y se obtienen buenos resultados			Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados dudosos. Se requiere mucha experiencia.				Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados de regular a bueno. Se requiere mucha experiencia.					
	Por cálculo, partiendo de la curva granulométrica. Sólo aplicable en el caso de arenas y gravas limpias sin cohesión.								Cálculos basados en los ensayos de consolidación. Resultados buenos. Se necesita mucha experiencia				

De esta tabla, Casagrande destaca ciertos valores del coeficiente de permeabilidad ( $1.0$ ,  $10^{-4}$ , y  $10^{-9}$  cm/s). Éstos se conocen como los puntos de referencia de Casagrande y son bastante útiles al realizar estudios de flujo en suelos. Por ejemplo,  $1.0$  cm/s es, aproximadamente, la frontera entre flujo laminar y turbulento, y separa las gravas limpias de las arenas limpias y gravas arenosas. Un valor de k de  $10^{-4}$  cm/s, es aproximadamente la frontera entre permeables y suelos de drenaje pobre bajo gradientes pequeños. La siguiente frontera,  $10^{-9}$  cm/s, es aproximadamente el límite inferior de la permeabilidad de suelos, aunque se han encontrado permeabilidades tan bajas como  $10^{-11}$  cm/s para arcillas muy plásticas en el límite de contracción. Casagrande recomienda que la permeabilidad debe relacionarse al punto de referencia más cercano, por ejemplo,  $0,01 \times 10^{-4}$  cm/s en vez de  $10^{-6}$  cm/s (Holtz and Kovacs, 1981).

Luego de observar los diversos factores que pueden tener influencia en la permeabilidad, es posible notar la gran importancia que tiene realizar ensayos de laboratorio que grafiquen de buena forma las condiciones de terreno. A partir de esto nace la inquietud de realizar ensayos con soluciones ácidas similares a las utilizadas en las pilas de lixiviación, y determinar cómo se diferencian estos resultados a los obtenidos con ensayos tradicionales utilizando agua destilada.

### **2.3 Ensayos de laboratorio para determinar la permeabilidad**

En laboratorio, la permeabilidad se obtiene a través de un aparato conocido como permeámetro. Éste se compone de una cámara o molde, en la cual se ubica una muestra de roca o suelo. En el caso que se utilice suelo, la muestra puede ser inalterada o reconstituida. Si la muestra es reconstituida, el valor de la permeabilidad que se obtenga sólo será un valor aproximado del valor real. Se debe tener especial cuidado con la densidad a la que se reconstituye la muestra, ya que este parámetro podría hacer variar fuertemente el valor de la permeabilidad real. Los ensayos de laboratorio se pueden dividir en ensayos a carga constante y ensayos a carga variable. Cada uno de ellos se explica a continuación.

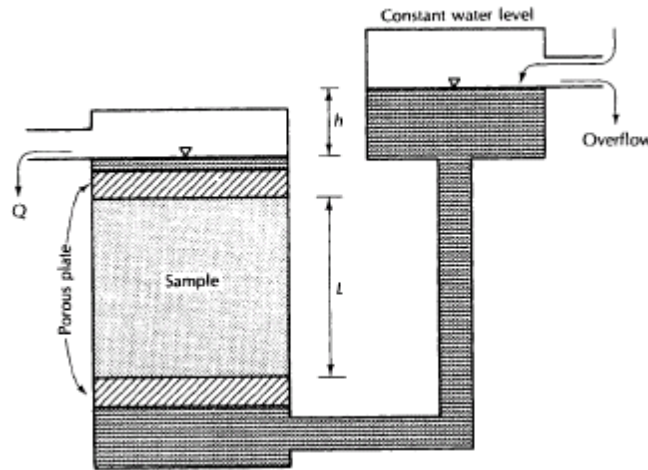
#### **2.3.1 Ensayos de carga constante**

Un esquema de este tipo de permeámetro se muestra en la Figura 2.4. Este permeámetro consiste en un contenedor dentro del cual se ubica la muestra de suelo. Bajo y sobre la muestra, es necesario colocar piedras porosas o geotextiles para uniformizar el flujo y disminuir la migración de partículas finas.

En este caso, un estanque de carga hidráulica provee una alimentación de agua (u otro fluido, si fuera el caso) a una carga constante (carga hidráulica), con lo que el agua se mueve a través de la muestra hasta alcanzar un régimen de equilibrio o estacionario. Para medir la permeabilidad se genera un flujo a través de la muestra de suelo y luego que se alcanza una situación de equilibrio, se mide el

caudal de salida desde el permeámetro,  $Q$ , así como la diferencia de carga entre el estanque de nivel constante y el nivel de agua en la salida,  $h$ .

Figura 2.4: Permeámetro de carga constante



Aplicando la Ley de Darcy, se obtiene la permeabilidad como:

$$k = \frac{V \cdot L}{A \cdot h \cdot t} \quad (2-2)$$

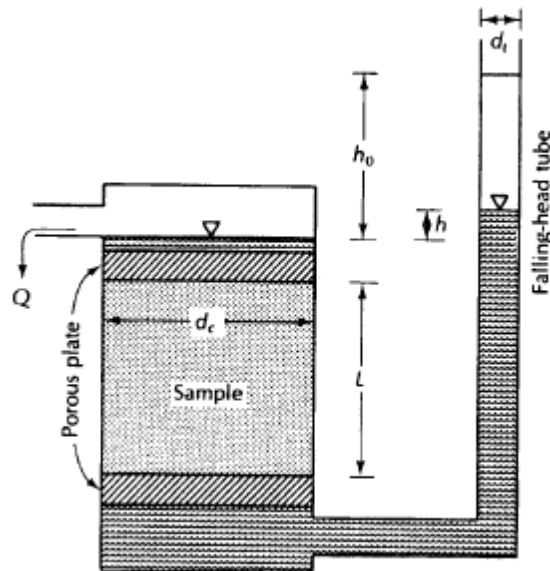
Es decir, para una altura constante del estanque de solución, debe medirse el volumen de fluido que pasa por una muestra de suelo de área transversal  $A$  y largo  $L$ , en un tiempo determinado,  $t$ . Para la correcta interpretación de los resultados de una prueba en permeámetro de carga constante, se debe utilizar varios gradientes hidráulicos, y éstos deben tener magnitudes similares a aquellos observados en terreno.

Se debe tener en cuenta que el ensayo a carga constante es realizado, en general, en suelos no cohesivos, debido a que en éstos la permeabilidad es suficientemente alta para obtener caudales que puedan ser medidos fácilmente.

### 2.3.2 Ensayos de carga variable

En los ensayos de carga variable, el estanque de carga hidráulica de nivel constante, se reemplaza por un tubo vertical en el cual se produce el descenso del nivel de agua a medida que ésta atraviesa la muestra de suelo, como se muestra en la Figura 2.5. Para la determinación de la permeabilidad, se anota el nivel de agua inicial en el tubo,  $h_1$  (para un tiempo arbitrario,  $t_1$ ). Luego de un período de tiempo,  $\Delta t$ , se mide la nueva posición del agua en el tubo vertical,  $h_2$ . El diámetro interior del tubo,  $d_t$ , el área de éste,  $a$ , la longitud de la muestra,  $L$ , el diámetro de la muestra,  $d_c$ , así como su área,  $A$ , también son conocidos.

Figura 2.5: Permeámetro de carga variable



Para el ensayo a carga variable, la velocidad de caída en el tubo es:

$$v = -\frac{dh}{dt} \quad (2-2)$$

Luego, en el tiempo  $t$ , el flujo que entra a la muestra es:

$$q_{entra} = -a \frac{dh}{dt} \quad (2-3)$$

A partir de la ley de Darcy, en el tiempo  $t$ , el flujo que sale es:

$$q_{sale} = k \cdot i \cdot A = k \cdot \frac{h}{L} \cdot A \quad (2-4)$$

Debido a la continuidad del flujo, se tiene:

$$q_{entra} = -a \frac{dh}{dt} = k \cdot \frac{h}{L} \cdot A = q_{sale} \quad (2-5)$$

Separando variables e integrando para tiempos  $t_1$  y  $t_2$  arbitrarios:

$$-a \int_{h_2}^{h_1} \frac{dh}{h} = k \cdot \frac{A}{L} \int_{t_1}^{t_2} dt \quad (2-6)$$

Obtenemos:

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot \Delta t} \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \quad (2-7)$$

Donde:

$$\Delta t = t_2 - t_1.$$

Este tipo de ensayos suele ser utilizado para suelos cohesivos, ya que en éstos el flujo es bajo, y es posible medir la diferencia de alturas en el tubo de carga hidráulica si se tiene un diámetro adecuado.

### **2.3.3 Factores que afectan el valor de la permeabilidad medido en laboratorio**

Diversos factores pueden afectar el coeficiente de permeabilidad medido en laboratorio. En este acápite se presentan los principales factores que deben tenerse en cuenta al realizar ensayos para medir la permeabilidad.

El primer factor que es necesario mencionar es el aire dentro de la probeta, ya que es posible que queden burbujas de aire atrapadas, o bien, pueden venir en el

fluido. De esta forma, la saturación del suelo sería menor al 100%, obteniendo un valor de la permeabilidad menor al valor saturado, debido a la disminución de los canales de flujo para el escurrimiento de la solución.

En algunos tipos de suelos, principalmente arenas y limos, se debe tener cuidado con la migración de finos, ya que éstos podrían tapar los filtros (piedras porosas o geotextiles), y por lo tanto, se determinaría un valor de la permeabilidad incorrecto. Pero también la migración de finos aumenta el flujo y, por lo tanto, el coeficiente de permeabilidad.

La variación de la temperatura también afecta el valor del coeficiente de permeabilidad, sobre todo si el ensayo es de larga duración. En el caso en que la temperatura en terreno sea muy diferente a la que se tiene en el laboratorio, debería hacerse una corrección por viscosidad del fluido.

También se debe velar por conseguir una muestra representativa para ensayar en laboratorio, ya que las condiciones de terreno pueden variar bastante respecto a las de laboratorio, especialmente en el caso de suelos estratificados o muy heterogéneos. La condición más difícil de representar en laboratorio es la heterogeneidad, la cual afecta fuertemente la permeabilidad, debido a que ésta es sensible a la dirección del flujo respecto a la distribución de los suelos de diferente granulometría.

Otro aspecto que también se debe tener en cuenta, es que si se utiliza un permeámetro de pared rígida, la solución tenderá a permear por la pared del permeámetro. Este problema se puede disminuir utilizando permeámetros de paredes flexibles, como por ejemplo, celdas triaxiales. También se puede mejorar esta situación cerciorándose que la muestra está presionada firmemente contra el borde del contenedor. Si estos flujos preferenciales no son evitados, los valores de la permeabilidad obtenidos serán bastante mayores que la realidad.



## 2.4 Métodos indirectos para determinar la permeabilidad de suelos granulares

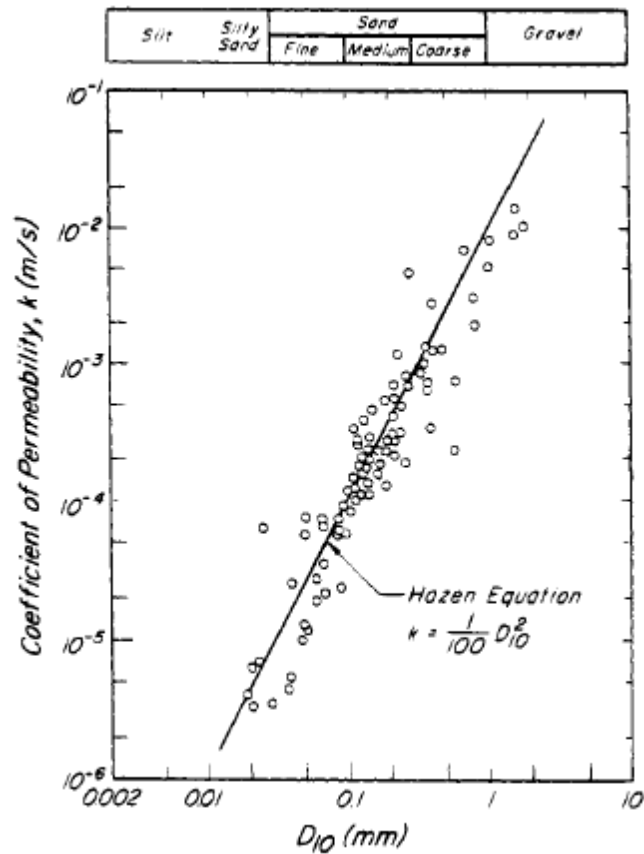
### 2.4.1 Método de Hazen

Como se vio anteriormente, la permeabilidad de suelos granulares depende, principalmente, del área de los poros normal al flujo. Dado que el diámetro promedio de los poros en un suelo con una porosidad dada, crece en proporción al promedio del tamaño de los granos, se espera que la permeabilidad de suelos granulares crezca, en alguna proporción, con algún tamaño característico de los granos, designado como diámetro efectivo de los granos,  $D_e$ . Extensas investigaciones para el diseño de filtros de arenas, realizadas por Hazen (Hazen, 1911), concluyeron en la siguiente ecuación:

$$K = C \cdot (D_e)^2 \quad (2-8)$$

En esta ecuación, el parámetro C incluye los efectos de la forma de los poros en la dirección del flujo y el volumen total de los poros, determinados a partir de propiedades como la forma de los granos, la gradación y la densidad. Hazen determinó que el diámetro efectivo de los granos con la mejor correlación para la ecuación (2-8), es el  $D_{10}$ . La Figura 2.6 presenta una comparación entre la ecuación de Hazen y datos experimentales relacionando el coeficiente de permeabilidad y el diámetro efectivo  $D_{10}$  (Louden, 1952).

Figura 2.6: Comparación entre la ecuación de Hazen y datos experimentales (Louden, 1952)



A partir de la Figura 2.6 es posible observar que la ecuación de Hazen estima de buena manera la permeabilidad en suelos granulares, aunque en algunos casos se podrían tener diferencias incluso mayores a un orden de magnitud.

El valor utilizado normalmente para el coeficiente  $C$  es 100 (para  $k$  en cm/s y  $D_{10}$  en cm), no obstante, diversos autores han reportado distintos valores. Los distintos rangos para este coeficiente se presentan en la Tabla 2.1 (Carrier, 2003).

**Tabla 2.1: Valores del coeficiente C**

Referencia	C
Taylor (1948, p. 112)	41-146
Leonards (1962, p. 119)	100-150
Mansur and Kaufman (1962, p. 260-261)	100-1000
Terzaghi and Peck (1964, p. 44)	100-150
Cedergren (1967, p. 42)	90-120
Lambe and Withman (1969, p. 290)	1-42
Holtz and Kovacs (1981, p. 209-212)	40-120
Terzaghi et al. (1996, p 73-74)	50-200
Das (1997, p. 153)	100-150
Coduto (1999, p. 226-227)	80-120

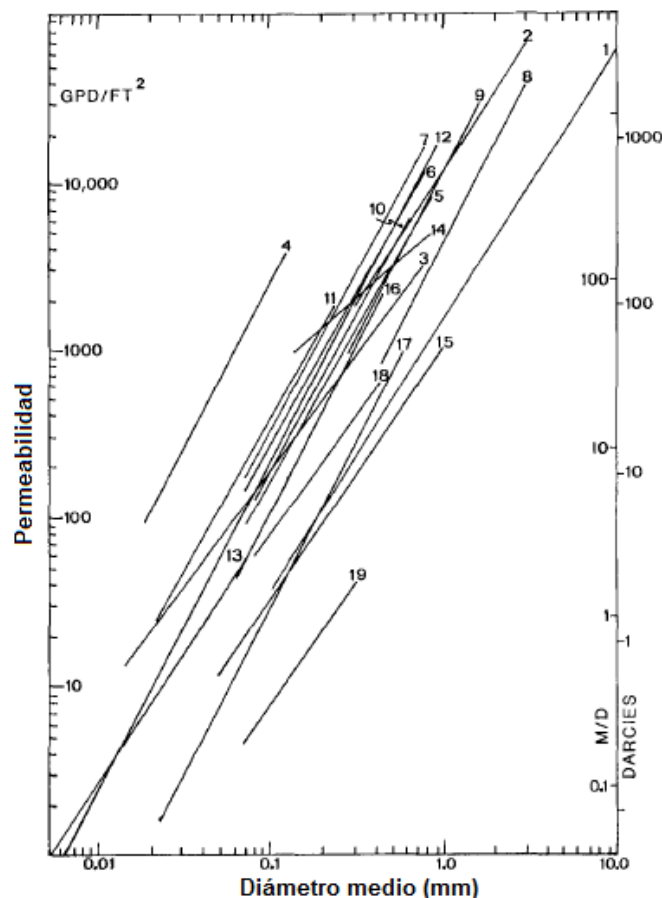
A partir de la Tabla 2.1 es posible observar que el coeficiente  $C$  varía entre 1 y 1000, es decir, tres órdenes de magnitud en términos de permeabilidad. Además, la fórmula es válida para valores de  $D_{10}$  entre 0,01 cm y 0,30 cm (Hazen 1892, 1911; Holtz and Kovacs, 1981; Coduto, 1999).

Se debe notar que la relación de Hazen fue obtenida para el diseño de filtros de arenas para purificar agua, lo que significa que las arenas utilizadas tenían propiedades muy particulares, como por ejemplo, sueltas, limpias y con un coeficiente de uniformidad menor a 2 (Terzaghi and Peck, 1964). Por otra parte, Holtz (Holtz & Kovacs, 1981) establece que esta relación sólo sería válida para valores de permeabilidad mayores que  $10^{-3}$  cm/s (Holtz and Kovacs 1981). Pese a esto, hoy en día esta relación se utiliza frecuentemente para estimar la permeabilidad de suelos granulares en terreno, no obstante, su utilización debe ser realizada con precaución.

### 2.4.2 Método de Shepherd

Para estudiar la relación entre el tamaño del grano y la permeabilidad de un suelo, Shepherd (Shepherd, 1989) realizó análisis estadísticos de regresiones potenciales en 19 grupos de datos publicados, relacionando tamaño de partículas con la permeabilidad medida en laboratorio. Los resultados de estos análisis muestran diferencias respecto a la relación obtenida por Hazen, con variaciones del exponente del diámetro del grano entre 1,11 y 2,05, pero la mayoría de los valores fueron significativamente menores que 2,0. Los datos analizados por Shepherd se muestran en la Figura 2.7.

Figura 2.7: Datos analizados por Shepherd (Shepherd, 1989)



A partir de la Figura 2.7 se puede observar que las pendientes de las curvas son distintas, lo cual está asociado a diferentes valores del exponente del tamaño de la

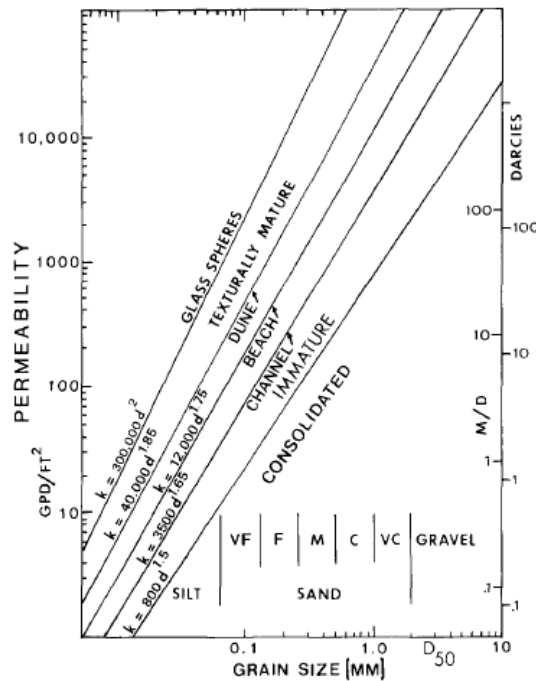
partícula en la ecuación de Hazen. En general, Shepherd observó que los valores de C fueron mayores para los set de datos obtenidos de muestras con partículas uniformes y granos más redondeados y esféricos. Por otra parte, los menores valores del exponente se obtuvieron en los suelos con buena gradación y partículas angulares.

En base a estos resultados, Shepherd propuso la siguiente relación entre el diámetro del grano y la permeabilidad:

$$K = C \cdot (D_{50})^j \quad (2-9)$$

Donde  $D_{50}$  es el tamaño medio de los granos y  $j$  es un valor que depende de la forma y uniformidad de los granos. De esta forma, un suelo con granos redondeados presenta un valor cercano a 2,0, mientras que para suelos naturales este exponente es cercano a 1,5. La Figura 2.8 muestra la relación entre la permeabilidad y el diámetro medio para suelos con distinta textura.

Figura 2.8: Relación de Shepherd (Shepherd, 1989)



A partir de la Figura 2.8 es posible observar que la relación de Shepherd predice valores del coeficiente de permeabilidad más altos para aquellos suelos con partículas más lisas, lo cual se explica debido a que a menor rugosidad existe una menor resistencia al corte que evite el paso de la solución.

### 2.4.3 Método de Slichter

Slichter (Slichter, 1899) presentó una relación en la cual se estima la permeabilidad de un suelo mediante la curva granulométrica, incluyendo también un coeficiente  $K_7$ , el cual depende de la porosidad de la muestra. Esta relación fue obtenida para arenas, utilizando granos uniformes y esféricos. De acuerdo al arreglo de esferas, el volumen de vacíos varía entre un 26,0% y un 47,6% del total de la masa. Su fórmula para la permeabilidad, dependiendo del diámetro de las esferas y la porosidad, es la siguiente, para una temperatura de 10°C:

$$K = \frac{771 \cdot D^2}{K_1} \quad (2-10)$$

Donde:

$D$ : Diámetro de las esferas.

$K_7$ : Coeficiente que depende de la porosidad según se indica en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2: Coeficiente K1 en función de la porosidad**

<b>N</b>	<b>1/K<sub>1</sub></b>
0,26	0,01187
0,28	0,01517
0,30	0,01905
0,32	0,02356
0,34	0,02878
0,36	0,03473
0,38	0,04154
0,40	0,04922
0,42	0,05789
0,44	0,06776
0,46	0,07838

Luego, el coeficiente de permeabilidad de una masa con un 46% de volumen de vacíos, es decir, un arreglo muy suelto, se expresa como  $60,3D^2$ . Según la fórmula de Hazen, el coeficiente de permeabilidad de una arena limpia y muy suelta, se expresa como  $116D_e^2$ , mientras que si la consideramos uniforme, se transforma en  $150D_e^2$ . La diferencia entre Slichter y Hazen radica en la consideración de Slichter de granos uniformes y redondeados. Esta consideración de Slichter y su comparación con suelos naturales, indica que su alcance y aporte está relacionado mayormente con fines académicos y no es válida para ser usada en la estimación de la permeabilidad de arenas en general.

#### **2.4.4 Método de Fair y Hatch**

Fair y Hatch (Fair and Hatch, 1933) publicaron una relación más compleja para el cálculo de la permeabilidad en arenas. Esta relación es la siguiente:

$$K = \frac{\rho \cdot g}{\mu} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot \frac{1}{m \cdot \left[ \frac{S}{100} \cdot \sum \frac{P_j}{D_{jm}} \right]^2} \quad (2-11)$$

Donde  $m$  es un factor de empaquetamiento de los granos y  $g$  es la aceleración de gravedad.  $S$  es un factor de forma de los granos de material, para el cual Fair y Hatch (Fair and Hatch, 1933) recomendaron un valor de 6,0 para granos esféricos y 7,7 para granos angulares.  $n$  es la porosidad de la muestra,  $p_j$  es el porcentaje de material contenido entre los tamices de diámetro  $D_j$  y  $D_{j+1}$ , y finalmente  $D_{jm}$  es el diámetro medio entre los tamices  $D_j$  y  $D_{j+1}$  definido como:

$$D_{jm} = \sqrt{D_j \cdot D_{j+1}} \quad (2-12)$$

#### 2.4.5 Método de Terzaghi

Terzaghi (Terzaghi, 1925) publicó una relación semi-empírica para calcular el coeficiente de permeabilidad, basada en los siguientes hechos: Las partes más anchas de los canales capilares a través de los cuales el agua fluye, tienen a lo menos cinco veces el diámetro de los más estrechos. Por lo tanto, si una cantidad definida de agua percola a través de uno de los canales capilares, la pérdida de carga por unidad de largo de las secciones más estrechas del canal, es al menos 25 veces mayor que la pérdida por unidad de largo de los más anchos. Debido a esto, la percolación de agua a través de arena puede ser comparada al flujo de agua a través de un set de tamices en series en la que la resistencia a la percolación es reducida a los tamices, mientras en los espacios entre los tamices la resistencia es despreciable. Sea  $d_w$  el tamaño efectivo de los granos (cm),  $n$  la porosidad,  $\mu_{10}$  y  $\mu_t$  los coeficientes de viscosidad del agua a 10°C y una temperatura  $t$ , respectivamente, y  $C$  un coeficiente que se ha establecido empíricamente que está en el rango entre  $800\mu_{10}$  y  $460\mu_{10}$ , el cual depende de la forma de los granos y de la uniformidad de la arena, la relación se escribe como:



$$K = \left( \frac{C}{\mu_{10}} \right) \cdot \left( \frac{\mu_{10}}{\mu_T} \right) \cdot \left( \frac{n - 0.13}{\sqrt[3]{1 - n}} \right)^2 \cdot d_w^2 \quad (2-13)$$

El valor 800 fue derivado de ensayos en arenas cuyos granos fueron bien pulidos y redondeados, mientras que el valor 460 fue obtenido en ensayos de arenas con granos irregulares y rugosos. La influencia de la uniformidad de la arena en el valor de C, fue mucho menos marcada que la influencia de la calidad de los granos.

#### 2.4.6 Método de Kozeny-Carman

Otra relación para el cálculo de la permeabilidad, es la de Kozeny-Carman (Kozeni, 1927; Carman, 1938, 1956). Esta relación semiempírica está basada en toda la distribución granulométrica del suelo (no sólo en un diámetro efectivo), la forma de las partículas, y el índice de vacíos. La relación es la siguiente:

$$K = \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{1}{C_{K-C}} \cdot \frac{e^3}{(1 - e)^2} \cdot \frac{1}{S_0^2} \quad (2-14)$$

Donde:

$\gamma$ : Peso unitario de la solución permeante.

$\mu$ : Viscosidad de la solución permeante.

$C_{K-C}$ : Coeficiente empírico Kozeni-Carman.

$S_0$ : Superficie específica por unidad de volumen de partículas (1/cm).

$e$ : Índice de vacíos

Carman definió que  $C_{K-C}$  tiene un valor de  $4,8 \pm 0,3$  para esferas uniformes, aunque se suele tomar un valor de 5,0 para este coeficiente. Con esto, la relación se escribe, para 20°C, como:

$$K = 1,99 \times 10^4 \cdot \frac{e^3}{(1 - e)^2} \cdot \frac{1}{S_0^2} \quad (2-15)$$

Pese a que esta relación es mucho más precisa que la relación de Hazen, es menos utilizada. Una de las razones radica en la poca experiencia de los Ingenieros geotécnicos para medir la superficie específica. Incluso no existe una norma ASTM para realizar esta medición en suelos, aunque es posible realizarla utilizando absorción de gas nitrógeno (Carrier, 2003). No obstante, el valor de  $S_0$  puede ser estimado fácilmente a través de la distribución granulométrica. Por ejemplo, para el caso de partículas esféricas, es fácil demostrar que la superficie específica tendrá un valor igual a  $6/D$ . Para este caso, la relación se convierte en:

$$K = 552 \cdot \frac{e^3}{(1-e)^2} \cdot D^2 \quad (2-16)$$

En el caso que el suelo no esté compuesto de partículas uniformes, el diámetro efectivo puede ser calculado a partir de la distribución granulométrica como:

$$D_{eff} = \frac{100\% \cdot \sum f_i}{D_{avei}} \quad (2-17)$$

Donde:

$f_i$  : Fracción de partículas entre dos tamaños de tamices

$D_{avei} = \sqrt{D_{li} \cdot D_{si}}$  : Diámetro promedio de partículas entre dos tamaños de tamices.

Luego, el valor de  $S_0$  es:

$$S_0 = \frac{6}{D_{eff}} \quad (2-18)$$

Esta relación cumple con que las partículas más pequeñas tienen mayor influencia en la permeabilidad, lo cual está incluido en  $D_{eff}$  y  $S_0$ :

Finalmente, para incorporar la angularidad de las partículas, es posible introducir un factor de forma,  $SF$ :

$$S_0 = \frac{SF}{D_{eff}} \quad (2-19)$$

Luego, reuniendo los términos, la ecuación original se expresa como:

$$K = 1,99 \times 10^4 \left( \frac{100\%}{\sum \frac{f_i}{\sqrt{D_{li} \cdot D_{si}}}} \right)^2 \cdot \frac{1}{SF^2} \cdot \frac{e^3}{(1-e)^2} \quad (2-20)$$

Esta relación es muy similar a aquella obtenida por Fair and Hatch (Fair and Hatch, 1933)

#### 2.4.7 Hazen versus Kozeny-Carman

Las dos relaciones más utilizadas en la actualidad para estimar permeabilidad de suelos granulares (principalmente arenosos), son las de Hazen y Kozeny-Carman. Se ha visto en el acápite 2.4.1, que el coeficiente  $C$ , utilizado en la relación de Hazen puede tener variaciones entre 1 y 1000, es decir, tres órdenes de magnitud, lo que lo hace muy impreciso. No obstante, su simplicidad y rapidez para estimar la permeabilidad ha hecho que sea utilizado ampliamente. Por otra parte, la relación de Kozeny-Carman es más precisa pero no tiene la simplicidad de la relación de Hazen. Además, su utilización requiere de una mayor cantidad de tiempo en el cálculo, no obstante, hoy en día, debido a los avances computacionales, es relativamente simple programar esta relación y poder estimar la permeabilidad mediante ésta, tan rápido como la relación de Hazen, lo que debiera tener como consecuencia que la relación de Kozeny-Carman comience a ser utilizada mayormente, ganando terreno por sobre la de Hazen.

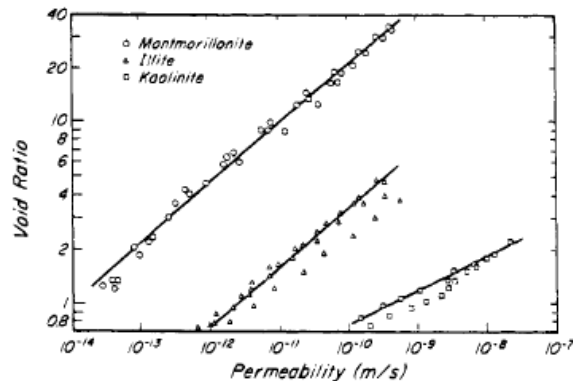
#### 2.4.8 Observaciones a los métodos indirectos en suelos granulares

Se ha observado que muchos de los métodos indirectos para estimar la permeabilidad en suelos granulares sólo incluyen un diámetro efectivo como variable granulométrica. Esto podría ser una debilidad ya que no incluyen otras

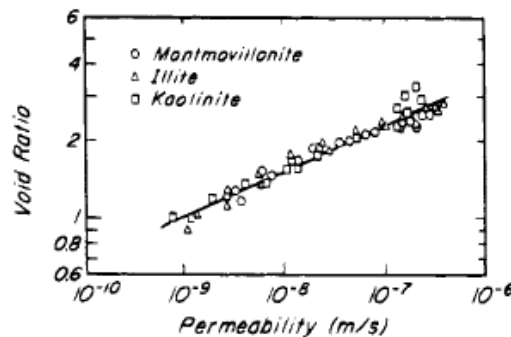
variables importantes como la gradación, la densidad, y porcentaje de finos y su plasticidad, entre otras.

Otro aspecto que debe tenerse en cuenta si se quiere utilizar alguno de los modelos presentados, es que la permeabilidad de los suelos granulares puede decrecer sustancialmente ante la presencia de pequeñas cantidades de partículas limosas y/o arcillosas. La mineralogía y el grado de floculación o dispersión de los finos determinan la magnitud de la disminución de la permeabilidad. Las Figuras 2.9 y 2.10 presentan correlaciones de valores de  $k$  dependiendo del índice de vacíos para minerales arcillosos que contienen sodio, en ensayos realizados en agua y carbón tetra clorhídrico (o benceno), respectivamente (Mesri and Olson, 1971).

**Figura 2.9: Permeabilidad de minerales arcillosos que contienen sodio, medida en ensayos utilizando agua (Mesri and Olson, 1971)**



**Figura 2.10: Permeabilidad de minerales arcillosos que contienen sodio, medida en ensayos utilizando carbón tetra clorhídrico o benceno (Mesri and Olson, 1971)**



De los tres minerales arcillosos ensayados, la montmorillonita tiene el menor tamaño de partículas, mientras que el mayor tamaño es el de la kaolinita. A igual índice de vacíos, la illita es 200 veces y la kaolinita alrededor de 200.000 veces más permeable que la montmorillonita. La Figura 2.9 muestra que la permeabilidad de los materiales arcillosos depende fuertemente del índice de vacíos.

Los datos de permeabilidad de la Figura 2.10 corresponden a minerales de arcilla ensayados en carbón tetra clorhídrico, que son fluidos no polares, que provocan completa aglomeración de las partículas arcillosas. Luego del aglomerado, el tamaño de las partículas de montmorillonita e illita, se aproxima al de las partículas de kaolinita, y los tres minerales arcillosos presentan una relación similar entre la permeabilidad y el índice de vacíos, como se muestra en la Figura 2.10.

El estudio de Mesri y Olson, demuestra que el coeficiente de permeabilidad es una variable que depende no sólo del suelo, sino que también del fluido, sobre todo en suelos arcillosos.

En el caso que se quiera utilizar alguna de las relaciones dadas por los modelos aquí presentados en gravas limpias, también podrían existir problemas, ya que todas estas relaciones tienen como hipótesis, que se cumple la ley de Darcy, lo que no se cumple cuando crece el diámetro de los poros en los suelos.

Otras consideraciones que no son tomadas en cuenta por estos métodos se enumeran a continuación ( Carrier, 2003):

- Formas de partículas extremas: Estas fórmulas no son aplicables cuando se tienen partículas laminares como micas. Además, en los casos en que la superficie específica medida sea mayor que la calculada, se debe ocupar esta última ya que esta diferencia suele deberse a irregularidades extremas

de las partículas o porosidad de éstas, lo que crea canales de flujo que no aportan a la permeabilidad del suelo;

- Distribuciones granulométricas extremas: Las relaciones no son aplicables si la curva granulométrica presenta una importante zona plana en la parte fina;
- Anisotropía: Ninguna de estas fórmulas ha tomado en cuenta anisotropía de los suelos. En la mayoría de los suelos en su condición natural, la permeabilidad horizontal es mayor que la permeabilidad vertical. Casi todos los ensayos existentes para validar estas relaciones han sido realizados midiendo permeabilidad vertical.

La influencia del índice de vacíos ha sido estudiada por Taylor (Taylor, 1948), quien propone la siguiente relación para estimar la permeabilidad a índices de vacío distintos al del ensayo:

$$k_1 : k_2 = \frac{C_1 e_1^3}{1 + e_1} : \frac{C_2 e_2^3}{1 + e_2} \quad (2-21)$$

Donde los coeficientes  $C_1$  y  $C_2$ , que dependen de la estructura del suelo, deben ser determinados de forma empírica. De manera muy aproximada, para arenas,  $C_1 \approx C_2$ . Otra relación que suele utilizarse en arenas es:

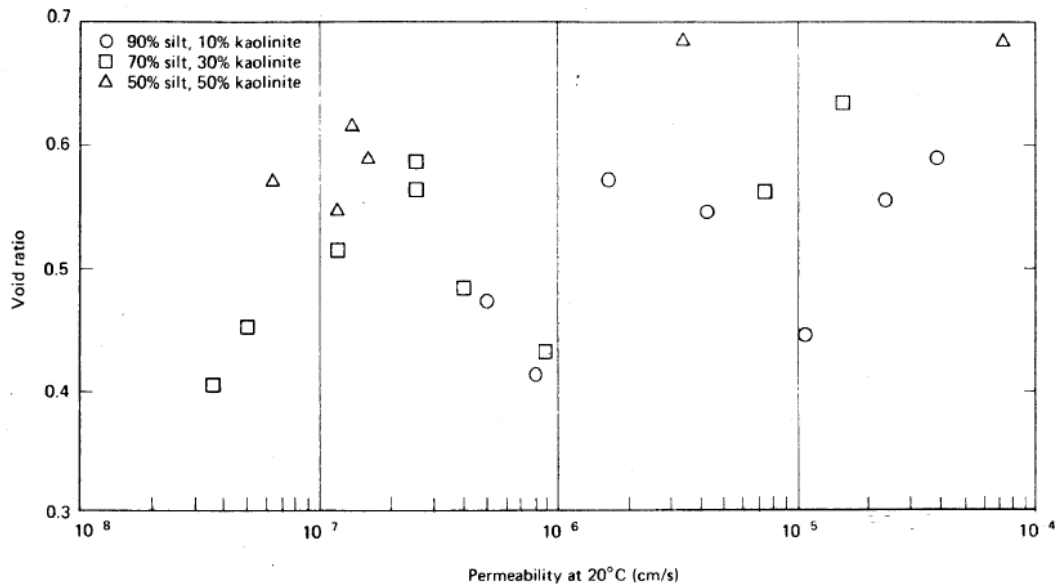
$$k_1 : k_2 = C'_1 e_1^2 : C'_2 e_2^2 \quad (2-22)$$

Al igual que antes, para arenas se puede considerar de manera aproximada,  $C'_1 \approx C'_2$ .

Para limos y arcillas, estas relaciones no funcionan muy bien. Para algunas arcillas, en un rango muy pequeño de permeabilidades (aproximadamente un orden de magnitud), se ha observado que la relación  $e$  versus  $\log_{10} k$ , es aproximadamente lineal si todos los otros factores se mantienen constantes, como se observa en la Figura 2.11. Sin embargo, para limos compactados y arcillas

limosas, García-Bengochea (Garcia-Bengochea et al, 1979) encontró que la relación entre el índice de vacíos,  $e$ , y el logaritmo de la permeabilidad,  $k$ , está lejos de ser lineal, como se observa en la Figura 2.11, donde se observa una gran dispersión en los resultados.

**Figura 2.11: Índice de vacíos versus permeabilidad para diversos suelos compactados (García-Bengochea et al., 1979)**



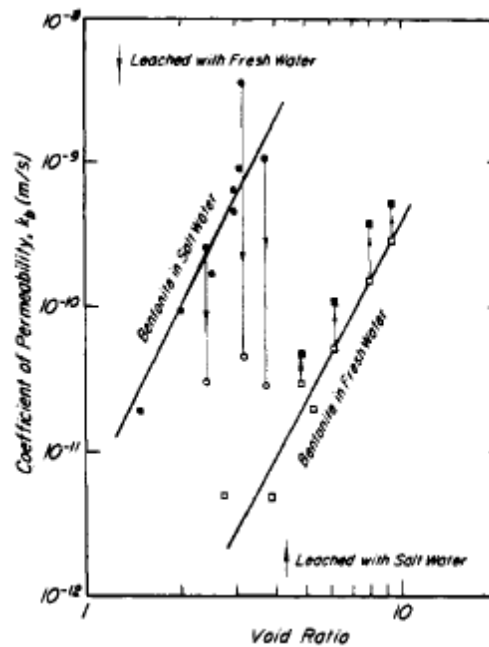
## 2.5 Permeabilidad de mezclas de arena y arcilla

La permeabilidad de suelos que contienen arena y arcilla es muy difícil de estimar. Kenney (Kenney et al., 1992) ha realizado estudios de la permeabilidad de mezclas de arena y bentonita, incluyendo ensayos de laboratorio y análisis teórico. Kenney (Kenney et al., 1992) midió la permeabilidad de mezclas de arena y bentonita, las cuales fueron mezcladas de dos formas distintas, con agua destilada (agua fresca) y agua salada. El tipo de agua utilizada influye directamente sobre la plasticidad de la bentonita. Los límites líquidos de la bentonita utilizando agua fresca y agua salada, fueron de 500% y 105%, respectivamente.

Antes que todo, se midió la permeabilidad de la bentonita, para lo cual se prepararon muestras de bentonita con agua fresca en unos casos, y salada en

otros, a contenidos de humedad cercanos y mayores al límite líquido, y luego fueron consolidadas en un consolidómetro a índices de vacío entre 1,5 y 10,0. Posteriormente se realizaron ensayos de permeabilidad en carga variable, utilizando agua fresca en algunos casos, y agua salada en otros, como solución permeante. Estos resultados se presentan en la Figura 2.12.

Figura 2.12: Permeabilidad de bentonita en agua fresca y agua salada (Terzaghi, Peck and Mesri, 1996)



La bentonita en agua fresca tiene una estructura altamente dispersa, con pequeños canales de flujo y baja permeabilidad. Al mismo valor de índice de vacíos, la bentonita en agua salada es un orden de magnitud más permeable que la bentonita en agua fresca, debido a que en agua salada las partículas de montmorillonita son floculadas en partículas mucho más grandes, por lo que la estructura presenta grandes canales de flujo y alta permeabilidad.

Kenney (Kenney et al., 1992) realizó ensayos en los que se usó agua salada para permear bentonita mezclada y consolidada en agua fresca, y a la inversa, ensayos en los que se utilizó agua fresca para permear bentonita mezclada y consolidada



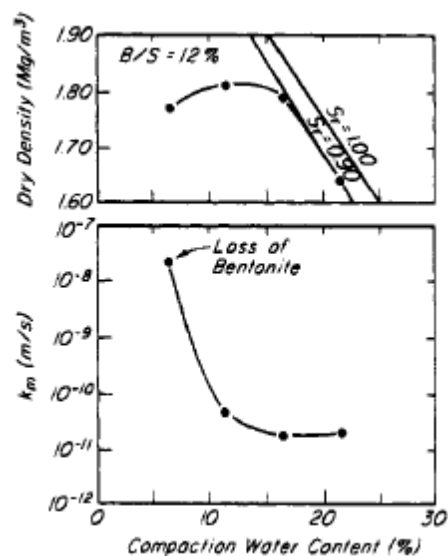
en agua salada. En ambos casos, no se permitió un cambio en el índice de vacíos. La Figura 2.12 muestra que la reducción en la concentración de sal lleva a una significativa dispersión de las partículas y una disminución en el tamaño de los poros y la permeabilidad, mayor a un orden de magnitud. Por otra parte, la permeabilidad aumentó sólo pequeñas cantidades cuando el agua fresca se reemplazó por agua salada.

La arena utilizada por Kenney (Kenney et al., 1992) en los ensayos llevados a cabo en las mezclas, tiene un coeficiente de permeabilidad de  $10^{-2}$  cm/s. Dos métodos diferentes fueron utilizados para preparar las mezclas de arena con bentonita: remoldeo, para aproximar mezclas homogéneas ideales; y compactadas, para aproximar procedimientos de compactación en terreno. Seed y Chan (Seed and Chan, 1959), en un estudio en arcillas compactadas mostraron que cuando muestras de arcilla se compactan a humedades menores que la humedad óptima, la estructura del suelo es independiente del tipo de compactación, mientras que para humedades mayores a la humedad óptima, el tipo de compactación tiene un efecto significativo en la estructura del suelo y por lo tanto, en la permeabilidad.

En el primer método de preparación, mezclas homogéneas de arena y bentonita fueron preparadas por un minucioso mezclado a contenidos de humedad cercanos a dos veces el contenido de humedad óptimo. Luego las mezclas fueron sometidas a consolidación uniaxial hasta que el peso unitario seco estuviera entre  $1,5 \text{ t/m}^3$  y  $1,8 \text{ t/m}^3$ . En el segundo, arenas secas y húmedas fueron mezcladas con bentonita seca, seguidas por mezclado y adición de más agua. Luego las muestras fueron compactadas dinámicamente en el permeámetro, utilizando un pequeño martillo de compactación y una energía de compactación por unidad de volumen equivalente a la compactación Proctor estándar. Para porcentajes de bentonita entre 4% y 20%, la compactación Proctor Estándar tuvo valores del peso unitario seco máximo entre  $1,74 \text{ t/m}^3$  y  $1,85 \text{ t/m}^3$ . Las probetas compactadas

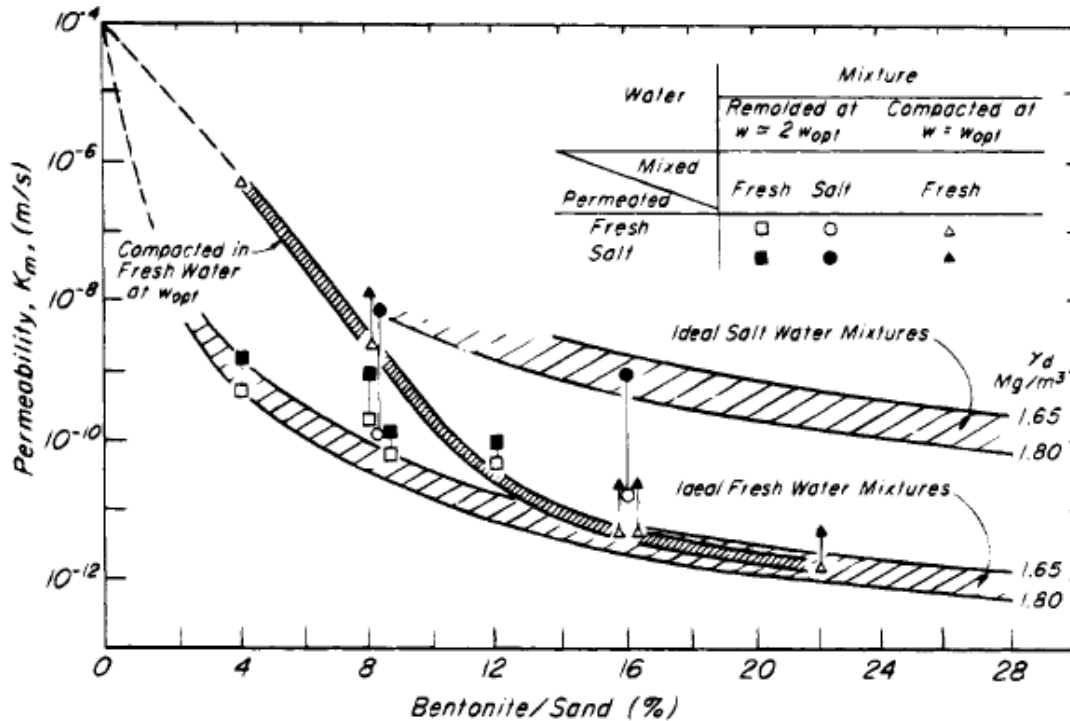
fueron sometidas a una tensión vertical efectiva igual a 60 kpa y fueron saturadas por contrapresión antes de medir la permeabilidad. Estos resultados se presentan en la Figura 2.13. Algunas muestras fueron realizadas con agua destilada y otras con agua salada. En la Figura 2.13, es posible observar también, el comportamiento de la permeabilidad, dependiendo de la humedad de compactación, donde se concluye que la permeabilidad disminuye a mayor contenido de humedad debido a la dispersión de las partículas. Se observa que la humedad de compactación, debido a la estructura con la que queda la muestra, tiene mayor influencia que la densidad.

Figura 2.13: Resultados de compactación y ensayos de permeabilidad en mezclas de arena y bentonita (Terzaghi, Peck and Mesri, 1996)



En la primera serie de ensayos de permeabilidad, hechos en muestras remoldeadas, los mismos fluidos utilizados para realizar la mezcla fueron utilizados para permear las muestras. Los resultados se presentan en la Figura 2.14 junto a curvas teóricas para mezclas ideales.

Figura 2.14: Permeabilidad de mezclas de arena y bentonita (Terzaghi, Peck and Mesri, 1996)



Kenney (Terzaghi, Peck and Mesri, 1996) llevó a cabo ensayos de permeabilidad en mezclas compactadas en agua fresca. La banda oscura de la Figura 2.14 indica la permeabilidad medida de mezclas de arena y bentonita y permeadas con agua fresca, y compactadas en agua fresca a la humedad óptima. Es posible notar que esta curva está por sobre aquella de muestras compactadas a una humedad igual al doble de la humedad óptima, de acuerdo a lo observado en la Figura 2.13.

Además, mezclas de arena y bentonita preparadas en agua fresca fueron permeadas con agua salada, y mezclas remoldeadas en agua salada fueron permeadas con agua fresca. Las mediciones de estas permeabilidades se presentan en la Figura 2.14, donde se observa que las mezclas tienen un comportamiento similar al observado en la Figura 2.12 para la bentonita. Por otra parte, en el rango de índices de vacíos obtenido, tanto en las muestras remoldeadas y consolidadas, como en las compactadas y consolidadas, las partículas de arcilla no tuvieron suficiente espacio y libertad para permitirles

reorganizarse en unidades mayores, como en los ensayos hechos sólo en bentonita. Por lo tanto, para mezclas compactadas o remoldeadas en agua fresca, la utilización de agua salada como fluido permeante produce un aumento en la permeabilidad menor a cinco veces.

En la Figura 2.14, los valores de permeabilidad de las mezclas han sido extrapolados por líneas discontinuas hasta una razón B/S=0 (Bentonita/Arena), para referenciar la permeabilidad de la arena ( $10^{-2}$  cm/s), y para mostrar la marcada reducción de la permeabilidad que resulta de la incorporación de pequeñas cantidades de bentonita.

Los resultados de los ensayos de Kenney (Kenney et al., 1992) muestran la dificultad que tiene la estimación de la permeabilidad en suelos que posean arena y arcillas. Además, se observa la importancia que posee el fluido utilizado en el ensayo de permeabilidad, tanto en la preparación de la muestra, como en el utilizado para permear la muestra.

## **2.6 Inestabilidad interna**

### **2.6.1 Definición**

El concepto de inestabilidad interna está directamente asociado con el término erosión, el cual se refiere al desgaste o pérdida de partículas de un cuerpo producto de fuerzas perturbadoras, tales como agua, hielo, viento, acción química, etc, y fue observado por primera vez en estudios de compatibilidad base/filtro. Kezdi fue uno de los primeros en estudiar este fenómeno, para lo cual analizó los resultados de una investigación realizada por Bernatzik (Bernatzik, 1948), donde materiales pobremente graduados experimentaron una significativa erosión de las fracciones más finas.

Terzaghi fue el primero en establecer un criterio para la protección de suelos erosionables, en base al cociente  $D_{15f}/D_{85s}$ , donde  $D_{15f}$  corresponde al diámetro que permite el paso del 15% en peso de las partículas de un material de filtro

protector. Por otra parte,  $D_{85s}$  corresponde al diámetro del material base (o material a proteger) que permite el paso del 85% en peso de las partículas. Terzaghi limitó este cociente a un valor máximo de 4 para asegurar la retención del material base por el material filtro. Esta regla ha sido utilizada por años en el diseño de filtros, no obstante, resultados no satisfactorios en presas de tierra construidas con materiales internamente inestables han cuestionado su aplicabilidad (Garner 2002)

Diversos autores han definido conceptos relacionados a la erosión, de acuerdo a los distintos tipos de migración de partículas que afectan a la parte más fina de un suelo. En esta investigación, el interés de la inestabilidad interna está relacionado con la capacidad de migrar de las partículas más finas debido a flujo de soluciones y acción química, y por consiguiente, el cambio de porosidad y permeabilidad en un suelo. De esta forma, la definición que más se adapta a este estudio es la dada por Charles (Charles, 2001), en la cual define suffosion como “la erosión interna en una masa de suelos que es internamente inestable, provocando cambios en la porosidad, permeabilidad y estructura de la muestra”. Otras definiciones de erosión han sido recopilados por Órdenes (Órdenes, 2008).

El término “inestabilidad interna” se refiere a la incapacidad de un suelo dado para prevenir la pérdida de sus partículas más pequeñas, debido a fuerzas perturbadoras (Keenney and Lau, 1985). Ciertos suelos tienen propiedades que hacen que queden partículas sueltas que no forman parte del esqueleto resistente y eventualmente pueden trasladarse dentro de la masa de suelo. Que un suelo sea inestable o estable internamente, depende de múltiples factores, entre los que se encuentran los siguientes:

- Granulometría: La granulometría es, quizás, el factor más importante en la estabilidad interna del suelo. Las granulometrías más susceptibles a presentar inestabilidad interna son a) granulometrías del tipo “gap graded”, es decir, aquellas en que existe ausencia de un tamaño determinado; y b)

granulometrías de graduación amplia donde exista gran diferencia entre las partículas de mayor y menor tamaño;

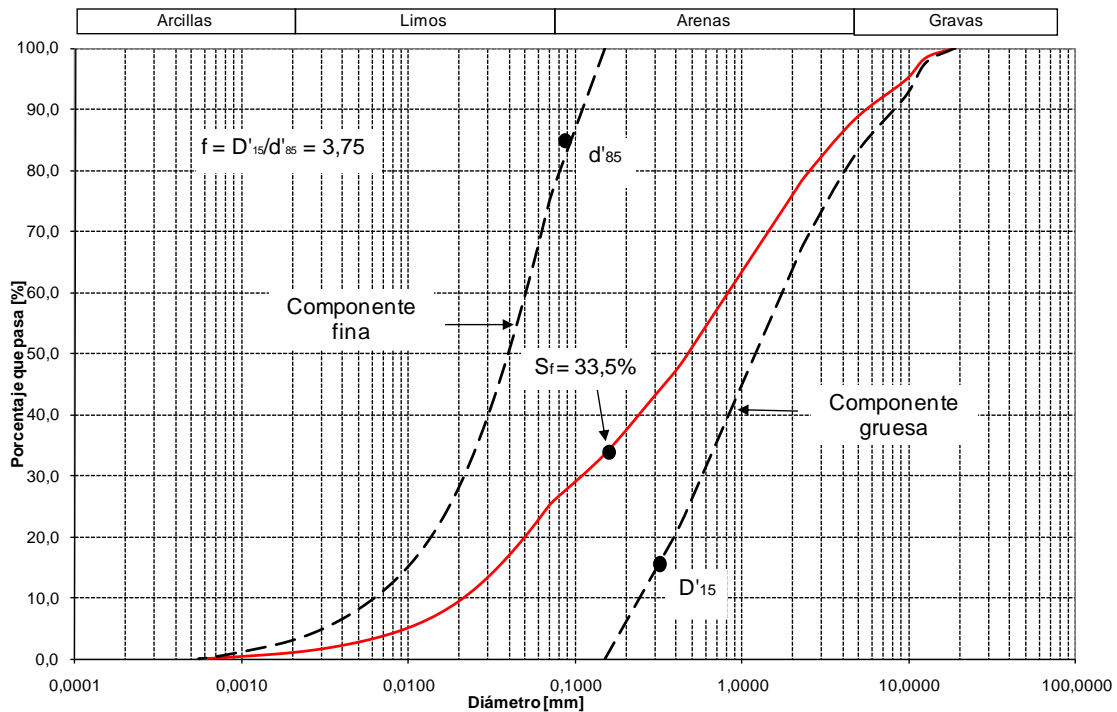
- Plasticidad de los finos: Suelos que contengan finos más plásticos serán menos susceptibles a que exista inestabilidad interna, ya que poseen mayor ligazón entre partículas. Foster ha definido que suelos con IP mayor a 15 son poco susceptibles a presentar inestabilidad interna, mientras que aquellos que presentan un valor menor a 6 son altamente susceptibles a presentarla (Órdenes, 2008);
- Grado de compactación: Suelos que se presenten sueltos tienen mayor tendencia a presentar inestabilidad interna que aquellos que se presenten densos, debido a que poseen mayor cantidad de vacíos, y por lo tanto, mayor probabilidad de que queden partículas sueltas.

Para realizar análisis del potencial de inestabilidad interna, Kezdi (Kezdi, 1979) y Kenney y Lau (Kenney and Lau, 1985) han propuesto métodos que permiten realizar un análisis cualitativo, basado solamente en la granulometría del suelo y que no permite conocer las condiciones de flujo a las cuales se presenta la inestabilidad interna. Estos métodos se presentan en los acápites siguientes.

### **2.6.2 Método de Kezdi**

Kezdi (Kezdi, 1979) ideó un método en el cual la curva granulométrica de un suelo se divide en dos, una parte fina y una gruesa. A estos dos “nuevos suelos”, se les analiza según las propiedades de filtro-base dadas por Terzaghi, considerando que la parte gruesa es el filtro y la parte más fina es la base de material a proteger, como se muestra en la Figura 2.15.

Figura 2.15: Método de Kezdi



Este análisis se realiza para distintos tamaños, hasta encontrar el valor máximo de  $D'_{15}/d'_{85}$ . Si este valor es mayor a cuatro, el suelo es potencialmente inestable internamente. En caso contrario, el suelo es potencialmente estable internamente. Los valores más altos de  $D'_{15}/d'_{85}$ , también indican cuáles son los tamaños más susceptibles a migrar.

Este método es muy útil para suelos del tipo gap graded, es decir, con ausencia de algún tamaño, especialmente cuando el tamaño que falta se encuentra en el sector medio de la curva granulométrica y el suelo no posee un contenido de finos mayor al 35% (Órdenes, 2008)

### 2.6.3 Método de Kenney and Lau

Kenney y Lau (Kenney and Lau, 1985) para entender mejor el fenómeno de inestabilidad interna y la influencia de las fuerzas de filtración y vibraciones en el inicio de la inestabilidad, desarrollaron una serie de ensayos de laboratorio, los

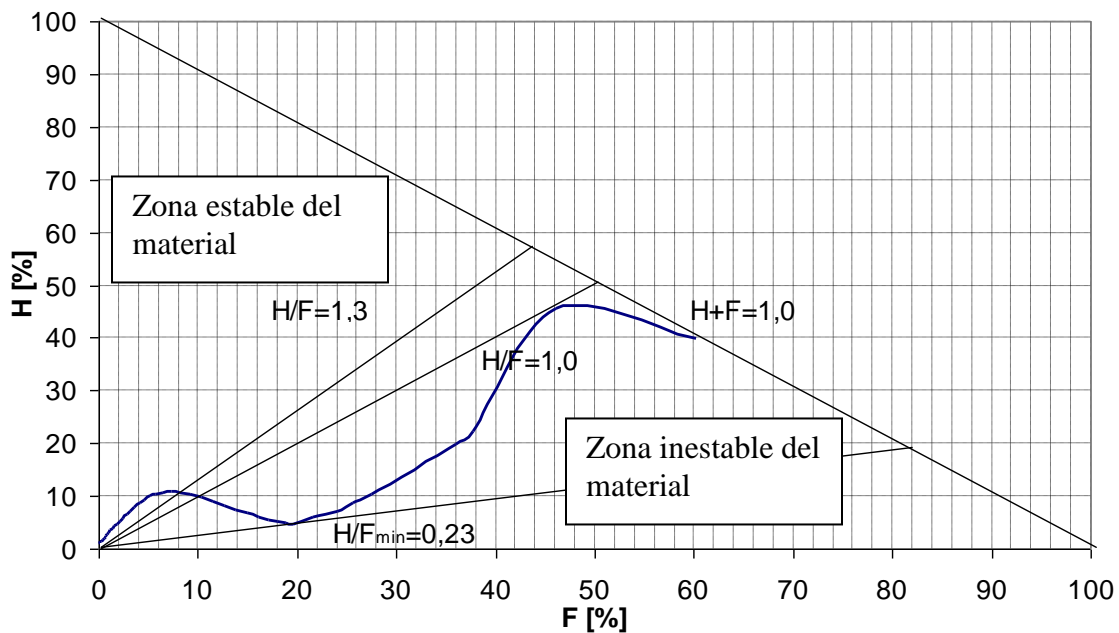
que consistieron en ensayos de flujo unidireccional a carga constante, con flujo descendente y muestras de dos tamaños, 245 mm de diámetro y 450 mm de altura las primeras, y 580 mm de diámetro y 860 mm de altura las segundas. Se utilizaron suelos base compuestos por gravas arenosas bien graduadas y gravas uniformes más gruesas para filtro. Para reproducir condiciones de terreno severas, se incorporaron vibraciones a las muestras. La duración total de la etapa de filtración varió entre 30 y 100 horas para los distintos ensayos realizados.

A partir de los resultados, se concluyó que el potencial de inestabilidad está directamente relacionado con la forma granulométrica y que los suelos con granulometría más amplia son más susceptibles a sufrir inestabilidad interna. Con estas apreciaciones, Kenney y Lau desarrollaron un criterio basado en la curva granulométrica. Este método funciona graficando, para una curva granulométrica dada, los pares ordenados  $(F,H)$ , definiendo  $F$  como la fracción menor a un determinado diámetro,  $D$ , y  $H$  como la fracción de material contenido entre los tamaños  $D$  y  $4D$ . El valor  $4D$  se debe a que el tamaño predominante de poros contenidos en una red de vacíos de partículas de tamaño  $D$ , es aproximadamente  $D/4$ . En este criterio se ha impuesto que sólo aquellas partículas más grandes que  $D/4$  no podrán moverse.

En el mismo gráfico, se dibuja la recta  $H/F=1$ . Si parte de la curva se encuentra por debajo de esta recta, el suelo es potencialmente inestable internamente. En caso contrario, el suelo es estable internamente. La recta para definir el criterio ha sido corregida de acuerdo a las contribuciones de Ripley (Ripley, 1986), Milligan (Milligan, 1986), y Sherard (Sherard et al., 1986), ya que inicialmente fue definida como  $H/F=1,3$ . Una explicación del método se presenta en la Figura 2.16.



Figura 2.16: Método de Kenney y Lau



Se debe tener en cuenta que el criterio desarrollado por Kenney y Lau fue desarrollado en base a pruebas de filtración en gravas arenosas, y por lo tanto, su extensión a otros tipos de suelos debe tenerlo en consideración, sobre todo en suelos con finos plásticos.

#### 2.6.4 Otros estudios empíricos de inestabilidad interna

Moffat (Moffat, 2002) realizó ensayos de laboratorio con granulometrías publicadas anteriormente por Kenney y Lau (Kenney and Lau, 1985) y Honjo (1996), examinándolas a través del criterio de Kezdi. El permeámetro utilizado era para muestras de 100 mm de diámetro y altura. Se aplicó una sobrecarga de 25 kPa en la parte superior del permeámetro y un martillo neumático para aplicar vibraciones en la muestra. Se utilizó flujo descendente y un gradiente hidráulico variando entre 0,1 y 18. La etapa de filtración tuvo una duración de diez horas sin vibraciones y luego una segunda etapa con vibraciones de una hora.

Las conclusiones de estos ensayos confirmaron el valor límite planteado por Kezdi para el inicio de la estabilidad y además sugieren que el criterio de Kenney y Lau puede ser extendido para suelos con porcentajes de finos hasta 30%, independiente de la forma de la curva granulométrica del material.

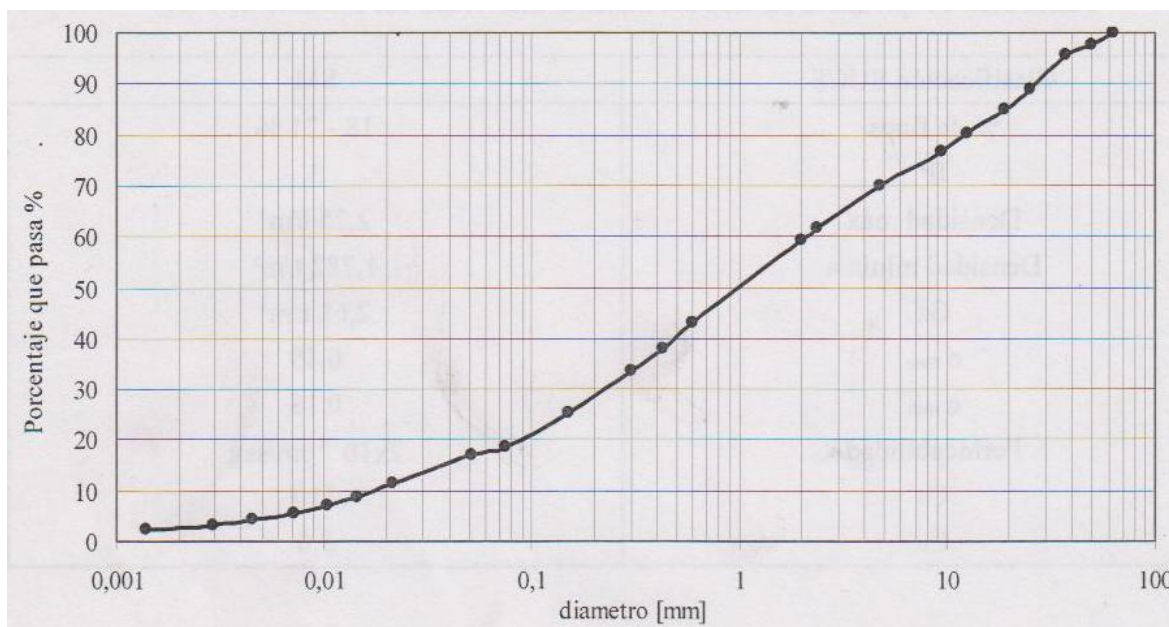
Órdenes (Órdenes, 2008) realizó ensayos de laboratorio para determinar las variables que gatillan la estabilidad interna. Además, realizó el análisis teórico por los métodos de Kezdi y Kenney and Lau presentados previamente. En estos estudios, el suelo estudiado corresponde a un suelo morrénico utilizado en la construcción del embalse El Yeso, material de amplia granulometría que ha demostrado ser susceptible a experimentar problemas de inestabilidad interna. Este suelo corresponde a una arena limos de muy baja plasticidad (IP=3) y sus propiedades se resumen en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3: Propiedades del material morrénico del embalse El Yeso (Órdenes, 2008)**

<b>Clasificación USCS</b>	<b>SM</b>
% de finos	18 – 21
IP	3%
Permeabilidad	$2 \times 10^{-4}$ cm/s
Cu	110
Cc	3,6

La curva granulométrica se presenta en la Figura 2.17.

Figura 2.17: Método de Kenney y Lau



A partir de la curva es posible observar que el material presenta una granulometría bastante amplia y lineal, y no posee ningún gap como otros materiales internamente inestables.

La evaluación realizada por Órdenes mostró que este material es inestable internamente por ambos métodos, obteniéndose un valor de  $H/F_{min} = 0,44$  y un  $D_{15}/D_{85max} = 9$ . Es importante destacar que el suelo ensayado contiene un porcentaje de finos bastante mayor que el utilizado en la realización de las dos reglas empíricas utilizadas, no obstante, se ha demostrado que en la práctica constituyen buenas herramientas para evaluar el potencial de inestabilidad para materiales con mayor contenido de finos (Moffat, 2005).

Los resultados de laboratorio para este material corroboraron la inestabilidad del material bajo ciertas condiciones. El inicio de la migración de partículas finas varió entre un gradiente de 12, sometiendo a la probeta a una carga vertical de  $0,25 \text{ kg/cm}^2$ , hasta un gradiente de 25 para una carga vertical de  $2 \text{ kg/cm}^2$ .

### **3 LIXIVIACIÓN EN PILAS**

#### **3.1 Introducción**

La lixiviación es un proceso hidrometalúrgico que permite obtener el cobre de los minerales que lo contienen aplicando una solución ácida, formada, principalmente, por ácido sulfúrico y agua. Este proceso está siendo ampliamente utilizado para minerales de cobre de baja ley, debido a su bajo costo.

Los minerales más comunes que contienen cobre son los óxidos y sulfuros. Estos minerales, sin embargo, son poco comunes en la corteza terrestre y suelen encontrarse unidos a otros minerales. Cuando un depósito mineral tiene una concentración que hace económicamente factible la explotación de un metal, se le conoce como mena.

La lixiviación se desarrolla en pilas, conocidas como pilas de lixiviación. Éstas son terraplenes de gran extensión y, en algunos casos, de gran altura, compuestos de minerales de cobre oxidados o sulfurados. Las pilas son regadas con soluciones ácidas en la parte superior, la cual entra en contacto con los minerales, generándose así una solución rica en cobre hacia la parte inferior de la pila. Esta zona se encuentra impermeabilizada y posee un sistema de colección y drenaje, con el cual la solución es dirigida hacia las piscinas de procesos. De este modo, parte del éxito de la lixiviación en pilas está asociado, entre otros factores, a un flujo vertical adecuado de la solución rica en cobre a través de la pila, punto en el cual está centrada esta investigación.

Hoy en día, el diseño de pilas de lixiviación suele considerar sólo variables metalúrgicas. Bard (Bard y Campaña, 2004) ha puesto en evidencia la necesidad de incorporar variables geotécnicas que, en algunos casos, podrían condicionar el diseño, lo cual ha sido corroborado por el autor en esta investigación.

En este capítulo se presenta un marco teórico que permite comprender de mejor forma los alcances de esta investigación, exponiendo los principios fundamentales

que gobiernan el proceso de lixiviación en pilas, y los principales factores de los cuales depende el éxito del proceso, enfocándose, principalmente, en lo relativo al drenaje de la pila.

### **3.2 Conceptos generales de pilas de lixiviación**

Las pilas de lixiviación pueden ser clasificadas, desde un punto de vista operacional, en pilas dinámicas, también llamadas del tipo “on-off”, y pilas estáticas o permanentes. Las pilas dinámicas son aquellas en las cuales una vez que el mineral ha sido lixiviado, éste es removido de la pila y trasladado a botaderos, donde eventualmente podría ser sometido a un proceso de lixiviación secundaria. Por otra parte, las pilas estáticas se construyen y riegan por niveles. Una vez finalizada la lixiviación de un nivel, se carga uno nuevo sobre el anterior, aprovechando o no la impermeabilización existente, lo que depende de la capacidad drenante de la pila. Este aspecto se revisa en el acápite 3.5.

Otra forma de clasificación de las pilas tiene relación con el proceso al cual es sometido el mineral antes de ser cargado en la pila. De esta forma, las pilas pueden ser de mineral chancado, o pilas ROM en el caso de que el material sea depositado en la pila directamente desde el rajo, sin realizar un proceso de chancado sobre él. Las pilas ROM poseen un tamaño máximo de partícula que puede alcanzar tamaños métricos, mientras que los minerales chancados suelen tener tamaños máximos que no sobrepasan 2”.

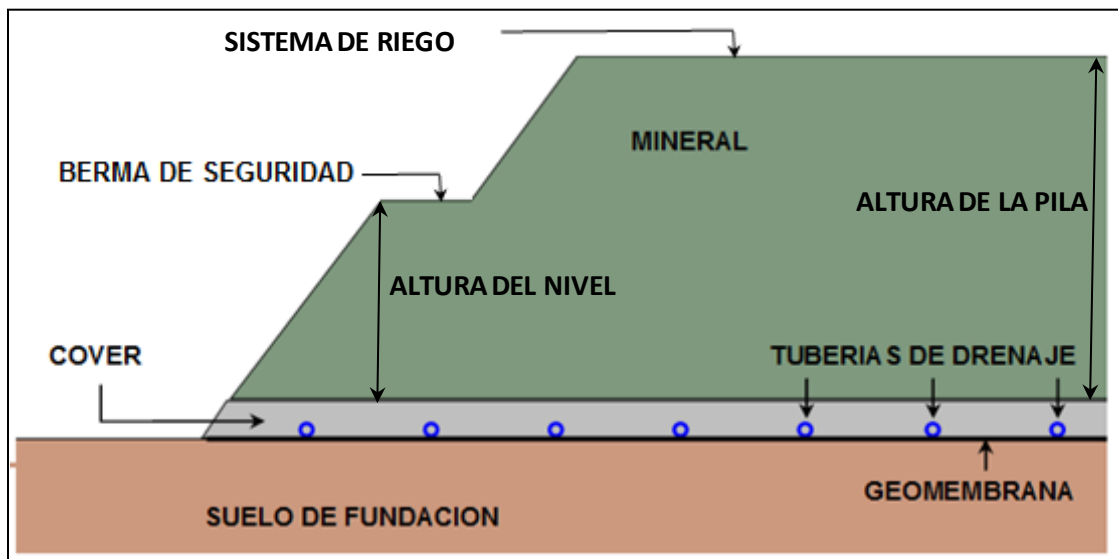
El sector de apilamiento de una planta cobre, por lo general, una gran área, la cual debe cumplir varios requisitos. El terreno donde se instalarán las pilas debe tener una pendiente ojalá no superior a 5,0 %, para asegurar la estabilidad de la pila, y nunca inferior a 0,7 %, de tal manera que las soluciones fluyan fácilmente hacia el sistema de colección.

El carguío de las pilas se realiza, en general, sobre un material granular llamado cover, el cual es colocado sobre una geomembrana impermeable de HDPE (high

density polyethylene) o LLDPE (linear low density polyethylene), cuyo espesor debe ser diseñado para evitar el punzonamiento generado por las partículas que están sobre ella, debido a la presión provocada por el peso propio de la pila. Esto evita la infiltración de soluciones al suelo natural. Sobre la geomembrana, y embebidas en el cover, se suele colocar tuberías que conforman los sistemas de drenaje y colección de la pila.

La Figura 3.1 presenta un esquema de una pila de lixiviación con los distintos componentes que la conforman.

Figura 3.1: Componentes de una pila de lixiviación



A continuación se explica cuales son las principales funciones de cada uno de los componentes de una pila de lixiviación de minerales de cobre.

- Mineral: Es el material pétreo que contiene el mineral de cobre. Estos minerales pueden ser óxidos o sulfuros de cobre;
- Solución ácida: Corresponde al agente lixivante. Sus principales componentes son agua y ácido sulfúrico. El riego también se puede realizar

con refino, es decir, con solución que ya ha lixiviado mineral, pero que no contiene cobre suficiente para realizar su extracción.

- Sistema de riego: Corresponde al sistema a través del cual se aplican las soluciones ácidas al mineral. Este sistema se ubica en la parte superior de la pila y se compone de goteros, aspersores o sistemas mixtos;
- Sistema de impermeabilización: Corresponde al sistema encargado de que las soluciones ácidas no escurran hacia el suelo de fundación de la pila. En Chile, en general, se utilizan geomembranas de HDPE o LLDPE, aunque también se ha utilizado PVC. La no utilización de sistemas de impermeabilización naturales, se debe a la dificultad de obtener suelos arcillosos en la zona del norte grande, donde suelen estar ubicadas las pilas de lixiviación;
- Tuberías de drenaje: Corresponde a la red de tuberías ranuradas cuyo fin es mantener controlado el nivel freático dentro de la pila. Éstas transportan las soluciones hasta el sistema de evacuación;
- Cover: Material granular que se coloca sobre el sistema de impermeabilización que puede cumplir alguna o todas las siguientes tareas: a) actuar como material drenante; b) proteger la geomembrana; y c) actuar como filtro;
- Sistema de evacuación: Se compone por una red de tuberías ranuradas, y se encarga de conducir las soluciones hacia afuera de la pila. Está conectado al sistema de drenaje y se ubica en la base de la pila. Las soluciones son conducidas hacia el sistema de recolección externo
- Sistema de recolección externo: Suele ser una canaleta ubicada fuera de la pila, desde la cual las soluciones se conducen hacia las piscinas de procesos, donde la solución puede ser devuelta, o bien, transportada hacia la

planta de extracción por solventes (SX), donde comienza el proceso de extracción del cobre desde las soluciones ácidas.

Las principales tareas concernientes a la Ingeniería geotécnica en un proceso de lixiviación, se enumeran a continuación:

- Asegurar el buen drenaje de la pila: Este aspecto es el foco de estudio de esta investigación, la cual se centra en el estudio de la permeabilidad del material de la pila. Para asegurar un buen drenaje, también es necesario revisar otros aspectos, como por ejemplo, realizar el diseño del material de cover, y del sistema de colección y drenaje. Éstos y otros aspectos relativos al drenaje, se revisan más detalladamente en el acápite 3.5;
- Asegurar la estabilidad de la pila: Para esto se deben realizar estudios de las diferentes componentes de la pila, para evaluar, entre otras cosas, sus propiedades de resistencia al corte. Debe tenerse en cuenta el drenaje de la pila y el nivel freático generado por la acumulación de soluciones en la parte inferior de la pila. En algunos casos, para mantener la estabilidad, los análisis pueden dar origen a restricciones en el ciclo de lixiviación o a las áreas bajo irrigación (Bard & Campaña, 2004), lo cual es difícil de realizar desde el punto de vista operacional.

### **3.3 Etapas del proceso de lixiviación en pilas**

Para llevar a cabo el proceso de lixiviación en pilas, ya sea en minerales oxidados o sulfuros secundarios, se debe construir una planta hidrometalúrgica de cobre. La operación de esta planta consta de varias etapas, las cuales se describen en los acápites 3.3.1 a 3.3.5.

#### **3.3.1 Chancado**

Una vez extraído el material con minerales de cobre, la primera etapa de proceso a la que es sometido, es el chancado, esto con el objeto de llevarlo a una



granulometría previamente estudiada que maximice la extracción. La decisión de realizar una pila de mineral chancado o ROM se toma desde un punto de vista económico, y radica principalmente en si la ley del mineral es lo suficientemente alta para que sea conveniente realizar el proceso de chancado.

El chancado consiste en un proceso de fragmentación del mineral y se realiza, en general, en varias etapas: chancado primario, secundario, y en algunos casos terciario, con el objeto de obtener un material mineralizado de un tamaño máximo entre  $\frac{3}{4}$ " y 2". Este tamaño es suficiente para dejar expuesta la superficie de las partículas de mineral a la infiltración de la solución ácida. Es importante notar que desde el punto de vista hidrometalúrgico, la reducción de tamaño es favorable, ya que aumenta la recuperación de cobre, no obstante, disminuye la permeabilidad del mineral, afectando el drenaje de la pila y la recuperación de las soluciones. Este aspecto se revisa en detalle en el acápite 3.5.

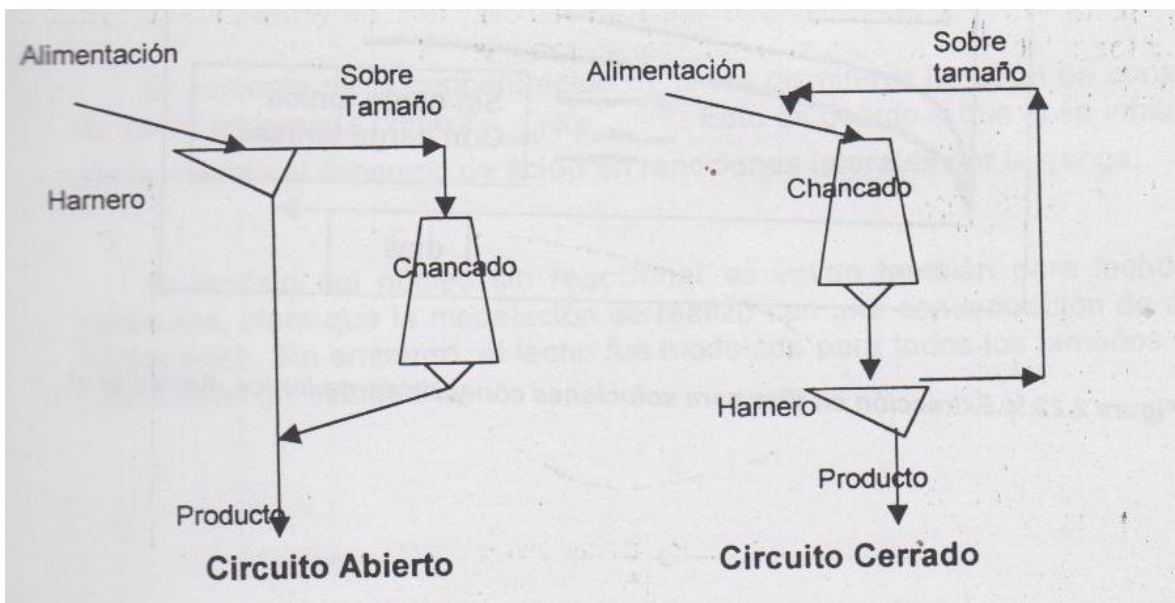
En casi todas las plantas de chancado se pueden distinguir dos etapas: chancado grueso y chancado fino. El chancado grueso corresponde a las instalaciones donde llega el mineral desde el yacimiento, y es reducido para pasar a la etapa de chancado fino. El chancado grueso tiene como equipos principales un chancador primario, con sus respectivas tolvas de recepción de camiones y productos, correas que extraen el mineral chancado y un acopio conocido como acopio de gruesos, donde se almacena el mineral que ya ha pasado por el chancador primario.

El chancado fino comienza con la alimentación del mineral desde el acopio de gruesos, el cual va a una primera etapa de clasificación y donde siempre es conveniente extraer el mineral bajo el tamaño máximo definido en el proceso, con el fin de no generar chancado excesivo que influya negativamente en la permeabilidad del mineral. El mineral sobre el tamaño máximo especificado, pasa a una etapa de chancado secundario, donde se hace una nueva reducción de tamaño. En general, el tamaño máximo que se puede lograr con los chancadores

secundarios es algo superior a 1½". Luego, si el proceso requiere una menor granulometría, se debe agregar una nueva etapa de clasificación, conocida como harneo terciario, donde se clasifica el material bajo y sobre el tamaño máximo definido. El bajo tamaño se extrae como producto final y el sobre tamaño se pasa a un sistema de chancado terciario de tal manera de reducirlo y lograr la granulometría apta para el proceso metalúrgico definido (Schmidt, 2001).

Actualmente, la selección y configuración de la planta de chancado se realiza a partir de los resultados de las pruebas metalúrgicas. A partir de éstas, se define el tamaño máximo de partícula de mineral que requiere el proceso para alcanzar los rendimientos metalúrgicos adecuados para el éxito del proyecto. Dependiendo de la granulometría que se haya definido en el proceso metalúrgico, el circuito de chancado fino puede ser cerrado o abierto. Ejemplos de ambos se adjuntan en la Figura 3.2.

Figura 3.2: Circuito de chancado cerrado (Mimica, 2002)



Se definen como circuitos cerrados, aquellos en que todos los productos que salen de los chancadores pasan por una etapa de clasificación, la cual se realiza con harneros. En general, cuando se requiere un producto chancado menor o igual a

½”, se emplea un circuito cerrado, debido a que la disminución de tamaño podría afectar la permeabilidad del suelo. En cambio, en el circuito abierto el producto que sale del último sistema de chancado es trasladado directamente a la planta de aglomeración, sin ser clasificado. Schmidt (Schmidt, 2001) afirma que en el caso de requerir un tamaño de partícula máximo de ¾” o mayor, siempre se puede emplear un circuito abierto.

El mineral chancado al tamaño máximo adecuado, normalmente se almacena en acopios tipo silos o en acopios techados, de tal manera de controlar mejor las emisiones de polvo.

### **3.3.2 Aglomeración**

El proceso de aglomeración consiste en mezclar el material chancado con agua y ácido sulfúrico, de tal manera que las partículas finas se adhieran entre ellas y con las partículas más gruesas, formando lo que se conoce como glómeros. La cantidad de agua y ácido que se utiliza en el proceso de aglomerado son factores que influyen en conseguir un proceso óptimo. El agua agregada en el proceso de aglomeración provee al material de una cohesión aparente, la cual ayudará a ligar el material fino con el grueso, formando un glómero, que si bien no tiene una gran consistencia mecánica, sí es adecuado para el proceso productivo.

La cantidad de agua que se debe agregar depende fuertemente de las características del mineral: contenido de finos, plasticidad de los finos, tamaño máximo de partículas, etc. Schmidt (Schmidt, 2001) ha enumerado las consideraciones que deben tenerse en cuenta para establecer la cantidad de agua y ácido en esta etapa:

- Un exceso de agua produce glómeros muy plásticos y muy poco estables que se destruyen, y que al cargarlos en una pila se deforman y producen una compactación del mineral antes de iniciar el regado, afectando el drenaje de la pila. Por otra parte, una falta de agua produce glómeros muy débiles

mecánicamente y muy esponjosos, lo que hace que al llegar a las pilas, el mineral quede con una muy baja densidad y que al regar la pila se produzca una gran compactación que puede provocar canalizaciones durante el proceso de lixiviación. Cabe notar que la cantidad de agua a utilizar en el aglomerado se obtiene a partir de pruebas metalúrgicas, y que algunas mineras hoy están optando por reemplazar el agua por refino, ya que se logran ventajas desde el punto de vista metalúrgico;

- El ácido sulfúrico agregado en el proceso de aglomeración cumple la función de comenzar a solubilizar el cobre soluble en ácido. Además, produce la inhibición de la formación de la sílice coloidal, de tal manera de minimizar la sílice que pasa a las soluciones de lixiviación en el equilibrio, y que si es sílice coloidal, trae problemas serios en la etapa de extracción por solventes debido a una formación mayor de borra. En general, la sulfatación del cobre que se obtiene en esta etapa es dependiente, principalmente, de la granulometría y de la cantidad de ácido agregado, con una adecuada dosificación de agua;
- La cantidad de ácido requerida en esta etapa depende directamente de la caracterización química del mineral, sobre todo del consumo de la ganga, materia que reacciona y consume ácido, y entrega impurezas al sistema. No se puede agregar más ácido en esta etapa que el consumido por la ganga en la planta industrial. Por el contrario, siempre es bueno agregar algo menos y adicionar el resto en las soluciones de lixiviación para mantener los equilibrios; y
- Siempre al reaccionar el mineral y el ácido, se producen gases producto de la reacción del mineral con él, y producto de la mezcla de agua y ácido sulfúrico concentrado. Estos gases, por disposiciones y regulaciones ambientales, deben ser extraídos y alejados de las condiciones de trabajo.

Respecto a este punto, es importante tener en cuenta cómo estos gases pueden afectar la permeabilidad del mineral.

Este proceso sólo es realizado en pilas de mineral chancado e incluso no en todas se realiza. En general, las técnicas de aglomeración crecen en complejidad y en costo con el aumento del porcentaje de finos (O'Kane consultants Inc., 2000).

Para el proceso de aglomeración de minerales con alto contenido de finos, se utilizan tambores rotatorios, los que consisten en unidades cilíndricas con un largo de alrededor de 2,5 a 3,5 veces su diámetro. Estos tambores giran a una velocidad bastante baja, entre 5 a 10 rpm, y están montados de tal manera de tener una inclinación que no supera los 8°. El tiempo de residencia del mineral en el tambor es de alrededor de un minuto, lo que se considera adecuado para lograr una buena mezcla del mineral con el agua y el ácido, y obtener una calidad mecánica aceptable del mineral aglomerado.

Los minerales donde la fracción fina es baja, son humectados con agua o solución ácida, y los glómeros son formados a medida que el mineral es agitado durante el manejo y la construcción de la pila.

Dependiendo de la calidad del mineral y, en general, de la cantidad de material bajo malla #100, es necesario agregar algún aditivo que permita mejorar la calidad del material aglomerado. Estos aditivos son compuestos de poliacrilamidas que estabilizan mejor el glómero, evitando que migren o se suelten las partículas finas de las gruesas.

En resumen, la etapa de aglomeración cumple los siguientes objetivos:

- Mejora las condiciones de flujo dentro de la pila, ya que la aglomeración contribuye en contener los finos dentro de los glómeros, ayudando a evitar que éstos afecten el drenaje de la pila;

- Permite homogeneizar el mineral en el lecho de la pila, ayudando a evitar el desarrollo de flujos preferenciales. Esto ocurre debido a que las partículas tienen un tamaño más uniforme, disminuyendo la segregación. Pese a lo anterior, la literatura muestra que en las pilas de mineral aglomerado se produce segregación de todos modos (O’Kane Consultants Inc., 2000);
- Humecta el mineral antes de depositarlo en la pila, de tal manera de evitar la disminución de permeabilidad que podría producirse debido a posibles expansiones de las arcillas presentes en el mineral;
- Comienza la sulfatación del cobre, aumentando la velocidad de lixiviación.

Un buen aglomerado muchas veces es la clave del éxito de la planta, debido a que esta etapa es la que tiene la misión de lograr un lecho de mineral homogéneo y permeable, que es parte esencial del proceso productivo de la lixiviación, es decir, tener una pila en la cual la solución de lixiviación pase por todas y cada una de las partículas de mineral, entregando el ácido sulfúrico faltante para lograr una buena recuperación del cobre.

### **3.3.3 Lixiviación**

Una vez formada la pila, se vierte lentamente una solución ácida en su superficie a través del sistema de riego. Esta solución se infiltra en la pila hasta su base, produciéndose la extracción del cobre y otras impurezas del mineral. En la base, la solución es recogida por el sistema de drenaje y llevada fuera del sector de las pilas mediante el sistema de evacuación.

### **3.3.4 Extracción por solventes (SX)**

Las soluciones producidas en la etapa de lixiviación tienen bajo contenido de cobre y muchas impurezas. Éstas son tratadas en una planta de extracción por solventes, que mediante un reactivo selectivo al cobre, concentra y purifica el cobre, dejándolo apto para la siguiente etapa del proceso.

Para realizar el riego de las pilas, normalmente se tienen dos modalidades, una que es conocida como un ciclo de lixiviación, que consiste en que la solución lixivante es una sola, que es la solución de refino proveniente de SX, y que al pasar por el mineral da origen a la solución rica en cobre directamente. Otra modalidad de operar es emplear lo que se conoce como dos ciclos de lixiviación, que consiste en que la solución de refino proveniente de SX se emplea en lixiviar las pilas más antiguas del proceso, generando una solución intermedia de tal manera que ésta, con una concentración de cobre relativamente baja, sea aplicada para regar las pilas más nuevas que están en proceso, generando de esta manera una solución, por lo general, más concentrada de cobre que al emplear sólo un ciclo. Ambos métodos de riego se muestran en las Figuras 3.3 y 3.4.

**Figura 3.3: Método de riego de un ciclo de lixiviación**

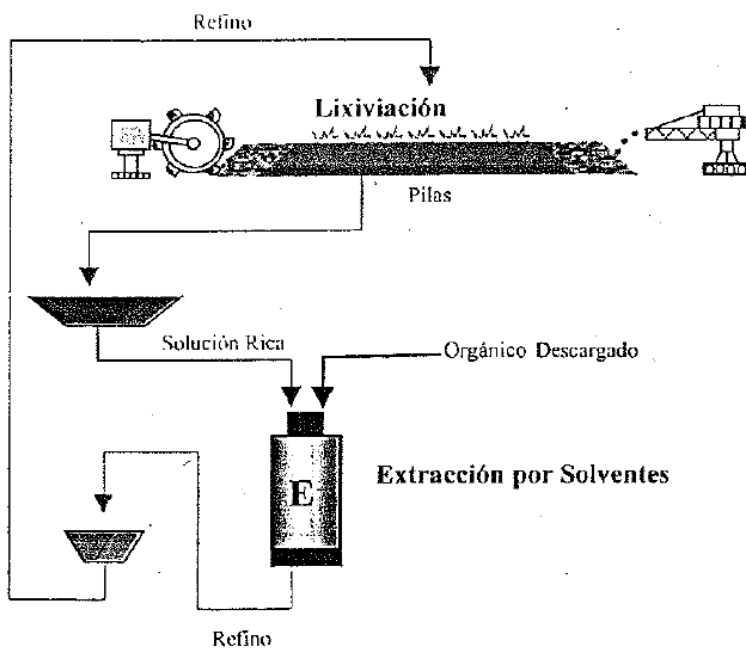
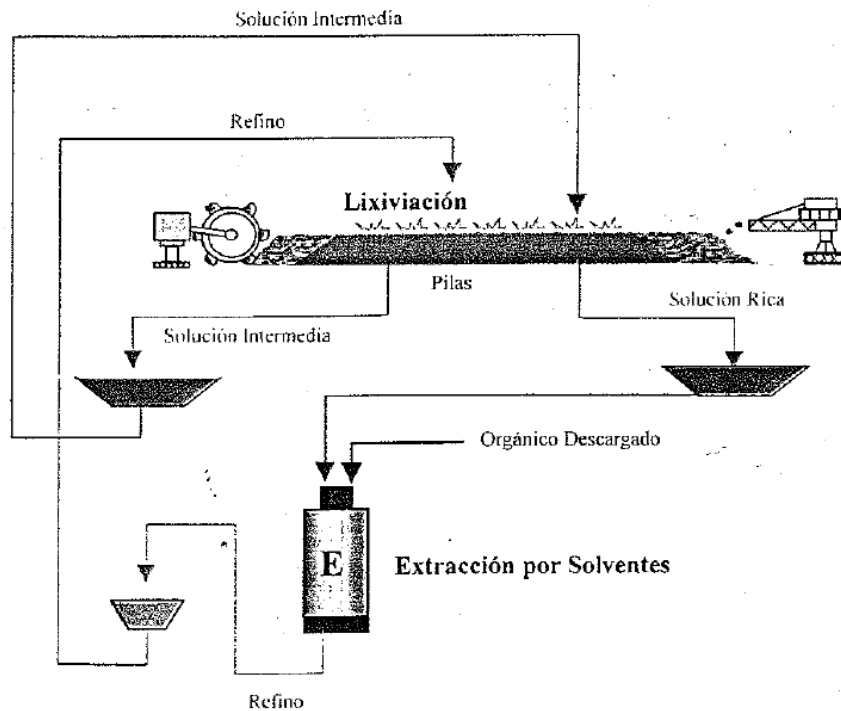


Figura 3.4: Método de riego de dos ciclo de lixiviación



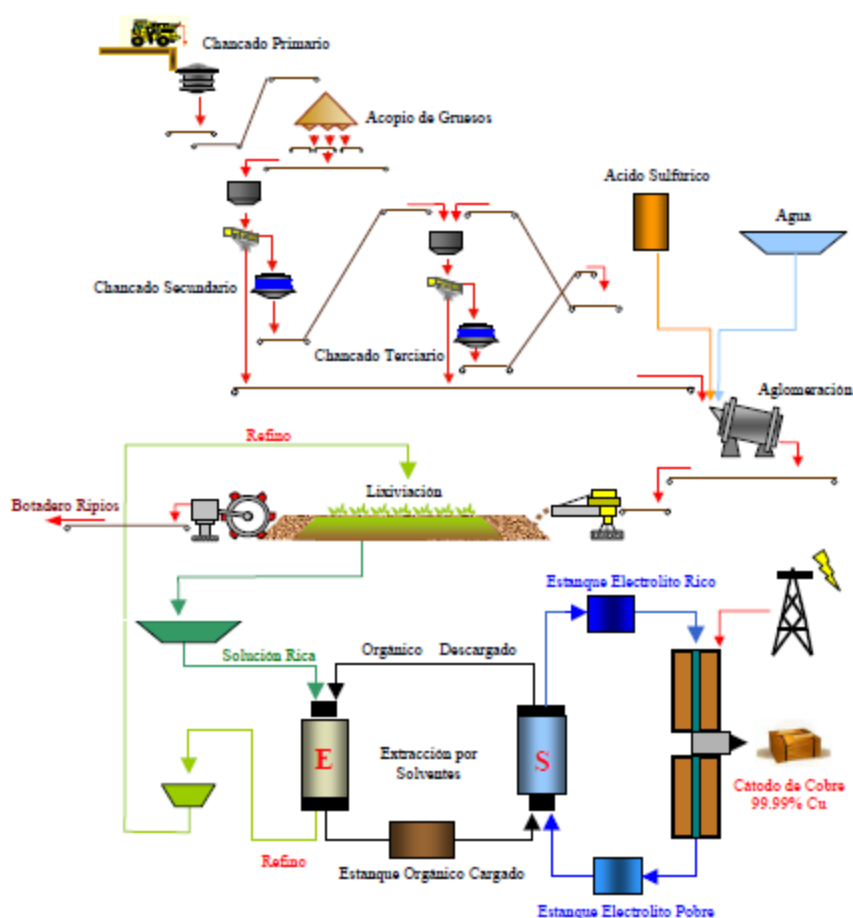
### 3.3.5 Electrobtcención (EW)

Las soluciones ricas en cobre y con impurezas controladas, conocidas como electrólitos, pasan a lo que se conoce como nave electrolítica, donde mediante el empleo de electrodos de plomo y acero inoxidable, y aplicación de corriente continua, se logra depositar el cobre de grado electrolito, obteniendo de esta manera los cátodos con una pureza sobre 99.99%.

En la Figura 3.5, se encuentra esquematizado un diagrama de flujo de toda una planta de tratamiento de minerales de cobre oxidados (Schmidt, 2001)

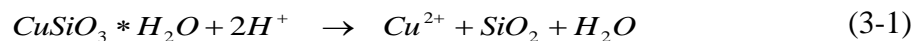


Figura 3.5: Diagrama de flujo de una planta de tratamiento de minerales de cobre oxidados

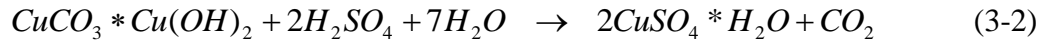


### 3.4 Proceso Químico de la Lixiviación

El proceso de lixiviación en minerales oxidados se basa en que éstos son sensibles al ataque de soluciones ácidas, es decir, al tener contacto con la solución ácida, el cobre oxidado presente en la partícula de mineral se disuelve en la solución y sale de la partícula. A modo de ejemplo, si el mineral es crisocola, la reacción química involucrada es:

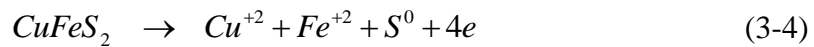


Si el mineral es malaquita, la reacción involucrada es:

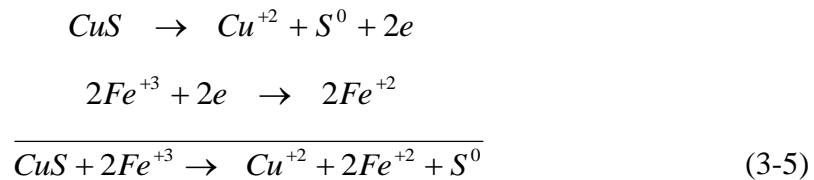


Los minerales sulfurados, a diferencia de los oxidados, no son sensibles al ataque de soluciones ácidas. Sin embargo, actualmente es posible obtener el cobre en este tipo de minerales mediante lixiviación bacteriana.

Para lixiviar el sulfuro de cobre es necesario remover los electrones desde el sulfuro, proceso que ayuda a romper la estructura del sulfuro y a liberar el cobre contenido. Este proceso puede ser representado para el caso de la covelita y la calcopirita por las siguientes reacciones químicas (Vargas, 2005):

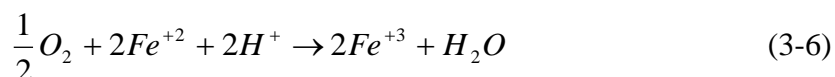


Para remover los electrones desde el sulfuro, se utiliza un agente oxidante en la solución de lixiviación que comúnmente es ión férrico (Fe+3). De esta forma, las reacciones globales obtenidas son las siguientes (Vargas, 2005):

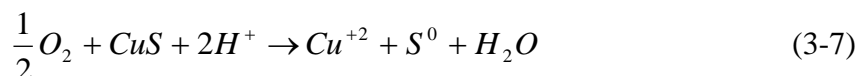


Para que el proceso funcione eficientemente, se deben tener estas reacciones de manera continua, para lo cual se deben extraer constantemente los iones de cobre desde la solución a través del proceso de extracción por solventes y regenerar continuamente el ión férrico, lo que se logra mediante la re-oxidación del ión ferroso con oxígeno. No obstante, la velocidad de oxidación de ión ferroso en condiciones abióticas es muy lenta para ser considerada una alternativa tecnológica atractiva, pero por otro lado, la oxidación de ión ferroso con oxígeno es fuertemente catalizada (acelerada) en presencia de microorganismos lixivadores. Dada la fuerte influencia catalítica de los microorganismos que lixivian

en la oxidación del ión ferroso, la lixiviación de un mineral de sulfuro puede ser conducida de modo que los electrones liberados por el mineral de sulfuro son aceptados por el ión férrico, lo cual resulta en la disolución del sulfuro y en la formación del ión ferroso. Simultáneamente, con la ayuda bacteriana, el ión ferroso está continuamente transfiriendo electrones al oxígeno disuelto, el cual regenera el ión férrico y produce agua, de acuerdo a la reacción global (Vargas, 2005):



Cabe constatar que el oxígeno no ataca directamente el sulfuro pero entrega una fuerza directora termodinámica estacionaria para la disolución del sulfuro y actúa como el aceptor final de electrones liberados desde el sulfuro. La reacción global para el caso de la covelita es obtenida sumando las reacciones 2.5 y 2.6, lo cual da (Vargas, 2005):



### 3.5 Factores que afectan el drenaje de la pila

El proceso de lixiviación es un proceso químico complejo, donde intervienen diversos factores. El éxito de éste depende, en gran medida, de realizar un diseño que permita obtener la solución rica de manera eficaz y eficiente, ya que para que la lixiviación sea económicamente factible, se debe obtener una gran cantidad de cobre en un limitado periodo de tiempo. En lo relativo a la geotecnia, un drenaje pobre de la pila es uno de las causas más comunes de fracaso de proyectos de lixiviación en pilas.

En general, el diseño de la pila se basa, principalmente, en variables hidrometalúrgicas, las cuales determinan el ciclo de lixiviación, la altura óptima de la pila, la tasa de irrigación, el porcentaje de cobre recuperado, etc. No obstante,

ya se ha puesto en evidencia que para conseguir que un proceso de lixiviación sea exitoso, es necesario incorporar variables geotécnicas en el diseño, relativo al drenaje o flujo de la solución rica en cobre. Las variables geotécnicas que pueden condicionar el diseño son: granulometría y propiedades índices del mineral, permeabilidad del mineral, utilización de material de cover y sus propiedades (granulometría y permeabilidad), homogeneidad de los minerales, humedad de apilamiento y sistema de impermeabilización.

En los acápite siguientes se realiza una descripción de distintos factores que pueden afectar el drenaje de la pila, además de los ya vistos como la calidad del chancado o de la aglomeración del mineral. La descripción realizada es presentada, principalmente desde un punto de vista geotécnico, no obstante, también se han incluido los criterios de diseño que se utilizan actualmente, los cuales se basan en mayor medida en variables hidrometalúrgicas. De esta forma es posible comprender la filosofía actual de diseño de pilas y como debe incorporarse la disciplina geotécnica.

### **3.5.1 Granulometría y permeabilidad del mineral**

Normalmente la granulometría es “seleccionada” por las distintas pruebas metalúrgicas que se realizan. Su elección comienza con una selección basada en la experiencia del metalurgista, quien toma en cuenta las características físico-químicas del mineral. Cabe notar que siempre un menor tamaño de partículas dará mejores resultados en la recuperación de cobre, sin embargo, la disminución de tamaño tiene como consecuencia una disminución de la permeabilidad, lo que puede causar problemas operacionales debido a inundaciones, problemas de estabilidad mecánica estática y sísmica, e incluso la imposibilidad de que la solución se infiltre a través de la pila. Además, al disminuir el tamaño, si bien se mejora la recuperación de cobre, también se aumentan los costos por chancado.

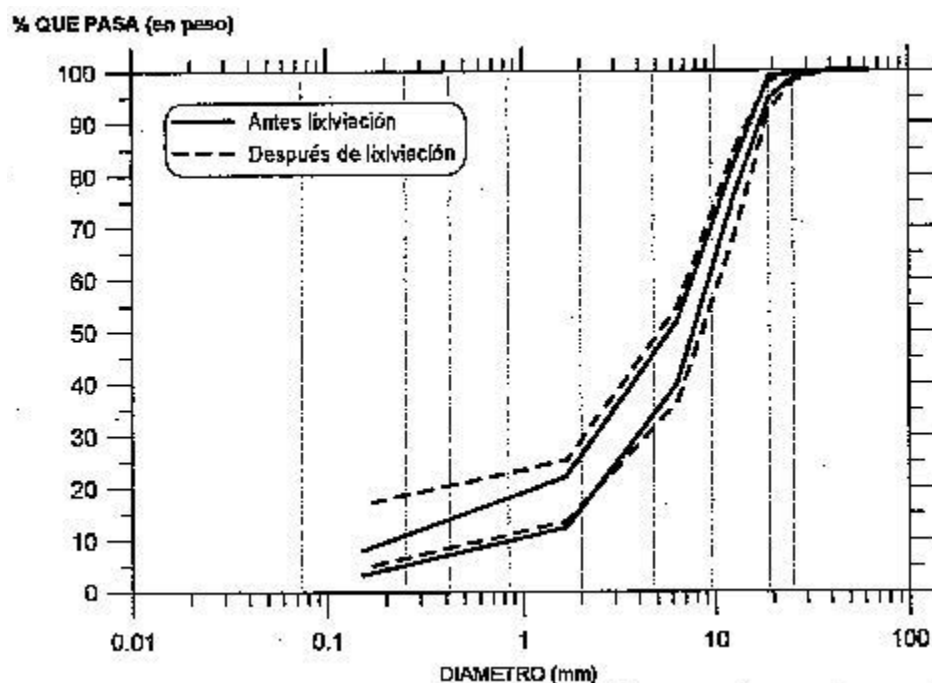
Debe considerarse que los ensayos son realizados sobre muestras discretas obtenidas, generalmente, de sondajes. Sin embargo, estas pruebas no siempre reflejan variaciones en el mineral por una mayor alteración o por cambios litológicos. En efecto, los sectores más alterados del cuerpo mineralizado contribuyen con un mayor contenido de arcillas, lo cual afecta en la capacidad de drenaje de los minerales y también en sus propiedades resistentes. También es necesario aclarar que desde el punto de vista metalúrgico no interesa cuantificar el material más fino que malla ASTM #100, y además, en algunos casos esta caracterización granulométrica se efectúa por tamizado en seco. Al comparar los resultados con los de granulometrías efectuadas por método estándar ASTM, se observan notables diferencias, principalmente en la fracción arenas y finos (Bard & Campaña, 2004).

Otro aspecto de importancia es la posibilidad de que al penetrar las soluciones por las microfisuras de las partículas más finas, se produzca un “chancado químico”, generando partículas más finas y afectando el drenaje de la pila. Este chancado químico podría sumarse a dos efectos que podrían producir cambios en la granulometría del mineral: el chancado debido a la operación y carguío (chancado mecánico) y la migración de finos desde los sectores más altos de la pila hasta los sectores más bajos.

Bard (Bard & Campaña, 2004) ha presentado evidencia de chancado químico. La Figura 3.6 presenta la granulometría de minerales antes y después de la lixiviación, observándose que por efecto del chancado químico puede producirse una variación en la fracción de arenas y finos. Debe tenerse en cuenta que el chancado químico ocurrirá en los minerales en mayor o menor cantidad, dependiendo de la ley del mineral y de los componentes de la ganga (conjunto de minerales que no contiene el metal a explotar), ya que algunos de ellos también podrían lixivarse. Se espera que mientras mayor sea la ley del mineral, y la ganga presente mayor cantidad de minerales lixiviables, mayor será el chancado químico

que presente. El chancado químico corresponde a una importante fuente de estudio, debido a que tiene gran relevancia en el comportamiento de la pila en el tiempo, afectando especialmente la permeabilidad del mineral en el tiempo debido al aumento en el porcentaje de finos.

Figura 3.6: Variación de la granulometría debido a “chancado químico” (Bard y Campaña, 2004)



La permeabilidad de un suelo depende, principalmente, de la granulometría, el porcentaje de finos, la densidad, y la plasticidad de los finos. Si la permeabilidad de la pila es alta, el tiempo de residencia de la solución en la pila es bajo. En este caso, la solución alcanzaría a lixiviar superficialmente y parcialmente las partículas que constituyen la pila. En caso de que la permeabilidad sea baja, la solución alcanzaría a lixiviar completamente, pero ésta demoraría demasiado en recorrer toda la pila, saturando sectores de ésta y afectando su estabilidad. Por lo tanto, una buena permeabilidad es aquella que permite al flujo de solución descender con facilidad, pero que también permite que la solución reaccione con la mayor cantidad de mineral posible. Por lo tanto, la importancia que tiene la permeabilidad

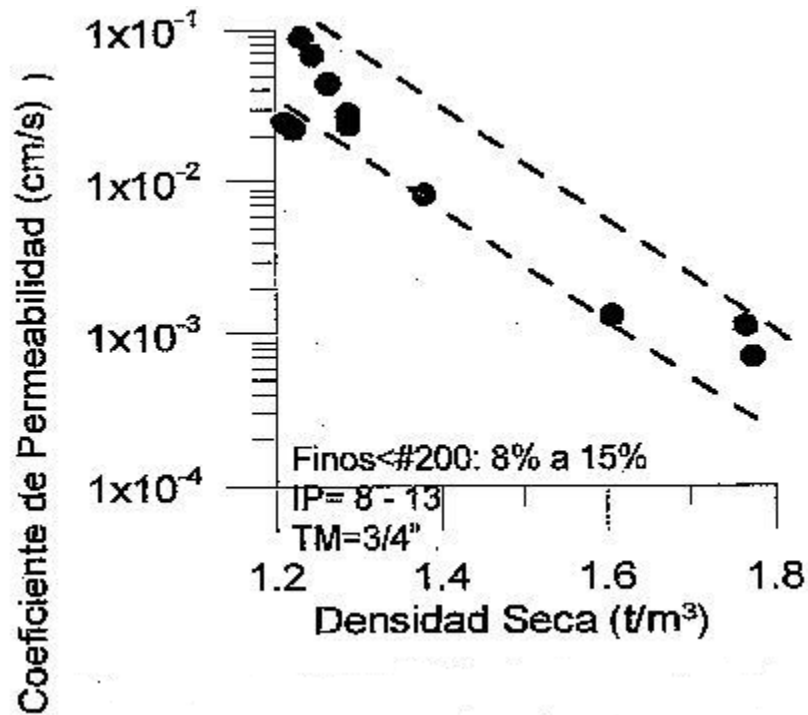
del mineral en el proceso de lixiviación es muy alta y es fundamental para el éxito del proceso.

En el caso de pilas de lixiviación, este parámetro es muy difícil de cuantificar debido a que su valor se ve fuertemente afectado por condiciones de operación. A continuación se enumeran los principales factores por los que este valor se puede ver afectado en una pila de lixiviación:

- Disminución de la permeabilidad por aumento del porcentaje de finos del mineral debido a chancado químico.
- Disminución de la permeabilidad por densificación de los materiales depositados por efecto de peso propio, saturación con ácido o debido a un apilamiento inadecuado.
- Disminución de la permeabilidad en los sectores inferiores, y aumento en los sectores superiores, debido a migración de finos desde la parte superior de la pila hacia la parte inferior.

Bard (Bard & Campaña, 2004) ha estudiado la relación entre la permeabilidad y la densidad seca en minerales. La Figura 3.7 presenta estos resultados llevados a cabo mediante el método del permeámetro de doble pared (ASTM D5093). En esta figura se intenta representar la disminución de la permeabilidad con la compactación producida por el peso propio de la pila. De esta forma, las densidades menores corresponderían a densidades de depositación, mientras que las mayores representan el aumento de densidad a medida que aumenta la altura de la pila.

Figura 3.7: Permeabilidad versus densidad seca (Bard y Campaña, 2004)



Además de las dificultades de medición de la permeabilidad debido a las condiciones operacionales, existen dificultades de medición en laboratorio si se utilizan permeámetros comunes, ya que debido a la baja densidad del mineral depositado en las pilas, los ensayos deben realizarse a baja densidad, lo cual puede producir errores atribuibles a las condiciones de borde en el caso de utilizar permeámetros de pared rígida. Al utilizar permeámetros de pared flexible, como celdas triaxiales, es posible evitar este problema.

Al medir la permeabilidad en laboratorio, debe intentarse reproducir las condiciones de terreno. En este estudio se han realizado ensayos de permeabilidad en laboratorio utilizando soluciones ácidas similares a las utilizadas en el proceso de lixiviación, con el objetivo de cuantificar posibles variaciones con respecto a la medición de la permeabilidad estándar con agua destilada. Para evitar el efecto de borde, los ensayos se han realizado en una celda triaxial



confeccionada especialmente para este estudio con materiales resistentes a las soluciones ácidas. Estos resultados se presentan en el Capítulo 5.0.

Por otra parte, también se debe considerar la evolución del coeficiente de permeabilidad con el grado de saturación del mineral, ya que los ensayos de laboratorio suelen realizarse sobre muestras saturadas, condición que no refleja las condiciones de operación de una pila de lixiviación, las que se asemejan más a una condición parcialmente saturada.

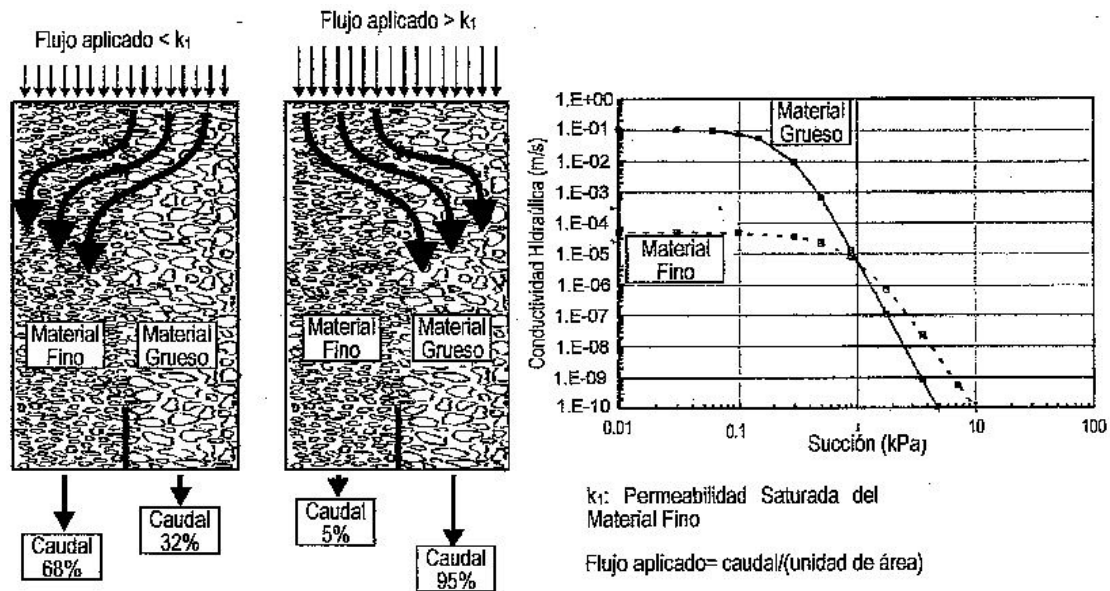
En cuanto a aspectos operacionales, debe tenerse en cuenta que suelen presentarse áreas con distintas permeabilidades, provocando flujos preferenciales que afectan tanto la operación como la recuperación de cobre. Esto puede ocurrir debido a la heterogeneidad de los minerales o como resultado de segregación del mineral durante la explotación, chancado o apilamiento.

### **3.5.2 Tasa de riego**

Este parámetro es fundamental, ya que determina, en gran medida, el tiempo de lixiviación. Debido a su importancia, siempre se estudia en laboratorios y en plantas pilotos y es afectado directamente por la permeabilidad del mineral. En un mineral con alto contenido de finos, normalmente se aplica una tasa de riego entre  $6 \text{ L/h/m}^2$  ( $1,7 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ) y  $10 \text{ L/h/m}^2$  ( $2,8 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ), mientras que uno más grueso puede tener tasas de hasta  $40 \text{ L/h/m}^2$  ( $1,1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ ) (Schmidt, 2001).

La tasa de riego también tiene influencia en los flujos preferenciales. Pruebas de irrigación experimentales han indicado que la magnitud de los flujos preferenciales depende de la capacidad de succión del material y de la tasa de riego impuesta (O'Kane Consultants Inc, 2000). La Figura 3.8 presenta resultados experimentales ilustrando esta situación.

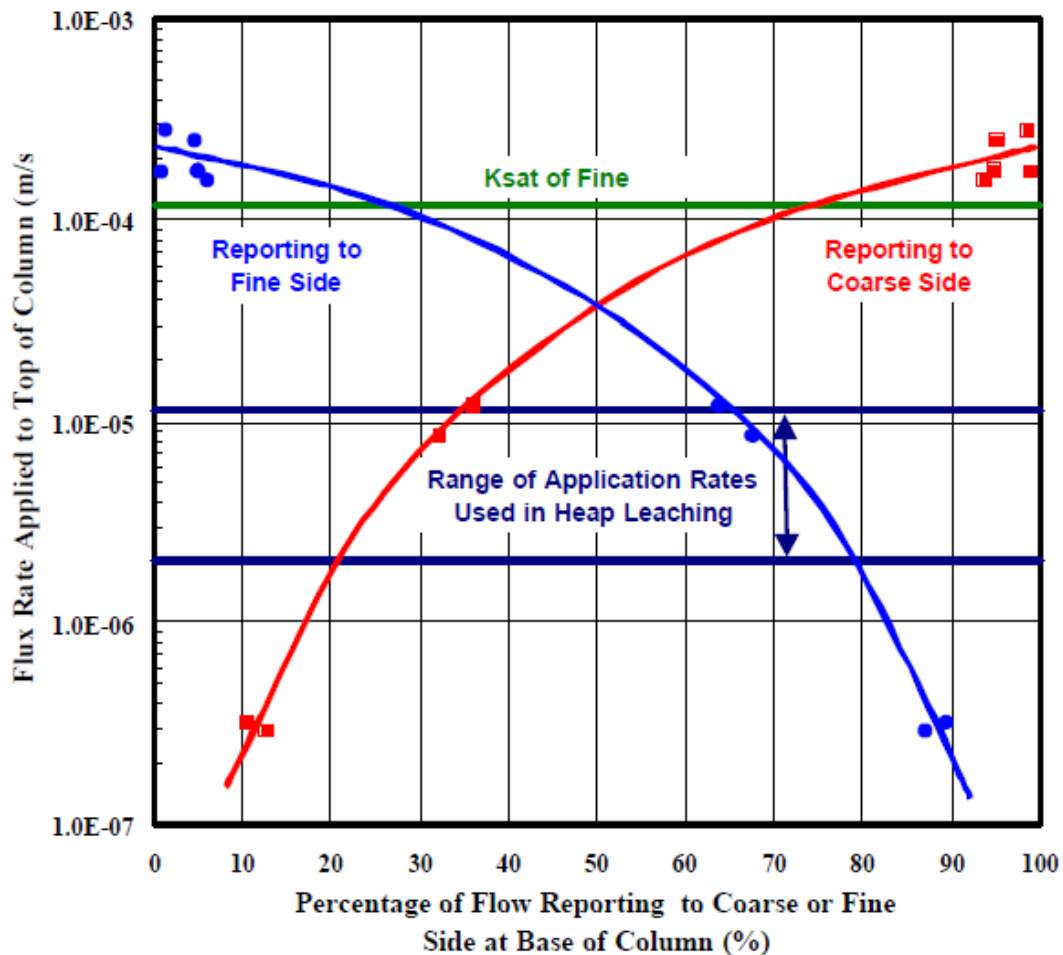
Figura 3.8: Flujo en medio parcialmente saturado, efecto de la magnitud de la tasa de irrigación



La principal conclusión que se obtiene de este estudio, es que el flujo no necesariamente fluye por el material más grueso. De esta forma, si la tasa de riego es mayor que la permeabilidad saturada de la parte más fina, se obtiene un flujo preferencial por la parte más gruesa. En el caso que la tasa de riego sea menor que la permeabilidad saturada de la parte más fina, el flujo escurre principalmente por la parte más fina. Cabe señalar que los porcentajes mostrados en esta figura son sólo referenciales, ya que dependen de la magnitud de la tasa de riego aplicada. Estos resultados, que son contra intuitivos, concuerdan con los presentados previamente por Newman (Newman, 1997), y se explican debido a que para tasas de riego menores a la permeabilidad saturada de la parte más fina, se tiene una mayor succión. Por otra parte, al aumentar la succión, la permeabilidad de la parte fina puede ser mayor que la del material grueso, como se muestra en la Figura 3.8. Este caso corresponde a las componentes segregadas estudiadas por O’Kane Consultants (O’Kane Consultants Inc., 2000), para las cuales el punto de cambio es una succión de 1 kPa.

La Figura 3.9 muestra la información del resto de los ensayos realizados por O'Kane Consultants (O'Kane Consultants Inc., 2000). En esta figura se superpone el rango de tasas de riego comúnmente utilizadas en pilas de lixiviación, a partir de lo cual se puede deducir que cerca del 75% del flujo escurre por la parte fina para este rango de tasas. Es necesario observar que este patrón de flujo es contrario a lo que se podría pensar, que sería que el flujo escurre principalmente por la parte gruesa del material.

Figura 3.9: Porcentajes del total de agua aplicada que escurre por cada una de las partes (gruesa y fina)



Una solución típica que se utiliza si se tienen recuperaciones de cobre bajas, es aumentar la tasa de riego. No obstante, esto disminuirá la recuperación de cobre,

debido a que el flujo tenderá a escurrir por la parte más gruesa. Ocurre también con normalidad, que al aplicar mayores tasas de riego la solución sale por los costados de la pila debido a la segregación, diferencias de compactación o consolidación, o diferencias importantes entre la permeabilidad horizontal y vertical (la permeabilidad horizontal suele ser mayor). Lo anterior puede derivar en fallas de taludes y disminución en la recuperación (O’Kane Consultants Inc., 2000).

A partir de lo visto en este acápite, se concluye que para determinar la tasa de riego óptima se debe tener conocimiento del rango de permeabilidades que se tendrá en la pila. Además, se ha observado que cuantificar la inevitable segregación que se produce dentro de la pila podría tener enormes beneficios. También es recomendable realizar la medición de la permeabilidad saturada de la porción más fina que se encontrará dentro de la pila. O’Kane Consultants (O’Kane Consultants Inc., 2000) recomienda aplicar tasas menores a este valor, y realizar esta aplicación en ciclos, para asegurar un flujo aceptable y lixiviar completamente la parte fina.

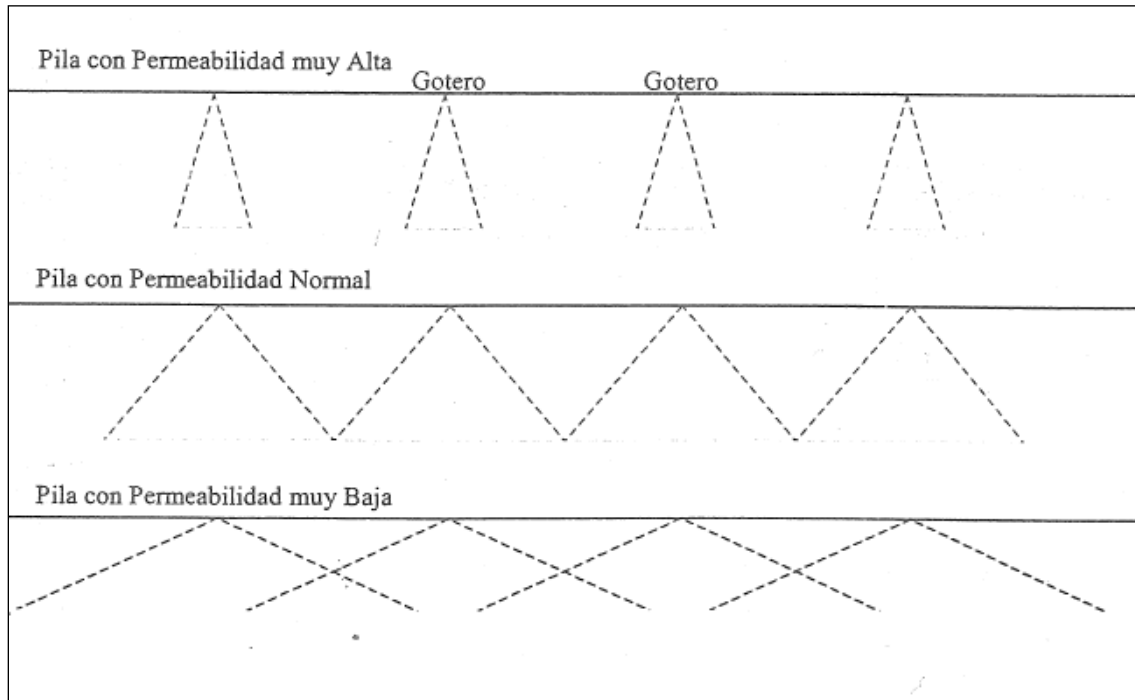
### **3.5.3 Sistemas de riego**

Al regar la pila debe tenerse en cuenta la necesidad de que la solución se distribuya uniformemente sobre su superficie. La selección del sistema de riego es un punto clave para el éxito del proceso, ya que, si se elige bien, se puede evitar que la solución se canalice en la superficie y en el lecho interno de la pila, permitiendo que por todo el mineral pase la cantidad de ácido necesaria para obtener el cobre (Schmidt, 2001).

Los goteros producen un problema típico, ya que en la parte superficial de la pila quedan sectores sin regar, conocidos como “cono invertido sin riego”. En esta zona, que queda comprendida entre gotero y gotero, en arreglo cuadrado o triangular, se produce una humectación del mineral, pero la solución lixivante no fluye, por lo que esas zonas quedan mal lixiviadas y la recuperación global de

cobre se ve afectada. Este cono depende mucho de la permeabilidad del mineral aglomerado, como se muestra en la Figura 3.10.

Figura 3.10: Conos sin riego según permeabilidad



Por otro lado, uno de los problemas que producen los aspersores es la destrucción de los glómeros en la superficie de la pila, debido al golpe continuo de las gotas sobre ellos, soltando, de esta manera, todo el material fino de los glómeros y lavándolo hacia el interior de la pila. En muchas operaciones, ese material fino produce algunas impermeabilizaciones superficiales, produciéndose una acumulación de soluciones en ella. Este hecho, con el transcurrir de los días, muchas veces va en aumento y hace necesario detener el riego.

Schmidt (Schmidt, 2001) recomienda que para materiales con contenido bajo malla ASTM #100 reducido (<15%), es posible emplear aspersores de alto flujo y gran radio, pues ellos producen gotas gruesas; pero si el material tiene un contenido bajo malla ASTM # 100 mayor a 15 %, recomienda utilizar aspersores

de menor flujo que producen gotas más finas y que cubren un área menor de riego.

Para evitar tener una mala lixiviación en la parte superior de la pila, se consideran sistemas mixtos de riego, empleando circuitos dobles, goteros y aspersores operando en forma alternada durante el ciclo de lixiviación. Minera El Tesoro es una de las que utiliza sistemas mixtos.

Además del sistema de riego, es importante tener en cuenta el efecto impermeabilizante que se produce en los glómeros con el secado, debido al efecto del ácido. O’Kane Consultants (O’Kane Consultants Inc., 2000) recomienda comenzar el riego de solución poco tiempo después de apilar el mineral (no más de 48 horas), con el fin de prevenir que se seque.

#### **3.5.4 Modalidad de riego**

La principal modalidad de riego utilizada en Chile es la de riego permanente, es decir, la pila es regada diariamente durante todo el ciclo de riego. Para minerales aglomerados de mala calidad, con mucho contenido bajo malla ASTM #100 (20% o más), Schmidt (Schmidt, 2001) recomienda emplear una modalidad de riego conocido como intermitente, que consiste en regar por un período, para luego dejar de regar por otro período no necesariamente igual y así completar todo el ciclo de lixiviación.

En la actualidad existe una planta industrial en Minera El Tesoro, cuyo mineral fue estudiado en esta investigación, que emplea esta técnica. Esta empresa implementó un sistema de riego intermitente con una modalidad de 24 horas de riego seguido por 24 horas de reposo.

#### **3.5.5 Utilización de material de cover**

Para diseñar el cover como material drenante, éste debe tener una permeabilidad adecuada que permita mantener controlado el nivel freático en la pila, evitando así

inestabilidades por saturación, permitiendo un drenaje rápido de las soluciones que ya han recorrido toda la altura de la pila. En general, se utilizan gravas limpias con un contenido de finos menor al 5% para lograr este objetivo.

Si el cover no es diseñado para que actúe como filtro, es posible que finos y arenas provenientes del mineral lleguen hasta las tuberías de drenaje. Si esto ocurre se pueden producir dos complicaciones: a) que la fracción fina pueda tapan el sistema de drenaje, y b) que aparezca luego en las piscinas, afectando el procesamiento de las soluciones. En el caso de que este material sea diseñado como filtro, los finos serán captados en la interfaz cover – mineral, creando una superficie de menor permeabilidad, la cual podría afectar en la recuperación de las soluciones y podría producir un aumento en el nivel freático que afecte la estabilidad de la pila. En muchos proyectos se tiene una presencia importante de finos y arenas en las piscinas de proceso. Para abordar este problema, el diseño del cover debe realizarse considerando sus propiedades de filtro y además, las características de estabilidad interna del mineral, según se ve en el acápite 2.6.

### **3.5.6 Tuberías de colección y drenaje**

Para un buen drenaje de la pila es necesario realizar un diseño adecuado de las tuberías que conforman el sistema de drenaje y evacuación. Para pilas de gran altura es necesario estudiar la deformación que se produce en las tuberías ante la carga del mineral y su capacidad para seguir transportando las soluciones. En este ámbito hay pocos estudios que sean concluyentes acerca del comportamiento que tendrán las tuberías sometidas a la carga del mineral.

El diseño de un adecuado sistema de drenaje y evacuación, junto a la utilización de un cover adecuado, permite mantener controlado el nivel freático al interior de la pila, a un nivel en que la estabilidad de ésta no se vea afectada y no se produzcan fallas por deslizamiento.

### **3.5.7 Sistema de apilamiento del mineral aglomerado**

El sistema de apilamiento del mineral juega un rol crucial para asegurar un buen drenaje. Se deben realizar todos los esfuerzos necesarios para construir una pila homogénea y con una capacidad de drenaje adecuada, es decir, pilas con minerales que no se encuentren compactados y libres de estratos de material segregado o cualquier otro problema que pudiera causar flujos preferenciales.

Simular el apilamiento del mineral y dejarlo apto para el riego es algo que no se puede simular en las pruebas en planta piloto, lo cual es una deficiencia importante que podría traer consecuencias al no poder simular del todo el comportamiento que tendrá el material en terreno. Esto tiene consecuencias para realizar diseños desde el punto de vista geotécnico y metalúrgico, ya que no es posible conocer la densidad, y por lo tanto, tampoco es posible estimar con certeza la permeabilidad.

La experiencia indica que para el tratamiento de minerales que se carguen a tasas inferiores a 10.000 toneladas por día, lo más conveniente es emplear el transporte del aglomerado en camiones y dejarlo sobre un equipo especial que permite disponerlo a la altura requerida, definida por el proceso metalúrgico. Tener un equipamiento totalmente mecanizado para este tamaño de planta no se justifica, ya que la inversión de capital es muy alta. Para un tratamiento de mineral sobre 15.000 toneladas por día, ya se requiere, y se justifica, un sistema mecanizado. Este tipo de sistema considera, en general, la salida del mineral aglomerado de los tambores mediante una correa transportadora y varias otras correas, para finalmente, llegar a un sistema que apila el mineral a la altura requerida. El sistema que apila el mineral, en general, es un puente montado sobre orugas que tiene una correa apiladora. También en algunas operaciones se emplean correas tipo saltamonte que finalmente rematan en una correa que tiene una estructura montada en orugas o neumáticos, que permite realizar un semicírculo y que va retrocediendo y disponiendo el material en una superficie previamente preparada.



Estos sistemas permiten un apilamiento suave del mineral y pueden minimizar tanto la compactación como la segregación del mineral.

Si las pilas son del tipo permanente, es decir, sólo se debe nivelar la superficie de la antigua pila y así construir una segunda, tercera, o las capas que sean necesarias de mineral durante la vida del proyecto. En algunas pilas, para los niveles superiores se va realizando un sistema de impermeabilización de los niveles inferiores, realizando un nuevo sistema de colección para los niveles superiores. No obstante, esto no se realiza en todas las pilas, por lo que se debe estudiar cómo se ve afectada la permeabilidad del mineral y el material de cover, con la carga producida por los nuevos niveles de mineral.

Si la pila es dinámica, es decir, se remueven los materiales lixiviados, conocidos como ripios, y se disponen en otro sector (botadero), se tienen dos opciones: mediante cargadores frontales y camiones, o un sistema totalmente mecanizado (rotopala). Para una planta de tratamiento de hasta 20.000 toneladas por día de ripios a remover, se puede efectuar esta operación con cargadores y camiones. Para mayor capacidad de tratamiento diario de mineral, se requiere un sistema mecanizado.

O'Kane Consultants Inc. (O'Kane Consultants Inc., 2000) establece que en toda pila se desarrollarán inevitablemente, estratos de material fino y grueso, ya que el proceso natural de colocación los segrega, a pesar de que el mineral haya sido aglomerado previamente. No obstante, en los minerales que han sido aglomerados, la segregación será menor. Bajo estas condiciones, la solución escurre, principalmente, por el estrato más conductivo, con la posibilidad de que queden ciertas áreas dentro de la pila sin lixivarse. La trayectoria preferencial no depende totalmente de las propiedades físicas de cada estrato, sino que también, del estado de tensiones y el grado de saturación resultante, y por lo tanto, de la tasa de riego aplicada, pudiendo ser el estrato fino o el grueso, la trayectoria preferencial, como se ve en el acápite 3.5.2.

### **3.5.8 Altura de la pila**

Las pilas estáticas se construyen por capas o niveles. Al finalizar la lixiviación, se procede a cargar el siguiente nivel.

Para dar cifras de alturas de pila comunes, primero debe diferenciarse entre pilas ROM y pilas de mineral chancado. Las pilas ROM normalmente tienen grandes alturas, pudiendo alcanzar hoy en días hasta 200 m, y se construyen en niveles que normalmente no sobrepasan los 40 m, sin sistema de impermeabilización entre niveles. El material ROM está compuesto por un amplio rango de tamaños, desde finos hasta clastos de dimensiones métricas. Por lo tanto, los problemas de permeabilidad de la pila se suelen limitar a canalizaciones y flujos preferenciales.

En las pilas de mineral chancado, en cambio, para realizar la selección de la altura del nivel se suele tener en cuenta las características físico químicas del mineral. Schmidt recomienda (Schmidt, 2001) que si el mineral tiene un alto consumo de ácido, sobre 25 Kg/tonelada de mineral, la altura debe ser inferior a 4 m. También recomienda que si se tiene un alto contenido de material bajo malla ASTM # 100, sobre un 18%, tampoco debería superarse los 4m. Para minerales de mejor calidad desde el punto de vista metalúrgico, se pueden seleccionar alturas sobre 6 m. Normalmente la altura de los niveles para estas pilas varía entre 2,5 m y 10,0 m.

El análisis que hoy día se realiza suele no incluir variables geotécnicas, excepto por la recomendación realizada por Schimdt (Schmidt, 2001) acerca de la altura del nivel dependiendo de su contenido bajo malla ASTM # 100. La variable geotécnica relevante para definir la altura de la pila, de sus respectivos niveles, y la decisión de colocar o no sistemas de impermeabilización, colección y drenaje intermedios, es la permeabilidad del mineral. Debe tenerse en cuenta que a mayor altura, la compactación aumenta debido al aumento en el nivel de tensiones y a la

densificación del mineral, lo que podría afectar fuertemente en la permeabilidad del mineral en la zona inferior de la pila.

### **3.5.9 Tiempo de lixiviación**

El tiempo de lixiviación es un parámetro operacional muy importante para el proceso hidrometalúrgico del cobre, y depende de muchas de las variables anteriormente descritas. De esta forma, si se fija una recuperación objetivo, el tiempo de lixiviación dependerá fuertemente de las siguientes variables:

- Granulometría del mineral;
- Altura de apilamiento;
- Tasa de riego;
- Ácido en la aglomeración;
- Permeabilidad de la pila; y
- Concentración de ácido en las soluciones de lixiviación.

Schmidt (Schmidt, 2001) dice respecto a este parámetro, que siempre un mayor tiempo de procesamiento conlleva una mayor inversión. Por lo tanto, muchas veces sería mejor tener una mayor inversión en chancado, obteniéndose una granulometría más pequeña y de esta manera tener menores tiempos de lixiviación. No obstante, se debe aclarar que Schmidt está asumiendo que al disminuir el tamaño de partículas, la permeabilidad del mineral será suficiente para que no se presenten problemas en la extracción de la solución rica, lo cual no será cierto a partir de un cierto tamaño de partícula, dependiendo también de otras variables operacionales. Esto es una muestra más de la importancia que tiene la permeabilidad del mineral en el diseño de pilas de lixiviación, y la importancia de incorporar aspectos geotécnicos en el diseño.

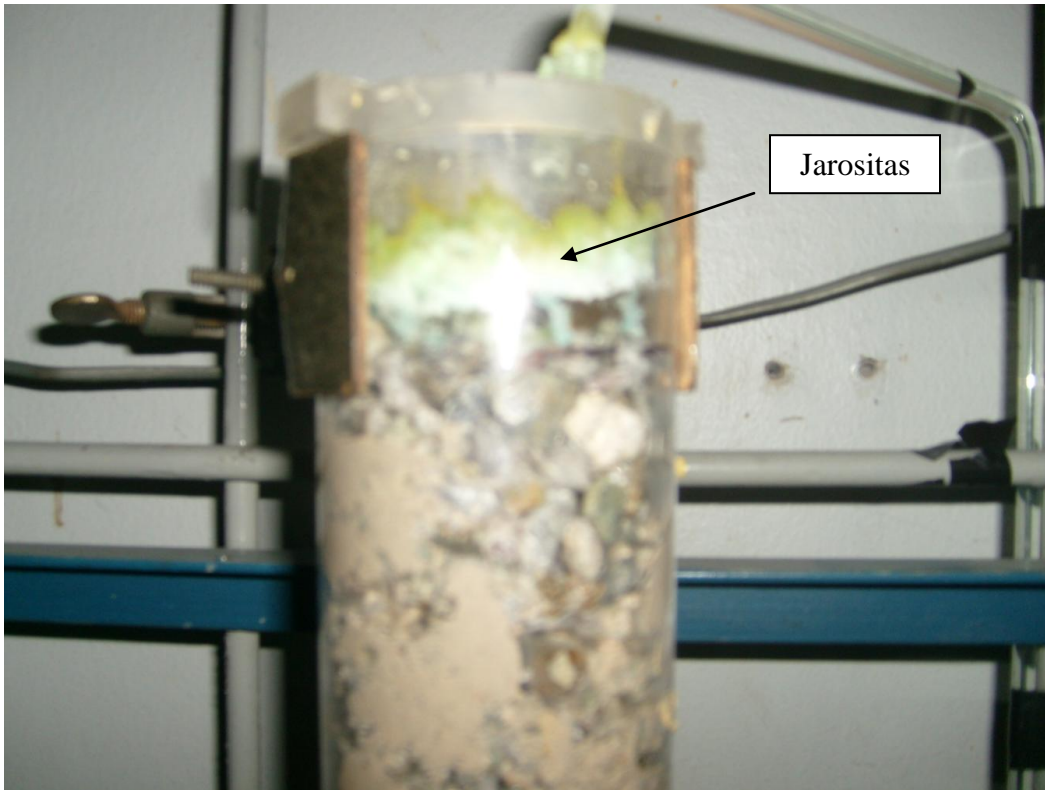
Los tiempos de lixiviación normalmente varían entre 20 y 80 días (Schmidt, 2001).

### **3.5.10 Hierro presente en el mineral**

Los minerales de cobre sulfurado pueden ser lixiviados mediante la oxidación de éstos, lo cual se logra a través de microorganismos y la acción del ión férrico ( $\text{Fe}^{+3}$ ), el que puede ser obtenido de la ganga o de minerales como la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), etc (Barrett et al., 1993a; Barrett et al., 1993b), mediante la disolución por medio de una solución ácida. Por lo tanto, en el proceso de lixiviación se tendrá, generalmente, variadas especies de hierro en solución, que interactúan formando complejos que conducen a la precipitación del ión férrico.

Lo anterior indica que el ión férrico juega un papel preponderante en el proceso de lixiviación. Es aún más importante si se tiene en cuenta que la interacción de las distintas especies de hierro en solución conducirá a la precipitación del ión férrico, es decir, a la formación de sólidos en la solución, lo cuál puede ser un grave problema si ocurre en forma descontrolada (Paipa, 2004). Distintos precipitados de ión férrico reportados en equipos de lixiviación industriales han sido registrados, tales como hidróxido ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ), óxido ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), goetita ( $\text{FeOOH}$ ) y jarositas ( $\text{MFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ). El más común según los metalurgistas, corresponde a las jarositas, cuya formación depende de los minerales, las soluciones utilizadas y la cantidad de oxígeno presente. La Figura 3.11 muestra jarositas formadas en un ensayo de columna realizado en investigaciones del departamento de Química y Biotecnología de la Universidad de Chile.

Figura 3.11: Jarositas formadas en ensayos de columna



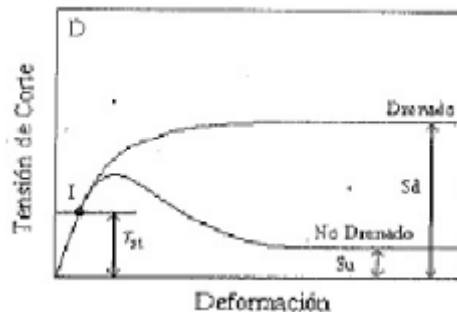
El fenómeno de precipitación de ión férrico y formación de sólidos en la solución podría tener influencia en la permeabilidad de los minerales. Esta relación no se estudió en detalle en esta investigación ni existen publicaciones relativas a este tema de conocimiento del autor. Sin embargo, al realizar ensayos de permeabilidad con distintas soluciones (soluciones ácidas compuestas de agua y ácido sulfúrico, y agua destilada) y minerales, indirectamente los resultados permiten realizar algunas conclusiones al respecto, lo cual se ve en detalle en los Capítulos 5.0 y 6.0. No obstante, este es un fenómeno que merece mayor estudio con investigaciones específicas al respecto.

### **3.6 Consecuencias de un mal drenaje**

La consecuencia más lógica de un mal drenaje de la pila es la imposibilidad de recuperar el cobre, no obstante, también puede causar problemas de estabilidad mecánica estática y sísmica.

Dentro de este ítem, se debe considerar en el diseño de pilas de lixiviación la posibilidad de que se desarrollen fallas de flujo dentro de éstas, fenómeno que puede ocurrir en pilas con baja permeabilidad. Las fallas de flujo corresponden a fallas debido a la pérdida súbita de resistencia al corte al pasar de una condición de carga drenada a una condición de carga no drenada, provocado por un repentino incremento en las presiones de poros. Las condiciones que deben tenerse para la ocurrencia de falla de flujo son: contenido de arcillas considerable (baja permeabilidad); baja densidad; e incremento de las cargas solicitantes. Este comportamiento puede producirse por efecto del peso propio, sin la necesidad de que existan solicitaciones sísmicas. La Figura 3.12 presenta en forma esquemática la pérdida de resistencia al corte en un material de baja densidad con un comportamiento no drenado, debido al incremento en las presiones de poros (Verdugo, 1995). Deslizamientos asociados a falla de flujo han sido descritos por el profesor Morgenstern en botaderos de minas de carbón en Canadá (Dawson, Morgenstern and Stokes, 1998).

**Figura 3.12: Pérdida de resistencia al corte por incremento de las presiones de poros**



## **4 PROGRAMA DE ENSAYOS**

### **4.1 Introducción**

En este capítulo se presenta la campaña de ensayos de laboratorio. En el acápite 4.2 se realiza una descripción de los suelos utilizados, los cuales corresponden a minerales de cobre provenientes de tres minas diferentes. Además, se explican las distintas condiciones en las que se encontraban cada uno de estos suelos antes de realizar los ensayos. Principalmente, se explica si las muestras han sido sometidas previamente a aglomeración o corresponden a mineral fresco.

En el acápite 4.3 se describe en detalle el programa de ensayos y se realiza una descripción de los equipos utilizados. Este programa consta, principalmente, de ensayos de permeabilidad, algunos de ellos realizados con soluciones ácidas compuestas de agua destilada y ácido sulfúrico. Estos ensayos fueron ejecutados en un permeámetro de pared flexible, el cual fue confeccionado específicamente para este estudio con materiales especiales resistentes a la acción del ácido sulfúrico. Este equipo se describe en el acápite 4.4 junto al detalle del resto de los equipos utilizados.

Finalmente, en el acápite 4.5 se realiza una descripción de las metodologías utilizadas en cada uno de los ensayos. Esta explicación es fundamental para comprender este estudio, ya que los ensayos de permeabilidad no fueron realizados con las metodologías habituales debido a dos motivos principales: a) realizar mejoras en las metodologías de ensayos al utilizar este tipo de materiales, b) los ensayos realizados en esta investigación sobrepasan el alcance de las técnicas tradicionales.

### **4.2 Suelos utilizados**

En esta investigación se realizaron ensayos en muestras de tres suelos diferentes, correspondientes a minerales de cobre provenientes de las minas Spence,

Collahuasi y El Tesoro. Las muestras fueron facilitadas por Minera Spence S.A., Compañía Minera doña Inés de Collahuasi y por la empresa Terral S.A., en el caso de los suelos de El Tesoro. Cada uno de estos materiales fue entregado en condiciones particulares al momento de iniciar esta investigación, las que se describen en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1: Condiciones iniciales de los suelos utilizados**

<b>Proveniencia (Simbología<sup>1</sup>)</b>	<b>Condiciones iniciales</b>
Spence (S)	Ripios chancados lixiviados de forma incompleta. Debido a problemas de estancamiento de soluciones en las pilas <sup>2</sup> , había sido posible obtener sólo el 40% del cobre contenido en el mineral.
Collahuasi (C)	Minerales de cobre chancados, aglomerados con solución ácida, pero sin ser sometidos a proceso de riego
El Tesoro (ET)	Mineral ROM <sup>3</sup> . En este caso, los minerales fueron entregados en tres condiciones distintas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Minerales aglomerados con solución ácida, pero sin ser sometidos a proceso de riego;</li> <li>• Minerales aglomerados con la misma solución ácida que el caso anterior, pero con adición de hipoclorito (utilizado para mejorar la oxidación de los minerales de cobre y desactivar la capacidad intercambiadora iónica de las arcillas); estos minerales tampoco han sido sometidos a proceso de riego; y</li> <li>• Mineral fresco sin tratamiento previo (ni aglomerado ni riego), dividido en tamaños para confección de granulometrías especiales.</li> </ul>

<sup>1</sup> Esta simbología corresponde a la utilizada en el Capítulo 5.0 para describir las distintas muestras ensayadas

<sup>2</sup> Información proporcionada por Spence

<sup>3</sup> Run off mine, mineral que no es sometido al proceso de chancado antes de cargarlo en las pilas

### **4.3 Ensayos realizados**

Los tres materiales descritos en el acápite 4.2, fueron sometidos a un programa de ensayos que incluye ensayos de permeabilidad con agua destilada y otros



realizados con soluciones ácidas, en probetas confeccionadas a densidades similares. Se realizaron análisis granulométricos incluyendo granulometrías post ensayo y ensayos para determinar los límites de Atterberg, en los cuales se evaluó la influencia del ácido y el secado en horno en la plasticidad de este tipo de suelos. La Tabla 4.2 presenta los ensayos realizados en todos los suelos estudiados.

**Tabla 4.2: Ensayos realizados**

<b>Tipo de ensayo</b>	<b>Ensayos realizados</b>
Ensayos mineralógicos	1. Ensayos de difracción de rayos X.
Análisis granulométricos	1. Análisis granulométricos para partículas con diámetros mayores a 0,074 mm, y; 2. Análisis granulométricos incluyendo partículas con diámetros menores a 0,074 mm, mediante la técnica de difracción de rayos láser.
Límites de Atterberg	1. Ensayos realizados utilizando agua destilada y secado al horno para la preparación y ejecución de los ensayos; 2. Ensayos realizados utilizando agua destilada y secado al aire para la preparación y ejecución de los ensayos; y 3. Ensayos realizados utilizando solución ácida y secado al horno para la preparación y ejecución de los ensayos.
Ensayos de permeabilidad en pared flexible	1. Ensayos realizados con agua destilada; 2. Ensayos realizados con soluciones ácidas obtenidas de la mezcla de ácido sulfúrico y agua destilada.

La Tabla 4.3 presenta las diferentes condiciones con las que fueron realizados los ensayos de permeabilidad en los distintos suelos utilizados. Cabe notar que para cada muestra se realizaron varias mediciones de permeabilidad. Entre las

variables se ha incluido el pH de la solución utilizada al comienzo de los ensayos y si el ensayo fue realizado con recirculación. En los casos en que se recirculó la muestra, el pH no es constante en los distintos ensayos. En esta tabla también se observa si se realizaron ensayos con agua destilada y con granulometrías fabricadas. Los detalles de cada probeta ensayada se presentan en el Capítulo 5.0.

Tabla 4.3: Ensayos de permeabilidad

Material	Condiciones de Ensayo									
	Ph								Ensayos con granulometrías fabricadas	
	Variable	0,53		2,00		Agua				
	Utilización de agua									
	Sí	Sí	No	Sí	No	-				
	Recirculación									
	Sí	No	Sí		Sí	Sí	No	No		
	<b>Spence</b>	X		X	X	X	X			
<b>Collahuasi</b>		X		X		X				
<b>El Tesoro</b>							X	X	X	

#### 4.4 Equipos utilizados

##### 4.4.1 Ensayos mineralógicos

Para conocer la mineralogía de los suelos estudiados se realizaron ensayos de difracción de rayos X en el Laboratorio de Cristalografía del Departamento de Física de la Universidad de Chile, tanto en muestras en su condición inicial como en muestras previamente sometidas a ensayos de permeabilidad. El equipo

utilizado para la medición corresponde a un difractómetro de polvo cristalino SIEMENS D5000.

#### 4.4.2 Análisis granulométricos

Se realizaron ensayos granulométricos para partículas con diámetros mayores a 0,074 mm y ensayos incluyendo partículas con diámetros menores a 0,074 mm. Los equipos utilizados para cada caso se detallan a continuación.

##### 4.4.2.1 Análisis granulométricos para partículas con diámetros mayores a 0,074 mm

Estos análisis granulométricos se realizaron en el Laboratorio de Sólidos y Medios Particulados de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, de acuerdo a la metodología descrita en 3.4.2.1. Los tamices utilizados se detallan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Tamices utilizados

Tamiz ASTM	Abertura [mm]
1½"	37,5
1"	25,0
¾"	19,0
½"	12,5
⅜"	9,50
#4	4,75
#8	2,36
#10	2,00
#30	0,600
#40	0,425
#50	0,300
#100	0,150
#200	0,074

#### 4.4.2.2 Análisis granulométricos incluyendo partículas con diámetros menores a 0,074 mm

En esta investigación, los análisis granulométricos para la parte fina de las muestras se realizaron mediante un método alternativo al hidrómetro, el cual utiliza un equipo avanzado denominado Mastersizer 2000. Este método utiliza la técnica de difracción de rayos láser para realizar el análisis granulométrico. Su principal ventaja es la rapidez para realizar estos análisis, lo que transforma esta medición en un trabajo simple y rutinario. La medición con este equipo tiene una precisión de  $\pm 1\%$ , y es posible medir tamaños de partículas entre  $0,02 \mu\text{m}$  y  $2000\mu\text{m}$ . La Figura 4.1 presenta una fotografía del equipo utilizado.

**Figura 4.1: Equipo para análisis granulométrico**



Los ensayos fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Sedimentología del Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

#### 4.4.3 Límites de Atterberg

Se realizaron ensayos para la medición de los límites de Atterberg de todos los suelos considerados en este estudio, los cuales fueron realizados en las tres condiciones descritas en la Tabla 4.2. Los equipos utilizados en todos los ensayos, son los correspondientes a los utilizados en la norma ASTM D 4318 – 98, y los ensayos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Sólidos y Medios Particulados de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

#### **4.4.4 Ensayos de permeabilidad en pared flexible**

Como se muestra en la Tabla 4.2, se realizaron ensayos con agua destilada y con soluciones ácidas compuestas de ácido sulfúrico y agua destilada. Todos estos ensayos fueron realizados en un permeámetro de carga constante y pared flexible, el cual fue confeccionado con materiales resistentes a la acción de soluciones ácidas. Las soluciones ácidas fueron confeccionadas con agua destilada y con distintas concentraciones de ácido sulfúrico, dependiendo del objetivo del ensayo realizado. En el Capítulo 5.0 se explica con más detalle la elección de las concentraciones utilizadas.

El ensayo en pared flexible tiene ventajas respecto al ensayo en pared rígida; las principales son: a) eliminar el efecto de filtración en el contacto suelo-pared que se produce en los permeámetros de pared rígida; b) controlar el nivel de esfuerzos a través de la aplicación de presiones de cámara, y; c) permitir la aplicación de una contrapresión para mejorar la saturación de la muestra, no obstante, en este caso esto no fue realizado debido a la dificultad de medir la contrapresión por el efecto perjudicial del ácido sulfúrico en los sensores de presión.

El permeámetro utilizado está constituido por tres componentes principales:

- Celda triaxial;
- Sistema de aplicación de carga hidráulica; y
- Sistema de aplicación de presión de cámara.

A continuación se presenta una descripción de cada una de estas componentes.

##### **4.4.4.1 Celda triaxial**

El permeámetro utilizado posee una celda triaxial para ensayar probetas cilíndricas de aproximadamente 15 cm de diámetro y 30 cm de alto. En la Figura 4.2, en la cual se presenta una probeta luego de ser ensayada, se pueden

observar los materiales con los que está construida esta celda, con el fin de poder utilizarse con soluciones ácidas. Para los caps y las válvulas, se utilizó acero inoxidable, mientras que para la base, se utilizó polipropileno. En el resto de los componentes del permeámetro no fue necesario utilizar materiales resistentes a la acción del ácido sulfúrico, debido a que éstos no están en contacto directo con la solución. Se utilizó geotextiles entre la probeta y los caps.

**Figura 4.2: Permeámetro y muestra ensayada**

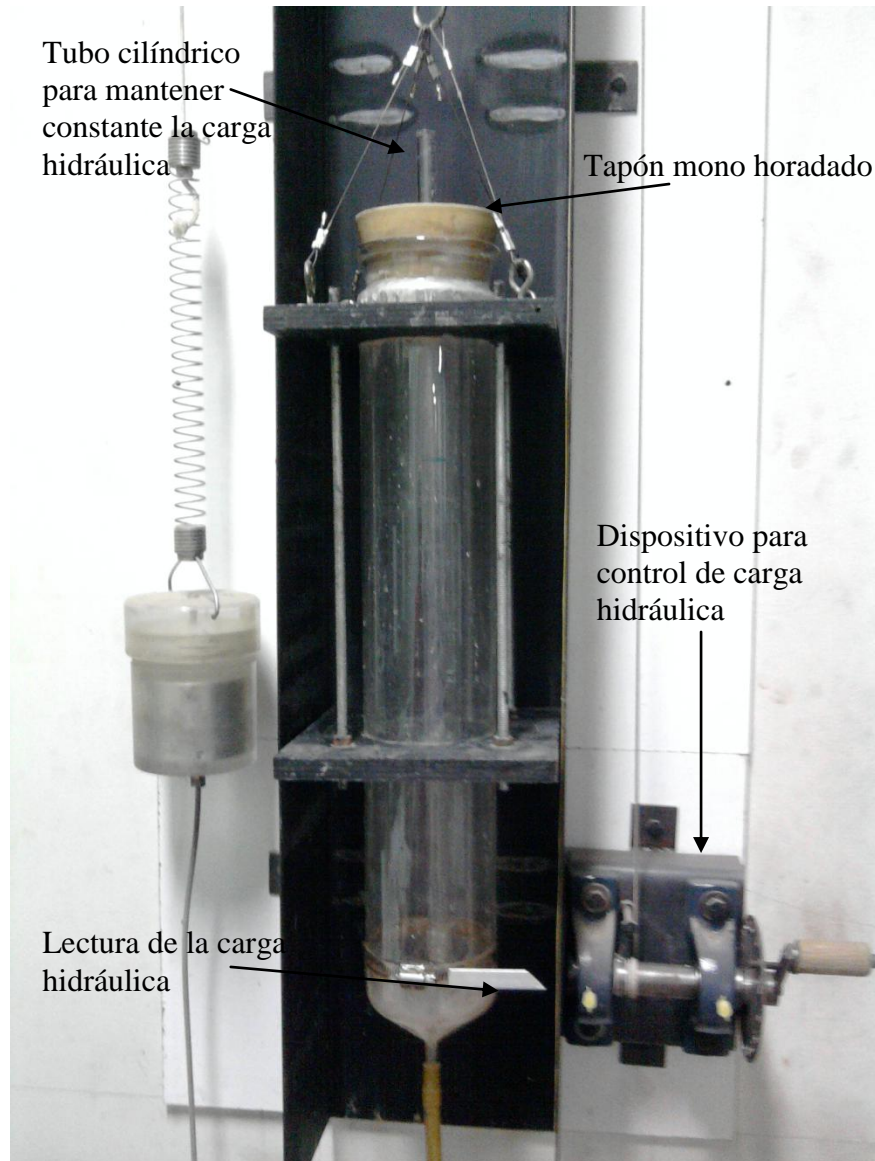


#### 4.4.4.2 Sistema de aplicación de carga hidráulica

Para la aplicación de la carga hidráulica, se confeccionó un sistema en el cual el contenedor de la solución no necesita ser alimentado constantemente durante la ejecución del ensayo de permeabilidad, para mantener constante la carga hidráulica. Esto se logra con un tubo cilíndrico para contener la solución, el cual tiene aberturas en la parte inferior y en la parte superior. En la parte inferior se conecta la manguera por la que fluye la solución hacia la probeta, mientras que en la parte superior, se coloca un tapón monohoradado. Por el orificio del tapón se inserta un tubo cilíndrico abierto tanto superior como inferiormente, el cual queda al interior del tubo que contiene la solución, generando presión atmosférica por debajo del nivel del líquido.

De esta forma, se mantiene la carga constante sin la necesidad de alimentar el contenedor durante la ejecución del ensayo. Este sistema se presenta en la Figura 4.3.

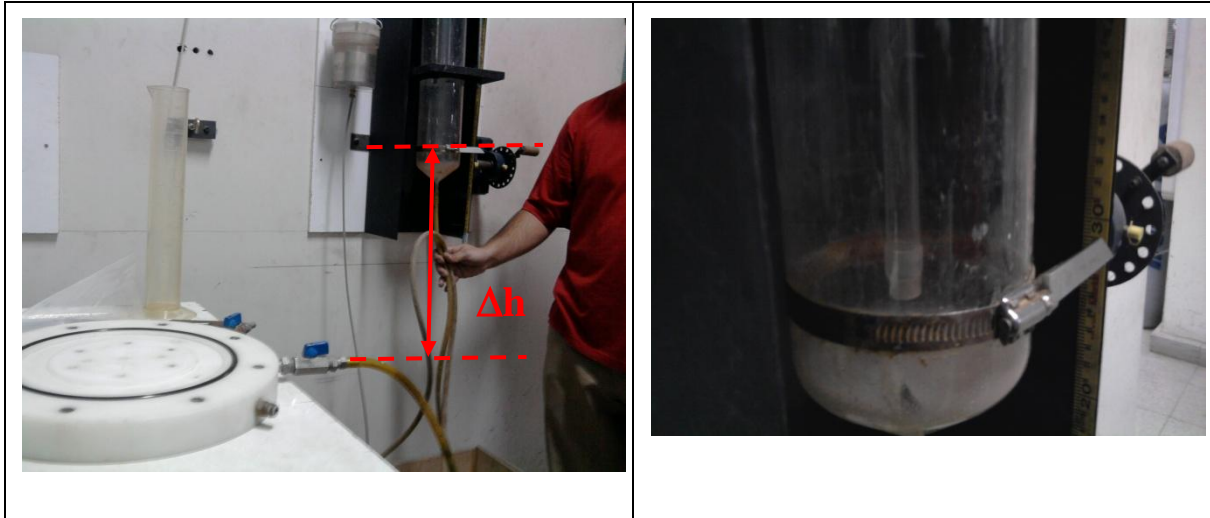
**Figura 4.3: Sistema para mantención de carga constante**



La carga hidráulica corresponde a la diferencia de altura que existe entre la salida de la solución en la celda triaxial y la parte inferior del tubo interior, la cual se encuentra a presión atmosférica. La Figura 4.4 muestra como se realizan las lecturas de la carga hidráulica. Antes de comenzar los ensayos, se realizó una nivelación del sistema.

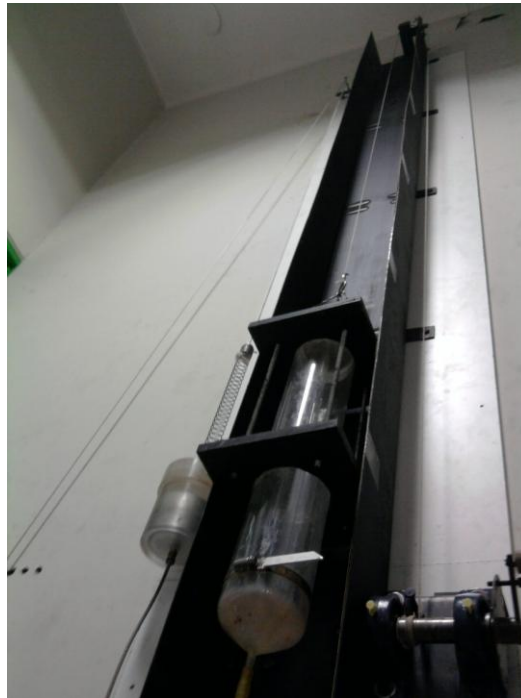


**Figura 4.4: Medición de carga hidráulica**



Este sistema permite medir permeabilidad hasta un gradiente igual a 20. La precisión de la medición del gradiente hidráulico es de 0,01. El sistema completo se muestra en la Figura 4.5.

**Figura 4.5: Sistema de aplicación de carga**



#### 4.4.4.3 Sistema de aplicación de la presión de cámara

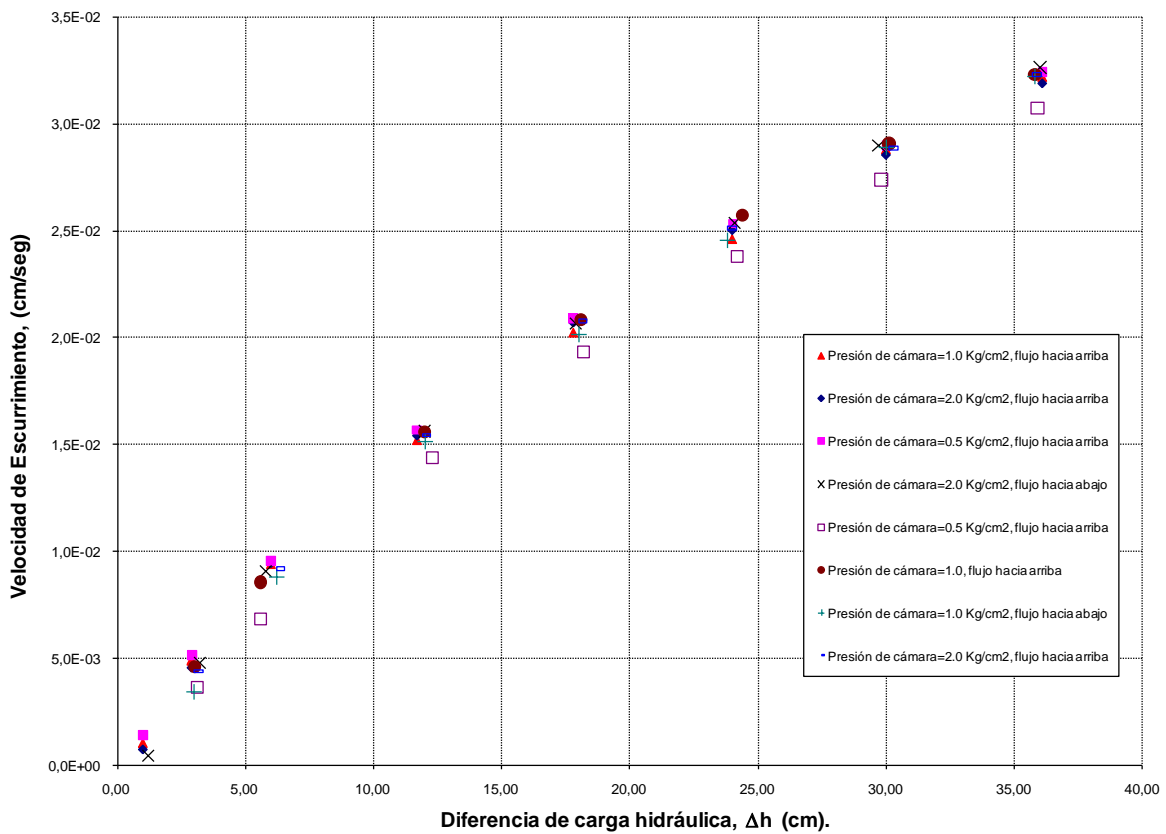
La celda triaxial, como se mencionó anteriormente, permite la aplicación de presión de cámara, para lo cual se utilizó un contenedor relleno con mercurio, para aplicar diferentes valores de presión de cámara. Para medir la presión aplicada, se utilizó un sensor de presión. Este sistema de aplicación de presión de cámara se muestra en la Figura 4.6.

**Figura 4.6: Aplicación de presión de cámara**



Para conocer los valores de permeabilidad máxima que es posible medir con este equipo, se realizaron mediciones de la velocidad de escurrimiento para distintos valores de carga hidráulica, sin la presencia de una muestra de suelo. En lugar de la muestra de suelo, se colocó un tubo hueco. Se realizaron mediciones para distintos valores de presión de cámara y para flujo hacia arriba y hacia abajo. Estos resultados, se presentan en la Figura 4.7.

**Figura 4.7: Medición del equipo**



De la Figura 4.7 se desprende que las mediciones realizadas en el equipo son precisas, ya que se obtuvieron valores muy similares para todos los casos medidos. Por otra parte, a partir de ésta es posible observar que la máxima permeabilidad que se podrá medir en este aparato es de aproximadamente  $2,5 \times 10^{-2}$  cm/s.

## **4.5 Metodologías**

### **4.5.1 Ensayos mineralógicos**

Para realizar los ensayos de difracción de rayos X se tomaron muestras representativas de cada una de las muestras a ensayar; éstas fueron trituradas con un mortero para conseguir un polvo policristalino, ensayando aquella parte que pasa por la malla ASTM #200. El chancado con el mortero tiene como fin lograr mayor representatividad en el ensayo.

Posteriormente, una vez que se obtuvieron muestras representativas del material, se sometieron a la acción de rayos X en el difractómetro, y se obtuvieron los difractogramas para cada una de ellas.

Finalmente, cada uno de los difractogramas es comparado con la base de datos que posee el Laboratorio de Cristalografía del Departamento de Física de la Universidad de Chile, obteniéndose así, los minerales que se encuentran en las muestras.

Los análisis realizados fueron sólo cualitativos, debido a que los análisis cuantitativos necesitan de amplia experiencia en los tipos de cristales que se están estudiando.

### **4.5.2 Análisis granulométricos**

#### **4.5.2.1 Análisis granulométricos para partículas con diámetros mayores a 0,074 mm**

En las muestras de suelo que contienen ácido se produce una fuerte aglomeración de sus partículas al secarlas al horno. Esto afecta directamente la ejecución del análisis granulométrico, ya que para separar las partículas se requiere un lavado profundo de toda la muestra. Además de esta dificultad, existe el riesgo de producir rotura de partículas, debido a que la acción continua de soluciones ácidas puede debilitar la resistencia mecánica de las mismas. Por lo anterior, para

realizar los análisis granulométricos de esta investigación se adaptó una metodología con el fin de disminuir los efectos negativos de los problemas descritos. A continuación se describe, en forma secuencial, la metodología definida.

- Se toma una muestra de a lo menos 5,0 kg. En el caso de los análisis granulométricos posteriores al ensayo de permeabilidad, la muestra corresponde a toda la probeta.
- Se divide la muestra en dos partes aproximadamente iguales. En los casos en que la muestra no ha sido ensayada, se realiza cuarteo. En las muestras que han sido ensayadas, se divide la probeta con un corte longitudinal, para lograr una buena representatividad de ambas partes.
- Una de las partes de la muestra es pesada, luego secada al horno, a una temperatura de 50°C, y luego se calcula la humedad.
- La otra parte de la muestra es pesada, denominándola  $A$ . A través de la humedad de la muestra secada al horno, se obtiene el peso seco de ésta, denominado  $A'$ . Luego se lava la totalidad de esta muestra para eliminar los finos.
- Luego de terminar el lavado de finos, se seca la muestra en horno a una temperatura de 50°C. Una vez finalizado el secado, se pesa la muestra, denominando  $B$  a este valor. El peso seco de los finos se obtiene por diferencia entre  $A'$  y  $B$ .
- Se realiza el tamizado de la muestra sin finos, utilizando el juego de tamices presentado en la Tabla 4.4. Este tamizado debe ser realizado con la precaución de no producir grandes impactos en las partículas que pudiesen causar rotura de las mismas.

Este procedimiento mejora las técnicas convencionales debido a que se supera el problema del aglomerado producido por efecto del ácido y el secado al horno. Además, el secado al horno de las partículas gruesas que serán tamizadas se realiza a una baja temperatura para evitar rotura de las mismas. No obstante, para que sea válido se debe realizar lavado de finos de una gran cantidad de material, demorando la ejecución del ensayo.

#### 4.5.2.2 Análisis granulométricos incluyendo partículas con diámetros menores a 0,074 mm

Los análisis granulométricos de las partículas más finas fueron realizados mediante la técnica de difracción láser, comúnmente aplicada para este tipo de análisis. En la difracción láser, el patrón de dispersión obtenido de la iluminación de partículas dispersas con un haz de luz láser, contiene información acerca del tamaño de la partícula y la granulometría.

La interacción entre partículas y luz, depende principalmente del tamaño de la partícula, la forma, la rugosidad de la superficie, e índices de refracción del material y del medio de dispersión. Para un material específico, el patrón de dispersión de luz láser de una partícula es único para su tamaño. A través de la deconvolución del patrón de dispersión de la muestra con un modelo óptico, se obtiene la distribución granulométrica.

La granulometría puede ser estimada para un amplio rango de tamaños por este método, aproximadamente de 0,02  $\mu\text{m}$  hasta 2000  $\mu\text{m}$ , para partículas dispersas secas, suspendidas en un medio acuoso.

Este tipo de ensayos demora aproximadamente 5 min por muestra y su precisión depende, en gran medida, del uso de un defloculante adecuado, y de la obtención de una muestra representativa.

### **4.5.3 Límites de Atterberg**

Los ensayos de límites de Atterberg fueron realizados según la norma ASTM D 4318-98, con la salvedad ya mencionada de la ejecución para tres condiciones distintas; las muestras para estos ensayos fueron preparadas mediante el método seco incluido en la norma. Las tres condiciones a las que se realizaron los ensayos son las siguientes:

- Ensayos utilizando agua destilada y secado al horno para la preparación y la ejecución del ensayo.
- Ensayos utilizando agua destilada para la preparación y la ejecución del ensayo, y secado al aire para la preparación. Para la humedad, las muestras fueron secadas en horno a 50°C.
- Ensayos utilizando solución ácida y secado al horno, para la preparación y la ejecución del ensayo.

Las soluciones ácidas utilizadas en estos ensayos fueron preparadas con agua destilada y ácido sulfúrico, mezcladas de tal forma que se lograra una solución de pH = 2,0, mientras que el secado al horno se realizó a 100°C.

Los límites líquidos fueron determinados por el método de varios puntos. Cabe notar que para la preparación de las muestras, éstas fueron dejadas en cámara húmeda por lo menos 24 horas, con la humedad necesaria para obtener, aproximadamente, 15 golpes, a diferencia de lo que indica la norma, la cual recomienda 25. Luego, el secado se fue realizando con la ayuda de un ventilador, pero mezclando el suelo en todo momento con una espátula. Todo este procedimiento tuvo como objetivo tener una muestra con humedad lo más homogénea posible.

#### **4.5.4 Ensayos de permeabilidad en pared flexible**

A continuación se describe el proceso, en orden secuencial, de todas las tareas que se realizaron para llevar a cabo los ensayos de permeabilidad; éstas son: preparación de la muestra, aplicación de presión de cámara, saturación y medición de la permeabilidad.

##### **4.5.4.1 Preparación de la muestra**

Todas las muestras ensayadas en esta investigación corresponden a muestras remoldeadas. Lo primero que se realizó antes de comenzar el ensayo, fue definir la densidad a la cual se confeccionaría la muestra. Este valor sólo fue estimado, ya que al aplicar el confinamiento, la densidad cambiaría.

En todos los suelos estudiados, la primera muestra se confeccionó intentando lograr una densidad cercana a la mínima, mientras que para el resto de las probetas se depositó la misma cantidad de material en siete capas, para tener una densidad uniforme. Este método dio buen resultado, ya que se lograron densidades similares para todas las muestras.

También se confeccionaron muestras a densidades mayores para estudiar el efecto de la densidad; en estos casos se compactó una probeta aplicando gran energía para lograr una muestra con alto grado de compactación. Luego, el resto de las probetas se ensayaron estimando cantidades de material entre la probeta más suelta y la más densa.

No se realizaron ensayos de compactación debido a que no se contó con la cantidad de material suficiente. Todas las muestras fueron confeccionadas con la humedad que poseían en el momento del ensayo.

Las probetas fueron confeccionadas sobre el cap inferior de la celda triaxial. Una vez que la probeta ya había sido preparada, se cerró la celda y se llenó con agua. Al finalizar, ya es posible comenzar la aplicación de presión de cámara.



#### 4.5.4.2 Aplicación de presión de cámara

Todos los ensayos fueron realizados a  $1 \text{ kg/cm}^2$  de presión de cámara efectiva. Esta presión fue aplicada en incrementos de aproximadamente  $0,3 \text{ kg/cm}^2$ , lo cual es necesario debido a que el sistema de aplicación de presión de cámara no es estable ante los cambios volumétricos de la probeta, ya que el volumen de mercurio en el contenedor disminuye producto de la contracción de la probeta.

#### 4.5.4.3 Saturación de la muestra

Una vez estabilizada la presión de cámara, comienza el proceso de saturación. Para esto, se tuvo especial cuidado de realizarlo lentamente, asegurando una mejor saturación de la probeta, ya que no se aplicaría contrapresión. Es importante destacar que la saturación, al igual que la aplicación de la carga hidráulica, fue realizada mediante flujo desde abajo hacia arriba de la probeta, lo cual mejora la saturación por efecto de la capilaridad, y disminuye la posibilidad de crear canales preferenciales.

La saturación se realizó con el mismo sistema de aplicación de carga, comenzando con 3 cm de diferencia entre la carga hidráulica del sistema de aplicación y la válvula de ingreso de la probeta, lo cual correspondería a un gradiente de 0,1 en condición saturada. Luego se esperó hasta que el flujo se estancara y se subió 3 cm más, volviendo a esperar su estabilización.

El proceso anterior se repitió hasta que salió flujo por la válvula conectada a la parte superior de la probeta. Luego se dejó correr el flujo mientras se observara la salida de burbujas; una vez estabilizado, se fue subiendo la carga hidráulica para ir eliminando todas las burbujas de aire dentro de la probeta; esta carga hidráulica no sobrepasó valores de presión equivalente a  $0,25 \text{ kg/cm}^2$  (1/4 de la presión de cámara). Una vez eliminadas las burbujas, se disminuyó la carga hidráulica hasta un valor equivalente a un gradiente de 0,1 aproximadamente, a la espera del comienzo de las mediciones. Cabe notar que todo el proceso de saturación, nunca

demoró menos de 24 horas para asegurar lo más posible la saturación de la muestra.

#### 4.5.4.4 Medición de la permeabilidad

La medición de la permeabilidad se realizó aplicando carga hidráulica en un rango de gradientes, aproximadamente, entre 0,1 y 1,2. Para los suelos de El Tesoro se aplicó gradientes hidráulicos bastante mayores debido a la baja permeabilidad de estos suelos, llegando incluso a valores cercanos a 20. Esto debió ser realizado para poder tener una cantidad de flujo que pudiera ser medida con los instrumentos utilizados, que para estos suelos, consistió en una pipeta de 10 cm<sup>3</sup> de capacidad.

La aplicación de la carga hidráulica se realizó de menor a mayor y, en general, cada medición de permeabilidad consistió en diez puntos de medición (con un mínimo de dos lecturas c/u), con distintos gradientes hidráulicos, y en el rango señalado anteriormente.

El volumen de solución medido fue variable, dependiendo principalmente de la permeabilidad del suelo. Sin embargo, al realizar muchos puntos de medición, fue posible asegurar la correcta cuantificación de la permeabilidad.

## **5 ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **5.1 Introducción**

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de todos los ensayos de laboratorio realizados, expuestos en el Capítulo 4.0, incluyendo también el análisis de los mismos.

El énfasis de los análisis aquí presentados, se centra en conocer las diferencias que puedan existir al realizar los ensayos utilizando agua destilada, o bien, soluciones ácidas similares a las utilizadas en pilas de lixiviación. Debido a la observación de una importante migración de partículas en los ensayos realizados, se analiza también el potencial de estabilidad interna de cada una de las muestras.

### **5.2 Composición mineralógica**

Se decidió estudiar la composición mineralógica de cada uno de los suelos, debido a la importancia que tiene ésta en el proceso de lixiviación, y a la que pudiera tener en la permeabilidad, bajo el flujo de soluciones ácidas. Para lo anterior se realizaron ensayos de difracción de rayos X a una muestra en su condición inicial (ver condiciones iniciales en Tabla 4.1), y a una muestra obtenida luego de ejecutar un ensayo de permeabilidad con solución ácida sobre ella. Esto fue realizado en cada uno de los suelos estudiados. Los resultados se presentan en las Tablas 5.1, 5.2 y 5.3, en las que también es posible observar información entregada por los proveedores de cada una de las muestras; en algunos casos, esta información no pudo ser corroborada por los ensayos de difracción de rayos X.

**Tabla 5.1: Composición mineralógica, suelo proveniente de Spence**

Nombre del compuesto	Fórmula
Quartz low	SiO <sub>2</sub>
Silicon Oxide	SiO <sub>2</sub>
Magnetite	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
Polyolithionite-1M, Fe-rich	K(AlFeLi)(Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH)F
Dickite	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> (HCONH <sub>2</sub> )
Aluminum Manganese Titanium	Al <sub>3</sub> Ti <sub>0.78</sub> Mn <sub>0.25</sub>
Cuprite	Cu <sub>2</sub> O
Cadmium Cyanide	Cd(CN) <sub>2</sub>
Manganese Magnesium Oxide	(MgO) <sub>0.841</sub> (MnO) <sub>0.159</sub>
Zinc Nitrate Hydrate	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O
Muscovite	KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>
Potassium Magnesium Aluminum Silicate Hydroxide	K(Mg,Al) <sub>2.04</sub> (Si <sub>3.34</sub> Al <sub>0.66</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>
Potassium Hydrogen Sulfate	K(HSO <sub>4</sub> )(H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )

**Tabla 5.2: Composición mineralógica, suelo proveniente de Collahuasi**

Nombre del compuesto	Fórmula	Observaciones
Crisocola	CuSiO <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O	Información entregada por Collahuasi
Calcosina	Cu <sub>2</sub> S	Información entregada por Collahuasi
Halloysite-10 <sup>a</sup>	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	-
Jarosite, OH-rich	(K,H <sub>3</sub> O)Fe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	-
Potassium Magnesium Silicate	Alpha-K <sub>2</sub> MgSi <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	-
Muscovite-3T	(K,Na)(Al,Mg,Fe) <sub>2</sub> (Si <sub>3.1</sub> Al <sub>0.9</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	Sólo encontrado en la muestra post ensayo
Albite, Ca-rich, ordered	(Na,Ca)Al(Si,Al) <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Sólo encontrado en la muestra post ensayo
Gypsum, syn	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	Sólo encontrado en la muestra post ensayo
Clinocllore-1MIlb	Mg <sub>5</sub> Al(Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	Sólo encontrado en la muestra post ensayo

Tabla 5.3: Composición mineralógica, suelo proveniente de El Tesoro

Nombre del compuesto	Fórmula
Gypsum, syn	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Anorthite, Na-rich, disordered	$(\text{Ca,Na})(\text{Si,Al})_4\text{O}_8$
Quartz	$\text{SiO}_2$
Pseudomalachite	$\text{Cu}_5(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_4$
Sodium Magnesium Titanium Oxide	$\text{Na}_{0.68}\text{Mg}_{0.34}\text{Ti}_{0.66}\text{O}_2$
Sodium Zirconium Oxide	$\text{Na}_2\text{ZrO}_3$
Zinc Phosphate Hydrate	$\text{Zn}_2\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Aluminum Phosphate	$\text{Al}_{36}\text{P}_{36}\text{O}_{144}$
Cuprite	$\text{Cu}_2\text{O}$

Tabla 5.3: Composición mineralógica, suelo proveniente de El Tesoro (continuación)

Nombre del compuesto	Fórmula	Observaciones	Presencia [%]
Albite, Ca-rich, ordered	$(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})_3\text{O}_8$	Sólo se encontró en la muestra post ensayo	-
Silver Aluminum Silicate Hydrate	$\text{Al}_{96}\text{H}_{26}\text{Ag}_{70}\text{Si}_{96}\text{O}_{384}\cdot x\text{H}_2\text{O}$	Sólo se encontró en la muestra post ensayo	-
Albite (heat treated)	$\text{Na}(\text{Si}_3\text{O}_8)$	El Terral – Dictuc, 2009	35,7
Chalcopyrite	$\text{CuFeS}_2$	El Terral – Dictuc, 2009	1,3
Cuprite	$\text{Cu}_2\text{O}$	El Terral – Dictuc, 2009	9,0
Dickite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4(\text{HCONH}_2)$	Información entregada por El Terral, obtenida de ensayos de Difracción de rayos X realizados en Dictuc	5,4
Diopside ferrian, syn	$\text{Ca}_{0,991}(\text{Mg}_{0,641}\text{Fe}_{0,342})(\text{Si}_{1,6}\text{Fe}_{0,417})\text{O}_6$	Información entregada por El Terral, obtenida de ensayos de Difracción de rayos X realizados en Dictuc	3,6
Malachite	$\text{CuCO}_3\cdot\text{Cu}(\text{OH})_2$	Información entregada por El Terral, obtenida de ensayos de Difracción de rayos X realizados en Dictuc	4,4
Microcline, intermédiaire	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$	Información entregada por El Terral, obtenida de ensayos de Difracción de rayos X realizados en Dictuc	6,9
Quartz low, syn	$\text{SiO}_2$	Información entregada por El Terral, obtenida de ensayos de Difracción de rayos X realizados en Dictuc	28,1

Se debe aclarar que estos ensayos no son definitivos, ya que para conocer los distintos componentes de cada uno de los suelos estudiados de manera más precisa, sería necesario realizar un análisis estadístico, con el fin de reducir los errores de medición propios del ensayo. Por otra parte, existen casos en los que se encontraron diferencias entre los minerales encontrados antes y después del ensayo de permeabilidad; esto no representa, necesariamente, que exista diferencia en los minerales encontrados en ambos casos, ya que para esto debiera realizarse un análisis estadístico exhaustivo.

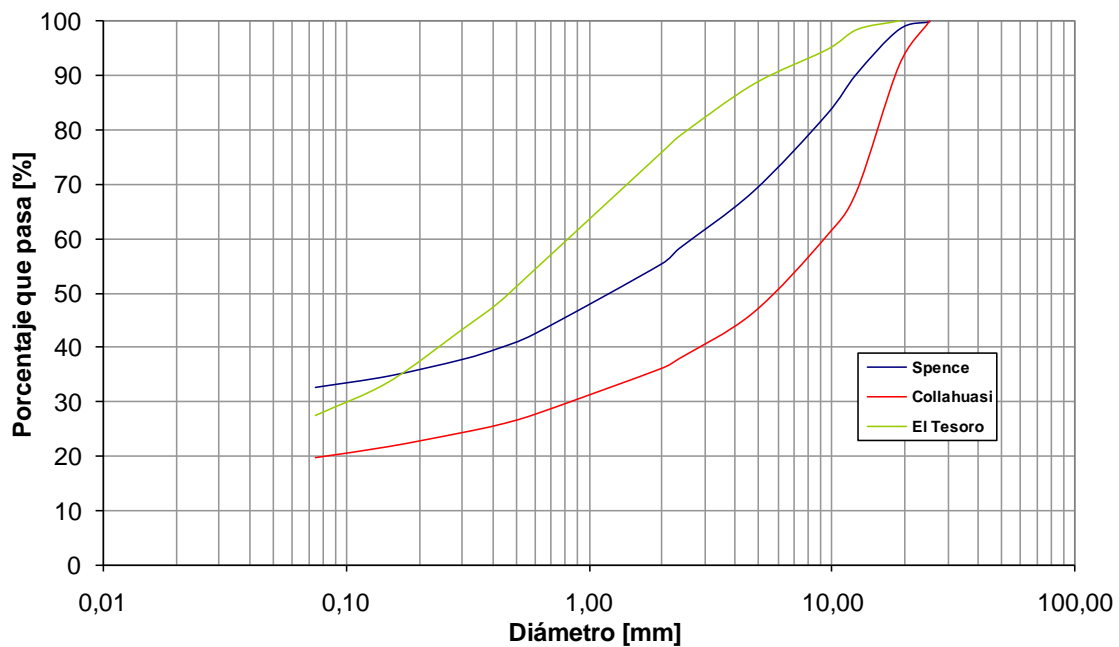
Este ensayo fue realizado sólo como una guía para futuras investigaciones que pretendan estudiar más detalladamente el efecto de la mineralogía en la permeabilidad de suelos bajo flujo de soluciones ácidas. Cabe señalar que los ensayos realizados en esta investigación no presentaron un análisis cuantitativo; los porcentajes de cada uno de los compuestos, para la muestra de El Tesoro, corresponde a un análisis entregado por la consultora Terral, y realizado por DICTUC (Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile).

Lo más interesante de este ensayo es la posibilidad de encontrar jarositas, partículas (geles) coloidales con un alto potencial de hinchamiento, que podrían afectar la permeabilidad. Estas partículas pueden generarse en el proceso de lixiviación en muestras con altos contenidos de fierro, si se dan las condiciones requeridas de oxigenación y acidez (Terral, 2004). En esta investigación, este fenómeno no fue estudiado en detalle, no obstante, es posible apreciar que se observó la presencia de jarositas en la muestra de Collahuasi. En el resto de los suelos, no se observó su presencia, no obstante, con los ensayos realizados no es posible descartarla.

### 5.3 Análisis granulométricos, límites de Atterberg y clasificación USCS

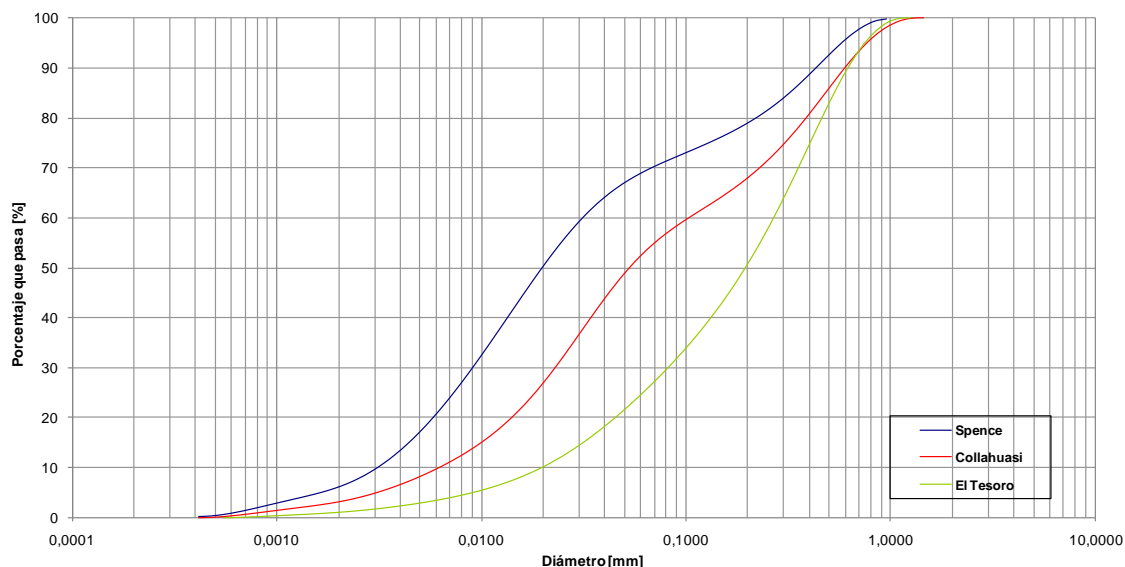
Los resultados de los análisis granulométricos en los tres suelos utilizados en esta investigación se presentan en las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3. Éstos fueron realizados según las metodologías de ensayo descritas en el capítulo 4.0. Debe notarse que para el caso de los suelos de mina El Tesoro, todos los ensayos para clasificación se realizaron con el material aglomerado, sin adición de hipoclorito.

Figura 5.1: Granulometrías, partículas con diámetro sobre 0,074 mm

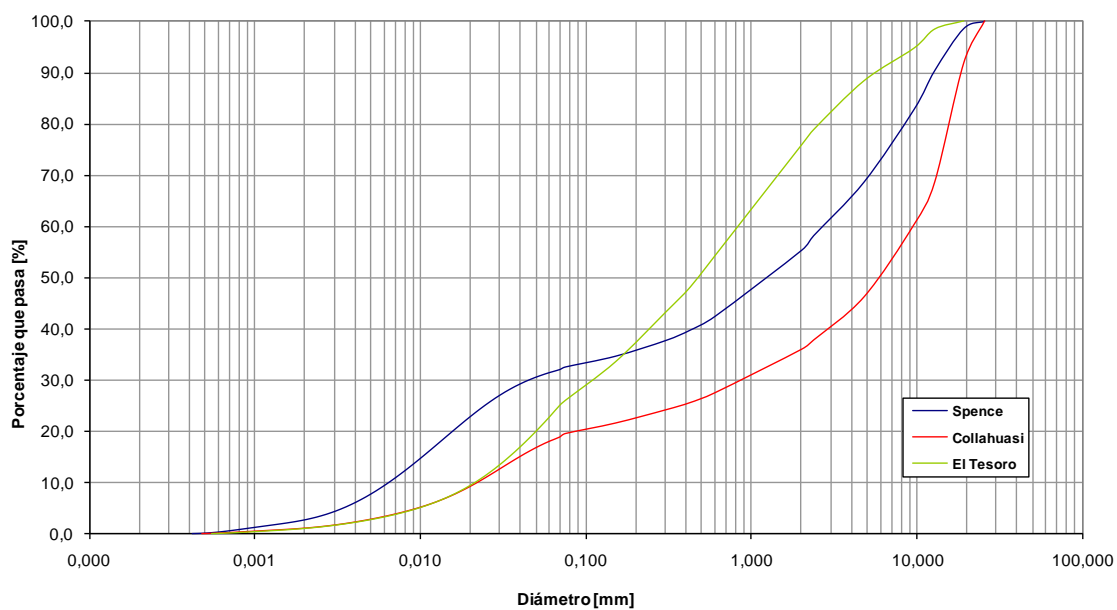




**Figura 5.2: Granulometrías, partículas con diámetros menores a 0,074 mm**



**Figura 5.3: Granulometrías integrales de los materiales**



De las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3, se observa que las curvas granulométricas de las muestras provenientes de Spence y Collahuasi tienen una forma similar, siendo la muestra de Collahuasi algo más gruesa que la de Spence. La distribución de tamaños corresponde a aquella conocida como gap graded (con ausencia de

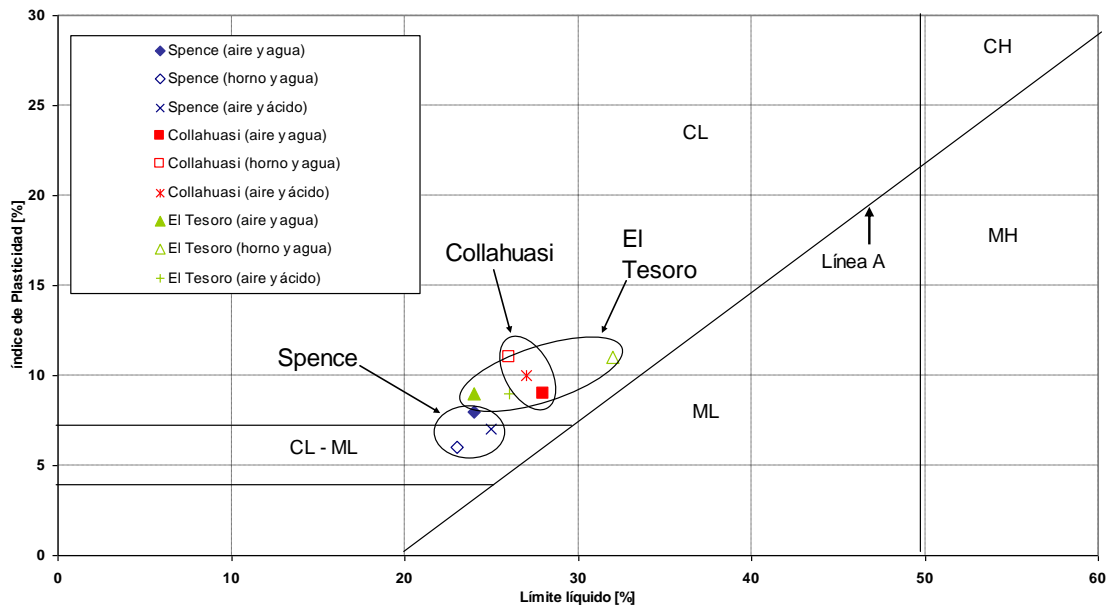
algún tamaño). Por otra parte, la curva granulométrica de la muestra de El Tesoro tiene una forma diferente, mejor graduada, y por la tanto, una distribución de tamaños completamente diferente. Cabe señalar que esta muestra no fue sometida a chancado.

Para estudiar el efecto del ácido y del secado al horno en la plasticidad de los finos, en los suelos utilizados en este estudio, se realizaron ensayos de límites de Atterberg con las siguientes tres condiciones:

- Ensayos con agua y secados al aire;
- Ensayos con ácido y secados al aire;
- Ensayos con agua y secados al horno a 50°C.

Los resultados de estos ensayos se presentan en la carta de plasticidad de la Figura 5.4.

**Figura 5.4: Efecto del ácido y el secado al horno en la plasticidad de los finos**



La carta de plasticidad indica que los finos de todos los suelos clasifican como arcillas de baja plasticidad, salvo por la muestra de Spence ensayada con agua y secada al horno, y la ensayada con ácido y secada al aire, también de Spence, las cuales clasifican como arcillas limosas (CL-ML).

En las muestras de Spence y Collahuasi, no se observan cambios importantes en la plasticidad de los finos debido a la utilización de ácido en el ensayo, ni tampoco debido al secado al horno. En la muestra proveniente de El Tesoro, tampoco se observan diferencias notorias en la plasticidad, no obstante, se observó un leve aumento en la plasticidad al utilizar secado con horno. Este comportamiento es muy particular y contrario a lo que se ha observado en otros suelos, donde la plasticidad no se ve afectada, o bien, disminuye debido al secado al horno. Por lo tanto, el comportamiento de este suelo en las condiciones de ensayo utilizadas constituye un caso particular a ser investigado con mayor profundidad.

Con los análisis granulométricos y los límites de Atterberg medidos en forma tradicional, se realizó la clasificación de los suelos según el sistema USCS. Estos resultados se presentan en la Tabla 5.4.

**Tabla 5.4: Clasificación USCS de los suelos utilizados**

<b>Suelo</b>	<b>Clasificación USCS</b>
Spence	SC
Collahuasi	GC
El Tesoro	SC

Se observa a partir de la Tabla 5.4, que los suelos de Spence y El Tesoro clasifican como arenas arcillosas, mientras que el suelo proveniente de la Mina

Collahuasi clasifica como una grava arcillosa, de acuerdo al sistema de clasificación USCS.

#### 5.4 Ensayos de permeabilidad

Debido a que los ensayos realizados a cada una de las muestras no fueron hechos bajo las mismas condiciones, se realizará el análisis de cada uno de los suelos por separado. Los ensayos fueron realizados a una presión de cámara efectiva de 1,0 kg/cm<sup>2</sup>, salvo que se haga explícito lo contrario. Los resultados se presentan en los acápite siguientes, mientras que los datos de las mediciones de cada ensayo se presentan en el Anexo A.

##### 5.4.1 Suelo proveniente de la mina Spence

En la Tabla 5.5 se presenta la denominación dada a las muestras ensayadas en este suelo. Se presentan además, las condiciones a las cuales se sometió cada serie de ensayos.

Tabla 5.5: Condiciones de ensayo de las muestras de suelos proveniente de la mina Spence

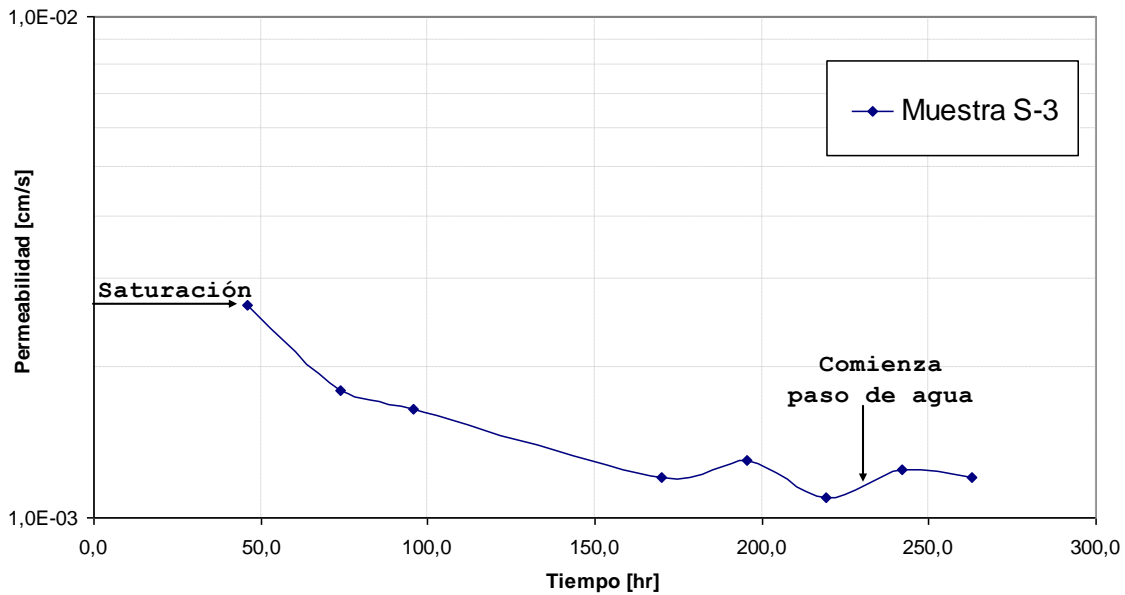
Muestra	N° ensayos	pH de la solución	Densidad seca al final de la serie de ensayos [t/m <sup>3</sup> ]	Paso de agua
S-1	25	Variable	1,69	Sí
S-2	1	0,53	1,70	No
S-3	8	0,53	1,73	Sí
S-4	3	2,00	1,69	No
S-5	3	2,00	1,72	No
S-6	7	2,00	1,64	Sí
S-7	3	2,00	1,89	No
S-8	3	2,00	1,83	No

En la primera columna de la Tabla 5.5 se presenta la denominación dada a cada una de las muestras o serie de ensayos. La segunda columna se refiere al número de veces que se realizaron mediciones de permeabilidad en cada una de las series. En la tercera columna se muestra el valor de pH de la solución utilizada. Cabe notar que todos los ensayos se realizaron con recirculación y sin agregar ácido en el momento de recircular, salvo cuando se realizaron cambios de pH para la muestra S-1. Por lo tanto, los valores de pH considerados en la Tabla 5.5 fueron medidos al comenzar a circular la solución y debieron disminuir a medida que la solución se recirculaba. En la cuarta columna se incluyó el valor de la densidad seca de cada muestra al finalizar la serie de ensayos. Finalmente, en la quinta columna se informa si la serie de ensayos incluyó ensayos con agua destilada.

#### 5.4.1.1 Comparación entre la utilización de soluciones ácidas y agua destilada en el ensayo de permeabilidad

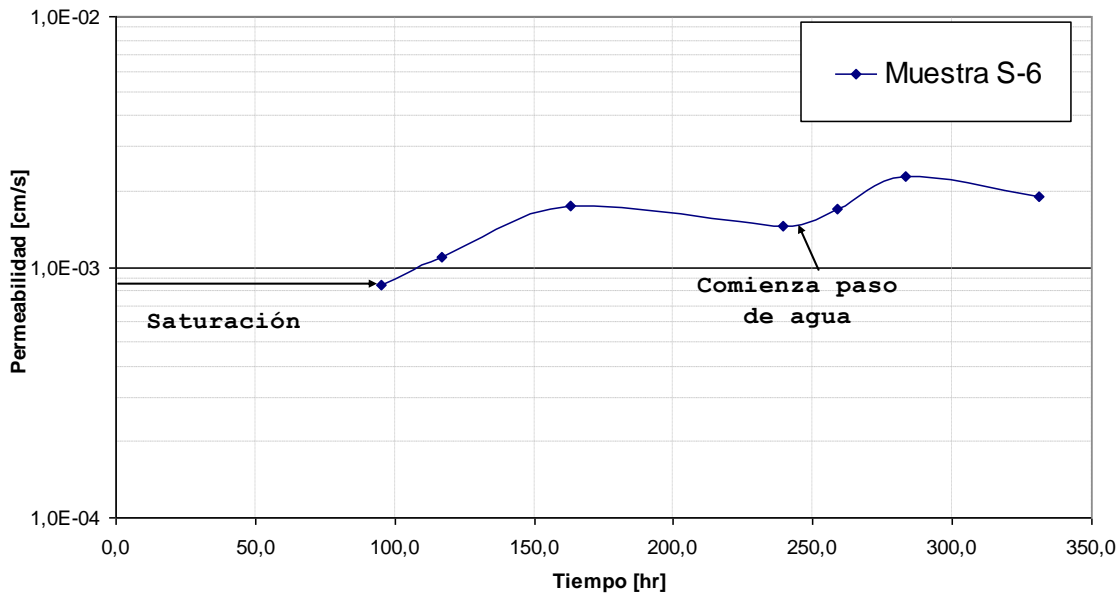
Para estudiar este fenómeno se tomará como ejemplo la muestra S-3, la cual fue saturada con solución ácida de  $\text{pH} = 0,53$ . Una vez completada la saturación, se realizaron mediciones de permeabilidad. La permeabilidad fue medida seis (6) veces utilizando la solución ácida recirculada. Los valores de permeabilidad fueron medidos para la zona donde se presentó flujo laminar, es decir, cuando se mantuvo una relación lineal entre la velocidad de escurrimiento y el gradiente hidráulico, que para este suelo, en general se observó hasta un gradiente hidráulico cercano a 0,9 para una presión de cámara de  $1 \text{ kg/cm}^2$ , con pequeñas variaciones dependiendo de los cambios de permeabilidad de las distintas muestras. Estos resultados se presentan en la Figura 5.5, donde se puede observar variaciones entre  $1,1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$  y  $2,7 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ , lo cual es una variación pequeña para este tipo de ensayos. Al finalizar la sexta medición de permeabilidad, se cambió la solución ácida por agua destilada y se realizaron dos (2) nuevas mediciones de permeabilidad, cuyos resultados no presentaron cambios importantes con respecto a los ensayos anteriores.

Figura 5.5: Permeabilidad en el tiempo, muestra S-3



Otro ejemplo donde se puede estudiar este fenómeno es en la muestra S-6, la cual fue saturada con solución ácida pero esta vez con un pH = 2,00. Los resultados para esta serie de ensayos se muestran en la Figura 5.6. Las observaciones que se pueden realizar en esta muestra son similares a las realizadas para la muestra S-3. En este caso, se realizaron cuatro (4) mediciones con solución ácida y los resultados variaron entre  $8,5 \times 10^{-4}$  cm/s y  $1,8 \times 10^{-3}$  cm/s. Al igual que en la muestra anterior, se cree que esta variación es propia de los errores asociados al ensayo y no son atribuibles a un cambio en la permeabilidad. Luego del cuarto ensayo, se cambió la solución ácida por agua destilada y se realizaron tres (3) nuevas mediciones de permeabilidad. En este caso tampoco hubo una variación significativa de la permeabilidad del suelo.

Figura 5.6: Permeabilidad en el tiempo, muestra S-6



De las Figuras 5.5 y 5.6 también se puede observar que no hay una tendencia establecida de la permeabilidad a lo largo del tiempo; mientras la muestra S-3 va disminuyendo su permeabilidad en el tiempo, la muestra S-6 tiene un comportamiento opuesto. No obstante, las variaciones de la permeabilidad son pequeñas para la precisión de este ensayo, y éstas podrían deberse a los diversos factores que pueden afectar los valores de permeabilidad obtenidos en laboratorio, como se indicó en el Capítulo 2.0.

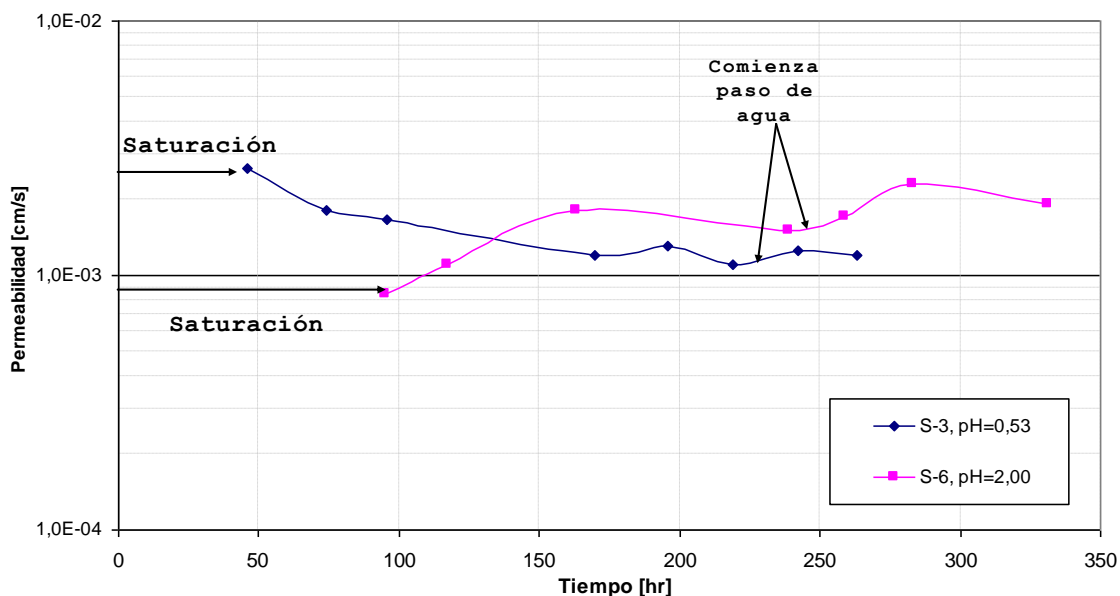
En resumen, es posible decir que en este tipo de suelos la permeabilidad no se vio afectada mayormente al realizar ensayos con solución ácida, respecto a aquellos realizados con agua destilada.

#### 5.4.1.2 Efecto de la acidez de la solución en el ensayo de permeabilidad

En el acápite anterior, en las Figuras 5.5 y 5.6, se mostró que al utilizar agua en una muestra en la que previamente se había utilizado solución ácida, la permeabilidad no se vio afectada. La Figura 5.7 muestra los mismos resultados, pero se presentan ambas muestras en una misma figura. La densidad seca de la

muestra S-3 tiene un valor de  $1,73 \text{ t/m}^3$ , mientras que la densidad seca de la muestra S-6 es de  $1,64 \text{ t/m}^3$ .

Figura 5.7: Comparación muestras S-3 y S-6



En la Figura 5.7 se puede observar que no existe variación considerable en los valores de permeabilidad obtenidos utilizando soluciones con distintos pH. La pequeña diferencia de permeabilidad existente podría deberse a la densidad, lo cual se estudia en el acápite 5.4.1.4, donde se incluirán los resultados de todas las muestras ensayadas en este suelo.

#### 5.4.1.3 Efecto del tiempo en el ensayo de permeabilidad con soluciones ácidas

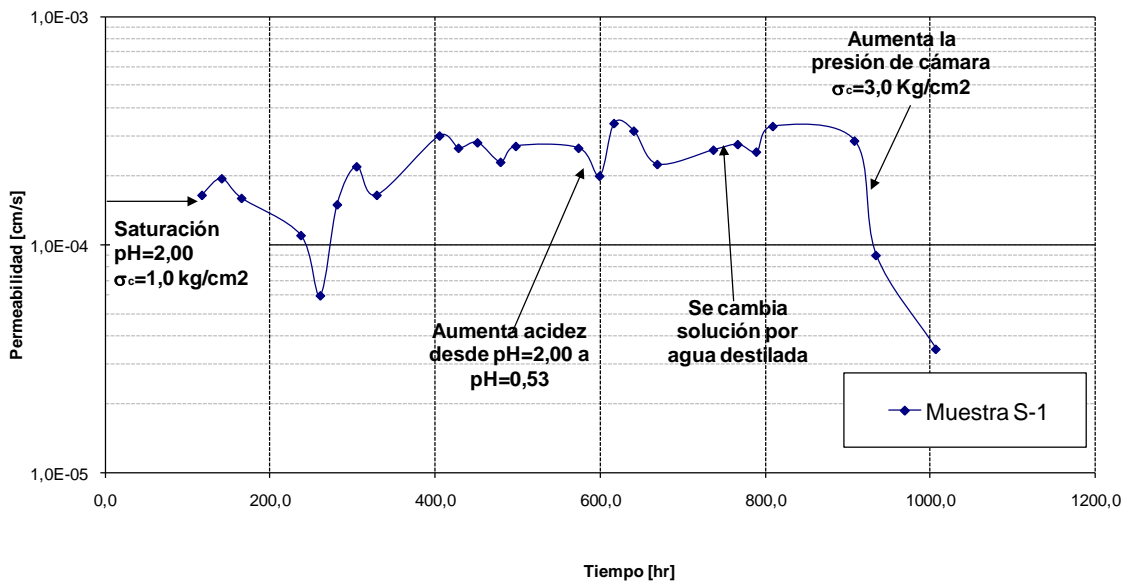
En la muestra S-1 se realizaron mediciones de permeabilidad durante aproximadamente 42 días. Se comenzó saturando con un pH de 2,00, recirculando la solución ácida sin agregar ácido al recircular la muestra; luego se realizaron mediciones cada un día aproximadamente. Después de alrededor de 24 días se agregó ácido a la muestra hasta alcanzar un pH = 0,53, continuando con el proceso de recirculación, sin agregar ácido nuevamente. Luego, en torno al día 33, se cambió la solución ácida por agua destilada y se comenzó a permear sin



recirculación. Finalmente, el día 39 aproximadamente, se aumentó la presión de cámara hasta los  $3,0 \text{ kg/cm}^2$  y se realizaron nuevas mediciones de permeabilidad.

Los resultados de los ensayos realizados en la muestra S-1, se presentan en la Figura 5.8.

**Figura 5.8: Permeabilidad en el tiempo, muestra S-1**



De la Figura 5.8 se puede observar que la permeabilidad no cambió significativamente a lo largo del tiempo. Los mayores cambios se presentaron al comienzo, cuando se produjo una baja en la permeabilidad, lo que se podría deber a una mala saturación de la muestra. El aumento de presión de cámara generó una baja importante en la permeabilidad cercana a un (1) orden de magnitud. Se estima que este efecto está asociado a la disminución del índice de vacíos con el aumento de  $\sigma_3$ .

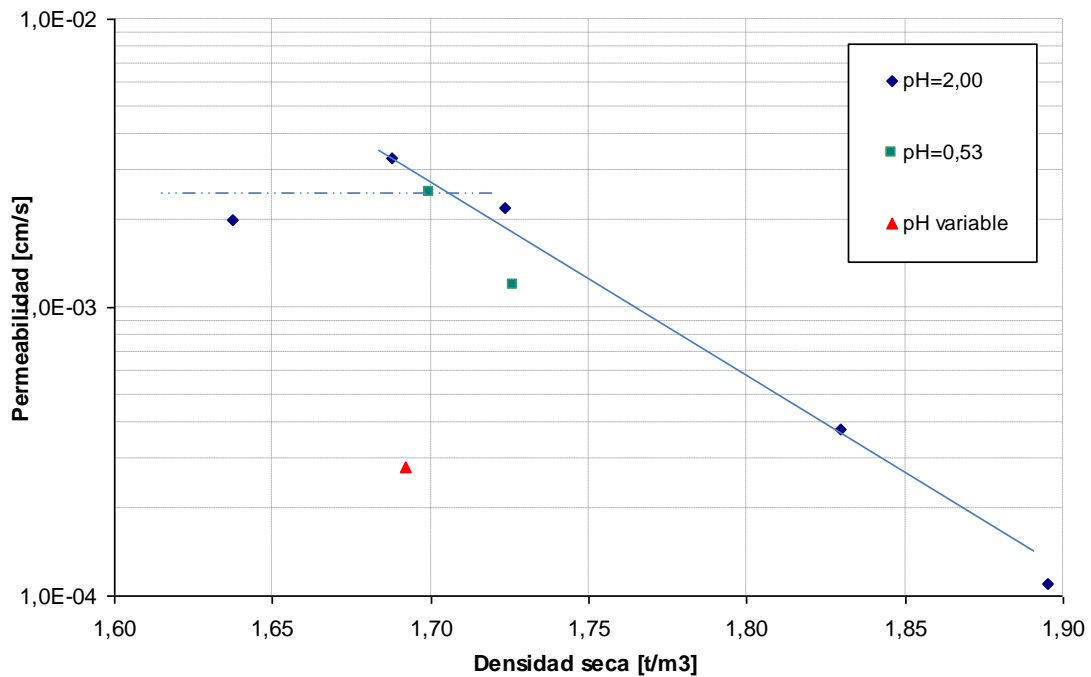
Cabe notar que los valores de permeabilidad obtenidos en esta muestra, sin considerar los valores con presión de cámara de  $3.0 \text{ kg/cm}^2$ , están en un rango entre  $6,0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$  y  $3,4 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ . Estos valores de permeabilidad son menores a los obtenidos en el resto de las muestras. Se estima que esta diferencia se debe

a que esta muestra fue la que presentó mayor contenido de finos. Estos resultados se presentan con mayor detalle en el acápite 5.6.

#### 5.4.1.4 Efecto de la densidad en la permeabilidad

La Figura 5.9 presenta la permeabilidad versus la densidad seca medida al final del ensayo. Se presentan los resultados obtenidos para la permeabilidad final de todas las muestras ensayadas en este suelo. Para el caso de la muestra S-1, se consideró la permeabilidad antes de aumentar la presión de cámara hasta  $3 \text{ kg/cm}^2$ . Estos resultados también se presentan en la Tabla 5.6.

Figura 5.9: Permeabilidad versus densidad seca, Spence



**Tabla 5.6: Permeabilidades de las muestras de suelos provenientes de la mina Spence**

<b>Muestra</b>	<b>pH de la solución</b>	<b>Densidad seca al final de la serie de ensayos [t/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Permeabilidad final [cm/s]</b>
S-1	Variable	1,69	$2,8 \times 10^{-4}$
S-2	0,53	1,70	$2,5 \times 10^{-3}$
S-3	0,53	1,73	$1,2 \times 10^{-3}$
S-4	2,00	1,69	$3,3 \times 10^{-3}$
S-5	2,00	1,72	$2,2 \times 10^{-3}$
S-6	2,00	1,64	$2,0 \times 10^{-3}$
S-7	2,00	1,89	$1,1 \times 10^{-4}$
S-8	2,00	1,83	$3,8 \times 10^{-4}$

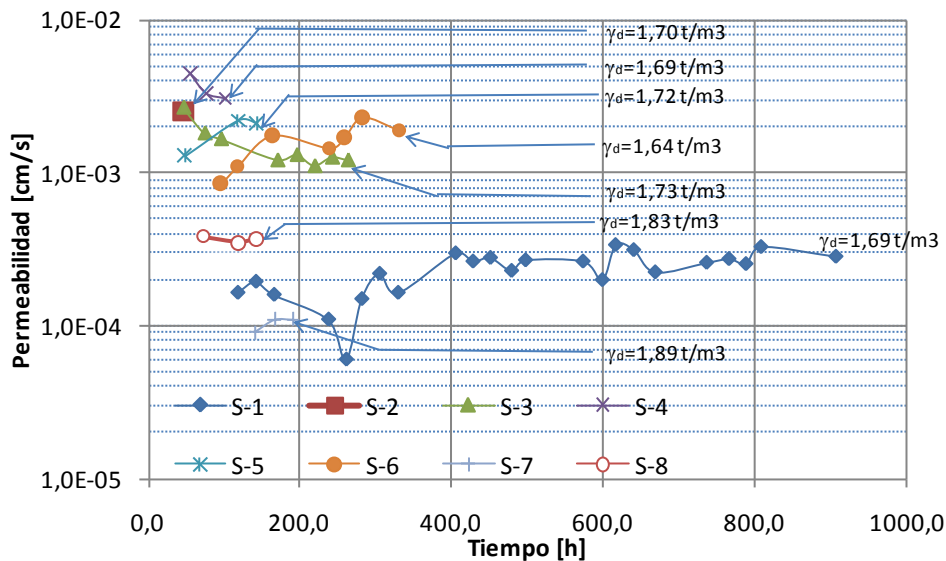
Los resultados presentados en la Figura 5.9 y en la Tabla 5.6 muestran que en este suelo la densidad afecta fuertemente el valor de la permeabilidad, disminuyéndola en más de un orden de magnitud para el rango de densidades considerado. También se observa que para valores de densidades bajos podría existir una zona en la cual la permeabilidad no se ve afectada en gran medida (línea discontinua).

Además, se puede observar un ensayo realizado con acidez variable (correspondiente a la muestra S-1), el cual presenta valores de permeabilidad menores que el resto de las muestras ensayadas a densidades similares. Esta diferencia podría explicarse por un mayor contenido de finos, como se mencionó anteriormente y se analiza en el acápite 5.6, y no debido a algún efecto químico. Si no se considera este ensayo, se confirma que la acidez de la solución no produce un efecto significativo en la permeabilidad de este suelo, como se mostró en el acápite 5.4.1.2.

#### 5.4.1.5 Resumen de ensayos, Spence

La Figura 5.10 presenta un resumen de todos los ensayos realizados en muestras de Spence, donde se grafica la permeabilidad en el tiempo de todas las muestras ensayadas. Además, se incorporó la densidad seca de cada muestra al final del ensayo.

Figura 5.10: Permeabilidad en el tiempo, Spence



La Figura 5.10 permite corroborar las conclusiones que se han obtenido hasta el momento. En primer lugar, se observa que existe una disminución de la permeabilidad debido al aumento de la densidad. La muestra S-1 no obedece a este comportamiento, lo que podría deberse a una mayor cantidad de finos, como se puede ver en el acápite 5.6. Además, es posible observar que la solución utilizada no afectó mayormente la permeabilidad, ya que en la Figura 5.10 se han incluido todos los ensayos y sólo se observan variaciones importantes debido a cambios en la densidad. Por otra parte, es posible observar que no existe un patrón de comportamiento en el tiempo para cada muestra, ya que algunas de ellas aumentan su permeabilidad en el tiempo, mientras que otras la disminuyen. No obstante, salvo para la muestra S-1, la medición entre un ensayo y otro para

una misma muestra, no presenta variaciones importantes en el tiempo, y las diferencias podrían deberse a los diversos factores que afectan la medición de la permeabilidad, los cuales fueron revisados en el Capítulo 2.0.

#### 5.4.2 Suelo proveniente de la mina Collahuasi

En la Tabla 5.7 se presenta la denominación dada a las muestras para cada una de las series de ensayos realizadas en este suelo. Se presentan además, las condiciones de ensayo de cada serie.

**Tabla 5.7: Condiciones de ensayo de las muestras de suelo provenientes de la mina Collahuasi**

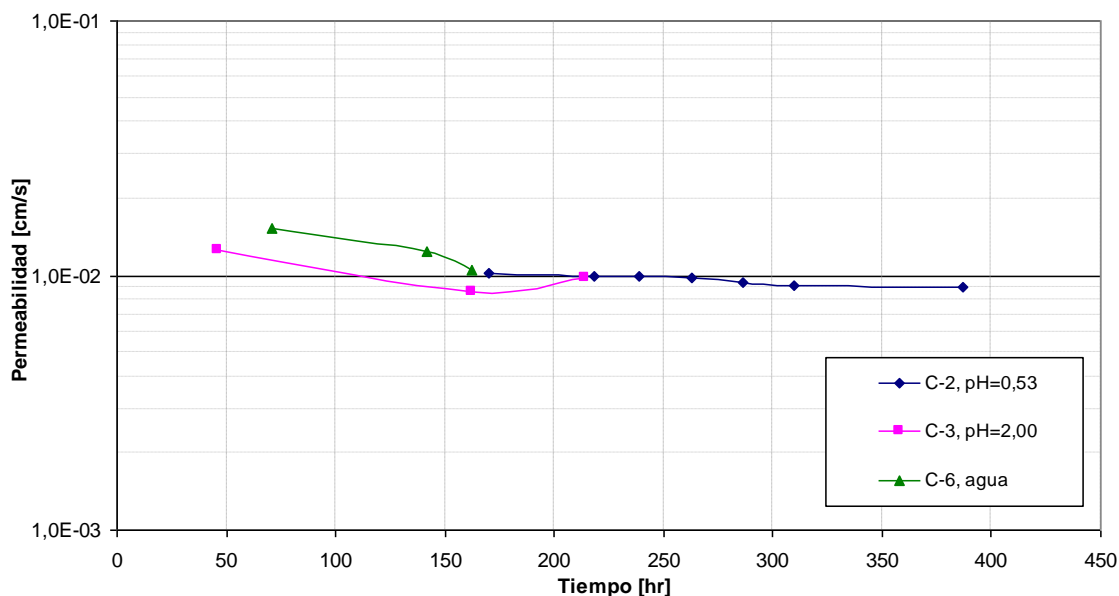
Muestra	N° ensayos	pH de la solución	Densidad seca al final de la serie de ensayos [t/m <sup>3</sup> ]	Recirculación	Paso de agua
C-1	18	Variable	1,65	No	Sí
C-2	7	0,53	1,65	Sí	No
C-3	3	2,00	1,67	Sí	No
C-4	3	2,00	1,90	Sí	No
C-5	3	2,00	1,80	Sí	No
C-6	3	Agua	1,64	No	-

En la primera columna de la Tabla 5.7 se presenta la denominación dada a la muestra ensayada. La segunda columna se refiere al número de veces que se realizaron mediciones de permeabilidad en cada serie de ensayos. En la tercera columna se muestra el valor de pH de la solución utilizada. Cabe notar que en los ensayos con recirculación no se agregó ácido a la solución, por lo que el valor de pH no es constante en todo el ensayo. En la cuarta columna se incluyó el valor de la densidad seca de cada muestra al finalizar la serie de ensayos. La quinta columna indica si la solución fue recirculada o no. Finalmente, en la sexta columna se informa si la serie incluyó ensayos con agua destilada.

#### 5.4.2.1 Efecto de la acidez de la solución en el ensayo de permeabilidad

Para estudiar este fenómeno se realiza una comparación entre las muestras C-2, C-3 y C-6, las cuales tienen densidades similares. Los resultados de la muestra C-1 se presentan posteriormente, en el acápite 5.4.2.2, debido a que en esta muestra se verán también otros aspectos. La muestra C-2 fue saturada con solución ácida de pH = 0,53; una vez completada la saturación, se realizaron mediciones de permeabilidad, recirculando la solución ácida, sin agregar ácido extra. La muestra C-3 se ensayó de la misma forma pero con un pH = 2,00, mientras que la muestra C-6 se ensayó con agua destilada y sin recirculación. Los valores de permeabilidad fueron medidos para la zona donde se presentó flujo laminar, que para este suelo, en general se observó hasta gradientes cercanos a 0,8, para una presión confinante de 1 kg/cm<sup>2</sup>, con pequeñas variaciones dependiendo de los cambios de permeabilidad de las distintas muestras. Los resultados se presentan en la Figura 5.11.

Figura 5.11: Efecto de la acidez de la solución, Collahuasi



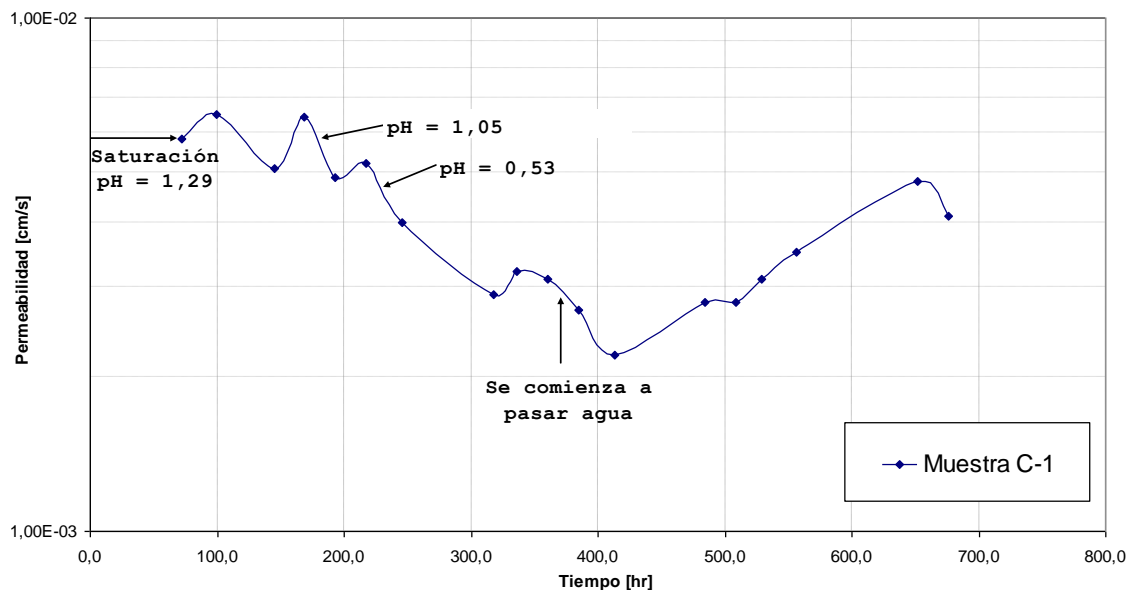
A partir de la Figura 5.11 se puede observar que los valores finales obtenidos para la constante de permeabilidad son muy similares y sólo presentan pequeñas

variaciones entre  $1,1 \times 10^{-2}$  cm/s y  $1,3 \times 10^{-2}$  cm/s. Por lo anterior, se puede concluir que este suelo no se ve afectado por la solución utilizada en el ensayo de permeabilidad.

#### 5.4.2.2 Efecto del tiempo en el ensayo de permeabilidad con soluciones ácidas

En la muestra C-1 se realizaron mediciones de permeabilidad durante aproximadamente 28 días; cabe considerar que en esta serie de ensayos nunca se recirculó la solución. En esta muestra se comenzó saturando con un pH = 1,29 y se realizaron cuatro (4) mediciones de permeabilidad. Luego de aproximadamente siete (7) días, se comenzó a utilizar una solución ácida de pH = 1,05, con la cual se realizaron dos (2) nuevas mediciones. Posteriormente, aproximadamente el día nueve (9), se cambió la solución por una con un pH = 0,53, realizando mediciones de permeabilidad con esta solución hasta aproximadamente el día 15, día en que se cambió la solución ácida por agua destilada. Se realizaron mediciones de permeabilidad hasta completar el día 28, contabilizando en total, 18 mediciones. Los resultados de este ensayo se presentan en la Figura 5.12.

Figura 5.12: Permeabilidad en el tiempo, muestra C-1

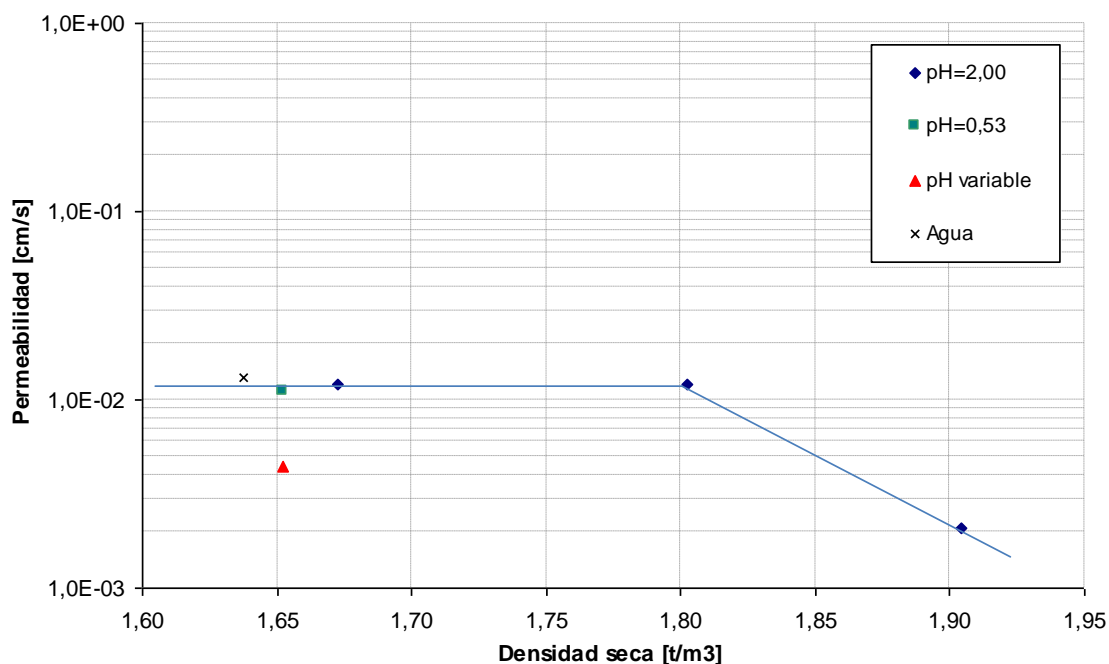


A partir de la Figura 5.12, se puede observar que la permeabilidad no cambió significativamente a lo largo del tiempo. Los valores límites medidos son  $2,2 \times 10^{-3}$  cm/s y  $6,5 \times 10^{-3}$  cm/s, lo cual no representa un cambio importante, considerando todos los factores que influyen en el ensayo, los cuales se discuten en el Capítulo 2.0.

#### 5.4.2.3 Efecto de la densidad en la permeabilidad

La Figura 5.13 presenta la permeabilidad en función de la densidad seca al final del ensayo. En este gráfico se han considerado todos los ensayos realizados en este tipo de suelos. Estos resultados también se presentan en la Tabla 5.8.

Figura 5.13: Permeabilidad versus densidad seca, Collahuasi





**Tabla 5.8: Permeabilidades de las muestras de suelos provenientes de la mina Collahuasi**

<b>Muestra</b>	<b>pH de la solución</b>	<b>Densidad seca al final de la serie de ensayos [t/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Permeabilidad final [cm/s]</b>
C-1	Variable	1,65	$4,4 \times 10^{-3}$
C-2	0,53	1,65	$1,1 \times 10^{-2}$
C-3	2,00	1,67	$1,2 \times 10^{-2}$
C-4	2,00	1,90	$2,1 \times 10^{-3}$
C-5	2,00	1,80	$1,2 \times 10^{-2}$
C-6	Agua	1,64	$1,3 \times 10^{-2}$

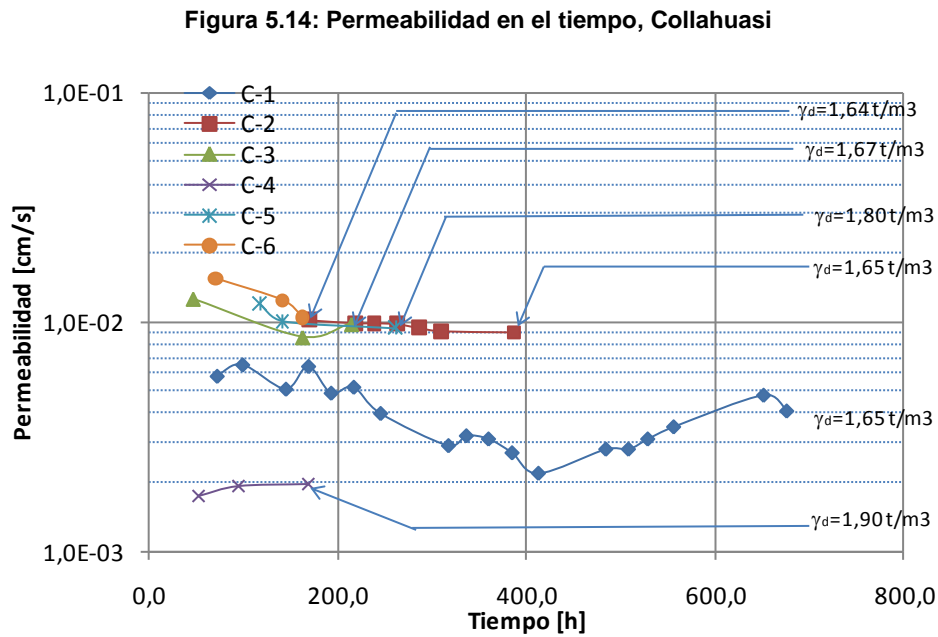
Los resultados presentados en la Figura 5.13 muestran que en este suelo, la densidad afecta fuertemente el valor de la permeabilidad, disminuyendo su valor en casi un orden de magnitud, desde  $1,3 \times 10^{-2}$  cm/s a  $2,1 \times 10^{-3}$  cm/s, en el rango de densidades considerado. Para valores bajos de densidad, la permeabilidad no se ve afectada.

Se observa que al igual que en la Figura 5.9, el ensayo realizado con un pH variable presenta una permeabilidad algo menor que el resto de los ensayos realizados a densidades de orden similar. Se podría pensar que este resultado podría deberse a lixiviación de la muestra, considerando que en esta serie de ensayos se agregó ácido en la recirculación, no obstante, es posible descartarlo debido a que los primeros valores medidos de la permeabilidad en esta muestra, también presentan una permeabilidad menor que el resto de las muestras con densidades similares. Al igual que en el caso de las muestras de Spence, la muestra C-1 presentó una mayor cantidad de finos en las granulometrías post ensayo, lo que podría explicar la baja permeabilidad en comparación al resto de los ensayos. Si no se toma en cuenta este ensayo, se observa que la

permeabilidad no se ve afectada por la solución utilizada, tal como se mostró en el acápite 5.4.2.1.

#### 5.4.2.4 Resumen de ensayos, Collahuasi

La Figura 5.14 presenta un resumen de todos los ensayos realizados en las muestras de Collahuasi, donde se grafica la permeabilidad en el tiempo de todas las muestras ensayadas. Además, se incorporó la densidad seca de cada muestra al final del ensayo.



La Figura 5.14 permite observar que todos los ensayos tienen un rango de permeabilidades similar. En primer lugar, se observa que la muestra C-4 presenta una permeabilidad menor, lo que se debería al aumento de la densidad. Por otra parte, la muestra S-1 también presenta una menor permeabilidad, lo que se puede explicar por la mayor cantidad de finos, como se puede ver en el acápite 5.6. Además, es posible concluir que la solución utilizada no afecta mayormente la permeabilidad. En este tipo de suelo es posible observar que existe un patrón de comportamiento en el tiempo para casi todas las muestras, donde se observa que la permeabilidad comienza a disminuir levemente en el tiempo, lo que podría

deberse a acomodo de partículas finas y arenas, lo que se ve en mayor profundidad en el acápite 5.8. En el caso de las muestras C-1 y C-4, se observa aumentos de la permeabilidad en el tiempo, lo que podría deberse a que la muestra no se encontraba saturada totalmente, y comienza a aumentar su permeabilidad a medida que se logra sacar las burbujas de aire hacia afuera de la probeta. No obstante, salvo para la muestra C-1, la medición entre un ensayo y otro, para una misma muestra, no presenta variaciones importantes en el tiempo, y las diferencias podrían deberse a los diversos factores que afectan la medición de la permeabilidad. Las diferencias mayores se dieron para la muestra que estuvo mayor tiempo sometida al flujo de soluciones ácidas, al igual que en el caso de los suelos de Spence, de lo cual se podría inferir la existencia de fenómenos que afecten la permeabilidad, además de los que se tiene normalmente en los ensayos, tales como efectos químicos producto de la interacción de soluciones ácidas y minerales.

#### 5.4.3 Suelo proveniente de la mina El Tesoro

En la Tabla 5.9, se presenta la denominación dada a las muestras ensayadas en este suelo, proveniente de la mina El Tesoro. Se presentan además, las condiciones a las cuales se sometió cada serie de ensayos.

**Tabla 5.9: Condiciones de ensayo de las muestras del suelo proveniente de mina El Tesoro**

Muestra	N° ensayos	pH de la solución	Densidad seca al final de la serie de ensayos [t/m <sup>3</sup> ]	Recirculación	Paso de agua
ET-4	1	2,00	1,66	-	No
ET-5	3	Agua	1,67	No	-
ET-6 <sup>1</sup>	1	2,00	1,69	-	No

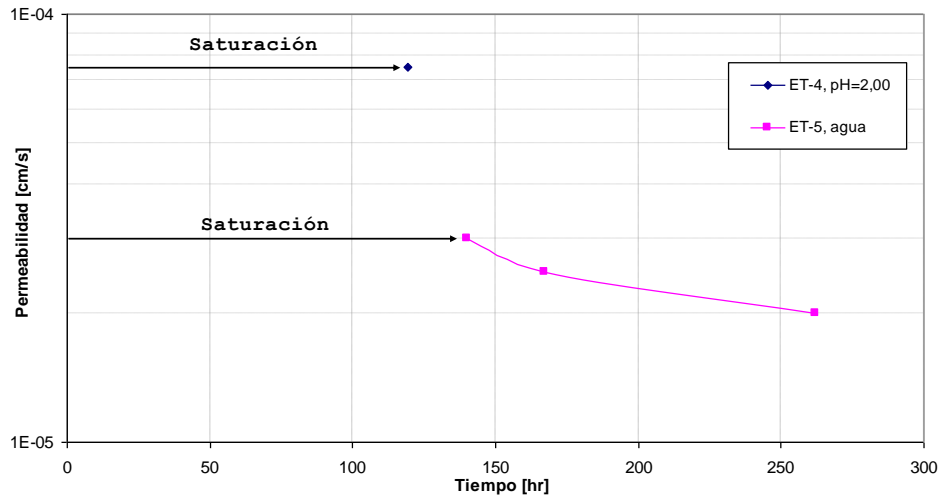
<sup>1</sup> Esta probeta fue confeccionada con material aglomerado con adición de hipoclorito

En la primera columna de la Tabla 5.9, se presenta la denominación para cada serie de ensayos. La segunda columna se refiere al número de veces que se realizaron mediciones de permeabilidad en cada una de las series de ensayo. En la tercera columna se muestra el valor de pH de la solución utilizada. En la cuarta columna se incluyó el valor de la densidad seca de cada muestra al finalizar la serie de ensayos. La quinta columna indica si la solución fue recirculada o no. En la sexta columna se informa si la serie de ensayos incluyó ensayos con agua destilada. Es importante agregar que la muestra ET-6 fue confeccionada con suelo aglomerado con la misma dosificación de agua y ácido que la muestra ET-4 pero con adición de hipoclorito.

#### 5.4.3.1 Comparación entre la utilización de soluciones ácidas y agua destilada en el ensayo de permeabilidad

Para estudiar este fenómeno se realiza una comparación entre las muestras ET-4 y ET-5. La muestra ET-4 fue saturada con solución ácida de pH = 2,00, y una vez completada la saturación, se realizó una medición de permeabilidad. La muestra ET-5 fue ensayada utilizando agua destilada, con tres mediciones de permeabilidad, sin realizar recirculación. Los valores de permeabilidad fueron medidos para la zona donde se presentó flujo laminar, que para este suelo, en general, se observó hasta un gradiente cercano a 8,8 para una presión de cámara de  $1 \text{ kg/cm}^2$ , con pequeñas variaciones dependiendo de los cambios de permeabilidad de las distintas muestras. Los resultados se presentan en la Figura 5.15.

Figura 5.15: Comparación muestras ET-4 y ET-5, El Tesoro



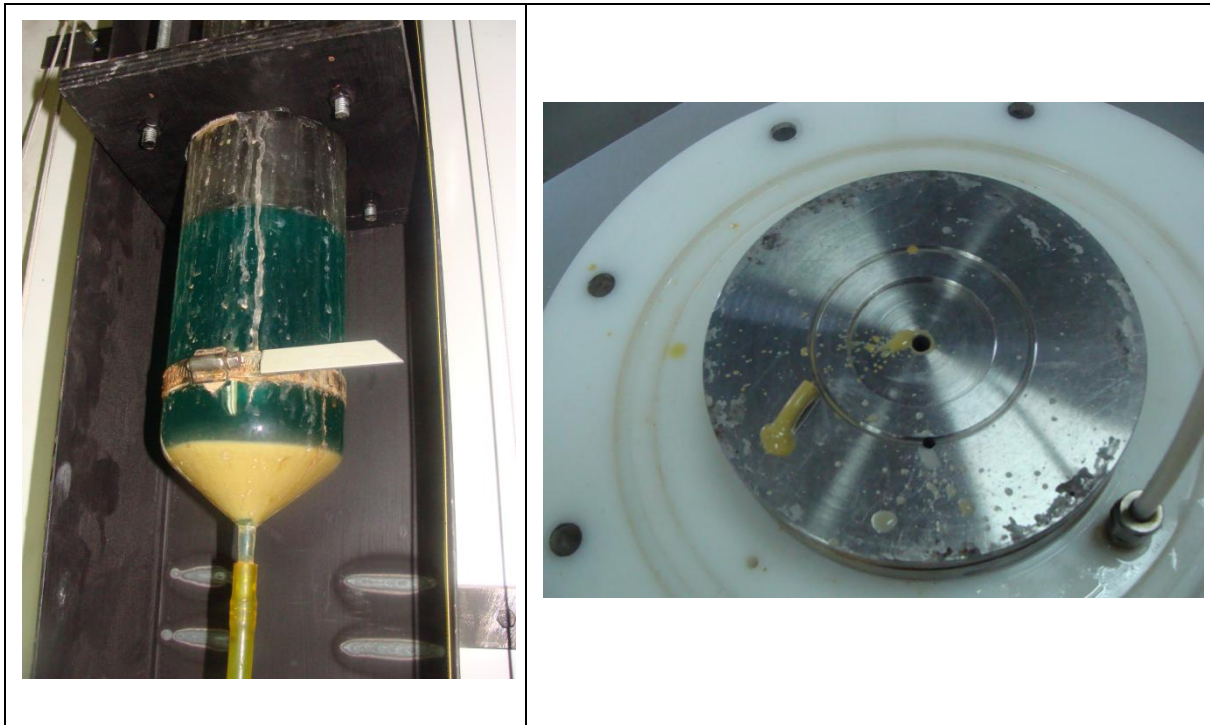
A partir de la Figura 5.15, se puede observar que los valores medidos de la permeabilidad tienen un mismo orden de magnitud, no obstante, sus valores tienen diferencias mayores a las observadas en las muestras de Spence y Collahuasi. En este caso, los resultados indican una permeabilidad de  $7,1 \times 10^{-5}$  cm/s para la muestra ensayada con solución ácida y de  $1,9 \times 10^{-5}$  cm/s para la muestra ensayada con agua. Las diferencias aquí establecidas merecen algunos comentarios a partir de la observación realizada durante la ejecución de los ensayos de laboratorio, lo cual se expone a continuación.

El primer punto que se debe aclarar, es que en estos ensayos la medición de la permeabilidad fue más difícil, debido a la baja permeabilidad de estos suelos. Esto se debe a que el permeámetro utilizado fue implementado sólo para ensayos de carga constante, ensayo con el cual es más complicada la medición para suelos de baja permeabilidad y los errores aumentan debido a la precisión de los equipos utilizados.

Por otra parte, debe notarse que el suelo ensayado con solución ácida no pudo ser recirculado debido a la decantación de una importante cantidad de partículas en la solución. Estas partículas taparon tanto el contenedor de solución, como las

válvulas de la celda triaxial, como se puede observar en la Figura 5.16. Por otra parte, ante la imposibilidad de recircular la muestra, sólo se realizó una (1) medición de permeabilidad con solución ácida, con lo cual no es posible asegurar la saturación de la muestra. En el ensayo realizado con agua, también se advirtió la presencia de estas partículas en la solución, lo cual no afectó las mediciones debido a que el ensayo no se realizó con recirculación.

**Figura 5.16: Finos en soluciones ácidas y en caps, muestra ET-6**

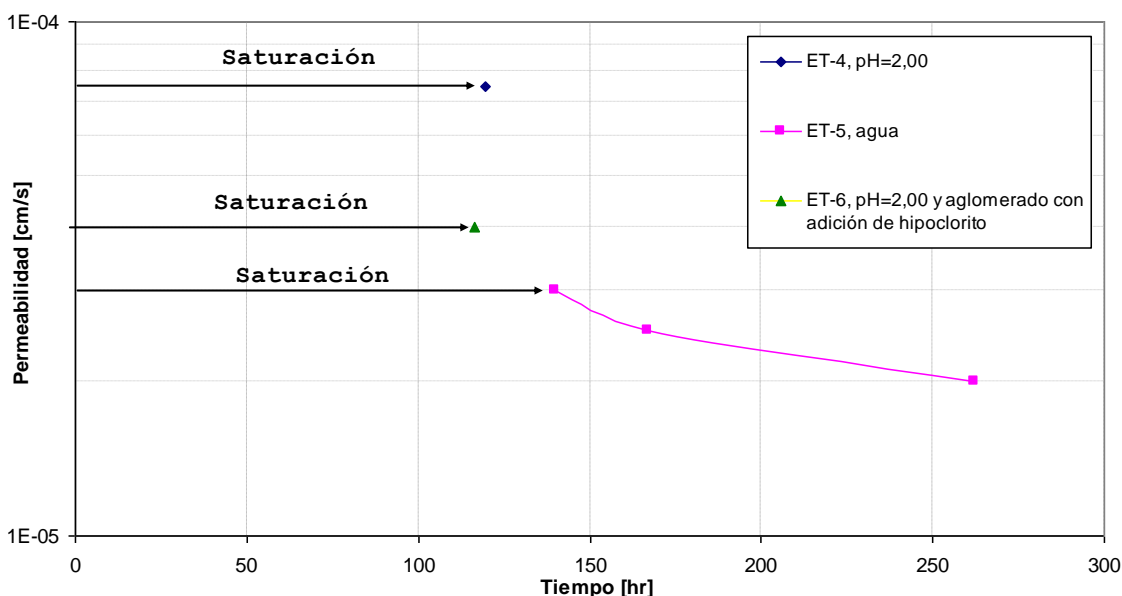


Estos dos puntos indican que las diferencias entre las permeabilidades de ambas muestras podrían ser menores y no es posible atribuir las diferencias observadas a la solución utilizada.

### 5.4.3.2 Efecto provocado por la adición de hipoclorito en la permeabilidad del suelo

La Figura 5.17 muestra los mismos resultados de la Figura 5.15, pero agregando el ensayo realizado en la muestra ET-6, la cual fue aglomerada con igual dosificación que la muestra ET-4 pero con adición de hipoclorito.

Figura 5.17: Efecto de la adición de hipoclorito, El Tesoro



Los resultados de la Figura 5.17, evidencian que la muestra ET-6 tiene valores de permeabilidad que están dentro del rango de las muestras ET-4 y ET-5, por lo que la adición de hipoclorito en el proceso de aglomeración no afectó mayormente los resultados del ensayo de permeabilidad. En la muestra ET-6, al igual que en la muestra ET-5, tampoco fue posible recircular la solución, debido a la decantación de una importante cantidad de partículas en la solución.

### 5.4.3.3 Efecto de la densidad en la permeabilidad

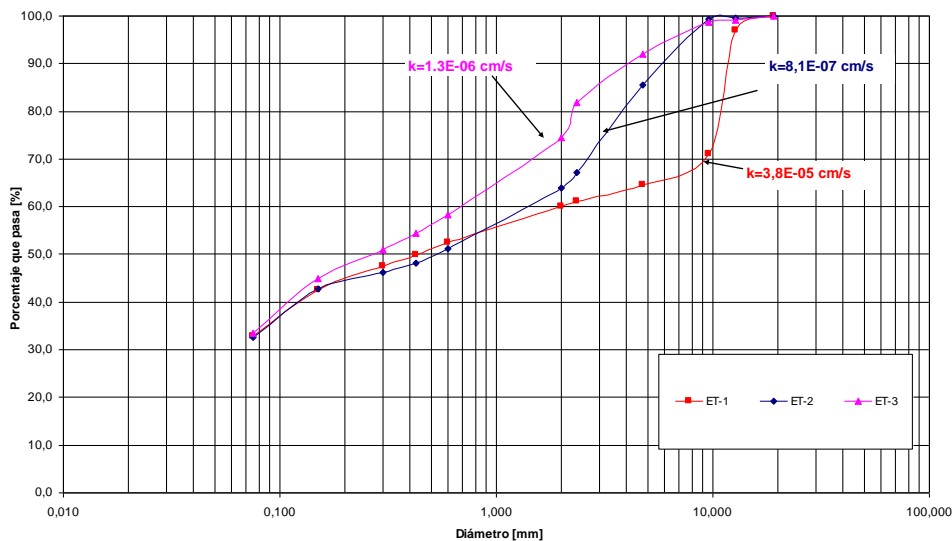
Este efecto no pudo ser estudiado en este suelo debido a la baja permeabilidad que presentó en los ensayos realizados a bajas densidades. De esta forma, sería muy difícil realizar mediciones confiables a densidades mayores con el equipo

utilizado. Como se observa a partir de la Tabla 5.9, las densidades de todas las muestras son similares, por lo que es esperable que sus permeabilidades no presenten muchas variaciones.

#### 5.4.3.4 Efecto de la granulometría en la permeabilidad, El Tesoro

Además de los ensayos presentados en la Tabla 5.9, en el suelo proveniente de la mina El Tesoro se realizó un estudio para cuantificar el efecto de la granulometría en la permeabilidad de este suelo. Para estudiar este fenómeno, se confeccionaron tres (3) muestras de la mina El Tesoro, correspondientes a mineral fresco (sin proceso de aglomeración). De esta forma, se conservó la mineralogía y se varió sólo la granulometría. En la confección de estas muestras, se conservó para las tres, el contenido de finos y el tamaño máximo. En las tres muestras, denominadas ET-1, ET-2 y ET-3, fueron realizados ensayos de permeabilidad con agua destilada. Estos resultados se presentan en la Figura 5.18. Cada ensayo contó con tres (3) mediciones de permeabilidad en las muestras ET-1 y ET-2, y con dos (2) en la muestra ET-3. De esta forma, es más factible la saturación de la muestra. Los ensayos fueron realizados confeccionando las probetas lo más suelta posible, intentando alcanzar la densidad mínima.

**Figura 5.18: Efecto de la granulometría en la permeabilidad – Granulometrías post ensayo, El Tesoro**





La Figura 5.18 presenta las granulometrías realizadas luego del ensayo de permeabilidad, junto al valor de la constante de permeabilidad obtenido en cada uno de estos ensayos. Se puede observar que hubo una variación de aproximadamente dos órdenes de magnitud entre los tres ensayos. La permeabilidad más alta se obtuvo para la muestra ET-1, la cual coincide con la más gruesa de las granulometrías; el valor obtenido para la constante de permeabilidad en este ensayo fue de  $3,8 \times 10^{-5}$  cm/s. La permeabilidad más baja fue obtenida para la muestra ET-2, sin coincidir con la muestra que presenta una granulometría más fina. El valor obtenido para la constante de permeabilidad en este caso fue de  $8,1 \times 10^{-7}$  cm/s. En la muestra ET-3 se midió una permeabilidad de  $1,3 \times 10^{-6}$  cm/s

La Tabla 5.10 presenta los coeficientes de uniformidad para cada una de estas muestras.

**Tabla 5.10: Coeficientes de uniformidad, El Tesoro**

Muestra	D <sub>10</sub> [mm]	D <sub>60</sub> [mm]	C <sub>u</sub>	k [cm/s]
ET-1	0,02	2,00	100,0	$3,8 \times 10^{-5}$
ET-2	0,02	1,50	75,0	$8,1 \times 10^{-7}$
ET-3	0,02	0,65	32,5	$1,3 \times 10^{-6}$

A partir de la Tabla 5.10, se observa que no existe relación entre el coeficiente de uniformidad y la permeabilidad. Considerando que el contenido de finos es el mismo para todas las muestras, las diferencias en el coeficiente de uniformidad no explican la diferencia en permeabilidad.

Como se observó en el Capítulo 2.0, la permeabilidad depende, principalmente, del diámetro de las partículas; es más, depende de los diámetros de las partículas más pequeñas de la muestra (por ejemplo, D<sub>10</sub>), ya que éstas suelen controlar la permeabilidad. En este caso, las tres muestras tienen igual contenido de finos, contradiciendo lo anterior. No obstante, la diferencia podría haberse explicado por

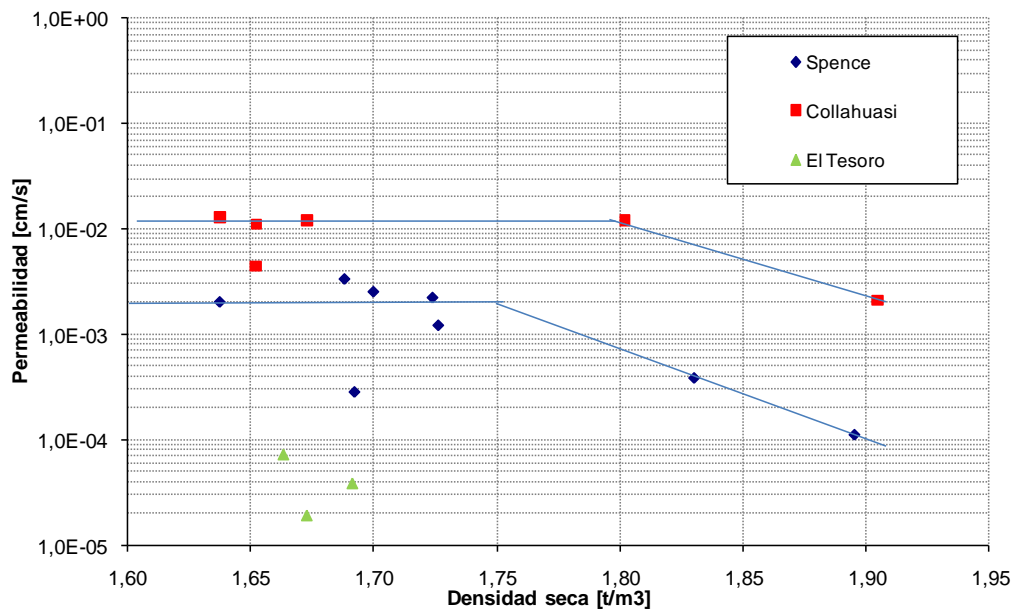
la diferencia en la graduación de las partículas, lo cual tampoco se aclara, tal como se observa en la Tabla 5.10.

La explicación de estas diferencias podría deberse a distintos factores, como por ejemplo, la influencia del diámetro medio de las partículas o la estabilidad interna de cada una de estas muestras, lo cual se revisa en el acápite 5.8. Se debe notar, no obstante, que el contenido de finos al final del ensayo es prácticamente el mismo. Debido a que en este caso no existe un efecto de lixiviación, esto indica que no hubo una migración de partículas importante

### 5.5 Resumen permeabilidad versus densidad

A modo de resumen, se presenta en la Figura 5.19, la permeabilidad versus densidad, incorporando todos los ensayos realizados en esta investigación.

Figura 5.19: Resumen permeabilidad versus densidad.



La Figura 5.19 permite reafirmar las observaciones anteriormente realizadas, como son, la existencia de un rango de densidades que no afecta mayormente la permeabilidad, y la marcada disminución de la permeabilidad una vez que se

supera este rango. Es posible observar además, que el suelo de Collahuasi es el más permeable, mientras que el de El Tesoro es el más impermeable.

## 5.6 Efecto de la granulometría en la permeabilidad

La Figura 5.20 muestra las granulometrías de las tres muestras ensayadas, junto al rango de permeabilidades obtenido para cada suelo. Para este rango sólo se consideraron los ensayos realizados a densidades bajas, cercanas a la mínima. Tampoco se consideran los ensayos realizados para estudio de granulometrías de muestras de El Tesoro. La Tabla 5.11, presenta los parámetros de estas granulometrías.

Figura 5.20: Efecto de la granulometría en la permeabilidad

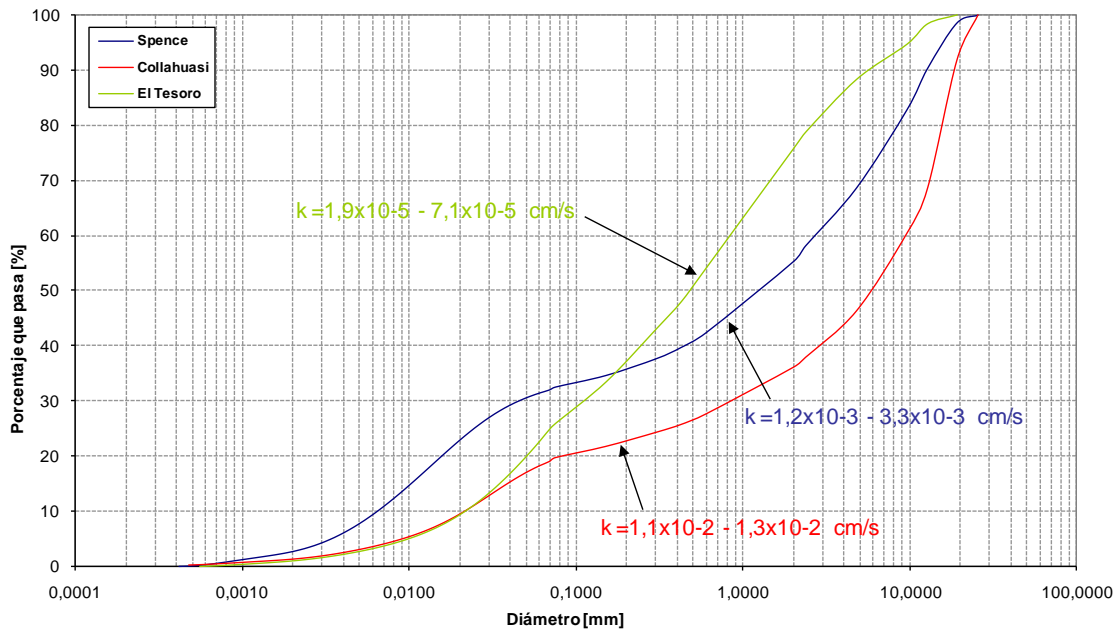


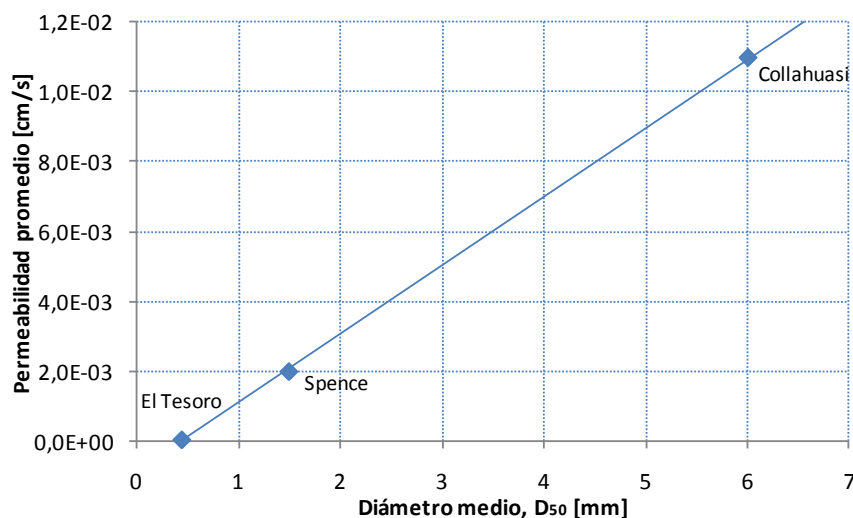
Tabla 5.11: Parámetros granulométricos

Muestra	Tam. Máx	D <sub>10</sub> [mm]	D <sub>60</sub> [mm]	% finos	C <sub>u</sub>
Spence	1"	0,006	2,50	32,5	417
Collahuasi	1"	0,020	9,50	19,5	475
El Tesoro	3/4"	0,020	0,80	27,3	40

A partir de la Figura 5.20 y la Tabla 5.11, se observa que no se cumple que los suelos que tengan un mayor diámetro efectivo ( $D_{10}$ ) tengan una permeabilidad mayor. De esta forma, la muestra de Spence debiera ser la que tiene una permeabilidad menor, lo cual no ocurre. Por otra parte, las diferencias tampoco se pueden explicar mediante el coeficiente de uniformidad; por ejemplo, las muestras de Collahuasi y El Tesoro poseen el mismo valor de  $D_{10}$ , y el coeficiente de uniformidad es mucho mayor para la muestra de Collahuasi. No obstante, la permeabilidad de la muestra de El Tesoro es mucho menor, lo cual contradice lo esperado, ya que al tener un menor coeficiente de uniformidad, se esperaría una permeabilidad mayor.

Sin embargo, si se realiza un análisis simple al observar todas las curvas, es posible observar que las muestras de Collahuasi y Spence, que tienen curvas granulométricas con una forma similar, tienen permeabilidades de acuerdo a lo esperado, es decir, la muestra más gruesa presenta una mayor permeabilidad. Además, si se observa el diámetro medio de cada una de las muestras, se puede observar que este parámetro puede explicar las diferencias. La Figura 5.21 muestra la permeabilidad en función del diámetro medio, para lo cual se utilizaron los valores promedio de las permeabilidades. Se observó que existe una relación lineal entre la permeabilidad y el diámetro medio para los tres suelos estudiados, lo cual representa un importante resultado, y a la vez sorprendente. El hecho de que la relación se haya dado para un diámetro mayor al  $D_{10}$  podría deberse a la inestabilidad interna de las muestras, ya que no todas las partículas estarían formando parte del esqueleto resistente. Debe considerarse que la cantidad de suelos estudiados es escasa para realizar conclusiones respecto a esta observación, no obstante, presenta una importante vía de investigación en el estudio de este tipo de suelos.

Figura 5.21: Efecto del diámetro medio en la permeabilidad



Se debe agregar que los finos de todas estas muestras tienen plasticidades similares, como se vio en el acápite 5.3. Además, se debe agregar que el suelo de El Tesoro corresponde a un mineral ROM (no es sometido a chancado sino que la granulometría que tiene este suelo, es aquella con la que sale del proceso de extracción), mientras que el resto de los suelos fue sometido a chancado para llegar a los tamaños que posee, y que los minerales de El Tesoro son conocidos por sus bajas permeabilidades y dificultad de operación en terreno.

Las diferencias observadas no representan una anomalía en los resultados, ya que se ha observado que en ensayos con muestras que contengan arcillas, no es posible extrapolar permeabilidades, debido a la capacidad de éstas para hincharse o flocularse.

La estabilidad interna de las muestras también podría afectar la permeabilidad, lo cual se discute con mayor profundidad en el acápite 5.8.

## 5.7 Granulometrías post ensayo

Las Figuras 5.22, 5.23 y 5.24, muestran las granulometrías realizadas luego de cada serie de ensayos de permeabilidad para los distintos suelos utilizados.

Figura 5.22: Granulometrías post ensayo, Spence

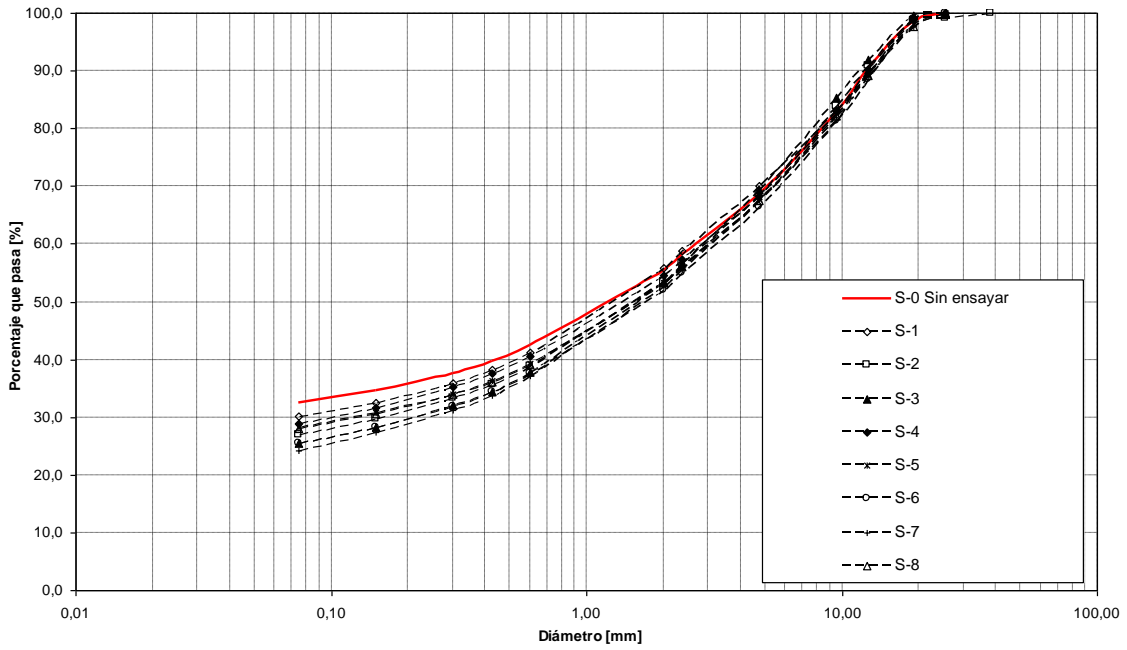


Figura 5.23: Granulometrías post ensayo, Collahuasi

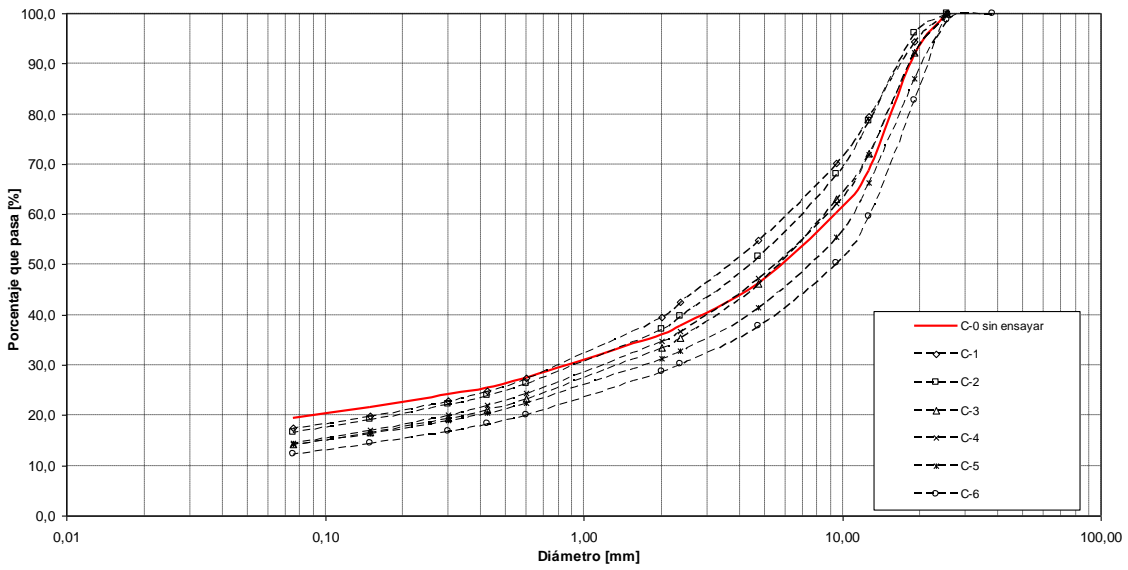
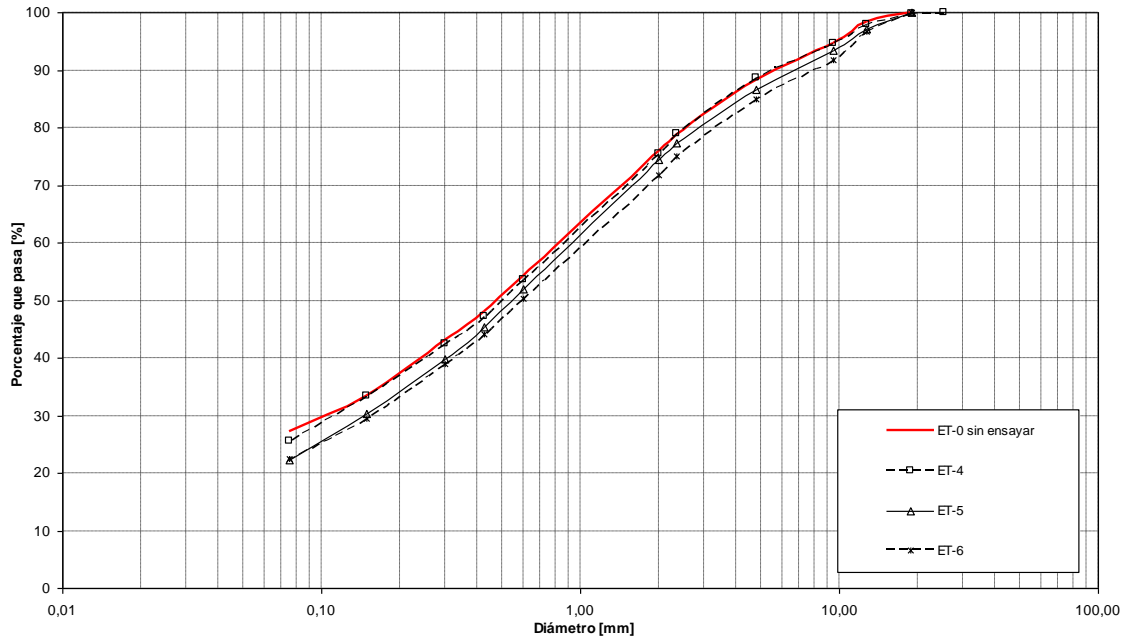


Figura 5.24: Granulometrías post ensayo, El Tesoro



A partir de las Figuras 5.22, 5.23 y 5.24, se puede observar que el principal efecto provocado por la ejecución del ensayo de permeabilidad en la granulometría del suelo, fue la disminución del porcentaje de finos de las muestras ensayadas. Esta disminución se podría explicar por dos efectos: la migración y la lixiviación de los finos. Caber notar que también es posible que exista creación de finos debido a un chancado químico de las partículas mayores. Pese a que algunos de los ensayos se realizaron con agua, no se descarta que en éstos pueda haber ocurrido lixiviación, debido a que las muestras contenían ácido antes de comenzar el ensayo.

La Tabla 5.12, presenta los porcentajes de finos en cada una de las muestras ensayadas. También se incluye el porcentaje de finos de las muestras antes de ensayar.

Tabla 5.12: Porcentajes de finos de las muestras ensayadas

<b>SPENCE</b>		
<b>Muestra</b>	<b>% de finos</b>	<b>Disminución del % de finos</b>
S-0 (sin ensayar)	32,5	-
S-1	30,1	2,4
S-2	26,9	5,6
S-3	25,4	7,1
S-4	28,9	3,6
S-5	28,2	4,3
S-6	25,5	7,0
S-7	24,3	8,2
S-8	28,1	4,4
<b>COLLAHUASI</b>		
<b>Muestra</b>	<b>% de finos</b>	<b>Disminución del % de finos</b>
C-0,0 (sin ensayar)	19,5	-
C-1	17,4	2,1
C-2	16,7	2,8
C-3	14,2	5,3
C-4	14,5	5,0
C-5	14,3	5,2
C-6	12,2	7,3
<b>EL TESORO</b>		
<b>Muestra</b>	<b>% de finos</b>	<b>Disminución del % de finos</b>
ET-0 (sin de ensayar)	27,3	-
ET-4	25,6	1,7
ET-5	22,3	5,0
ET-6	22,5	4,8

De la Tabla 5.12, se observa que existe una gran disminución en el porcentaje de finos, especialmente en las muestras de Spence y Collahuasi, donde se alcanza valores máximos de 8,2% y 7,3%, respectivamente. Las muestras de El Tesoro presentan una menor disminución en el porcentaje de finos, no obstante, se alcanzó una disminución máxima de 5,0% de finos, lo cual también representa una disminución importante. Cabe notar que la disminución del porcentaje de finos toma en cuenta el efecto de migración, lixiviación y chancado químico. Este último podría actuar creando finos, y por lo tanto, la pérdida de finos por migración y lixiviación sería mayor a la disminución considerada en la Tabla 5.12. Por otra parte, se puede observar que las muestras S-1 y C-1, son las que tienen un mayor contenido de finos post ensayo, de las muestras correspondientes a Spence y



Collahuasi respectivamente. Esto explicaría que en estas dos muestras se hayan medido permeabilidades menores respecto a muestras de los mismos suelos ensayadas a densidades similares.

Por otra parte, no se observan relaciones claras entre la pérdida de finos y variables como pH de las soluciones ácidas o tiempo de ensayo. No se realizaron mediciones de pérdida de masa, lo que podría dar luces de cuánto afecta la lixiviación y cuánto afecta la migración de partículas en los cambios granulométricos. Sería conveniente realizar ensayos de pérdida de masa en futuras investigaciones.

### **5.8 Estabilidad interna de los suelos estudiados**

Como se mencionó en el Capítulo 2.0, la migración de las partículas más finas a través de la matriz de las partículas más gruesas, podría ser una de las causas de los problemas de estancamiento de soluciones que suelen presentarse en las pilas de lixiviación. Para estudiar este fenómeno, se tomaron las granulometrías integrales (incluyendo partículas menores a 0,074 mm) y se estudiaron bajo el criterio desarrollado por Kezdi (Kezdi, 1979), y el presentado por Kenney & Lau (Kenney and Lau, 1985)). Estos criterios han sido presentados con mayor detalle en el Capítulo 2.0.

Los resultados obtenidos en cada uno de los suelos, se presentan a continuación en las Figuras 5.25 a 5.30, y en la Tabla 5.13, donde se han incorporado los resultados obtenidos por Órdenes a modo de comparación.

Figura 5.25: Análisis de estabilidad interna por el método de Kezdi (1979), Spence

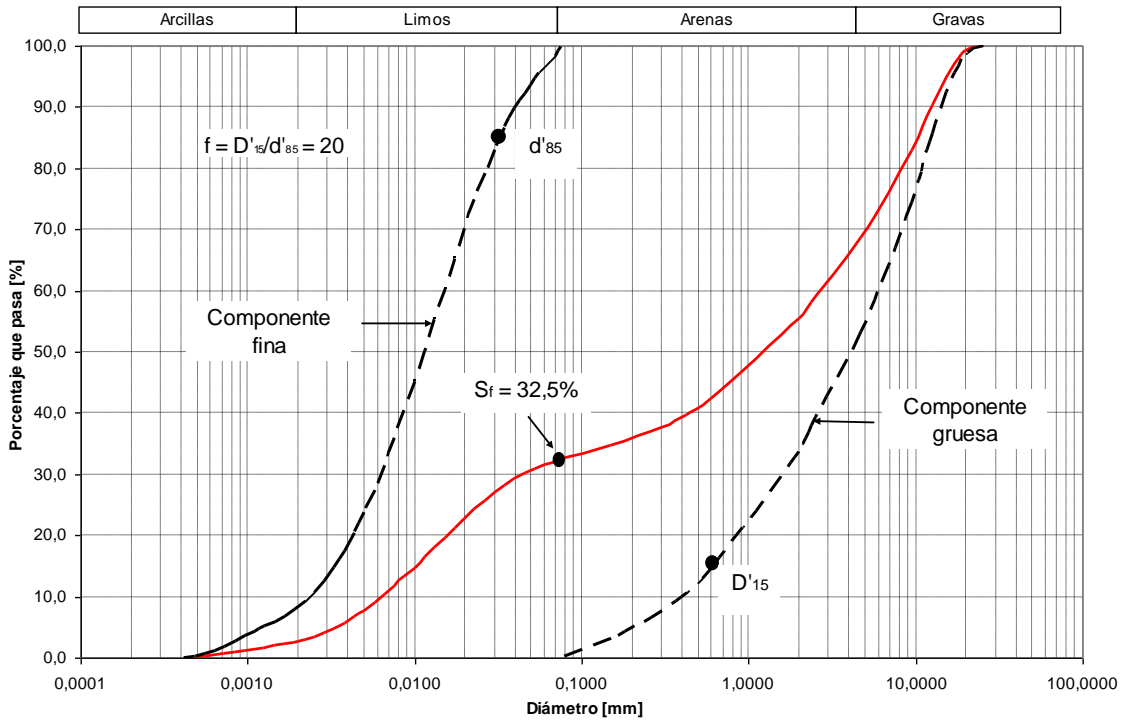


Figura 5.26: Análisis de estabilidad interna por el método de Kenney & Lau (1985), Spence

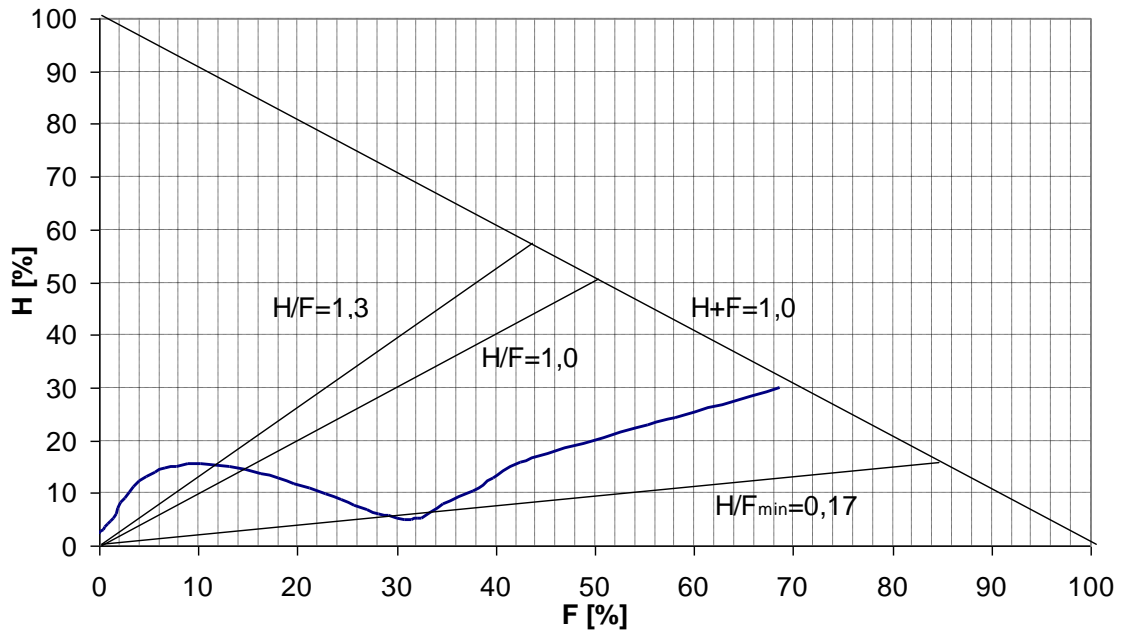


Figura 5.27: Análisis de estabilidad interna por el método de Kezdi (1979), Collahuasi

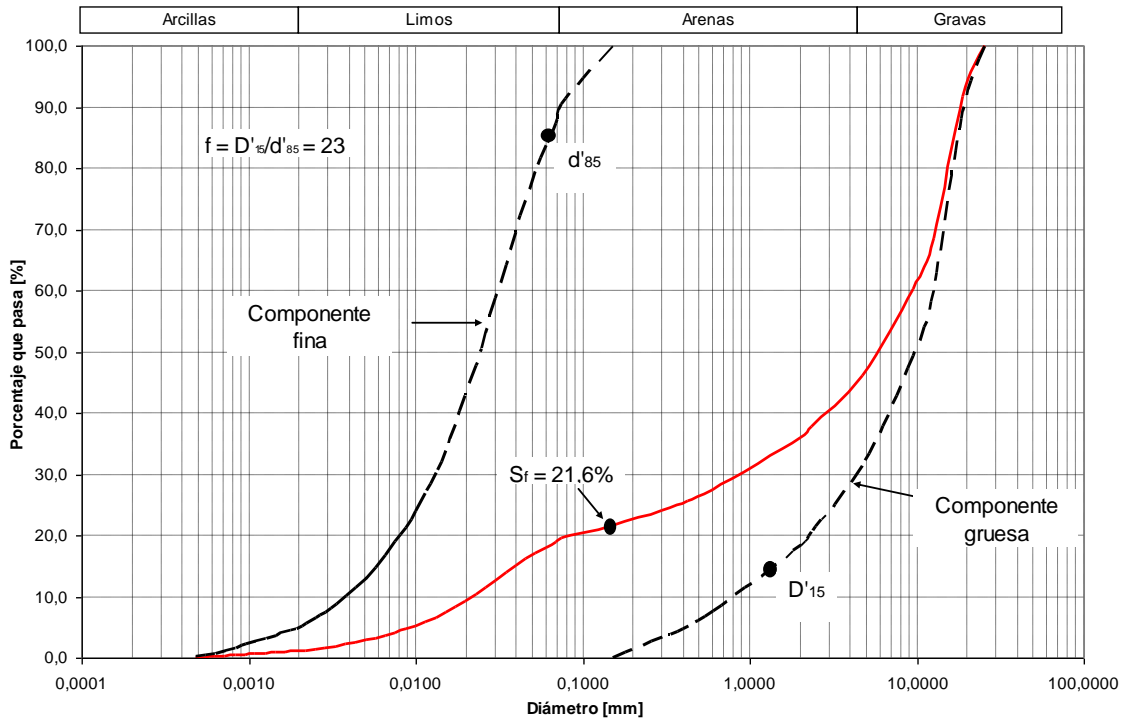


Figura 5.28: Análisis de estabilidad interna por el método de Kenney and Lau (1985), Collahuasi

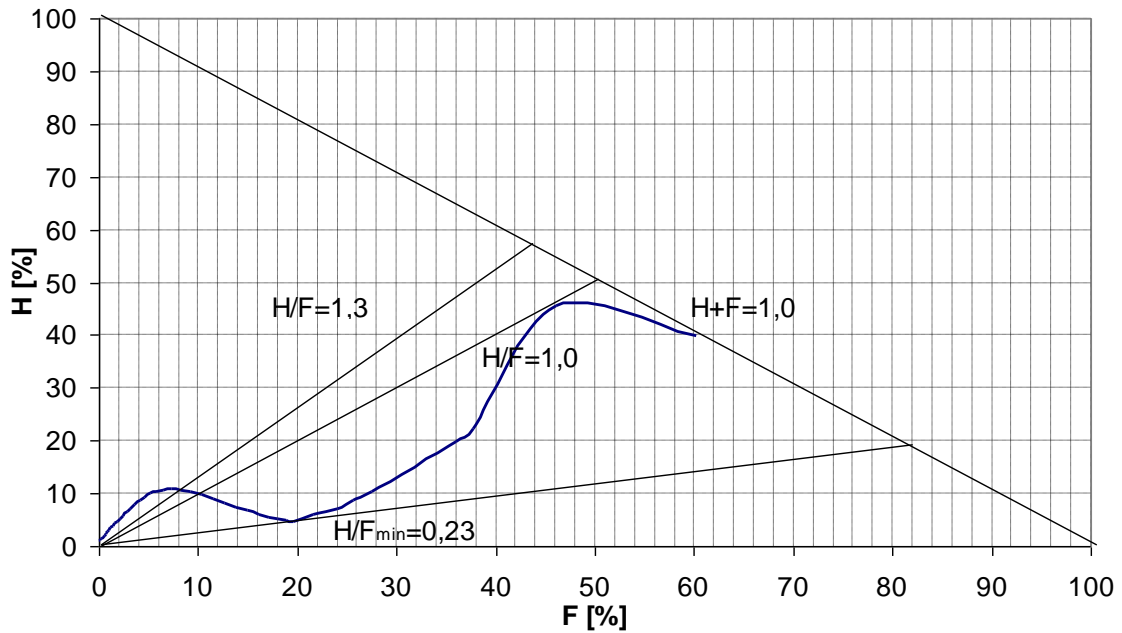


Figura 5.29: Análisis de estabilidad interna por el método de Kezdi (1979), El Tesoro

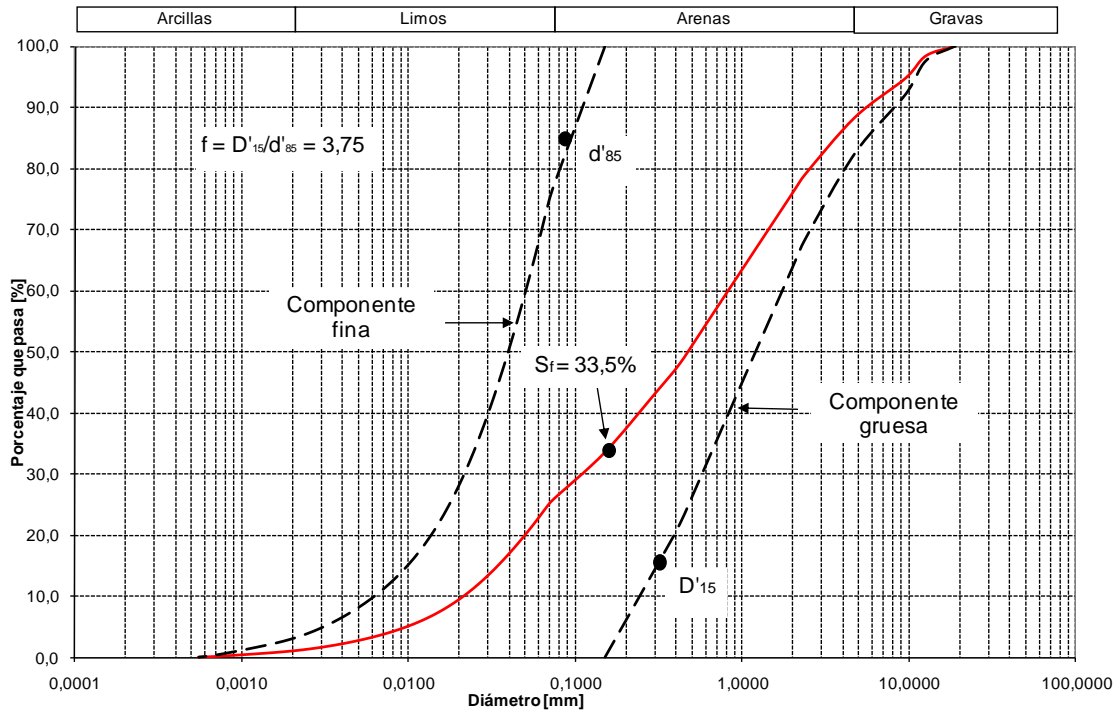


Figura 5.30: Análisis de estabilidad interna por el método de Kenney & Lau (1985), El Tesoro

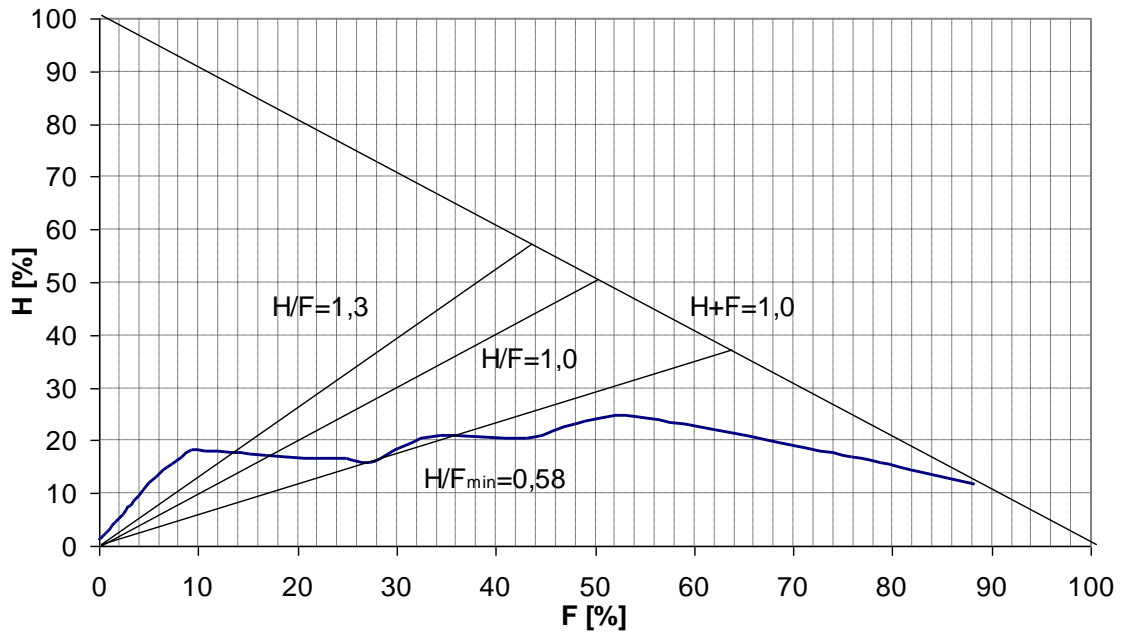


Tabla 5.13: Análisis de estabilidad interna mediante el método de Kezdi (1979) y Kenney and Lau (1985)

Muestra	$C_u$	$S_f$ [%]	$D'_{15}/d'_{85}$	$(H/F)_{min}$
Spence	417	32,5	20,00	0,17
Collahuasi	475	21,6	23,00	0,23
El Tesoro	40	33,5	3,75	0,58
Morrena <sup>(*)</sup>	110	-	9	0,44

(\*)Órdenes 2008

Estos resultados indican que todas las muestras evaluadas por el criterio de Kenney & Lau (1985) son inestables internamente, mientras que al evaluarlas mediante el método de Kezdi(1979) las muestras de Spence y Collahuasi presentan inestabilidad interna. La muestra de El Tesoro, en cambio, es estable mediante este criterio. Lo anterior podría explicar, en parte, algunos problemas de estancamiento en pilas de lixiviación, los cuales podrían producirse por migración de finos desde la parte superior de la pila hacia la parte inferior, acumulándose en los sectores cercanos a las tuberías de colección y drenaje, y por lo tanto, afectando el drenaje de soluciones y produciendo un aumento en el nivel freático. En la utilización del criterio de Kenney and Lau, la razón H/Fmin fue evaluada para valores de F entre 0% y 30%, tal como lo establece Kenney and Lau (Kenney and Lau, 1985). Esto se debe a que se considera que sólo un 30% de las partículas más finas pueden migrar por la matriz de las partículas más gruesas.

La primera observación importante que puede realizarse de estos resultados, es que la muestra de El Tesoro presenta el menor potencial de inestabilidad interna, evaluada por los dos criterios utilizados en esta investigación. Esta observación está de acuerdo con la menor pérdida de finos observada en esta muestra de suelo, tal como se muestra en el acápite 5.6. También se observa que los suelos de Spence y Collahuasi presentan un potencial de inestabilidad mayor que el del suelo morrénico estudiado por Órdenes, considerando ambos criterios. Lo anterior indicaría que la migración de finos se produciría a menores gradientes que en el estudio desarrollado por Órdenes.

Se debe notar que en los ensayos de laboratorio se observó migración de finos durante la saturación de las muestras, no obstante, aparentemente ésta no logró afectar la permeabilidad de los suelos de manera importante, lo que se concluye a partir del comportamiento de la permeabilidad en el tiempo. De lo anterior, no es posible concluir que la migración de los finos no afecte la permeabilidad en las pilas de lixiviación debido a que el largo de la probeta utilizada para los ensayos de permeabilidad es mucho menor si se compara con la altura de las pilas, por lo que se concluye que en una pila podría acumularse una gran cantidad de finos en la parte inferior de ésta (más aún si se utiliza un material filtrante sobre la geomembrana), lo cual podría provocar un estancamiento de las soluciones y el aumento en el nivel freático de la pila, afectando incluso la estabilidad de ésta.

Como complemento a estos análisis, se debe tomar en cuenta que en la construcción de las pilas de lixiviación, el mineral suele ser depositado por volteo, por lo que éste suele quedar depositado en estado suelto, lo cual aumentaría las posibilidades de presentar migración de partículas (Órdenes, 2008), no obstante, los gradientes hidráulicos que se tienen en las pilas suelen ser bajos.

## **6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1 General**

El objetivo general planteado en esta investigación consistió en intentar comprender los potenciales cambios de permeabilidad en el material de una pila de lixiviación. Para esto, la investigación se centró en comparar el coeficiente de permeabilidad medido en laboratorio utilizando agua destilada, con el valor obtenido usando soluciones ácidas compuestas por agua destilada y ácido sulfúrico. Esta idea se basó en la experiencia chilena en ensayos de permeabilidad en rípios lixiviados y a la escasez de datos de permeabilidad realizados con soluciones ácidas.

Para cumplir los objetivos planteados se realizaron ensayos utilizando agua destilada y soluciones ácidas, en tres muestras de suelos correspondientes a minerales frescos en algunos casos y rípios lixiviados en otros. Éstos fueron realizados a carga constante y en pared flexible. Posterior a cada ensayo de permeabilidad, se realizaron análisis granulométricos post ensayo para establecer diferencias entre la granulometría de la muestra antes y después de realizar cada ensayo. Los análisis granulométricos realizados posteriores a los ensayos de permeabilidad, sumados a la observación en la ejecución de los ensayos, permitieron constatar una importante migración de partículas a lo largo de las mediciones. Este fenómeno fue estudiado teóricamente, basándose en los criterios desarrollados por Kezdi (Kezdi, 1979) y Kenney and Lau (Kenney and Lau, 1985).

Los ensayos realizados permitieron estudiar otros efectos además de los ya enumerados, concernientes al flujo de soluciones en pilas de lixiviación. Dentro de éstos se pueden mencionar: el efecto producido por la acción de las soluciones ácidas en la permeabilidad de los suelos a lo largo del tiempo; el efecto de la acidez de la solución (concentración de ácido sulfúrico) en el ensayo de permeabilidad; el efecto de la densidad en la permeabilidad de este tipo de suelos;

el efecto provocado en la permeabilidad del suelo por la adición de hipoclorito en el proceso de aglomeración; el efecto de la granulometría de la muestra en la permeabilidad del suelo; y el efecto de la acción del ácido sulfúrico y el secado al horno en la plasticidad de los finos.

## **6.2 Conclusiones**

Luego de analizar los resultados de los ensayos realizados, las principales conclusiones obtenidas de éstos se presentan a continuación. Cabe notar que estas conclusiones se basan en los ensayos realizados en las tres muestras de suelo utilizadas en esta investigación:

- Se ha observado en terreno que existen cambios de permeabilidad durante el proceso de lixiviación. En este estudio se han ensayado en laboratorio tres diferentes materiales provenientes de tres obras mineras, a fin de analizar los efectos directos de las soluciones ácidas utilizadas en estas obras en la permeabilidad de los depósitos. Se han comparado los resultados con los obtenidos en ensayos que utilizan agua destilada, para concluir que no existen significativas variaciones en la permeabilidad al utilizar soluciones ácidas, lo cual contradice lo esperado en esta investigación. Esto fue verificado en ensayos realizados a carga constante y en pared flexible, utilizando soluciones ácidas y agua destilada. Resultados deficientes o contradictorios que pudieran haberse obtenido en experiencias anteriores en este tipo de suelos, podrían deberse a la utilización de equipos inadecuados compuestos de piezas hechas de metales lixiviables al contacto con ácido sulfúrico;
- Dos de los materiales estudiados presentan granulometrías que permiten y propician inestabilidad interna frente al flujo. Como se podía entonces esperar, en los ensayos realizados sobre estas muestras se han observado cambios producidos por migración de partículas. La inestabilidad interna



pudo ser constatada teóricamente mediante los métodos desarrollados por Kenney y Lau (Kenney and Lau, 1985) y Kezdi (Kezdi, 1979). Cabe notar que por ambos criterios, los suelos de Collahuasi y Spence presentan un mayor potencial de inestabilidad interna que los suelos morrénicos estudiados por Órdenes (Órdenes, 2008) en los que se demostró inestabilidad interna empíricamente;

- Se puede concluir que la mayor parte de los cambios globales de permeabilidad se deben a la migración de partículas que terminan por localizarse en determinados planos constituyendo substratos comparativamente impermeables;
- Se desestima por lo tanto el efecto directo y negativo en términos de permeabilidad de las soluciones ácidas en el material lixiviado, criterio que hasta aquí ha primado para explicar los cambios de permeabilidad observados en terreno;
- La similitud entre las formas de las curvas granulométricas de los suelos provenientes de Spence y Collahuasi y el alto potencial de inestabilidad interna que presentan al ser evaluados bajo los criterios utilizados en esta investigación, indican que en estos casos (y quizás en muchos otros), los criterios con los que son chancados los minerales serían inapropiados desde el punto de vista de flujo de soluciones. Actualmente, los criterios para chancado dependen exclusivamente de variables metalúrgicas y de los chancadores de los que se disponga (los cuales han sido diseñados mediante el mismo criterio o, simplemente, son los que dispone el mercado). Este estudio concluye que se debe realizar una evaluación en futuros proyectos o investigaciones, de la posibilidad de obtener granulometrías potencialmente estables sin afectar el proceso de lixiviación. Esto se debe realizar mediante un estudio desde el punto de vista técnico y

económico, confluyendo, en principio, las disciplinas geotécnicas (para mejorar el flujo de soluciones), de procesos (para optimizar la recuperación de cobre en el tiempo) y mecánica (para estudiar la posibilidad de construir un chancador que permita realizar lo anterior);

- La permeabilidad se vio afectada fuertemente por la densidad en los ensayos realizados en los suelos provenientes de Spence y Collahuasi;
- Los ensayos realizados con soluciones ácidas mostraron que la permeabilidad no sufrió variaciones considerables a lo largo del tiempo. Las diferencias que se presentaron en los ensayos realizados en esta investigación estarían asociadas principalmente a la saturación de la muestra, o bien a migración de las partículas más finas, creando áreas con menor permeabilidad;
- La acidez de las soluciones ácidas no afecta la permeabilidad de los suelos estudiados. Esto pudo ser observado en los ensayos realizados con soluciones con distintos valores de pH y agua destilada, donde no se notaron diferencias significativas;
- El secado al horno en ensayos de límites de Atterberg con agua destilada así como con solución ácida no afectaron significativamente los resultados.

Nota: No se ha realizado el análisis para el material proveniente de Minera El Tesoro.

### **6.3 Recomendaciones para futuras investigaciones**

A continuación se enumeran algunas recomendaciones que, a juicio del autor, podrían ser de utilidad en futuras investigaciones.

- Estudiar la estabilidad interna de una gran cantidad de minerales chancados, de manera teórica en un inicio, para evaluar la hipótesis establecida en esta

investigación, la cual indica que una gran cantidad de minerales podría tener problemas de estabilidad interna debido a los procesos de chancado. Además, se deben incorporar ensayos de laboratorio que permitan corroborar el análisis teórico, y que puedan establecer las condiciones de tensión efectiva, gradiente hidráulico y densidad, a las cuales se produciría inestabilidad en este tipo de suelo; éstas deben ser comparadas con las que suelen tenerse en las pilas de lixiviación;

- Realizar nuevos estudios acerca del efecto de la densidad en la permeabilidad de este tipo de suelos, incorporando ensayos de compactación que permitan medir el grado de compactación al cual comienza a disminuir la permeabilidad;
- Estudiar el efecto de la carga vertical en la permeabilidad. Este fenómeno es importante debido a la creciente altura de las pilas de lixiviación (alcanzando hasta 200 m). Algunas de éstas poseen sistemas de colección de soluciones en niveles intermedios, no obstante, otras colectan las soluciones sólo en la parte inferior de la pila, sometiendo a grandes tensiones a los minerales que se encuentran en estos sectores, y afectando su permeabilidad. La importante disminución de la permeabilidad mostrada por la única muestra donde se realizó este estudio, indica la importancia que tiene estudiar este fenómeno.

## 7 Bibliografía

1. Bard E. & Campaña J. (2004) Aspectos geotécnicos en el diseño de pilas y botaderos de ripios lixiviados, V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica.
2. Barret, J. Highes, M., Karavaiko and SPENCER, p. 1993a. “The chemistry of the bacterial oxidation reactions”, Metal extraction by bacterial oxidation of minerals, Ellis Horwood Series in Inorganic Chemistry. New York: Ellis Horwood. Pp73-102.
3. Barret, J. Highes, M., Karavaiko and SPENCER, p. 1993a. “Product and effluent treatment””, Metal extraction by bacterial oxidation of minerals, Ellis Horwood Series in Inorganic Chemistry. New York: Ellis Horwood. Pp154-168.
4. Carrier D. (2003), “Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman”, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, November 2003, 1054-1056.
5. Casagrande, A. (1938). “Notes on Soil Mechanics – First Semester”, Harvard University (unpublished).
6. Cedergren, H. (1967). “Seepage, drainage, and flow nets”, Wiley, New York.
7. Chang, R. “Química”, McGraw-Hill Interamericana Editores, Méjico D.F, Méjico.
8. Carman, P. (1938). “The determination of the specific surface of powders”, J. Soc. Chem. Ind. Trans., 57, 225.
9. Carman, P. (1956). “Flow of gases through porous media”, Butterworths scientific Publications, London.
10. Coduto, D. (1999). “ Geotechnical engineering: Principles and practice”, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.
11. Das, B. (1997). “Advanced soil mechanics”, Taylor & Francis, Washington D.C.
12. Dawson, R., Morgenstern, N., and Stokes, A., (1998). “Liquefaction Flowslidess in Rocky Mountain Coal Mine Waste Dumps”. Canadian Geotechnical Journal 35, pp 328-343.
13. Domic, E. (2001) “Hidrometalurgia: Fundamentos, procesos y aplicaciones”, Andros Editores, Santiago, Chile.

14. Espinoza, C. (2008). Apuntes del curso “Hidráulica de Aguas Subterráneas y su Aprovechamiento”, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
15. Fair, G. and Hatch, L. (1933). “Fundamental factors governing the stream-line flow of water through sand”. *J. Am. Water Works Assoc.*, 25, 1551-1565.
16. García-Bengochea, I., Novell, C.W., and Altschaeffl, A.G. (1979) “Pore Distribution and Permeability of Silty Clays”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 105, No. GT7, pp. 839-856.
17. Hansbo, S (1960) “Consolidation of Clay with Special Reference to Influence of Vertical Sand Drains”, *Proceeding N° 14, Swedish Geotechnical Institute*, 47 pp.
18. Hazen, A. (1911) Discussion of “Dams on Sands Foundations”, by A.C. Koenig, *Transactions, ASCE*, Vol. 73, pp 199-203.
19. Holtz, R and Kovacs, W (1981) “An Introduction to Geotechnical Engineering”, Prentice-Hall Civil Engineering an Engineering Mechanics Series.
20. Kenney, T. C. and Lau, D. (1985). “Internal stability of granular filters”, *Can. Geotéch. J.* 22. 215-225.
21. Kezdi, A. (1979) “Soil physics”. Amsterdam: Elsevier.
22. Kozeny, J. (1927) “Ueber kapillare Leitung des Wassers im Boden.”, *Wiem, Akad. Wiss.*, 136(2a), 271.
23. Lambe T. and Withman, R. (1969). “Soil mechanics”, Wiley, Ney York.
24. Leonards, G. (1962). “Engineering properties of soils”, *Foundation engineering*, G. A. Leonards, ed., Mc Graw-Hill, New York.
25. Louden, A. G. (1952) “The computation of permeability form simple soil tests”, *Géot.*, 13, No. 4, pp. 325-333.
26. Mansur, C. and Kaufman, R. (1962). “Dewatering”, *Foundation engineering*, G. A. Leonards, ed., Mc Graw-Hill, New York.
27. Mesri, G. and Olson, R. (1971) “Mechanism controlling the permeability of clays”, *Clays and Clay Minerals*, 19, No. 3, pp. 151-158.
28. Milligan, V. (1986). “Internal stability of granular filters: 1 Discussion”. *Canadian Geotechnical Journal*. 23, 414-418-

29. Mimica, C. (2002). “Criterios Vigentes para el Diseño de Circuitos de lixiviación de Minerales Oxidados de Cobre en Pilas”, memoria de título para optar al grado de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile.
30. Moffat, R. (2005). “Experiments on the internal stability of widely graded cohesionless” A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. University of British Columbia. Department of Civil Engineering.
31. Newman, L., Herasymuik, G., Barbour, S., Fredlund, D. and Smith, T. (1997). “The Hidrogeology of Waste Rock Dumps and Mechanism for Unsaturated Preferential Flow”, Proceedings for the Fourth International Conference on Acid Rock Drainage, Vancouver, B. C., May 31-June 6, 1997, pp. 551-565.
32. O’Kane Consultants Inc. (2000), “Demonstration of the Application of Unsaturated Zone Hidrology for Heap Leach Optimization”. Industrial Research Assistance Program Contract #332407.
33. Órdenes, S. (2008). “Inestabilidad Interna en Materiales de Origen Glacial”, Tesis para optar al grado de magíster en ciencias de la Ingeniería, mención Ingeniería Geotécnica, Universidad de Chile.
34. Paipa, C. “Estudio Cinético de la Precipitación de Jarositas en el Sistema  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3\text{-H}_2\text{O-H}_2\text{SO}_4\text{-M}_2\text{SO}_4$  a  $70^\circ\text{C}$ ”, Tesis para optar al grado académico de doctor en Química, Universidad de Chile.
35. Página web de Codelco <http://www.codelco.com>
36. Ripley, F. (1986). “Internal stability of granular filters: 1 Discussion”. Canadian Geotechnical Journal 23, 225-258.
37. Shepherd, R. (1989) “Correlations of permeability and grain size”, Ground Water, Vo. 27, No. 5, pp. 633-638.
38. Sherard, J. y Dunnigan, L. (1986). “Internal stability of granular filters: 1 Discussion”. Canadian Geotechnical Journal. J23, 418-420.

39. Schmidt, P. (2001). "Criterios de diseño de un proceso hidrometalúrgico para minerales de cobre oxidados", memoria de título para optar al grado de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile.
40. Skempton, A. W. and Brogan J. M. (1994). "Experiments on piping in sandy gravels", *Géotechnique* 44, No. 3, 449-460.
41. Slichter, C. S. (1899). Annual report of US geological survey, p 311.
42. Tavernas, F., Tremblay, M., Larouche, G. and Leroueil, S. (1986) "In situ measurement of permeability of natural soft clays" Proc. In Situ '86, ASCE Specialty Conf. on Use of In Situ testing in Geotech. Eng., Blacksburg, pp 1034.1048.
43. Taylor, D.W. (1948). "Fundamentals of Soil Mechanics", John Wiley & Sons, Inc., New York.
44. Terral, (2004). "Revisión de Lixiviación en Pilas de Minerales de Cobre", COGNIS, LX User Xonference, La Serena.
45. Terzaghi, K. (1925). "Principle of soils mechanics: III – Determination of permeability of clay", *Engineering news record* Vo. 25, No. 21, 832-836.
46. Terzaghi, K; Peck, R (1964). "Soil Mechanics in Engineering Practice", John Wiley & Sons, Inc, New York.
47. Terzaghi, K; Peck, R and Mesri, G (1996). "Soil Mechanics in Engineering Practice", John Wiley & Sons, Inc, New York.
48. Vallejo L, (2002). "Ingeniería Geológica", Pearson Educación.
49. Vargas T, (2005). "Biolixiviación de sulfuros", apuntes del curso "Procesos Hidro-Electro Metalúrgicos", Departamento de Ingeniería Civil en Minas, Universidad de Chile.
50. Verdugo R, (1995). "Zonificación Sísmica y Geotecnia", X CongresoPanamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones. Guadalajara, México, Vol.4, pp. 647-663.

51. Wallace M, (1948). "Experimental Investigation of the Effect of Degree of Saturation on the Permeability of Sands S.M. thesis, Dept. of Civil Engr., M.I.T., Cambridge, Mass.
52. Wallace, M. (1948). "Experimental investigation of the effect of degree of saturation on the permeability of sand" Thesis, Dept. of Civil Engr., M.I.T., Cambridge.



## **ANEXO A: ENSAYOS DE PERMEABILIDAD**

Figura A.1: Muestra S-1, Spence

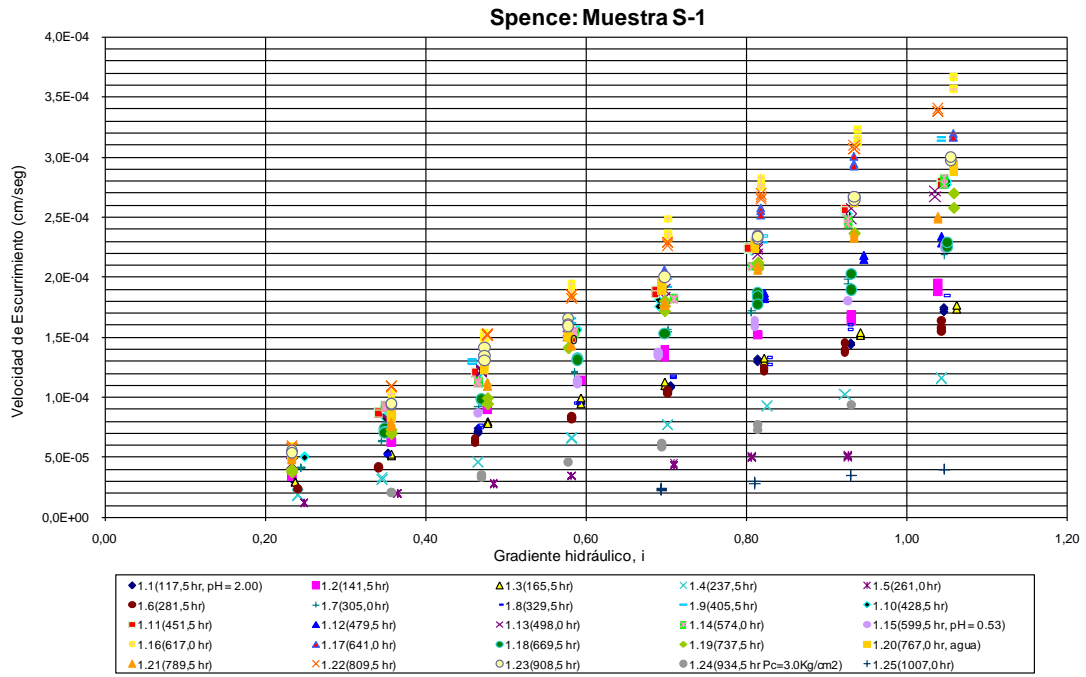


Figura A.2: Muestra S-1, permeabilidad en el tiempo

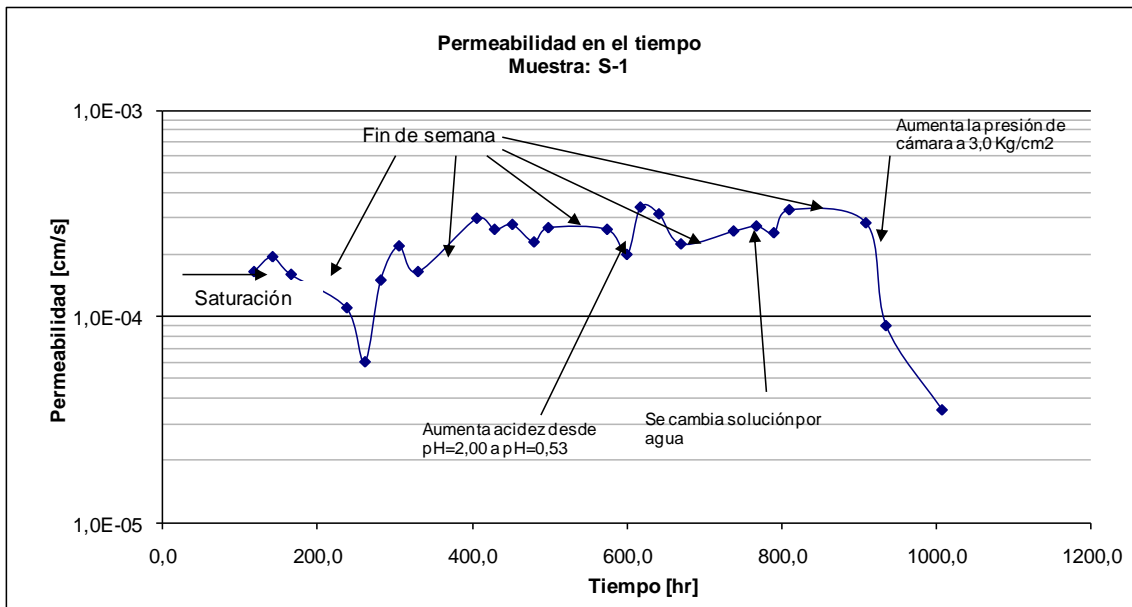


Figura A.3: Muestra S-2, Spence

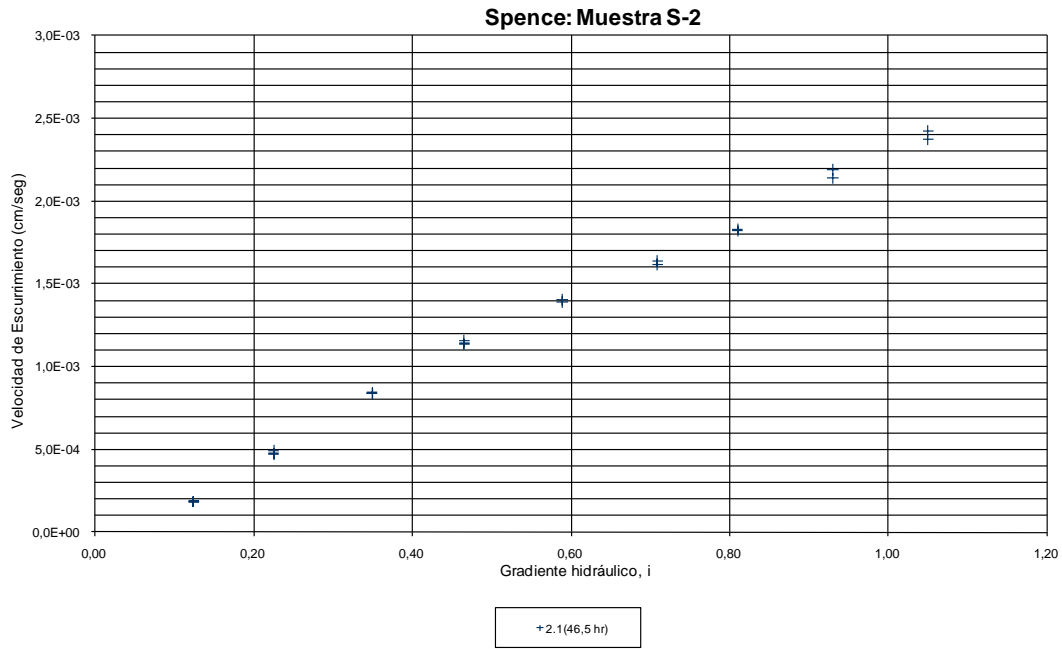


Figura A.4: Muestra S-3, Spence

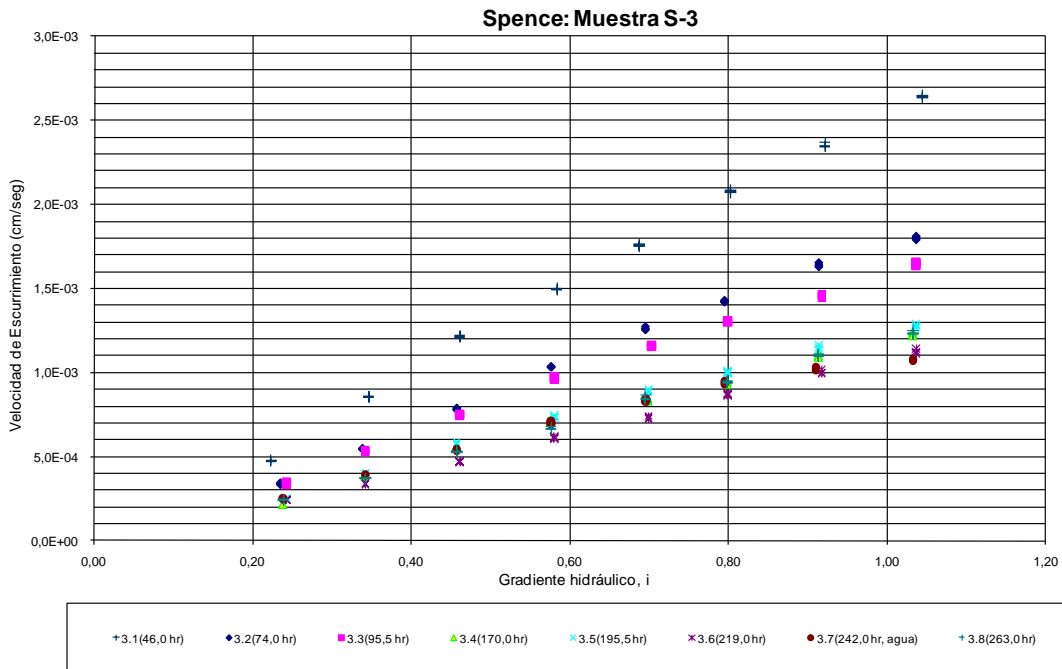


Figura A.5: Muestra S-3, permeabilidad en el tiempo

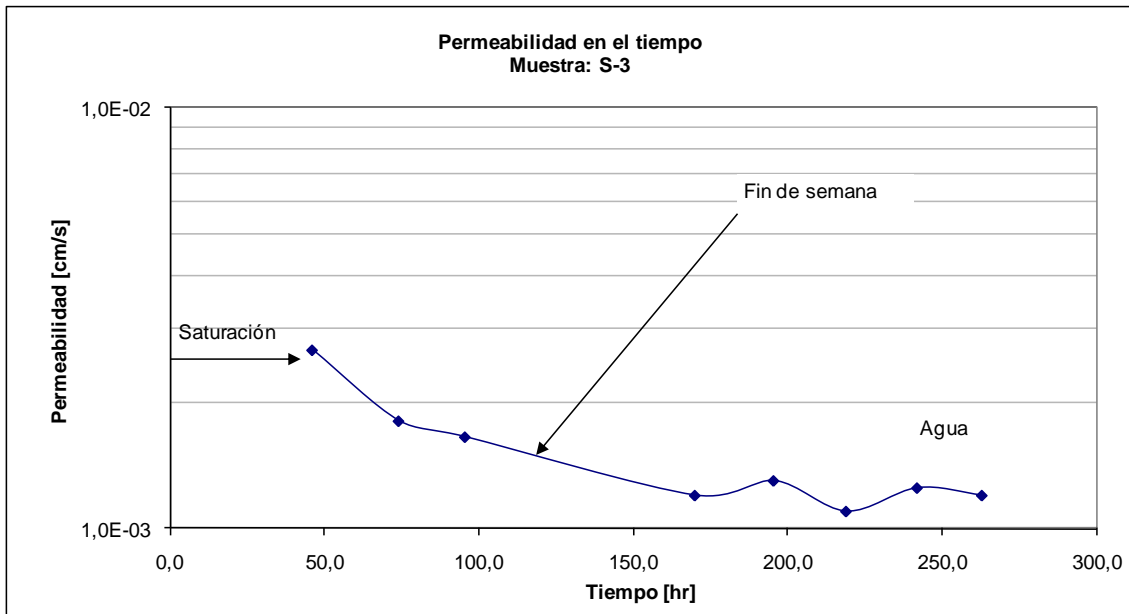


Figura A.6: Muestra S-4, Spence

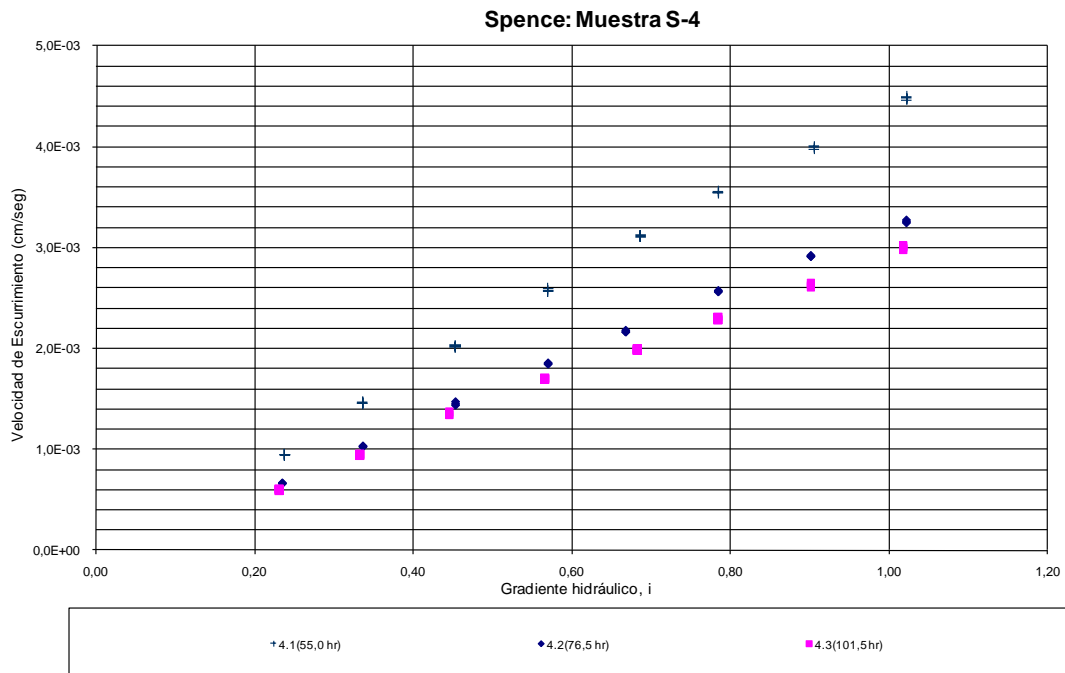


Figura A.7: Muestra S-4, permeabilidad en el tiempo

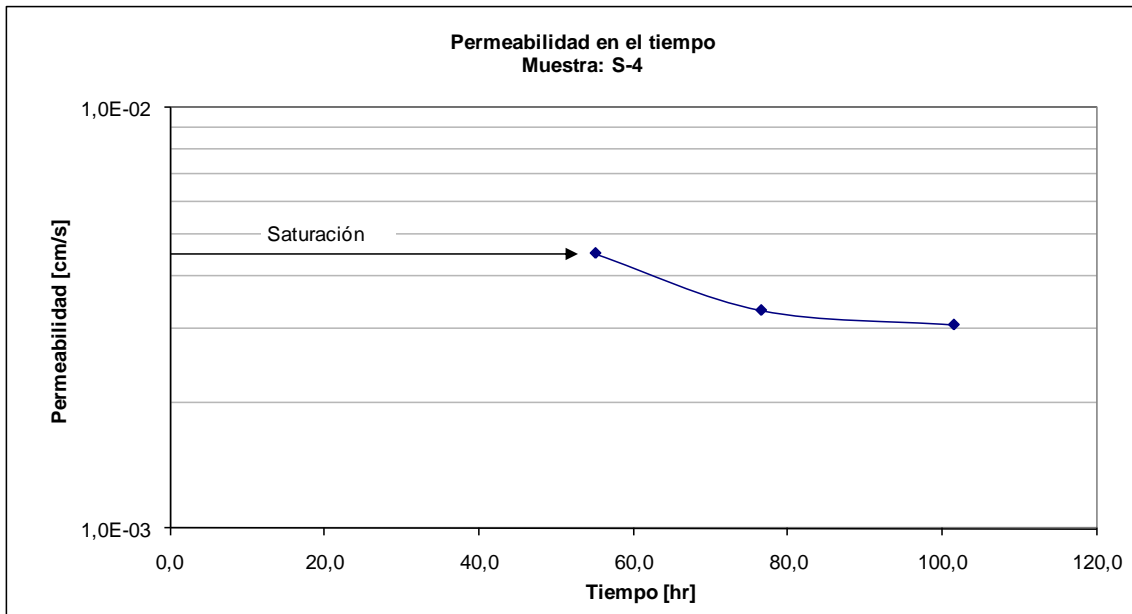


Figura A.8: Muestra S-5, Spence

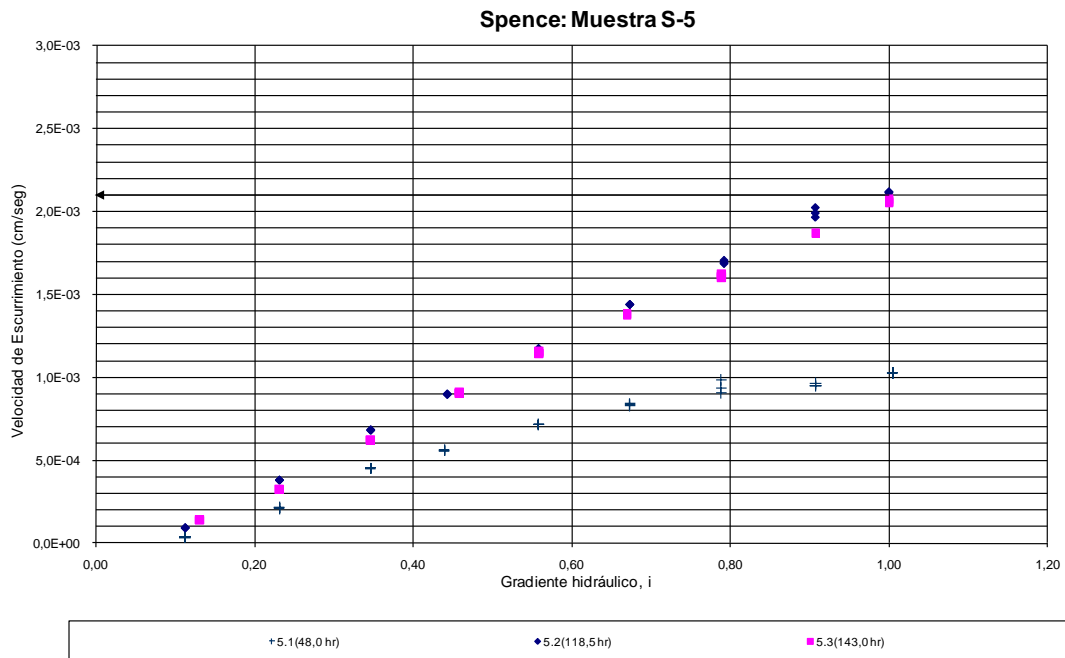


Figura A.9: Muestra S-5, permeabilidad en el tiempo

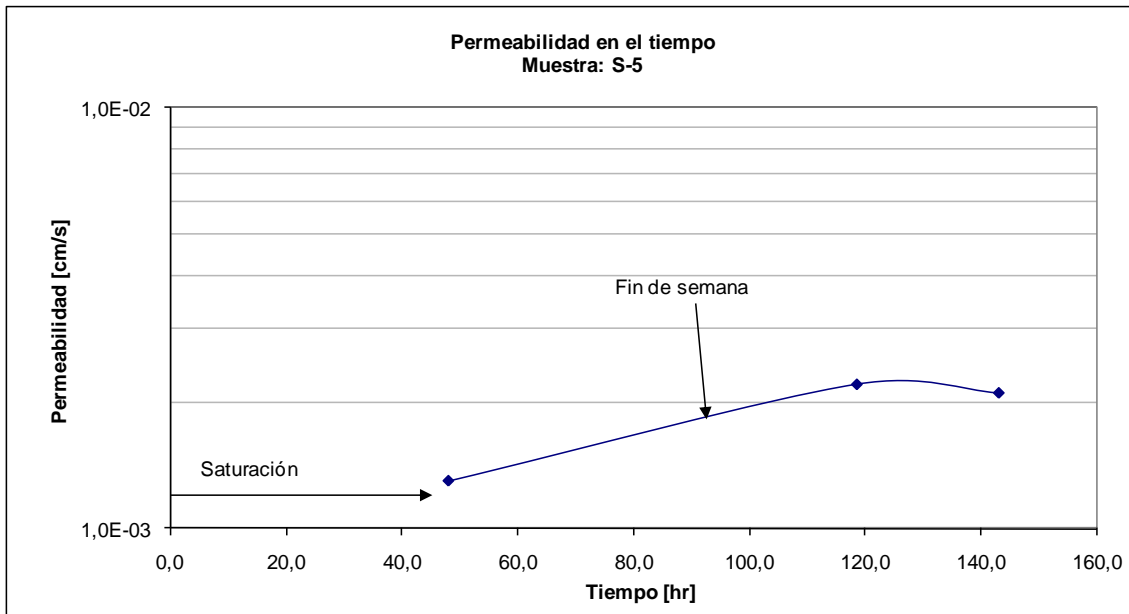


Figura A.10: Muestra S-6, Spence

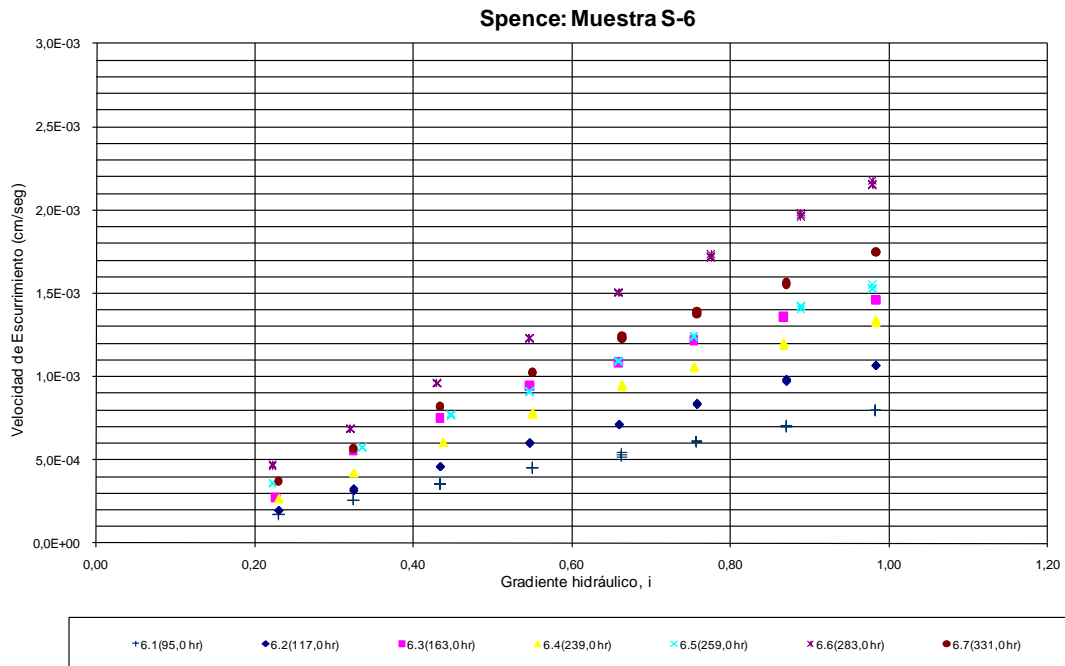


Figura A.11: Muestra S-6, Permeabilidad en el tiempo

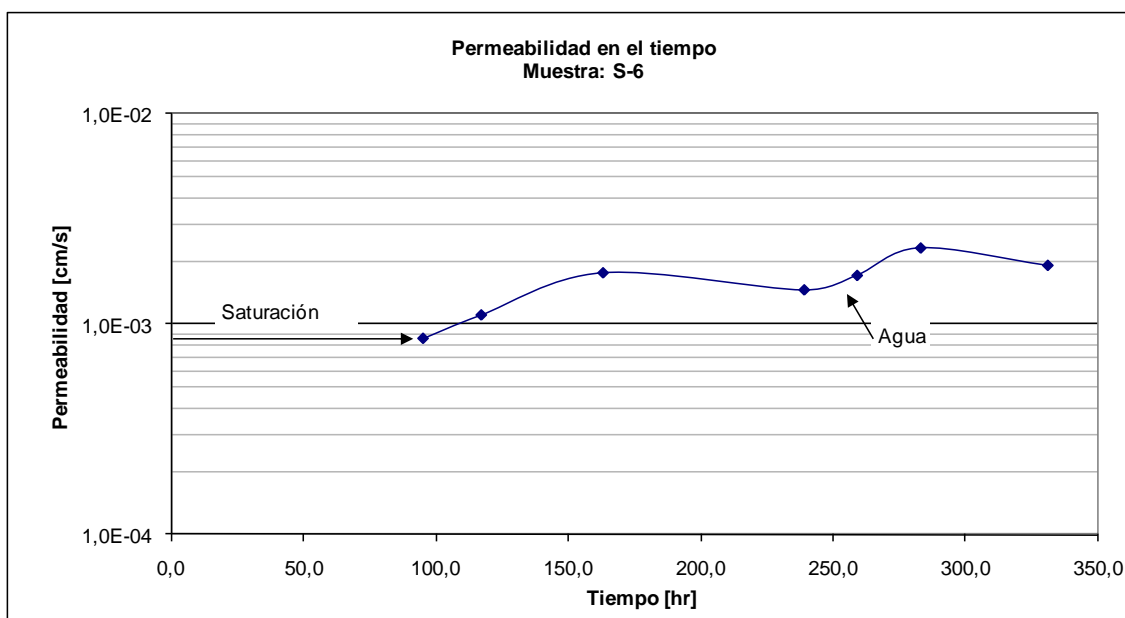


Figura A.12: Muestra S-7, Spence

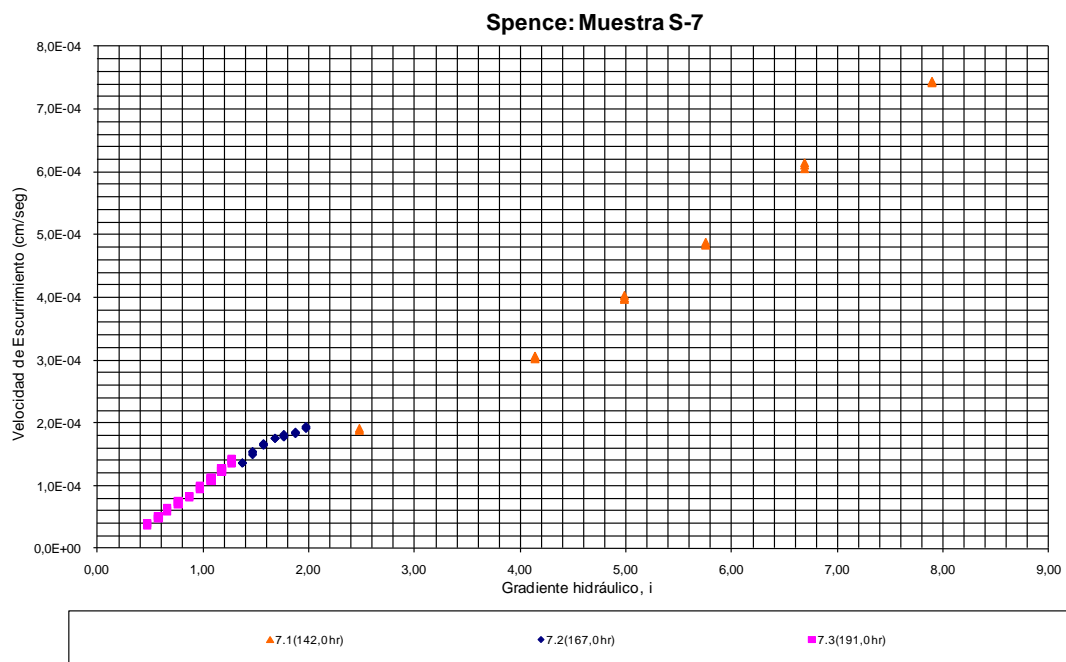


Figura A.13: Muestra S-7, Permeabilidad en el tiempo

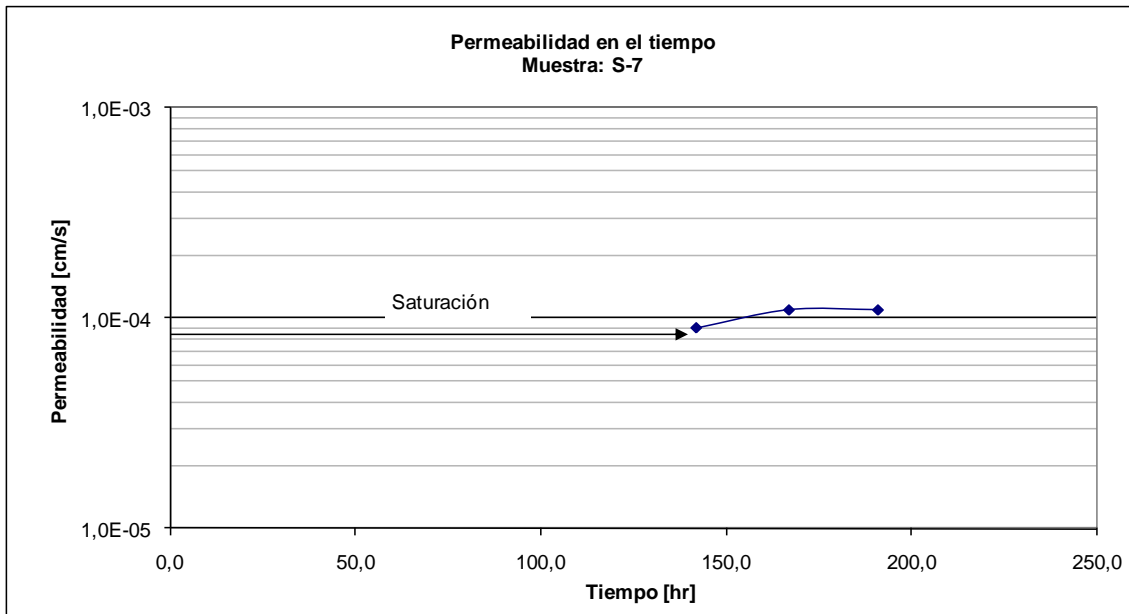


Figura A.14: Muestra S-8, Spence

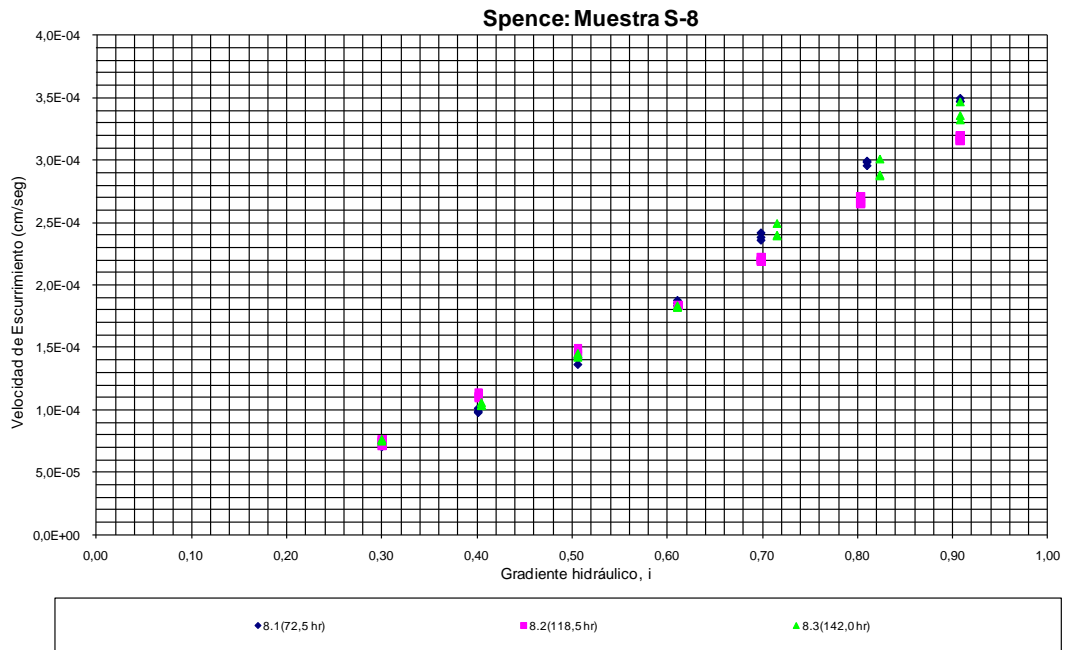




Figura A.15: Muestra S-8, Permeabilidad en el tiempo

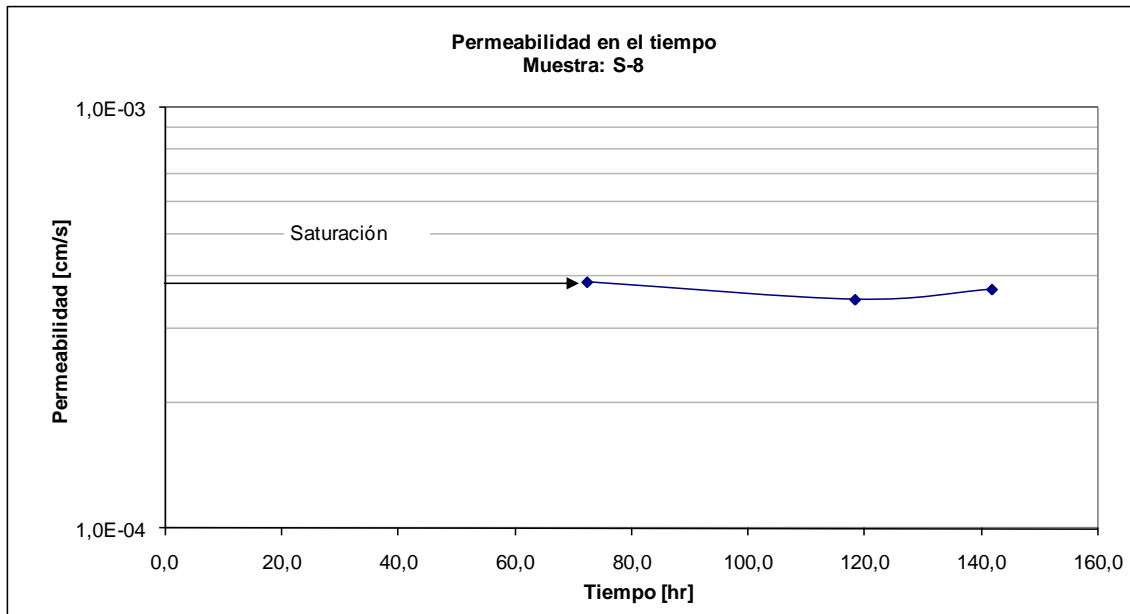


Figura A.16: Muestra C-1, Collahuasi

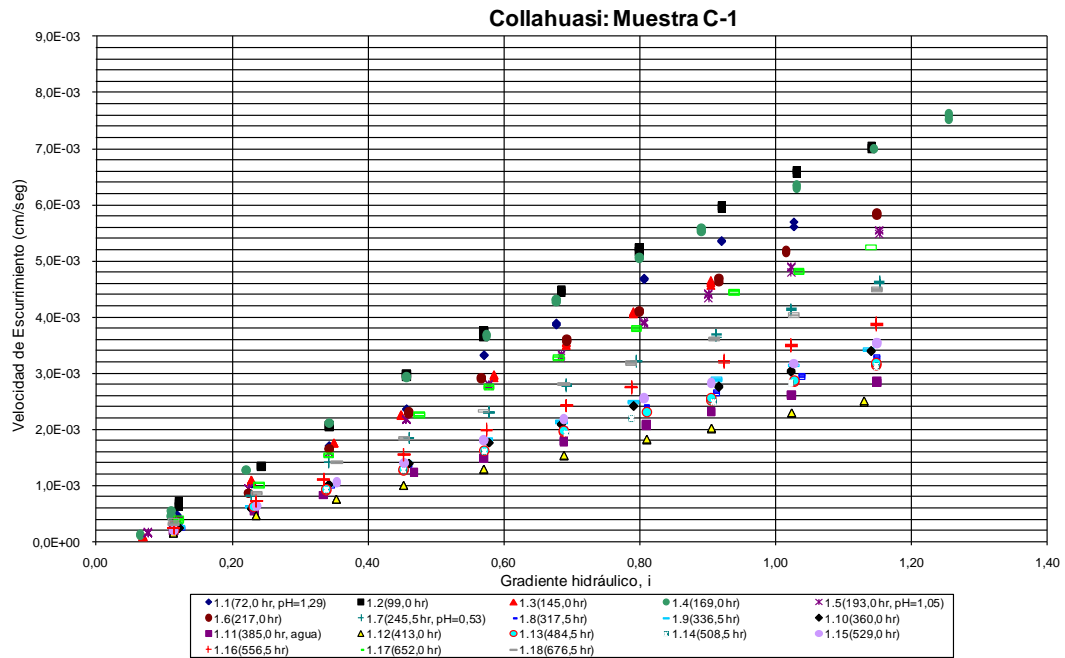


Figura A.17: Muestra C-1, Permeabilidad en el tiempo

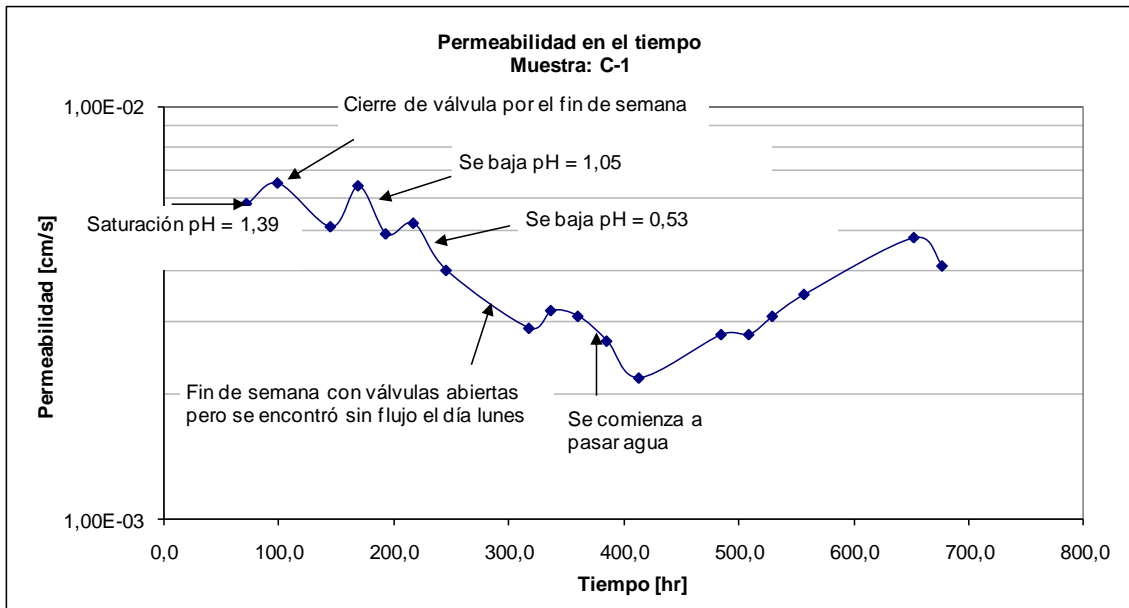


Figura A.18: Muestra C-2, Collahuasi

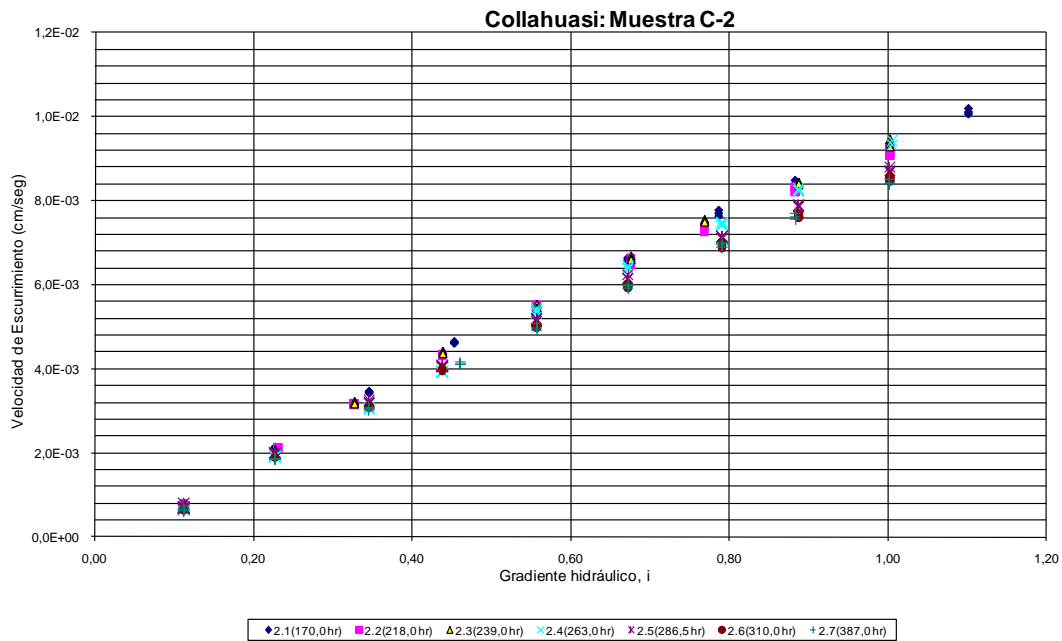


Figura A.19: Muestra C-2, Permeabilidad en el tiempo

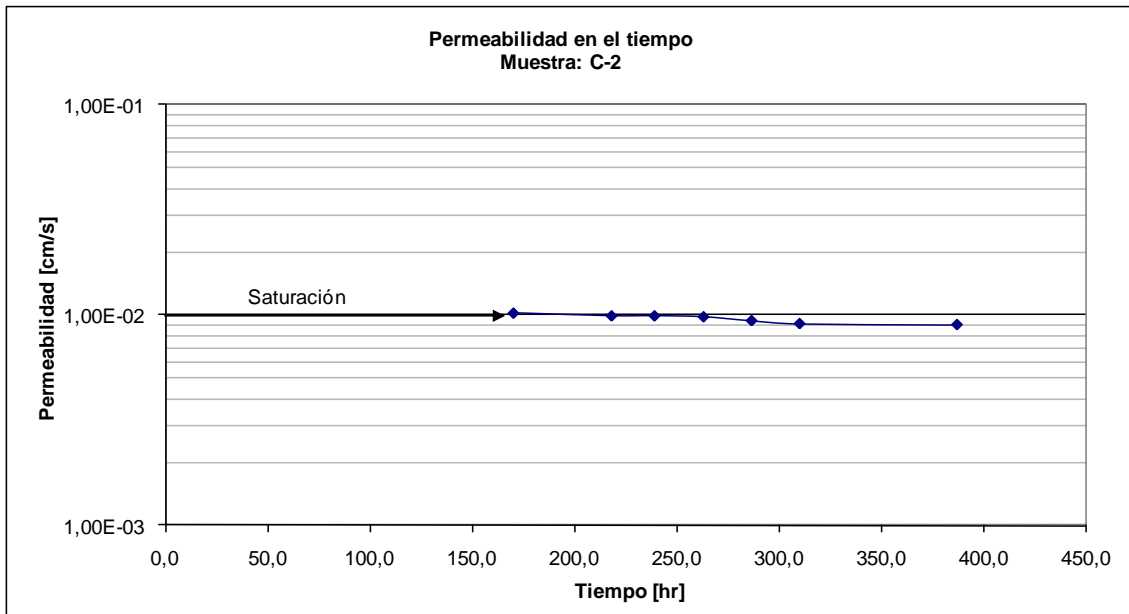


Figura A.20: Muestra C-3, Collahuasi

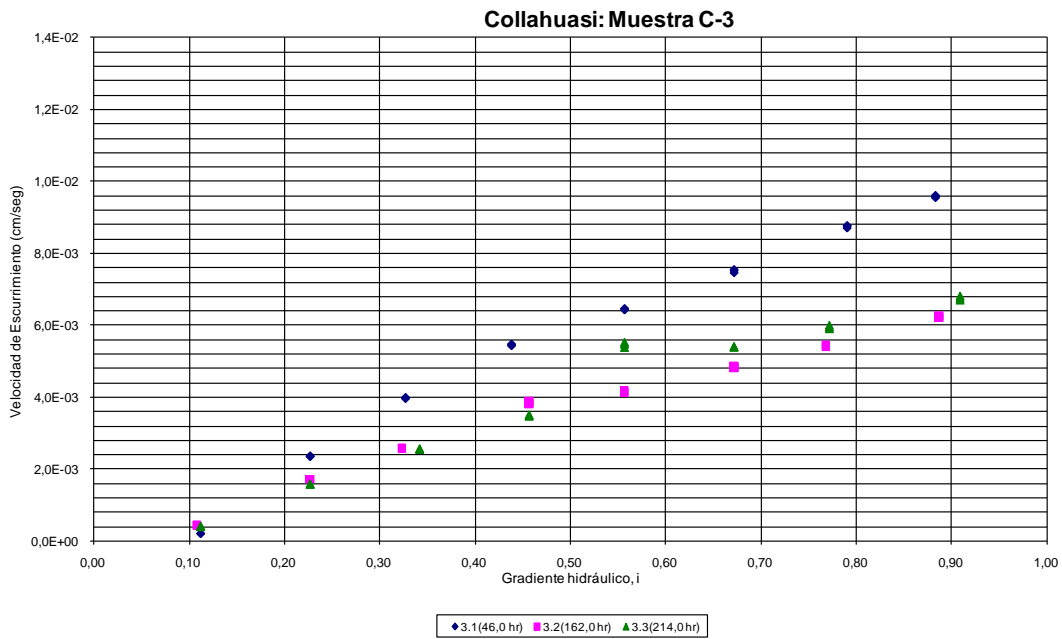


Figura A.21: Muestra C-3, Permeabilidad en el tiempo

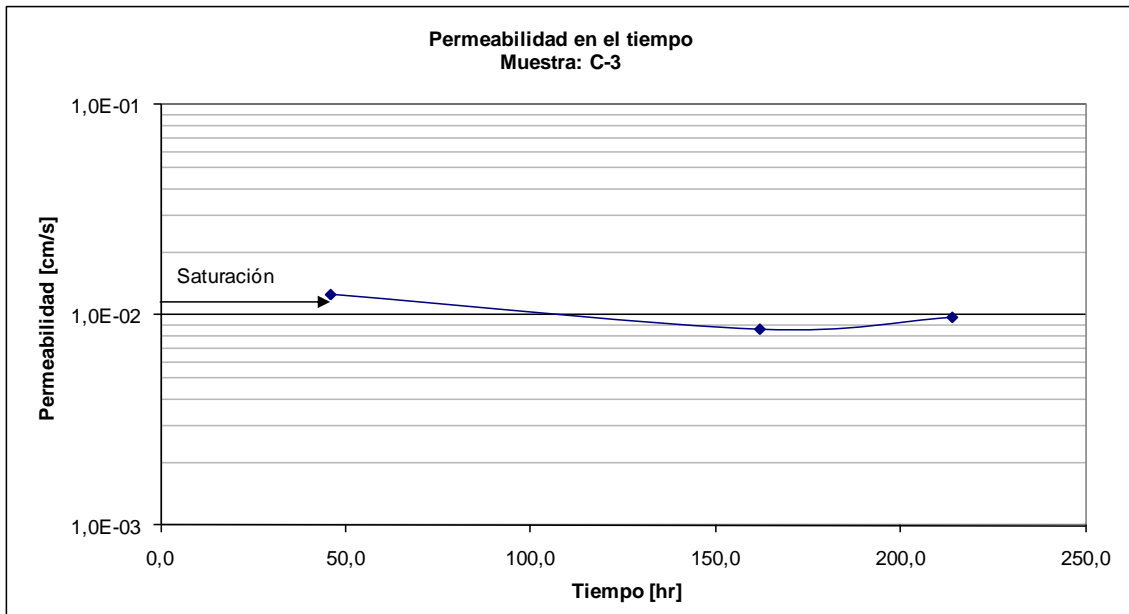


Figura A.22: Muestra C-4, Collahuasi

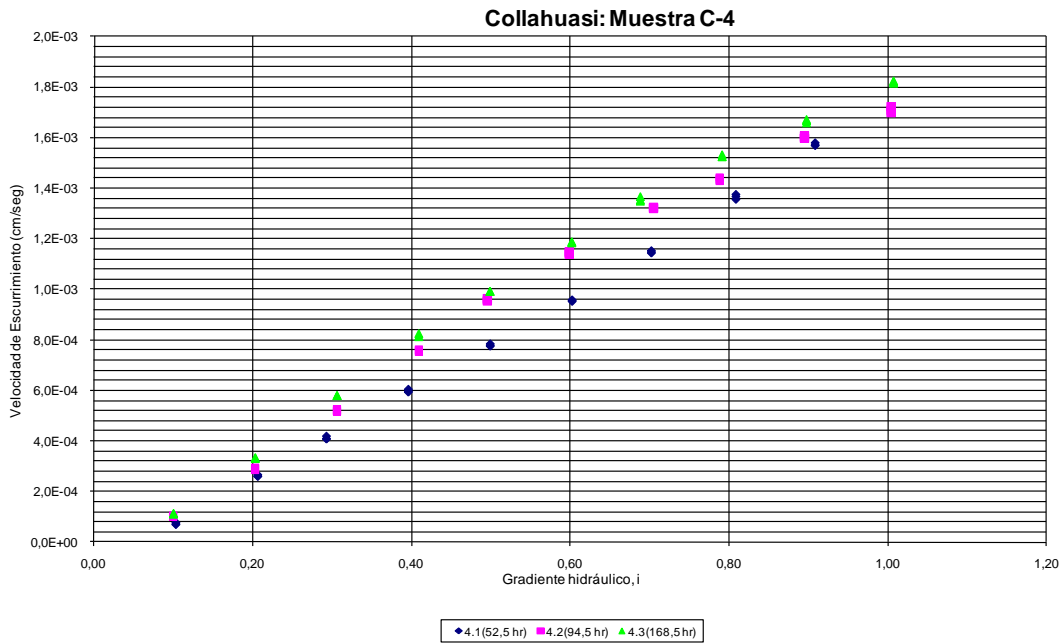


Figura A.23: Muestra C-4, permeabilidad en el tiempo

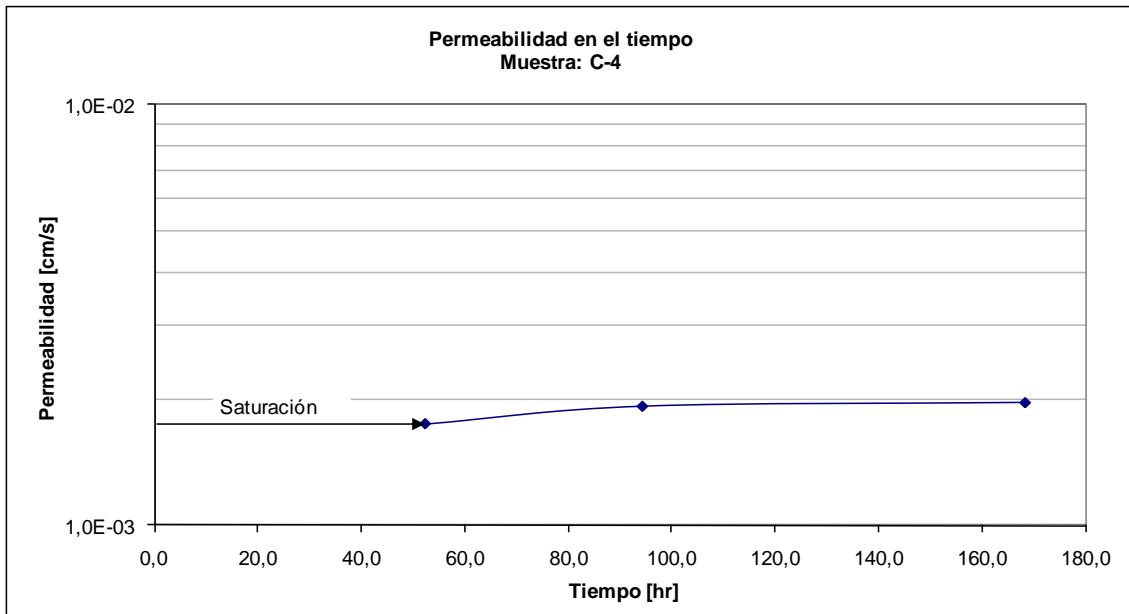


Figura A.24: Muestra C-5, Collahuasi

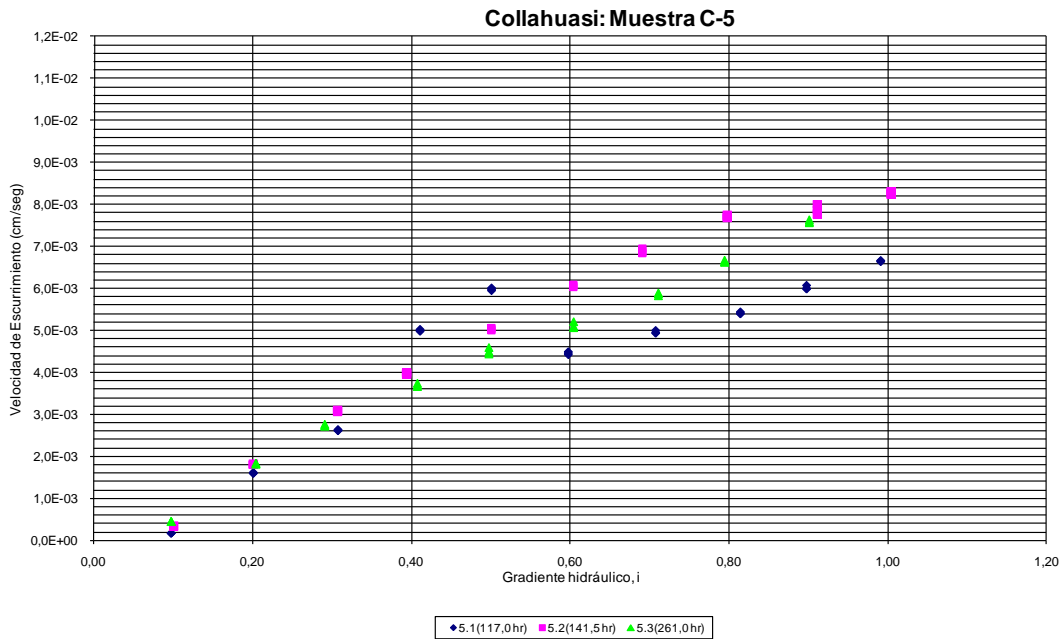


Figura A.25: Muestra C-5, permeabilidad en el tiempo

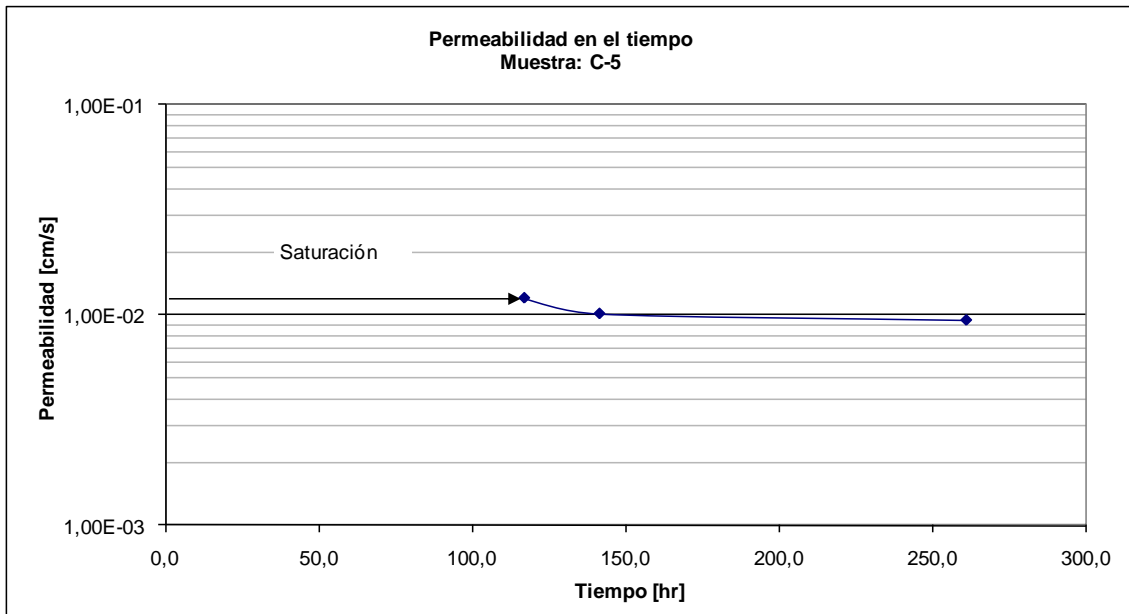


Figura A.26: Muestra C-6, Collahuasi

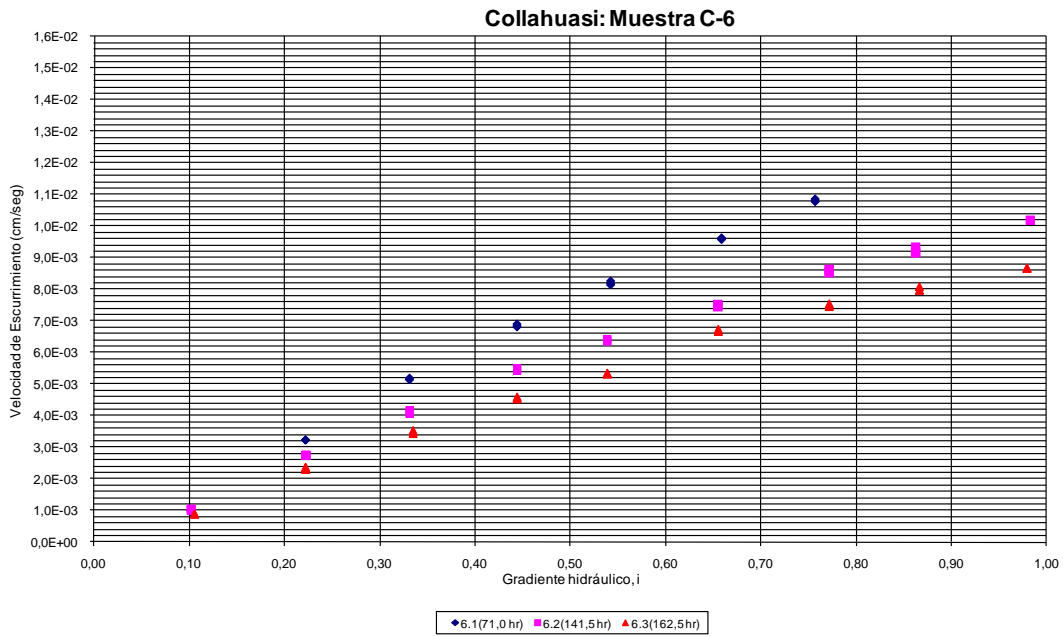


Figura A.27: Muestra C-6, permeabilidad en el tiempo

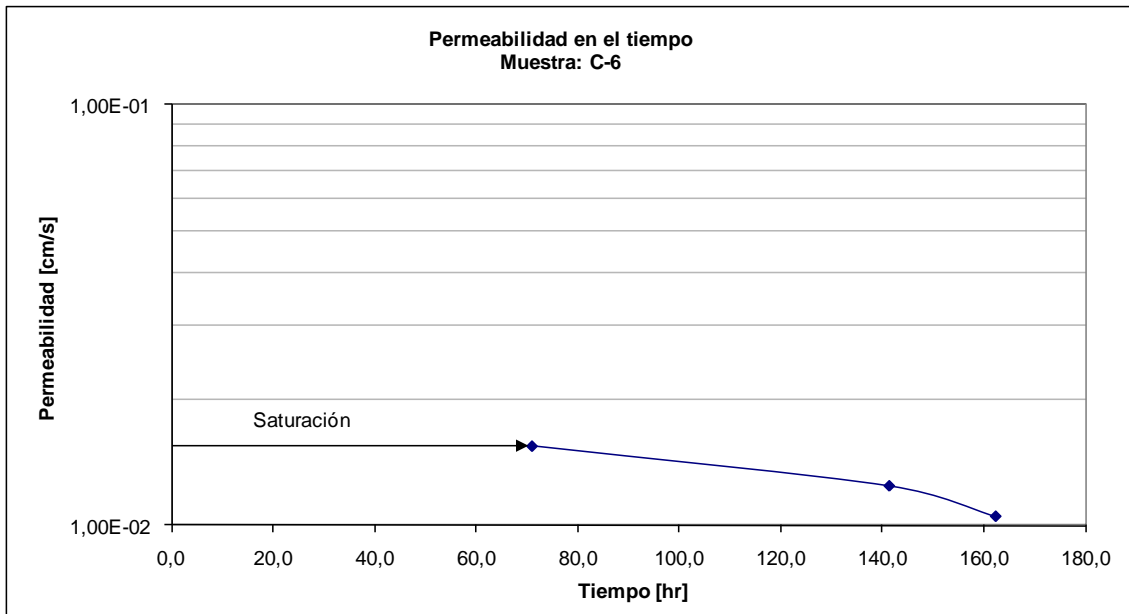


Figura A.28: Muestra ET-1, El Tesoro

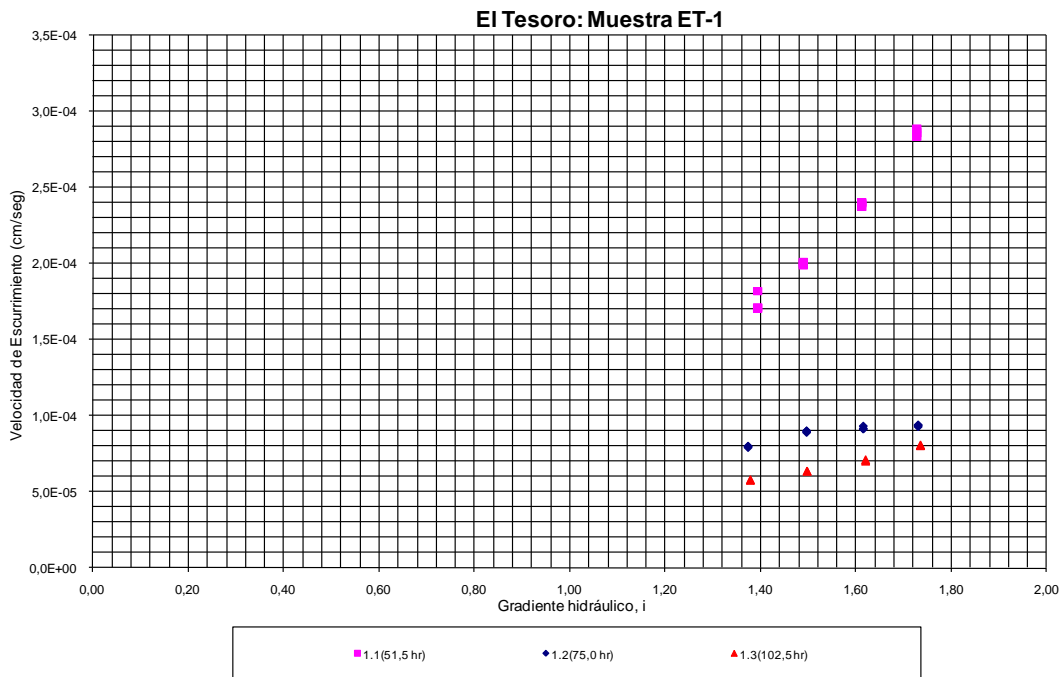


Figura A.29: Muestra ET-1, permeabilidad en el tiempo

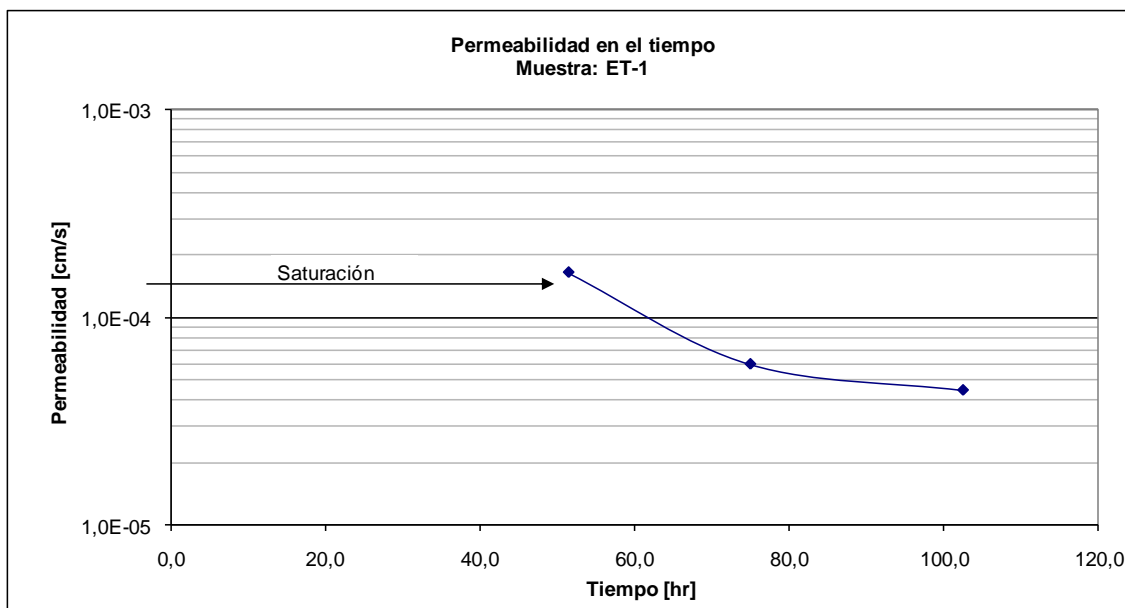


Figura A.30: Muestra ET-2, El Tesoro

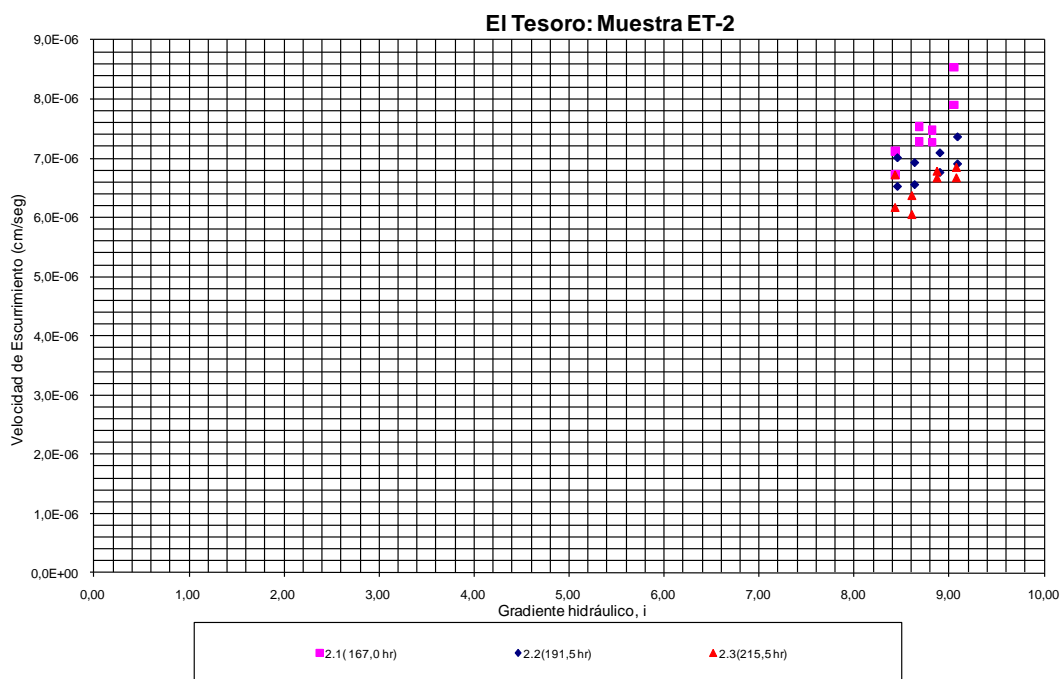




Figura A.31: Muestra ET-2, permeabilidad en el tiempo

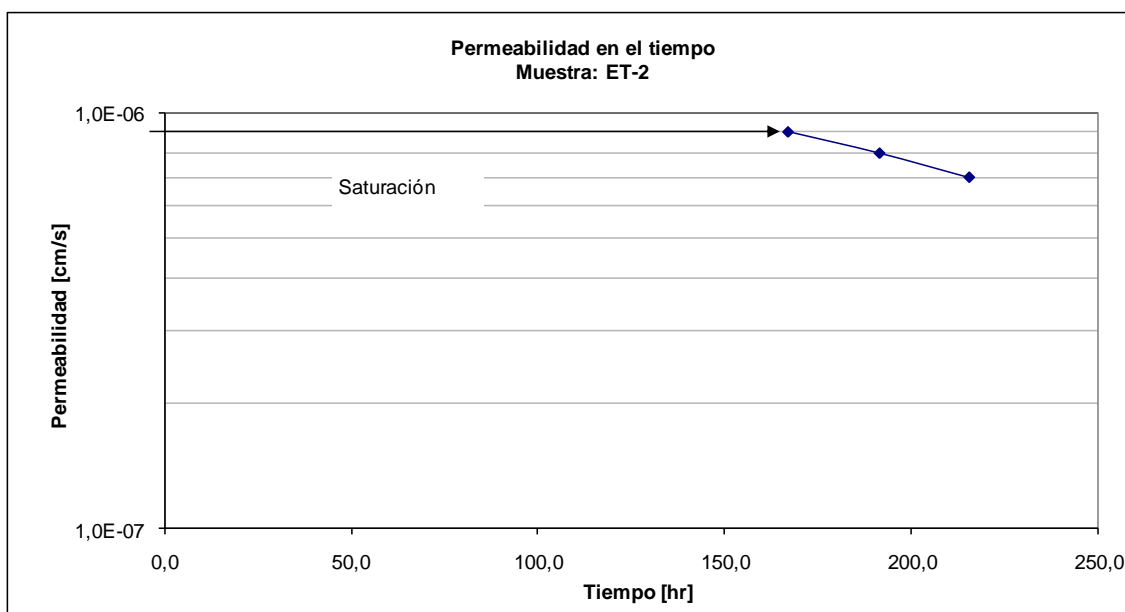


Figura A.32: Muestra ET-3, El Tesoro

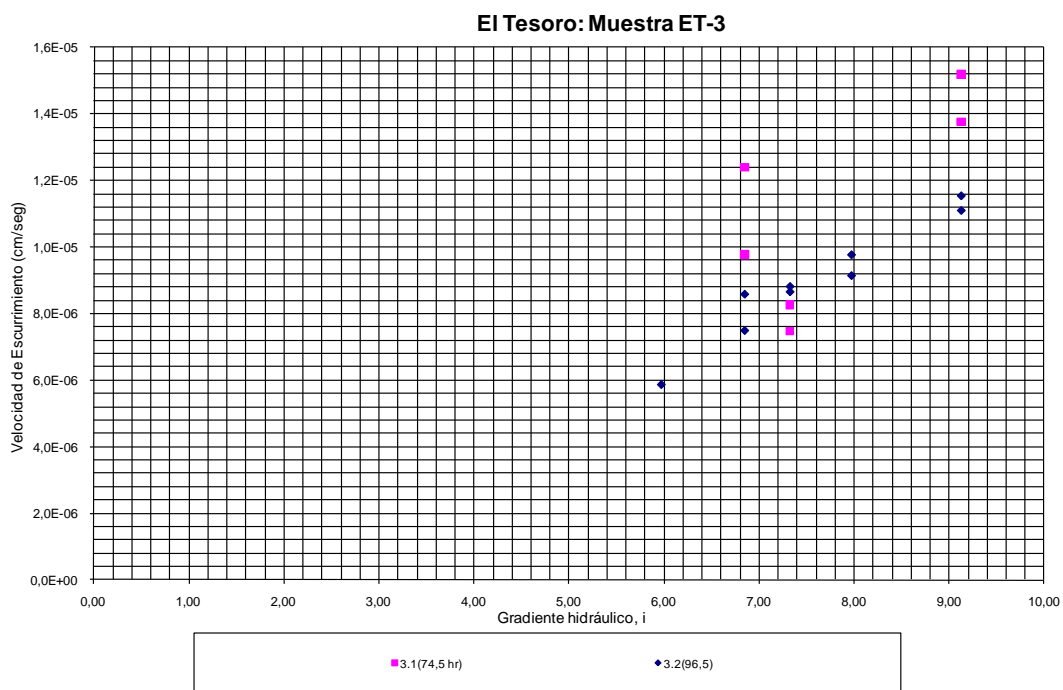


Figura A.33: Muestra ET-3, permeabilidad en el tiempo

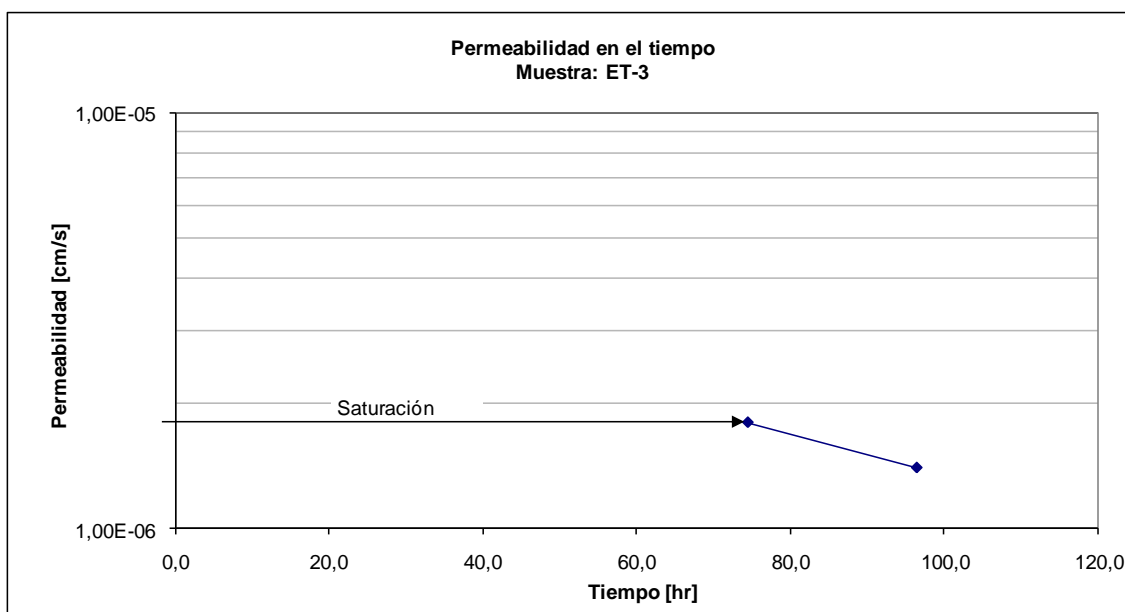


Figura A.34: Muestra ET-4, El Tesoro

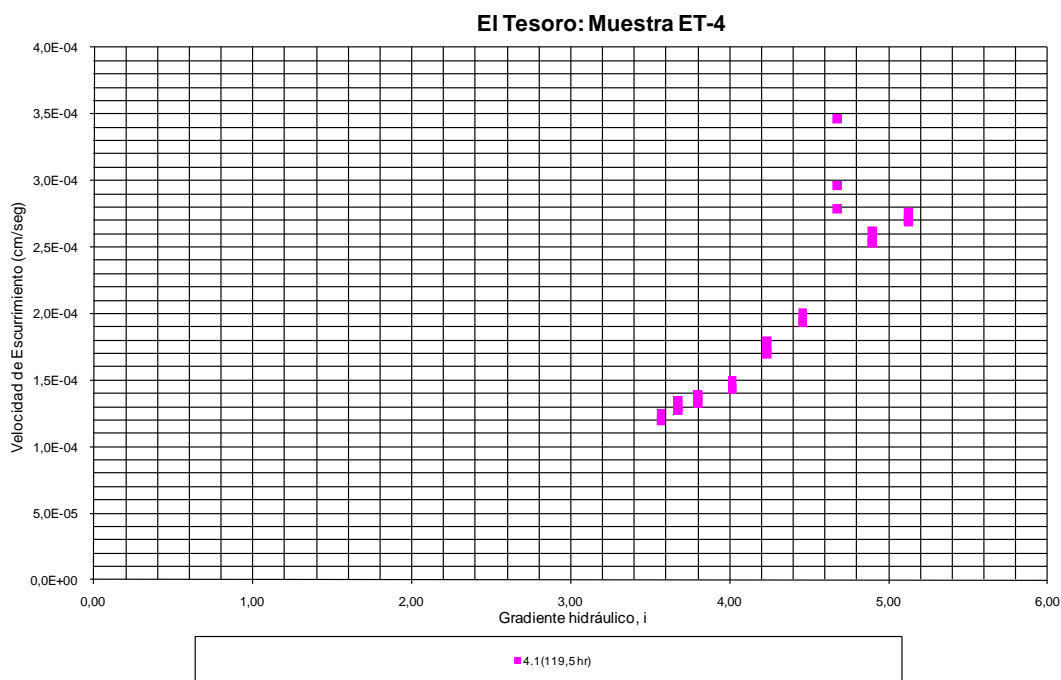


Figura A.35: Muestra ET-5, El Tesoro

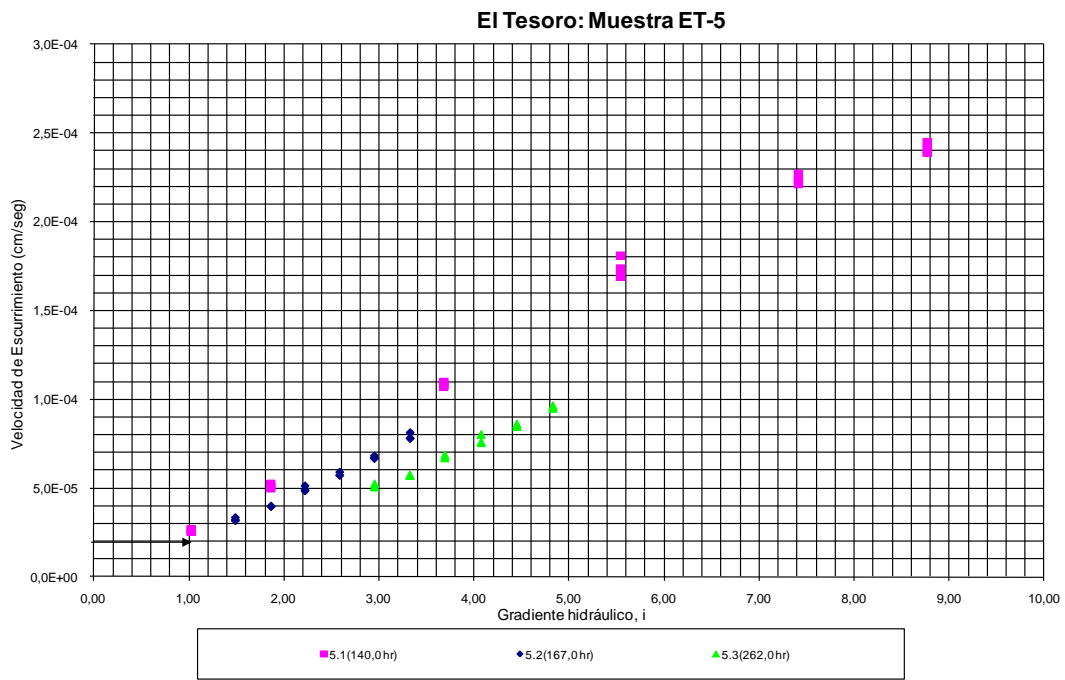


Figura A.36: Muestra ET-5, permeabilidad en el tiempo

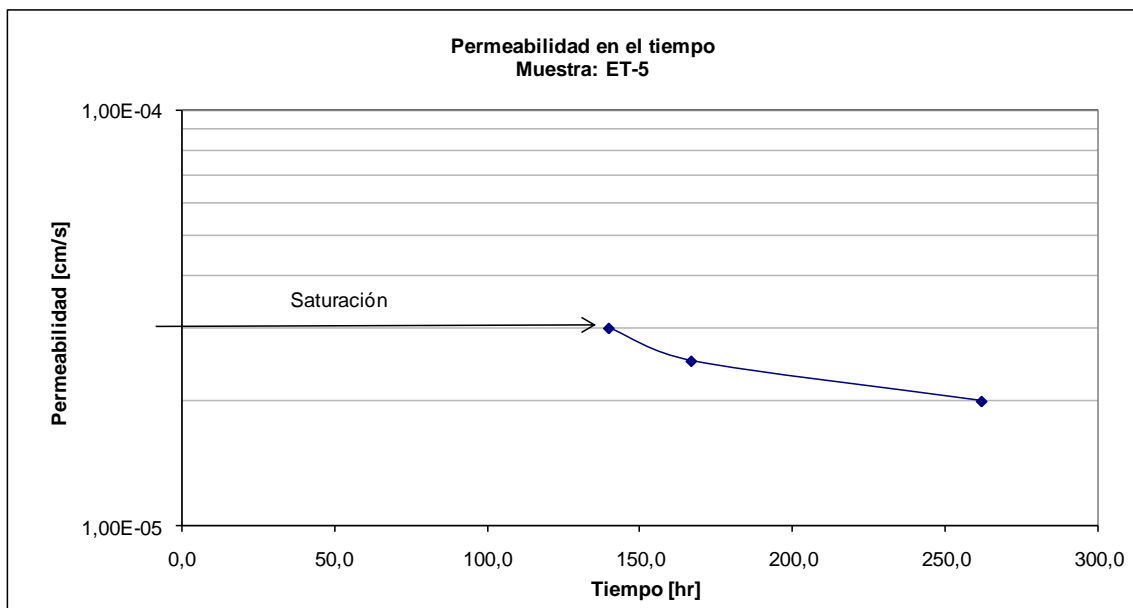


Figura A.37: Muestra ET-6, El Tesoro

