



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

VARIACIÓN DE LA PERMEABILIDAD Y PARÁMETROS CONSOLIDACIÓN EN  
RELAVES TRATADOS CON AGUA DE MAR.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL.

CARLOS FRANCISCO CARMÍ AHUES

PROFESOR GUÍA:  
SR. JOSÉ CAMPAÑA ZEPEDA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN EVALUADORA  
SR. RICARDO MOFFAT COVARRUBIAS  
SR. EDGAR BARD ORTUZAR

SANTIAGO DE CHILE

2013

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL  
POR: CARLOS FRANCISCO CARMÍ AHUES  
FECHA: 13/06/2013  
PROFESOR GUÍA: JOSÉ ENRIQUE CAMPAÑA  
ZEPEDA

## **VARIACIÓN DE LA PERMEABILIDAD Y PARÁMETROS CONSOLIDACIÓN EN RELAVES TRATADOS CON AGUA DE MAR.**

Gran parte de la gran minería del cobre se ubica en el desierto o en zonas de escasos recursos hídricos, ya sea por falta de lluvias o sobreexplotación. El uso de agua para el proceso de extracción del cobre es de vital importancia. Actualmente, la falta de este recurso es un factor relevante en los niveles de explotación y costo de expansiones proyectadas en la gran minería de cobre y nuevas minas de oro. Por lo anterior, un número importante de proyectos está evaluando, o se encuentran operando con agua de mar en sus procesos productivos.

Este cambio en el proceso, implica conocer el comportamiento a corto y largo de plazo de los relaves, tanto en sus propiedades de resistencia al corte como geo-hidráulicas, ya que la presencia de sales podría afectar el comportamiento geotécnico de estos materiales.

En este trabajo de título se estudiará la consolidación de los relaves tratados con agua de mar, para determinar posibles cambios en su permeabilidad, compresibilidad y disipación de presiones de poro por efecto del contenido de sales del agua de mar.

Con este fin se efectuaron ensayos de caracterización geotécnica de los relaves, ensayos de sedimentación, ensayos edométricos y ensayos de permeabilidad saturada en permeámetro de pared flexible. Los ensayos se realizaron en muestras de relave con 2 contenidos de finos, utilizando agua de mar como fluido. Los ensayos además se repitieron con agua potable para efectos de base de comparación.

Para las muestras con un 33% de finos, se determinó que las permeabilidades obtenidas a través de los ensayos edométricos no presentan diferencias significativas dependiendo del tipo de agua infiltrada. Para las muestras con un 55% de finos se observó un aumento de hasta un orden de magnitud para las muestras ensayadas con agua de mar.

Los resultados obtenidos con los ensayos de permeabilidad en permeámetro de pared flexible no entregaron diferencias significativas en ninguno de los estudiados. En cuanto a los parámetros de consolidación, se obtuvo que el coeficiente de consolidación  $C_v$  es similar para índices de vacíos bajos, pero se observa que las muestras ensayadas con agua de mar, consolidan ligeramente más rápido.

## **Agradecimientos**

A mis padres y hermanos, quienes siempre me han apoyado.

Al profesor guía José Campaña, sin el cual este trabajo no hubiese sido posible.

A los profesores Edgar Bard y Ricardo Moffat, quienes con sus comentarios durante este trabajo o en la sala de clase han sido un apoyo fundamental durante este proceso.

A la empresa Anglo American Chile, por facilitar las muestras de relaves utilizadas en esta memoria, en especial a don Ricardo Godoy.

A la empresa Asquim Chile S.A. por la realización de los ensayos químicos en el agua utilizada, en especial a don Hector Varela.

A Omar y Mario, fue una alegría ir a trabajar todos los días al laboratorio, esas largas conversaciones a la hora de almuerzo y la infaltable ayuda para poder realizar los ensayos.

A mis amigos de primero, Tomás, Chiri, Félix, Natio, Pipe, Carli, Bego, Rayén y Pancho (que no es de primero pero igual) ustedes han sido súper importantes en esta etapa de mi vida, espero que nos sigamos viendo seguido.

A mis amigos geotécnicos, en especial a la Ale, Marcelo, Gaspar, Manuel, Daniel y Jope, su ayuda en el desarrollo de los ensayos fue muy importante, además de todas esas conversaciones y discusiones interesantes que se formaron.

A mis amigos de plan común, por todos esos paseos que hicimos a la playa.

Al equipo de Rugby de la facultad, que este último tiempo se han transformado en grandes amigos.

A mis amigos del colegio, que a pesar de juntarnos poco, es como si el tiempo no pasara.

A todos aquellos que han pasado por estos años de Universidad, que han sido grandes años de mi vida.

# TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción .....	6
1.1	Objetivos Generales .....	7
1.2	Objetivos Específicos .....	7
2	Depósitos de Relaves .....	8
3	Consolidación y Permeabilidad.....	10
3.1	Permeabilidad .....	10
3.1.1	Ensayos para determinar Permeabilidad. ....	13
3.1.2	Métodos Indirectos para obtener el Coeficiente de Permeabilidad. ....	14
3.1.3	Valores típicos de k para relaves .....	16
3.2	Consolidación .....	17
3.2.1	Modelos de Consolidación. ....	22
4	Efecto de la Sal.....	25
5	Metodología de Ensayos y Descripción de Equipos .....	28
5.1	Caracterización geotécnica. ....	29
5.2	Ensayos de Permeabilidad .....	30
5.3	Ensayos Edométricos .....	34
5.4	Determinación de Sales Solubles Totales .....	36
5.5	Ensayos de Sedimentación.....	36
6	Caracterización Geotécnica del Relave Ensayado .....	38
6.1	Peso Específico de los Sólidos ( $G_s$ ) .....	39
6.2	Granulometría .....	39
6.3	Límites de Atterberg .....	41
6.4	Densidad Máxima y Mínima .....	42
6.5	Proctor Estándar.....	42
6.6	Clasificación USCS .....	43
6.7	Ensayos Químicos de Agua .....	44

7	Resultados Obtenidos.....	45
7.1	Ensayos de Sedimentación.....	45
7.2	Ensayos de Consolidación .....	48
7.3	Ensayos de Permeabilidad .....	56
7.4	Sales Solubles Totales .....	57
8	Análisis de Resultados .....	58
8.1	Variación de los coeficientes de permeabilidad obtenidos.....	58
8.2	Variación del coeficiente de consolidación obtenidos.....	59
8.3	Predicción de Coeficiente de Permeabilidad .....	62
8.4	Comparación Parámetros de Consolidación con la Literatura.....	64
8.5	Aumento en el porcentaje de sales solubles totales .....	65
8.6	Resumen de Resultados Obtenidos.....	66
9	Conclusiones y Recomendaciones .....	68
9.1	Conclusiones.....	68
9.2	Recomendaciones Para Futuras Investigaciones .....	70
10	Referencias .....	71
	ANEXO A Ensayos de Caracterización .....	73
	ANEXO B Ensayos de Permeabilidad .....	92
	ANEXO C Ensayos de Consolidación .....	119
	ANEXO D Certificados de Ensayos Químicos en Agua.....	131

# 1 INTRODUCCIÓN

Las principales minas de cobre en Chile se ubican en zonas desérticas, donde el agua es un elemento escaso y actualmente existen muy pocas holguras para extraer más agua de las cuencas. Por esta condición es que actualmente se reutiliza la mayor cantidad de agua que es posible extraer de los tranques de relave, no obstante, una gran cantidad se pierde por evaporación, infiltración, rehumedecimiento y retención. En este contexto, la alternativa de usar agua de mar, ya sea desalinizada o no, es atractiva desde el punto de vista ambiental y económico. En algunos casos se utilizan procesos de desalinización de agua marina, el cual es muy costoso y utiliza mucha energía. Es por este motivo que se ha comenzado a estudiar la posibilidad de utilizar agua de mar sin desalinizar en los procesos mineros, lo cual conlleva a una serie de potenciales problemas que es necesario estudiar. La reciente mina Esperanza, inaugurada el año 2011, utiliza en sus procesos agua de mar, siendo pionera en su uso en Chile.

Además de lo descrito, existen variables ambientales que condicionan el tiempo por el cual las empresas mineras son responsables respecto a la protección de zonas aledañas al tranque, debido a la presencia de elementos que pueden contaminar cursos de agua o napas subterráneas. En este contexto, uno de los aspectos importantes a determinar en la etapa de diseño y cierre, es poder estimar en cuanto tiempo se consolidará el depósito, ya que esta variable tiene directa relación con el volumen de agua que se puede extraer de los mismos.

Bajo este marco, es que este trabajo de título estudiará el comportamiento de los relaves, tratados con agua de mar, desde el punto de vista de los parámetros que gobiernan la consolidación de los mismos, pues estos relevantes para el diseño de los depósitos de relave.

Las muestras de relave para este trabajo fueron facilitadas por Anglo American Chile, obtenidas desde el tranque de relave las Tórtolas, de minera Los Bronces.

## **1.1 OBJETIVOS GENERALES**

El propósito de este trabajo de título es determinar posibles cambios en la permeabilidad y consolidación (compresibilidad, disipación de presiones de poro) por efecto del contenido de sales del agua de mar en los relaves.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

El objetivo específico de este trabajo de título es obtener los parámetros de permeabilidad y de consolidación para relaves tratados con agua de mar, y compararlos con relaves tratados con agua corriente (potable).

## 2 DEPÓSITOS DE RELAVES

Los relaves corresponden a una suspensión de desechos sólidos provenientes de los procesos de extracción minera, formando una pulpa. También, se le denomina relave a la fracción sólida de la pulpa, estos deben ser almacenados en depósitos de relaves, los cuáles, se clasifican dependiendo de la consistencia del relave almacenado y del tipo de muro a utilizar (DS248, 2007)

Existen diversos tipos de depósitos de relaves, aquellos cuyo muro de contención es construido con material de empréstito o aquellos emplazados en una depresión natural que no requieren muro de contención, se denominan Embalse de Relaves. Los Tranques, corresponden a aquellos cuyo muro de contención es construido con el material más grueso del relave (DS248, 2007)



Figura 2.1 Esquema de un tranque de relaves (SERNAGEOMIN, SONAMI, & BGR, 2003)

Como los relaves en general son depositados de manera hidráulica, se encuentran en estados cuyo contenido de humedad permita su escurrimiento. Estas humedades suelen ser bastante altas, en estos casos suele hablarse del porcentaje de sólidos, el cual está definido por la siguiente relación.

$$P.S [\%] = \frac{\text{Peso Suelo Seco}}{\text{Peso Suelo Humedo}} \cdot 100 = \frac{1}{1 + \frac{w[\%]}{100}} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde  $w [\%]$  corresponde al contenido de humedad en porcentaje.



Para aumentar el agua recuperada en la operación minera y para mejorar la estabilidad de los relaves depositados, pueden someterse a diferentes procesos previos a la depositación, los cuales se pueden clasificar de acuerdo a su porcentaje de sólidos, separándose en relaves en pasta (Porcentaje de Sólidos entre un 50 y 70%), relaves espesados (Porcentaje de Sólidos entre un 70 y 85%), y relaves filtrados (Porcentaje de Sólidos mayor a 85%). (Bussièrre, 2007). En la figura 2.2 se muestra un esquema de la depositación para relaves convencionales y relaves espesados.

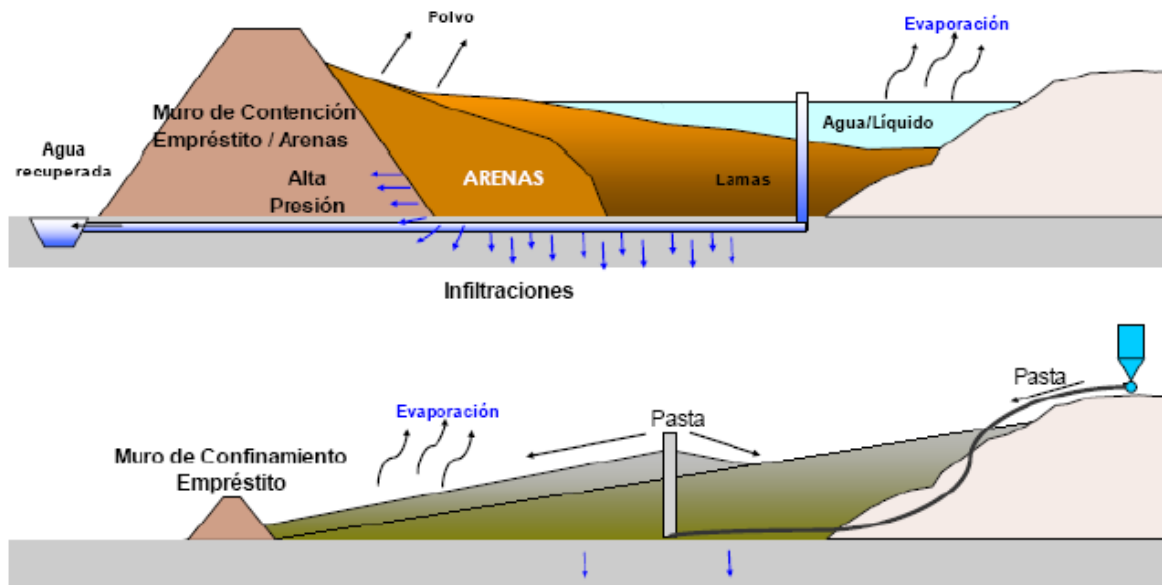


Figura 2.2 Esquema de depositación para un relave convencional (Arriba) y para un relave espesado (Abajo). (Galaz, 2011)

El análisis de estabilidad de los taludes debe realizarse en las etapas construcción y de cierre de operaciones donde deben incluirse las máximas sollicitaciones y los cambios en las propiedades de los depósitos (DS248, 2007). Este es una de las motivaciones de este trabajo, pues al alterar la composición del agua del proceso, se pueden esperar cambios considerables en las propiedades del relave, que pudieran afectar la estabilidad o balance de aguas en alguna de las etapas del proyecto.

### 3 CONSOLIDACIÓN Y PERMEABILIDAD

Los parámetros de permeabilidad y consolidación son muy influyentes en el diseño de los depósitos de relave, en lo que respecta a la cantidad de agua que es factible de extraer o bien, que es factible que se infiltre al subsuelo. Por esta razón, en el presente trabajo de título, se evaluará el impacto en ambos parámetros en relaves tratados con agua de mar.

#### 3.1 PERMEABILIDAD

La permeabilidad se define como la capacidad de un material de permitir que un fluido pase a través de él, sin alterar su estructura interna. En el caso de los suelos, el agua fluye a través de los espacios vacíos en el esqueleto del suelo, que deben estar interconectados entre sí. Esto ha sido verificado incluso en los suelos menos permeables, como las arcillas, donde se ha observado que la gran mayoría de los poros están interconectados.

Darcy determinó a través de ensayos experimentales que la relación entre la velocidad de flujo  $v$  y el gradiente hidráulico  $i$ , para casos donde el suelo se encuentra saturado, viene dada por.

$$V = k \cdot i \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde  $V$  corresponde a la velocidad del flujo,  $k$ , el coeficiente de conductividad hidráulica e  $i$ , el gradiente hidráulico. Hay que diferenciar esta velocidad (velocidad de descarga o velocidad de Darcy) con la velocidad real del fluido. La velocidad de Darcy se relaciona con la velocidad real de forma de mantener el flujo constante. Luego la relación entre el área real de flujo y el área total está dada por la siguiente ecuación.

$$\frac{A}{A_v} = \eta \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde  $A_v$  corresponde al área real por la cual el flujo puede existir,  $A$ , a la sección transversal y  $\eta$  a la porosidad. Luego la velocidad real de flujo está dada por.

$$V_t = \frac{V_d}{\eta} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Donde  $V_t$  es la velocidad real de flujo y  $V_d$  la velocidad de flujo de Darcy.

Otra forma de escribir la ley de Darcy es expresarla a través del caudal total por el área de flujo, esto se logra multiplicando la ecuación 3.1 por el área de flujo, que en el caso de los ensayos se puede considerar como la sección transversal de la muestra.

$$Q = k \cdot i \cdot A$$

Ecuación 3.4

Donde Q, es el caudal medido, y A el área de la sección transversal por donde existe flujo. Esta relación se cumple siempre y cuando el flujo obtenido sea laminar, es decir que las líneas de flujo sean paralelas entre sí. Es por esta razón que cuando se tienen suelos de grano grueso, el flujo se torna muy turbulento, por lo que la relación deja de ser válida. Esto puede verificarse calculando el número de Reynolds, el cuál para suelos ha sido definido como (Delleur, 1999):

$$R = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

Ecuación 3.5

Donde V es la velocidad de descarga del fluido, (velocidad real), D es el diámetro representativo, que generalmente suele tomarse como D<sub>10</sub> (El tamaño de partícula tal que el 10% en peso tiene un tamaño mayor) y  $\nu$ , que corresponde a la viscosidad cinemática del fluido.

Schneebeli (1955) según Delleur (Delleur, 1999) determinó que para flujos con número de Reynolds menores a 5 la ley de Darcy no es válida y para flujos con número de Reynolds mayores a 60 determinó que se presenta un flujo turbulento, por lo que la ley de Darcy tampoco es válida.

Los factores del suelo que influyen en la permeabilidad son principalmente el grado de saturación, la densidad, la estructura interna, la granulometría, siendo el principal, el tamaño de los granos más finos. Mientras menor sean los granos, esto provoca un aumento en la superficie específica de los granos, dificultando el paso del agua a través de los poros. La distribución granulométrica también es importante, pues mientras más uniforme sea el suelo, los poros serán más grandes y se tenderá a tener más canales conectados, por lo que la permeabilidad será mayor. Además se ha demostrado que la permeabilidad depende principalmente de los granos más finos presentes en la muestra (Terzaghi, Peck, & Mesri, 1996).

Para independizar el resultado obtenido del líquido infiltrado en el suelo, se ha desarrollado el término permeabilidad intrínseca del suelo, la cual se relaciona con el coeficiente de permeabilidad con los parámetros físicos característicos del fluido, como su densidad y viscosidad. (Chapuis & Aubertin, 2003).

$$k = K \cdot \frac{\gamma}{\mu} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Donde  $k$  es el coeficiente de conductividad hidráulica,  $K$ , la permeabilidad intrínseca,  $\gamma$  la densidad del fluido y  $\mu$  la viscosidad dinámica.

En este trabajo no se trabajará con la permeabilidad intrínseca, y siempre que se hable de permeabilidad se referirá al coeficiente de conductividad hidráulica.

Luego recordando la relación entre la viscosidad dinámica y viscosidad cinemática:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Donde  $\nu$  corresponde a la viscosidad cinemática,  $\mu$  a la viscosidad dinámica y  $\rho$  a la densidad del fluido. Luego se puede escribir el coeficiente de permeabilidad en función de la viscosidad cinemática del fluido (Terzaghi, Peck, & Mesri, 1996)

$$k_t = \frac{\nu_l}{\nu_t} \cdot k_l \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Donde  $k_t$  y  $k_l$  corresponden a las permeabilidades obtenidas en terreno y en laboratorio respectivamente. Y  $\nu_t$  y  $\nu_l$  a las correspondientes viscosidades.

Esta relación se presenta para convalidar los resultados obtenidos en laboratorio a aquellos que se debiesen utilizar en terreno debido a los cambios de temperatura que podrían existir. En general se presenta la permeabilidad en relación a la viscosidad del agua a 20°. En el marco de este trabajo de título se presentará el coeficiente de permeabilidad ajustado a las propiedades del agua destilada a 20°C con la finalidad de realizar comparaciones entre los resultados obtenidos con los ensayos con agua de mar y los realizados con agua potable.

A continuación se presentan dos expresiones determinadas por Jiménez (Jiménez, 2004) para determinar la viscosidad en agua de mar y en agua potable en función de la temperatura.

Viscosidad agua potable:

$$\eta_{H20} = -2 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 + 5 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 4 \cdot 10^{-5} \cdot T + 0.0017 \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Viscosidad agua de mar:

$$\eta_{mar} = -4 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 + 8 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 5 \cdot 10^{-5} \cdot T + 0.0018 \quad \text{Ecuación 3.10}$$

Las viscosidades obtenidas están en [kg/m s], y para una temperatura (T) de 20° se obtiene

$$\begin{aligned} \eta_{H_2O}[20^\circ] &= 1.084 \cdot 10^{-3} [\text{kg/m s}] \\ \eta_{mar}[20^\circ] &= 1.088 \cdot 10^{-3} [\text{kg/m s}] \end{aligned}$$

Se observa que ambas viscosidades son bastante parecidas, lo que hace variar el coeficiente de conductividad hidráulica en un 0.4%, lo cual podría llegar a despreciarse, dado que la variación de la permeabilidad medida en laboratorio con respecto a la permeabilidad real, puede variar entre un 68% y un 90% (Duncan, 2000).

### 3.1.1 ENSAYOS PARA DETERMINAR PERMEABILIDAD.

Para determinar el valor del coeficiente de permeabilidad  $k$  en suelos, existen diferentes metodologías, éstas pueden realizarse en terreno (in-situ) o pueden realizarse en laboratorio. En el caso de este trabajo, las mediciones se realizaron en laboratorio.

El equipo para medir la permeabilidad de forma directa es denominado permeámetro, este consiste en una celda para colocar la muestra y un sistema de inyección de agua, el cual depende del tipo de ensayo que se desee realizar.

Existen dos tipos de ensayos, aquellos de carga variable, y los de carga constante. Los de carga variable tienen una mejor precisión para suelos de baja permeabilidad (cohesivos), mientras que los de carga constante son más apropiados para suelos de alta permeabilidad (granulares), (Lambe & Whitman, 1969).

Además, las muestras de los ensayos en laboratorio pueden ser ensayadas en dos tipos de permeámetros, los de pared rígida y los de pared flexible, los primeros corresponden a un contenedor que no permite deformaciones laterales, mientras que el segundo sí lo permite. Los permeámetros de pared flexible son aquellos que cuentan con una membrana de látex (u otro similar), en la cual se coloca la muestra a ensayar, y esta puede ser sometida a una presión de confinamiento determinada, a través de presión de un fluido, el cual se encuentra por fuera de la membrana. Este tipo de ensayos es más preciso que los de pared rígida, pues, además de permitir aplicar una presión de confinamiento, evita la generación de vías preferenciales entre la pared del permeámetro y el suelo, lo que para permeabilidades bajas puede influir en un gran porcentaje en los resultados.

Para este trabajo se utilizará un permeámetro de carga variable en pared flexible, puesto que se espera que los relaves a utilizar, tengan permeabilidades relativamente bajas, lo que hace difícil medir los caudales para un permeámetro de carga constante.

### 3.1.2 MÉTODOS INDIRECTOS PARA OBTENER EL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD.

Además de los ensayos para medir directamente el coeficiente de conductividad hidráulica, se han establecido algunas fórmulas empíricas o semi empíricas para determinarlo.

Hazen (1911) fue el primero en desarrollar una fórmula para estimar la conductividad hidráulica en arenas, y debido a su simplicidad ha sido ampliamente utilizada, aunque existen diversos autores que han modificado este resultado. (Terzaghi, Peck, & Mesri, 1996)

$$K = C_H \cdot D_{10}^2 \quad \text{Ecuación 3.11}$$

Donde  $C_H$  es un coeficiente empírico y  $D_{10}$ , corresponde al diámetro del tamiz por el cuál pasa el diez por ciento de las partículas de la muestra de suelo. Esta es una fórmula extremadamente aproximada, que puede predecir permeabilidades con un amplio error.

Usualmente, el valor de  $C_H$  utilizado es de 100, pero existen diversos autores que proponen que  $C_H$  que puede variar entre 1 a 1000. (Carrier, 2003)

La ecuación de Kozeny-Carman (Kozeny 1927; Carman 1938, 1956) fue desarrollada con posterioridad a la de Hazen, el trabajo originalmente de Kozeny buscaba formas de determinar la superficie específica de algunos materiales para el desarrollo industrial. Este método para determinar la permeabilidad relaciona la superficie específica del suelo, el índice de vacíos y las propiedades físicas del líquido de una forma semi empírica para determinar la conductividad hidráulica del fluido. (Carrier, 2003)

$$K = \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{1}{C_{K-C}} \cdot \frac{1}{S_0^2} \cdot \left[ \frac{e^3}{1+e} \right] \quad \text{Ecuación 3.12}$$

Donde

- $\gamma$ : Densidad del fluido,
- $\mu$ : Viscosidad.
- $C_{K-C}$ : Coeficiente empírico de Kozeny-Carman.
- $e$ : Índice de vacíos.
- $S_0$ : Superficie específica por unidad de volumen.

Se ha demostrado que esta fórmula es más precisa que la desarrollada por Hazen (Carrier, 2003), pero ha sido poco utilizada debido a la dificultad por medir la superficie específica, aunque existen métodos para estimarla a partir de la curva granulométrica. Para partículas esféricas uniformes de diámetro  $D$ , se determinó que la superficie específica por unidad de volumen ( $S_0$ ) sería igual a:  
(Carrier, 2003)

$$S_0 = \frac{(\pi D^2)}{\frac{\pi D^3}{6}} = \frac{6}{D} \quad \text{Ecuación 3.13}$$

Luego incluyendo un factor de corrección según la forma de la partícula (SF) y obteniendo un diámetro efectivo ( $D_{eff}$ ), como un promedio ponderado de la curva granulométrica, es posible estimar  $S_0$  de la siguiente forma (Carrier, 2003)

$$S_0 = \frac{SF}{D_{eff}} \quad \text{Ecuación 3.14}$$

$$D_{eff} = \frac{100\%}{\left[ \sum \frac{f_i}{D_{li}^{0.404} \cdot D_{si}^{0.595}} \right]} \quad \text{Ecuación 3.15}$$

Donde

SF: Factor de forma,

$f_i$ : Porcentaje retenido en la malla  $i$ ,

$D_{li}$ : Diámetro de la malla superior.

$D_{si}$ : Diámetro de la malla inferior.

Finalmente, el coeficiente de permeabilidad con la ecuación de Kozeny-Carman utilizando agua destilada a 20°C. tomando un valor de  $C_{K-C}$  igual a 5, queda determinada según la ecuación 3.16.

$$K = 1.99 \times 10^4 \cdot \left( \frac{100\%}{\left[ \sum \frac{f_i}{D_{li}^{0.404} \cdot D_{si}^{0.595}} \right]} \right)^2 \cdot \left( \frac{1}{SF^2} \right) \cdot \left[ \frac{e^3}{1+e} \right] \quad \text{Ecuación 3.16}$$

Debido a lo complejo de los cálculos para este método hace unas décadas atrás no ha sido ampliamente utilizado, pero gracias a los desarrollos computacionales actualmente es fácil programarlo.

Se ha demostrado (Chapuis & Aubertin, 2003) que la fórmula de Kozeny-Carman tiene una mejor correlación con los resultados medidos. Se puede utilizar esta fórmula para validar los resultados de un ensayo de permeabilidad en arenas naturales. Para el caso de relaves, Chapuis & Aubertin (2003) determinaron que esta fórmula no predice de buena forma la conductividad hidráulica, por lo que modificaron la fórmula de Kozeny-Carman para ajustar de mejor forma los valores.

$$\text{Log}(K) = 1.46 (\log K_{K-C}) + 1.99 \quad \text{Ecuación 3.17}$$

Donde  $K_{K-C}$  corresponde al valor estimado según la ecuación 3.14, medida en [m/s].

Otra relación empírica es presentada por el US. Department of Transportation (Moulton, 1980). En la cuál a través de relaciones empíricas sobre una serie de muestras determina la ecuación 3.18. Esta ecuación fue deducida originalmente para bases y sub bases granulares, con aplicabilidad en carreteras. En el caso de los relaves, al ser suelos sin cohesión, de forma angular y con finos de baja a nula plasticidad, se estima que puede ser aplicada en este estudio, en especial para las arenas de relaves.

$$K = \frac{6.214 \times 10^5 \cdot D_{10}^{1.478} \cdot \eta^{6.654}}{P_{200}^{0.597}} \left[ \frac{ft}{day} \right] \quad \text{Ecuación 3.18}$$

Existen otros métodos para estimar la conductividad hidráulica de un suelo, pero la gran mayoría fueron desarrolladas para suelos que no corresponden a las características de los relaves utilizados en esta memoria.

### 3.1.3 VALORES TÍPICOS DE $k$ PARA RELAVES

Se presenta en la tabla 3.1 valores de  $k$  obtenidos para relaves de distinto tipo con diferentes ensayos utilizados, recopilada por Bussièrè (2007) desde distintas fuentes.

Tabla 3.1 Resultados típicos de ensayos de permeabilidad saturada sobre muestras remoldeadas e inalteradas de relaves mineros. (Bussièrè, 2007)

$k_{sat}$ (cm/s)	$e$	Apparatus used	Classification (USCS)	Reference
<b>Remolded samples</b>				
$1.3 \times 10^{-4}$	0.55	Rigid wall permeameter	ML	Guerra 1973
$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-3}$	0.65-1.10	Rigid wall permeameter	SM-ML	Mittal and Morgenstern 1975
$1 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-7}$	0.60-1.25	Odometer	SM-ML	Mittal and Morgenstern 1976
$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-6}$	0.45-1.20	Odometer	ML	Mabes et al. 1977
$6 \times 10^{-3} - 2 \times 10^{-4}$	0.50-1.10	Rigid wall permeameter	SP	Nelson et al. 1977
$1 \times 10^{-5} - 7 \times 10^{-7}$	1.20-1.70	Flexible wall permeameter	ML	Matyas et al. 1984
$8 \times 10^{-2} - 5 \times 10^{-3}$	0.70-0.80	—	SP	—
$6 \times 10^{-4} - 4 \times 10^{-6}$	—	—	SM-ML	Chen et al. 1988
$1.5 \times 10^{-5} - 7 \times 10^{-6}$	0.68-1.14	Odometer	ML	Barbour et al. 1993
$1 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-6}$	0.48-0.85	Odometer	ML	Bussièrè 1993
$5 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-5}$	0.50-1.00	Rigid wall permeameter	ML	Aubertin et al. 1996
$5 \times 10^{-4}$	0.87	Rigid wall permeameter	SM	Bussièrè et al. 1998
$3 \times 10^{-5}$	0.80	—	ML	—
$4.5 \times 10^{-5} - 9.8 \times 10^{-5}$	0.50-1.60	Odometer	SM	Qiu and Segó 2001
$2.7 \times 10^{-5} - 6.7 \times 10^{-5}$	0.50-1.60	—	ML	—
$1.2 \times 10^{-5}$	0.72	Flexible wall permeameter	ML	Martin et al. 2005
<b>Undisturbed samples</b>				
$3 \times 10^{-4} - 4 \times 10^{-4}$	0.48-0.62	Odometer	SM	Mabes et al. 1977
$3 \times 10^{-5} - 3 \times 10^{-7}$	0.55-1.05	—	ML	—
$1.6 \times 10^{-5} - 9.5 \times 10^{-7}$	—	Flexible wall permeameter	ML	Blight and Steffen 1979
$3 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-6}$	1.00-1.40	Flexible wall permeameter	ML	Matyas et al. 1984
$1 \times 10^{-3} - 7 \times 10^{-7}$	0.70-1.65	Odometer	ML	L'Écuyer et al. 1992
$6 \times 10^{-5} - 6 \times 10^{-6}$	—	Flexible wall permeameter	ML	Al and Blowes 2000
$4 \times 10^{-4}$	0.61	Flexible wall permeameter	SM	—
$4 \times 10^{-5} - 3 \times 10^{-6}$	0.59-0.89	—	ML	Brisson et al. 2002



En general los resultados son variados dependiendo del autor, pero se observa una tendencia a valores entre  $10^{-4}$  y  $10^{-6}$ , aunque los resultados difieren dependiendo del equipo utilizado. Los valores obtenidos con un permeámetro de pared rígida son mucho mayores que el resto, luego los valores obtenidos a través de ensayos edométricos y finalmente los valores de permeabilidad medidos con un permeámetros de pared flexible obtienen resultados bastante menores, incluso para las mismas muestras, por ejemplo las ensayadas por Mittal and Morgenstern (1975 y 1976)

### 3.2 CONSOLIDACIÓN

Según la definición de Terzaghi, consolidación corresponde a todo proceso que involucra una disminución del contenido de humedad de un suelo saturado, sin el reemplazo del agua por aire. *“Every process involving a decrease of the water content of a saturated soil without replacement of the water by air is called a process of consolidation”* (Terzaghi, Peck, & Mesri, 1996).

Este proceso cuenta de dos etapas, la consolidación primaria y la consolidación secundaria, el primero es el que se genera debido a las cargas aplicadas sobre el suelo, mientras que la consolidación secundaria es aquella que ocurre debido a fluencia, descomposición de materia orgánica, reptación o algún otro mecanismo de deformación en el tiempo a carga constante. En este trabajo se abordará el proceso de consolidación primaria.

La consolidación primaria se representa con la analogía de un estanque lleno de agua, con un resorte y un émbolo con una válvula de escape, en el cuál al aplicar carga, inicialmente la tomará el agua, pero luego esta comenzará a escaparse por la válvula, liberando el exceso de presión y el resorte se deformará, tomando la parte de la carga que deja de tomar el agua.

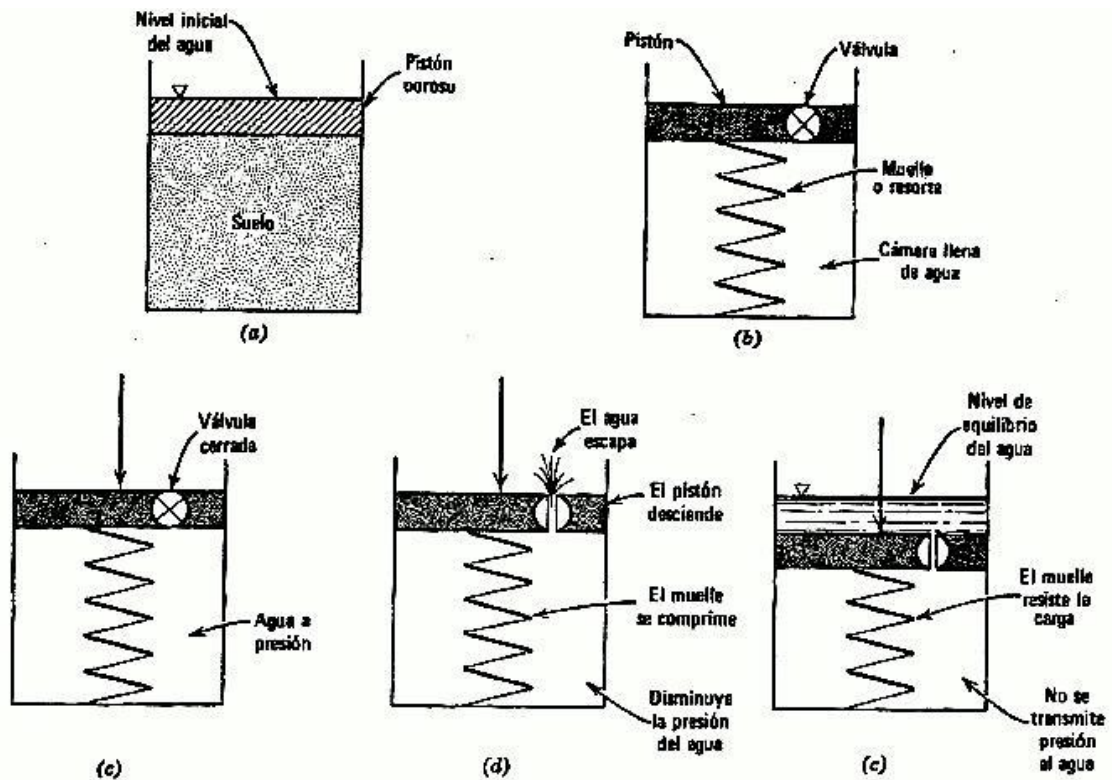


Figura 3.1 Modelo Básico de Consolidación (Lambe & Whitman, 1969).

En este modelo el resorte asemeja el esqueleto de suelo, el estanque a los espacios vacíos, y el tamaño de la válvula asimila la permeabilidad del suelo (mientras más grande la válvula, más rápido deja salir el agua, disipando de forma más rápida el exceso de presiones de poro).

Terzaghi desarrolló la ecuación de la consolidación unidimensional con una razón esfuerzo-deformación lineal, esta se basa en juntar las ecuaciones de equilibrio de un elemento de suelo, su coeficiente de compresibilidad y las ecuaciones de continuidad del fluido. (Lambe & Whitman, 1969).

La relación esfuerzo-deformación queda dada por:

$$\frac{\partial e}{\partial \sigma_v} = -a_v \quad \text{Ecuación 3.19}$$

Donde  $e$ , es el índice de vacíos,  $\sigma_v$  a la presión vertical total, y  $a_v$  al módulo de compresibilidad.

La ecuación de continuidad queda expresada por:

$$k \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{(1+e)} \frac{\partial e}{\partial t} \quad \text{Ecuación 3.20}$$

Donde  $h$  es la carga total,  $t$  el tiempo y  $z$  la profundidad. La carga total se puede descomponer en la altura de elevación, más la presión de poros, la cual a su vez se puede descomponer en la presión de poros hidrostática y el exceso de presiones de poro. Por lo tanto, bajo estas condiciones.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 (h_e + u_{ss} + u_e)}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \quad \text{Ecuación 3.21}$$

Juntando ambas ecuaciones se obtiene:

$$\frac{k(1+e)}{\gamma_w \cdot a_v} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = - \frac{\partial \sigma_v}{\partial t} \quad \text{Ecuación 3.22}$$

El primer término se denomina coeficiente de consolidación  $C_v$ :

$$C_v = \frac{k(1+e)}{\gamma_w \cdot a_v} = \frac{k}{\gamma_w \cdot m_v} \quad \text{Ecuación 3.23}$$

Donde  $m_v$  es el coeficiente de cambio volumétrico. Finalmente, si se expresa la tensión efectiva en función de las tensiones totales, se obtiene la ecuación de la consolidación de Terzaghi.

El coeficiente de cambio volumétrico está definido como el cambio volumétrico por unidad de volumen por unidad de incremento de carga (Craig, 2004) :

$$m_v = \frac{1}{1+e_0} \left( \frac{e_0 - e_1}{\sigma'_1 - \sigma'_0} \right) \quad \text{Ecuación 3.24}$$

Luego la ecuación 3.22 puede escribirse como:

$$c_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t} - \frac{\partial \sigma_v}{\partial t} \quad \text{Ecuación 3.25}$$

Para el caso del ensayo edométrico (consolidación en una dimensión) utilizado en esta memoria, la presión se mantiene en el tiempo y puede considerarse que es aplicada lo suficientemente rápido en comparación al tiempo de consolidación, por lo que podemos asumir el término  $\frac{\partial \sigma_v}{\partial t} = 0$ .

Introduciendo las variables adimensionales

$$Z = \frac{z}{h} \quad \text{Ecuación 3.26}$$

$$T = \frac{C_v t}{H^2} \quad \text{Ecuación 3.27}$$

Finalmente, la ecuación 3.25 puede escribirse como

$$\frac{\partial^2 u_e}{\partial Z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial T} \quad \text{Ecuación 3.28}$$

Cuya solución se representa en la figura 3.2:

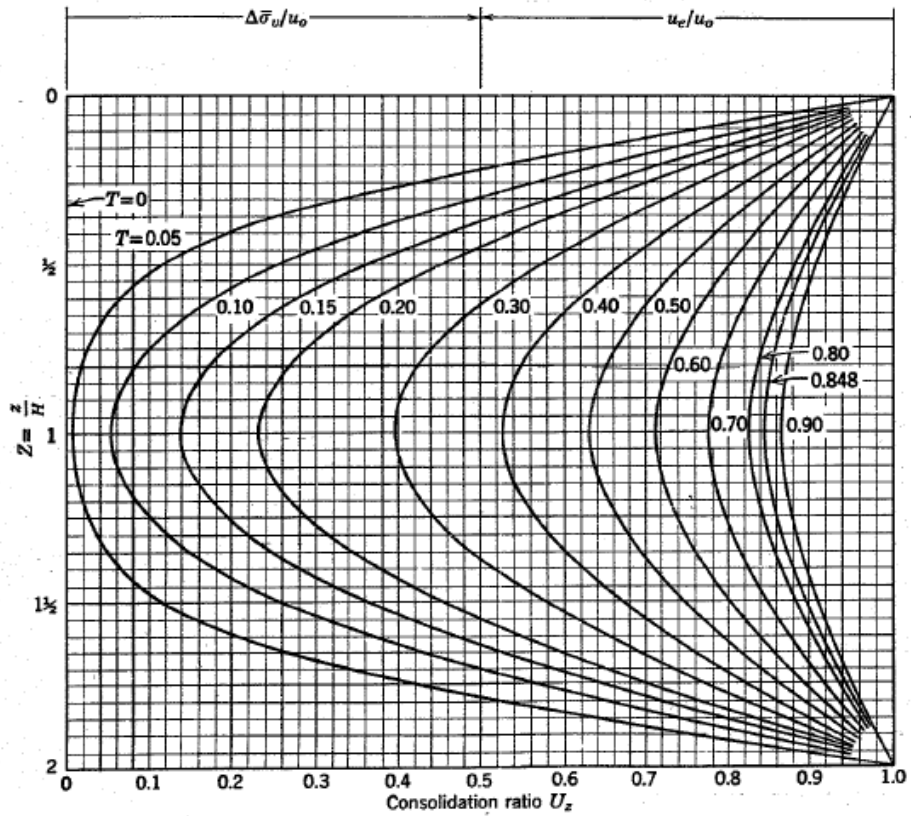


Figura 3.2 Expresión del grado de consolidación en función de la profundidad y del factor de tiempo: sobrepresión intersticial uniforme en el instante inicial (Lambe & Whitman, 1969).

Valores típicos reportados por Bussière (2007) para coeficientes de consolidación  $C_v$ , para índices de compresibilidad en  $C_c$  y  $C_r$  se presentan en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Resultados t picos de ensayos de consolidación sobre muestras remodeladas e inalteradas de relaves mineros. (Bussière, 2007)

Initial void ratio, $e_0$	$C_c$	$C_{cr}$	$c_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	Classification (USCS)	Reference
<b>Remolded samples</b>					
1.06–1.08	0.06–0.13	—	—	SP–SW	Mittal and Morgenstern 1975
0.95	0.13	—	$1 \times 10^{-1}$ – $5 \times 10^{-2}$	SM	Mittal and Morgenstern 1976
1.1–1.5	0.1–0.25	—	$1 \times 10^{-1}$ – $1 \times 10^{-3}$	ML	
1.22	0.3	0.032	—	ML	Mabes et al. 1977
0.70–0.85	0.06–0.13	—	$1 \times 10^2$	SP	Nelson et al. 1977
0.75	0.05	—	—	ML	Matyas et al. 1984
1.38–1.5	0.2–0.22	—	—	SP	
—	0.54	0.056	$6.2 \times 10^{-3}$	ML	Chen et al. 1988
—	0.12	0.011	$1.1 \times 10^{-2}$	SM	
0.56–0.80	0.05–0.13	0.003–0.01	$2.8$ – $5 \times 10^{-3}$	ML	Aubertin et al. 1996
0.5–1.6	0.056–0.094	—	$7.1 \times 10^{-3}$ – $3.3 \times 10^{-2}$	SM	Qiu and Segoo 2001
0.5–1.6	0.083–0.156	—	$4.3 \times 10^{-3}$ – $2.6 \times 10^{-2}$	ML	
<b>Undisturbed samples</b>					
0.62	0.13	0.02	—	SM	Mabes et al. 1977
0.69	0.08	0.01	—	ML	
0.6–1.6	0.06–0.15	—	$1.3 \times 10^{-2}$ – $6.3 \times 10^{-3}$	ML	Blight and Steffen 1979
—	0.28	—	$1.5 \times 10^{-1}$	ML	Volpe 1979
—	0.09	—	$3.7 \times 10^{-1}$	SP	
1.25–2.0	0.17–0.47	—	—	ML	Matyas et al. 1984
0.95–1.68	0.08–0.28	0.005–0.07	—	ML	L'�cuyer et al. 1992

Se observa de la tabla 3.2 que los valores de  $C_c$  varían típicamente en un rango entre 0.05 y 0.3, los valores más altos se obtienen en aquellas muestras con un índice de vacíos inicial más alto. El  ndice de recompresión  $C_{cr}$  o  $C_r$  varía entre 0.003 y 0.03 y el coeficiente de consolidación varía entre  $10^2$  y  $10^{-1}$  cm<sup>2</sup>/s para relaves más gruesos (SP o SM), mientras que para los más finos (ML) varía entre  $10^{-1}$  y  $10^{-3}$  cm<sup>2</sup>/s.

### 3.2.1 MODELOS DE CONSOLIDACIÓN.

Para analizar la deformación en los depósitos de relave, existen diversos métodos. Estos se diferencian pues están desarrollados para pequeñas o grandes deformaciones (Geier, Gjerapic, & Morrison, 2011). Debido al tipo de depositación de los relaves, inicialmente con un muy alto índice de vacíos, y que luego son sometidos a grandes esfuerzos, se esperan grandes deformaciones, por lo que muchos parámetros no pueden ser considerados constantes en el rango de deformaciones que se producirán.

El primer método fue desarrollado por Terzaghi, y asume que la compresión es constante en un rango de esfuerzos, la variación en el índice de vacíos está dada por la ecuación

$$\Delta e = C_c \cdot \log\left(\frac{\sigma_1'}{\sigma_0'}\right) \quad \text{Ecuación 3.29}$$

Donde  $\Delta e$  corresponde al índice de vacíos,  $C_c$ , al índice de compresibilidad y  $\sigma_1'$  y  $\sigma_0'$  a la tensión efectiva inicial y final respectivamente.

$C_c$  es la pendiente de la parte normalmente consolidada de los suelos, en caso de encontrarse en la parte preconsolidada se habla de  $C_r$ . Se ejemplifica una curva típica de un ensayo de consolidación unidimensional en la Figura 3.2.

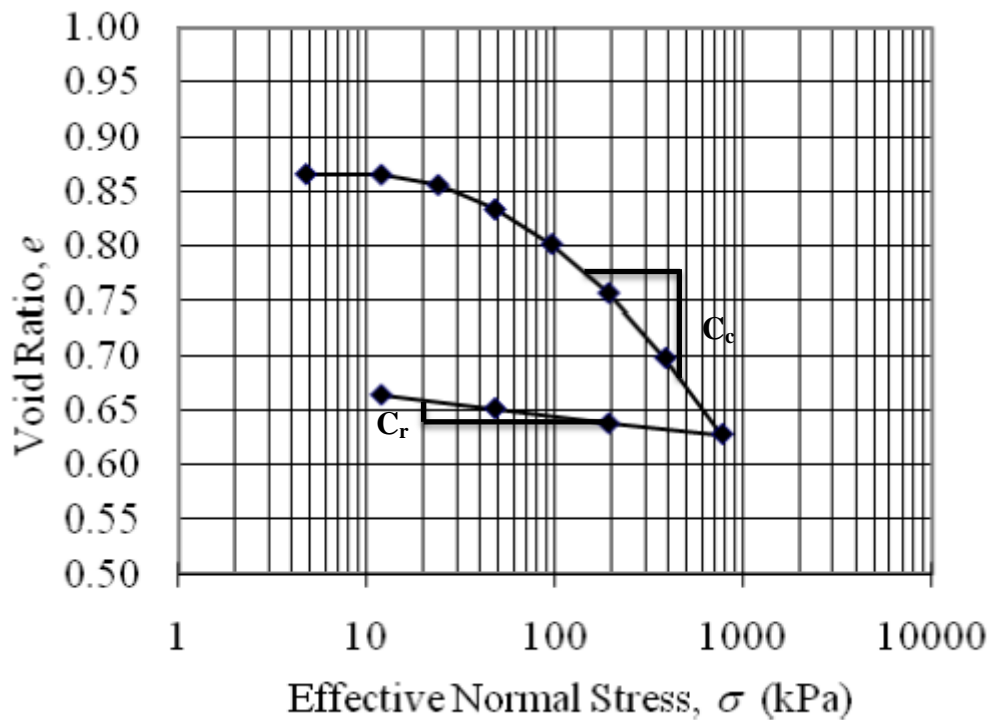


Figura 3.3 Forma de la curva típica e versus log σ para material de relave. (Geier, Gjerapic, & Morrison, 2011).

El método de Terzaghi asume que el coeficiente de consolidación  $C_v$  permanece constante, lo cual no parece ser adecuado para los relaves. En efecto típicamente los relaves son depositados con un contenido de sólidos cercano al 40% (relaves convencionales) o menor, y a medida que se van acumulando se consolidan en el tiempo, aumentando su contenido de sólidos considerablemente. Por esta misma razón, el rango de esfuerzos varía entre cero al momento de ser depositados superando los 1500 [kPa] cuando se encuentran en la base de un depósito de gran altura. (Geier, Gjerapic, & Morrison, 2011) (Tolosa, 2009).

Por otra parte, el modelo de grandes deformaciones, primeramente desarrollado por Gibson (1967), incluye en sus análisis los cambios provocados por las deformaciones en la permeabilidad y la compresibilidad del relave. Las ecuaciones son bastante complejas, por lo que se utilizan programas computacionales para su desarrollo, tales como CONDES (Yao and Znidarcic 1997) y FSCONSOL (Geier, Gjerapic, & Morrison, 2011)

Por ejemplo, FSCONSOL expresa la relación entre el índice de vacíos y el esfuerzo de confinamiento de la siguiente forma: (Geier, Gjerapic, & Morrison, 2011)

$$e = A \cdot \sigma'^B + M \quad \text{Ecuación 3.30}$$

Mientras que la relación entre la permeabilidad y el índice de vacíos la expresa como: (Geier, Gjerapic, & Morrison, 2011)

$$k = C \cdot e^D \quad \text{Ecuación 3.31}$$

Esta expresión es la utilizada para predecir el valor de la permeabilidad de Hazen (1911), que como se mencionó en 3.1.2, puede no ser la más adecuada para relaves.

El modelo de grandes deformaciones de Gibson, al expresar la permeabilidad y las relaciones de compresibilidad en función del índice de vacíos, llevará a una mejor estimación de las deformaciones. Este método es no lineal, pero eliminando la no linealidad de la permeabilidad y de la compresibilidad, se puede demostrar que se puede simplificar a la ecuación básica del modelo de Terzaghi.

En definitiva, ambos modelos (Terzaghi y Gibson) se diferencian en que el de Gibson disipa las presiones de poro más rápido, por lo que los asentamientos se logran en un menor tiempo de consolidación y los caudales de recuperación obtenidos son mayores (Tolosa, 2009).



## 4 EFECTO DE LA SAL

Existen diversos factores en que las sales presentes en un suelo o en el agua que circula a través de él, pueden afectar sus propiedades geotécnicas. En general estos factores están ligados al contenido de humedad y a la concentración de sales presentes.

En el caso más extremo, están los suelos salinos, donde se observa una estructura de suelo cementada debido a la unión de las partículas de suelo por cristales de sal. Esto provoca un aumento en la resistencia al corte, rigidez y en la capacidad de soporte de este tipo de suelos. El problema de estos suelos es que en presencia de agua, las sales son disueltas y se pierde esta capacidad de soporte extra, generada por la presencia de sales (Olguín, 2006).

Los suelos salinos están constituidos por minerales insolubles, sales solubles y aire, por lo que su estructura interna depende de estos tres parámetros. En este tipo de suelos al contacto con el agua se destruye su estructura interna debido a la disolución de las sales, este fenómeno se denomina colapsabilidad, y se observa que muestras con un alto contenido de finos, con un bajo índice de vacíos y una baja solubilidad de las sales existentes, generan una estructura menos colapsable, mientras que los suelos un bajo contenido de finos, alto índice de vacíos y una alta solubilidad en las sales, generan una estructura altamente colapsable (Olguín, 2006).

Además, la presencia de sales afecta la resistencia al corte. En la figura 4.1, se presenta la variación de la resistencia al corte para diferentes contenidos de sal en un suelo, donde se expone que además del contenido de sal presente en la muestra, el tipo de sal también es importante, pues genera distintos efectos sobre la muestra.

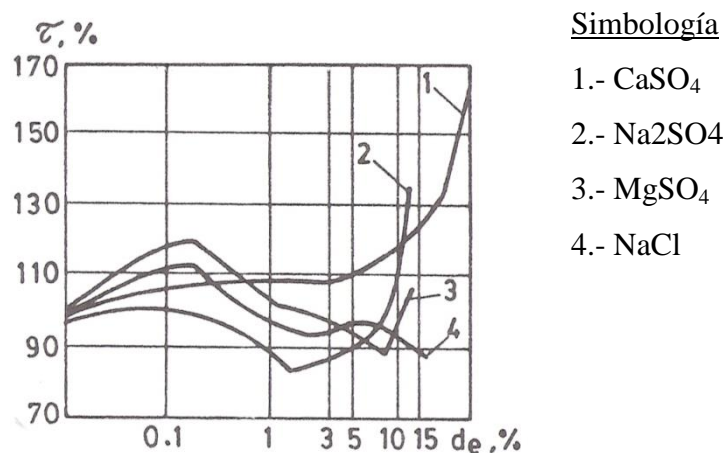


Figura 4.1 Variación de la Resistencia al Corte ( $\tau$ %) de muestras artificialmente salinizadas con respecto a su porcentaje de salinidad ( $d_e$ %) (Petrukhin, 1993).

Otro factor que es importante analizar en este trabajo, corresponde a la mineralogía del material a ensayar. Kenney (Kenney, et al, 1992) determinó que mezclas bentoníticas, ensayadas con soluciones de cloruro de sodio (40 g NaCl/l) aumentan su permeabilidad, esto debido a la forma de hidratarse de la montmorillonita. Se observó una disminución

considerable (alrededor de dos órdenes de magnitud), en el coeficiente de permeabilidad por este efecto (Figura 4.2).

Además el límite líquido obtenido en las muestras estudiadas por Kenney et al (1992) es de un 500% con la solución salina y 105% utilizando agua destilada. Es debido a este motivo que en este trabajo se determinarán los límites de Atterberg a las muestras de relaves utilizando agua de mar y agua potable.

En el estudio de Kenney et al (1992), la bentonita utilizada está compuesta por montmorillonita sódica, un mineral de arcilla, formado por hidrosilicatos de aluminio, magnesio entre otros compuestos. Cabe señalar que en su estado no hidratado, una partícula de montmorillonita está compuesta en pequeñas capas cristalinas, sujetas por pequeñas fuerzas de van der Waals y por presencia de cationes. Cuando la montmorillonita se humedece, el agua hidrata los cationes y las capas de montmorillonita, formando gruesas capas iónicas alrededor de las láminas. Cuando el agua tiene un alto contenido de sales, se requiere una menor cantidad de agua para neutralizar las cargas negativas, por lo que las capas formadas alrededor de las láminas son delgadas. Este efecto explica las diferencias entre los coeficientes de permeabilidad encontrados por Kenney en su estudio (Kenney, et al, 1992).

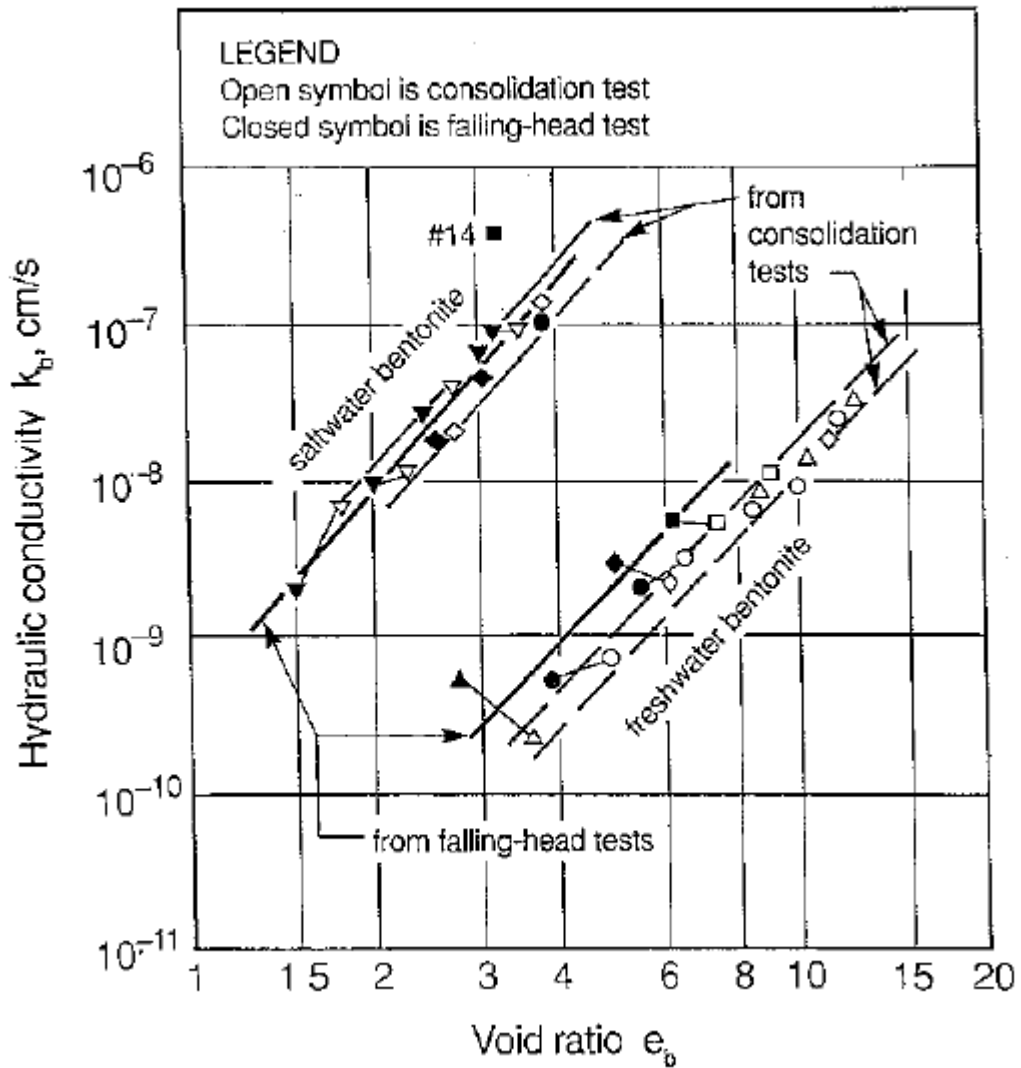


Figura 4.2 Variación de la permeabilidad según el índice de vacíos, para bentonita permeada con una solución salina y agua destilada (Kenney et al, 1992)

La figura 4.2 muestra que para el mismo índice de vacíos, la permeabilidad de la mezcla es mayor en el caso de las muestras ensayadas con la solución salina, lo que es consecuente con el comportamiento de la montmorillonita presente en la bentonita.

Es necesario mencionar que debido a los orígenes del relave a ensayar en el presente estudio, no debiese existir montmorillonita presente. Por lo que este efecto podría ser marginal, aun así es recomendable realizar un estudio mineralógico a las muestras para confirmar la presencia de este mineral o de algún otro mineral de arcilla, que pudiese sufrir efectos similares.

## 5 METODOLOGÍA DE ENSAYOS Y DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS

En el presente capítulo se presentan los tipos y cantidad de ensayos realizados en cada una de las muestras y explicando la metodología utilizada en cada uno de ellos.

Todos los ensayos se hicieron sobre muestras de relave integral obtenidas desde el tranque Las Tórtolas, perteneciente a Minera Los Bronces, de Anglo American Chile. El material fue extraído directamente de la planta en forma de pulpa, luego en el laboratorio fue secado al horno, disgregado y almacenado en bolsas para mantener la humedad al menor valor posible.

Para estudiar el efecto del contenido de finos, se modificó la granulometría del relave original, que presentaba un 55% de finos, componiendo una nueva muestra con un contenido de finos cercano al 30%.

Los ensayos de permeabilidad y consolidación se realizaron sobre ambas muestras, y utilizando agua potable y agua de mar. El agua de mar fue obtenida de la playa de las Rocas de Santo Domingo, Región de Valparaíso, la cual fue filtrada para eliminar impurezas antes de su uso.

Finalmente, para caracterizar el agua utilizada en los ensayos, se realizaron dos ensayos químicos, realizados por la empresa AsquimChile S.A.

A continuación se presenta un resumen con los ensayos realizados para este trabajo.

**Tabla 5.1 Programa de Ensayos**

	<b>Ensayos</b>	<b>Cantidad</b>
Caracterización Geotécnica	Peso Específico	2
	Límites de Atterberg	4
	Granulometría	2
	Hidrometría	1
	Densidad Máxima	2
	Densidad Mínima	2
	Proctor Estándar	4
Consolidación	Edométrica	4
Permeabilidad	Permeámetro de Pared Flexible	12
Otros	Caracterización Química de Agua	2
	Determinación de Sales Solubles Totales.	3

## 5.1 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA.

Los ensayos de caracterización geotécnica, de consolidación, de permeabilidad y los de determinación de sales solubles totales, fueron realizados en el laboratorio de Sólidos y Medios Particulados, MECESUP, de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

Los ensayos granulométricos se realizaron sobre ambas muestras, utilizando el procedimiento descrito en el manual de carreteras Volumen 8, para las partículas gruesas (mayores a 0.074mm). Los tamices utilizados corresponden al #16, #20, #40, #50, #100 y #200, que tienen aberturas de 2, 0.6, 0.425, 0.3, 0.15 y 0.075 mm respectivamente.

Para las partículas finas (menores a 0.074mm) se realizó el ensaye hidrométrico utilizando el procedimiento de la norma ASTM D422 – 63, se realizaron dos ensayos sobre la misma muestra de relave tamizada bajo malla#200, cuyos resultados se presentarán en el capítulo siguiente.

En cuanto a la determinación de peso específico ( $G_s$ ), se realizaron dos ensayos para cada una de las muestras utilizadas. Los ensayos se realizaron de acuerdo al procedimiento descrito en el manual de carreteras Volumen 8 utilizando un reductor de presión.

Además se realizaron ensayos de Límites de Atterberg, para determinar la plasticidad de las muestras a ensayar, estos ensayos se realizaron con las muestras secadas al horno a 100°, utilizando agua potable y agua de mar. Los procedimientos utilizados en este ensayo son los descritos en la norma ASTM D4318-05.

Para determinar la densidad máxima y mínima seca se utilizó el método de compactación, conocido como el método japonés (JSSMFE).

Finalmente en cuanto a la caracterización se realizaron ensayos Proctor estándar sobre ambas muestras, de la misma forma que los ensayos de plasticidad, se utilizó agua de mar y agua potable para obtener las curvas de humedad óptima. Este ensayo se realizó de acuerdo al Manual de Carreteras Volumen 8. Se utilizaron moldes de 100mm de diámetro nominal (Método A).

## 5.2 ENSAYOS DE PERMEABILIDAD

Los ensayos de permeabilidad fueron realizados en un permeámetro de pared flexible, con carga variable y nivel de salida constante, el ensayo se realizó de acuerdo a la norma ASTM D 5084-00. Este ensayo fue escogido debido al alto contenido de finos de las muestras, lo cual anticipa que se medirán bajas permeabilidades, para lo cual este ensayo es ideal, pues hace más fácil la medición y en consecuencia se obtiene una mayor precisión. Además, al utilizar pared flexible se elimina el potencial flujo preferencial entre la pared y el relave, y permite la aplicación de una presión de confinamiento y variar el gradiente hidráulico, lo que entrega resultados más precisos y permite realizarlos a la presión deseada.

Inicialmente se pensó en confeccionar las muestras con el método *wet tamping*, este método consiste en conformar la probeta con una compactación mecánica mediante un pisón manual, puesta en diferentes capas (5), a una determinada humedad (15% y 20%). Se intentó confeccionar las probetas con una humedad ligeramente superior a la humedad óptima del ensayo Proctor (12%-13%). No obstante a esta humedad la muestra con un 55% de finos presentó aglutinación de las partículas. Este fenómeno generó, al momento de la confección, la presencia de canales preferenciales, lo que induce una incorrecta medición del coeficiente de permeabilidad en el ensayo. En las figuras 5.1 y 5.2 se ilustra esta situación.

Al presentarse este problema, se intentó realizar la confección en una mayor cantidad de capas (10), disgregando la muestra antes de colocarla en el molde y a una mayor densidad, obteniendo mejores resultados que las probetas confeccionadas con 5 capas. Aun así se observó aglutinación de las partículas, formando glomérulos más pequeños, pero que de igual forma no representaban de la mejor forma el estado natural del relave depositado.



Figura 5.1 Aglutinación de partículas con un 17% de humedad.



Figura 5.2 Figura 5.3 Aglutinación de partículas con un 20% de humedad.

Para intentar mejorar y comparar los resultados, se confeccionó una probeta con un 5% de humedad a una densidad intermedia entre las realizadas con anterioridad, obteniendo permeabilidades considerablemente menores, lo cual es contradictorio con la teoría, que indica que las muestras compactadas con una humedad mayor a la humedad óptima del Proctor, debiese tener una menor conductividad hidráulica. Es por esta razón que se buscó otra forma de confeccionar las probetas, buscando una metodología que asemeje de mejor forma el tipo de depositación de los relaves en terreno, adoptando como metodología el confeccionar la probeta con relave tipo *slurry*.

El procedimiento para confeccionar las probetas tipo *slurry* consiste en recomponer la pulpa a la humedad requerida, y luego vaciarla en el molde, el cual se encuentra sosteniendo una membrana de látex, conectada a una bomba de vacío. Debido a la inestabilidad de la muestra, se utiliza un cilindro de mica, pegado con adhesivo de papel, de forma que al llenar la celda con agua se suelte y no interfiera en los resultados. Antes de armar la probeta, las líneas de agua deben saturarse, pues en caso contrario al momento de ensayar pueden quedar burbujas que bloqueen el paso de agua. (Santos, 2011)

Las muestras con un contenido de finos de 55% fueron confeccionadas con un 40% de humedad, mientras que las con un 33% de finos, fueron confeccionadas con un 30% de humedad, que corresponde a un 70% y un 75% de porcentaje de sólidos aproximadamente. Estas humedades fueron seleccionadas debido a que se buscó la menor humedad posible tal que se pudiese depositar el suelo de forma que escurra dentro del molde, con el fin de obtener una buena resistencia inicial para evitar la excesiva deformación de la probeta y evitar la segregación de partículas dentro de la probeta.



Figura 5.4 Montaje de ensayo de Permeabilidad en Pared Flexible. Se observa el cilindro para mantener la rigidez de la probeta, la membrana de látex instalada en el cap inferior y la pulpa lista.



Figura 5.5 Montaje de ensayo de Permeabilidad en Pared Flexible. Se observa la probeta armada con la saturación de las líneas de la celda y el molde aún conectado a la bomba de vacío.

Luego de confeccionar la probeta, se aplica una presión de cámara de  $0.5 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$ . La muestra no requiere saturación, pues esta se encuentra saturada desde su confección. Para medir los volúmenes de consolidación se utilizó una bureta externa debido a la imposibilidad de ingresar agua de mar a las buretas del panel de presiones existente en el laboratorio, debido a un posible deterioro de los equipos.

Los ensayos fueron realizados en una celda triaxial, utilizando una probeta de 5 cm de diámetro por 10cm de alto aproximadamente, aplicando inicialmente una presión de cámara de  $0.5 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$  y realizando un set de mediciones de permeabilidad con distintos gradientes hidráulicos (5; 4,5; 4; 3,5 y 3). Esto proceso fue repetido para presiones de confinamiento de  $1 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$  y  $1.5 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$ .



Figura 5.6 Montaje de ensayo de Permeabilidad en Permeámetro de Pared Flexible.

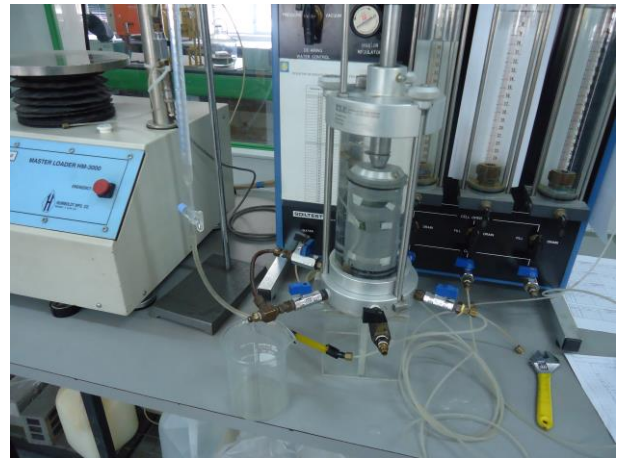


Figura 5.7 Montaje de ensayo de Permeabilidad en Permeámetro de Pared Flexible. Probeta montada con presión de cámara y conectada a la bureta.

En la figura 5.8 se esquematiza el ensayo de carga variable.

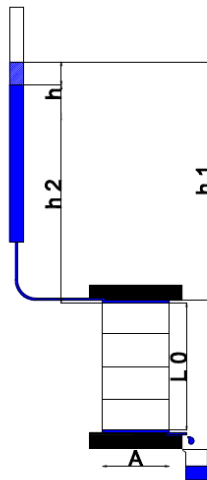


Figura 5.8 Esquema de Ensayo de carga variable, con nivel de salida constante.

A partir del esquema de la figura 5.8, se puede calcular el coeficiente de permeabilidad necesario a partir de las mediciones tomadas.

De la ley de Darcy, el caudal de salida está descrito por la ecuación 3.4.

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Asumiendo que las pérdidas de carga se producen sólo debido al flujo a través de la muestra, y no por el flujo a través del sistema hidráulico, se puede escribir el gradiente hidráulico como la caída de presión a lo largo de la probeta.



$$Q = k \cdot i \cdot A = k \cdot \frac{h}{L_0} \cdot A \quad \text{Ecuación 5.2}$$

Luego se puede escribir el flujo como el área de la bureta por la variación de altura de esta en un período de tiempo, lo que queda expresado como

$$Q = -a \cdot \frac{dh}{dt} = k \cdot \frac{h}{L_0} \cdot A \quad \text{Ecuación 5.3}$$

Para lo cual, utilizando separación de variables, e integrando para un  $t_1$  y  $t_2$ :

$$-a \cdot \int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{h} = k \cdot \frac{A}{L_0} \cdot \int_{t_1}^{t_2} dt \quad \text{Ecuación 5.4}$$

Se obtiene finalmente

$$k = \frac{a \cdot L_0}{\Delta t \cdot A} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad \text{Ecuación 5.5}$$

Dónde:

- a: Área transversal del tubo vertical.
- $L_0$  : Altura de la probeta.
- $\Delta t$ : Tiempo en el cuál se realiza la medición.
- A: Área transversal de la probeta.
- $h_1$ : Lecturas inicial en el tubo vertical.
- $h_2$ : Lecturas final en el tubo vertical.

Finalmente, el procedimiento utilizado consiste en la confección de la probeta según lo descrito con anterioridad, luego se ajusta el nivel cero de la bureta con un nivel, al nivel superior de la probeta. Luego se aplica una presión de confinamiento de  $0.5 \text{ kg/cm}^2$  midiendo el volumen de consolidación, este proceso es largo, y se esperó 24 hrs en todos los casos luego de varios ensayos de prueba, estimando que este tiempo sería suficiente para disipar el exceso de presiones de poro generadas por el incremento de la presión de confinamiento.

Luego se procede a dejar el nivel del tubo vertical a 50 cm sobre el nivel de la probeta, iniciando las mediciones de permeabilidad. Para los primeros gradientes se utilizó una ventana de 30 minutos por medición, y en el caso de los gradientes menores, se utilizó una ventana mayor, pues debido a la baja permeabilidad del suelo ensayado, los 30 minutos no eran suficientes y no se logró apreciar claramente la variación de altura. En estos casos se varió la ventana de tiempo entre 1 hr y 2 hr. Se tomaron mediciones para 5 diferentes

gradientes hidráulicos, pero en algunos casos no fue posible medirlos todos, en ese caso se dejó sólo 4 o 3 mediciones, pues para los gradientes más pequeños y presiones de cámara mayores, no se logró flujo en una ventana de tiempo razonable.

Luego, el proceso se repitió para presiones de 1 y 1.5 kg/cm<sup>2</sup>. Al finalizar el ensayo, la probeta es desmontada cuidadosamente, sin aplicar un estruje, pues la probeta al ser confeccionada en estado muy suelto, las deformaciones iniciales son considerables, por lo que al finalizar el ensayo se midió la altura y el diámetro de la probeta, para poder calcular realmente los gradientes utilizados. Se utilizó esta medida como la altura y el diámetro final para las tres presiones de cámara, pues como se podrá observar en los resultados, el mayor volumen de consolidación obtenido se daba para la primera presión de confinamiento.

Finalmente la muestra completa fue llevada al horno, para determinar su humedad residual y luego poder determinar la densidad real ensayada o índice de vacíos para cada una de las presiones de confinamiento utilizadas.

Como se indicó anteriormente, la saturación de la probeta no es necesaria, pues al ser confeccionada en forma de slurry, su contenido de agua es muy alto, por lo que su saturación está asegurada. Esto se confirmó midiendo el parámetro B para sólo una de las muestras, obteniendo un valor superior al 0.95, esto no se realizó en todas las mediciones, pues como se debe trabajar con agua de mar, no es posible utilizar los transductores de presión en el laboratorio para medir la presión de poros.

### **5.3 ENSAYOS EDMÉTRICOS**

Estos ensayos fueron realizados en una celda edométrica convencional (figuras 5.9 y 5.10), se realizaron sobre muestras remoldeadas descritas al comienzo del capítulo, depositadas de la misma forma que las probetas de los ensayos de permeabilidad (*slurry*), con la diferencia de que los equipos para mantener la probeta estable no son requeridos, pues la celda edométrica es de pared rígida, y no requiere de sistemas de apoyo de sostenimiento, ni de succión de vacíos.

Se efectuaron 4 ensayos de este tipo, al igual que para el caso anterior, las muestras con un 55% de finos se confeccionaron con un 40% de humedad (70% Porcentaje de Sólidos) mientras que las con 30% con un 30% de humedad (75% Porcentaje de Sólidos). Los ensayos se realizaron con carga y descarga, sin incluir una nueva recarga. Los ensayos se realizaron de acuerdo al procedimiento descrito en la norma ASTM D 2435-04, utilizando agua potable y agua de mar.



Figura 5.9 Montaje de ensayo Edométrico, celdas edométricas montadas en marcos de carga.



Figura 5.10 Montaje de ensayo Edométrico, montaje listo para ensayo.

Para determinar el coeficiente de consolidación  $C_v$  se utilizó el método de Taylor, también conocido como método de la raíz, el cuál es un método gráfico. El procedimiento de este método consiste en determinar el tiempo para el cuál se ha disipado el 90% ( $t_{90}$ ) del exceso de presiones de poros. Este valor se obtiene trazando la tangente de la parte recta de la curva tiempo-deformación, prolongándola hasta cortar el origen, luego se traza una línea con una inclinación de 1.15 veces la inclinación de la recta tangente. El valor en el eje de las abscisas en la intersección de esta recta con la curva observada determinará el valor de  $t_{90}$ . (Lambe & Whitman, 1969)

Luego, utilizando los resultados de la ecuación de consolidación para el caso de una sobrepresión uniforme, con drenaje doble se puede obtener el valor de  $C_v$  despejándolo de la ecuación 3.26.

$$C_v = \frac{T_v (U = 90\%) \cdot H^2}{t_{90}} \quad \text{Ecuación 5.6}$$

El módulo de deformación volumétrico ( $m_v$ ) puede obtenerse calculando la pendiente en el gráfico deformación unitaria en función de la carga.

Luego de obtenido el coeficiente de consolidación y el módulo de deformación, puede determinarse el valor del coeficiente de permeabilidad a través de la definición de  $C_v$  descrita en la ecuación 3.23.

$$k = C_v \cdot \gamma_w \cdot m_v \quad \text{Ecuación 5.7}$$

## **5.4 DETERMINACIÓN DE SALES SOLUBLES TOTALES**

Este ensayo se realizó sobre las muestras luego de ejecutados los ensayos de permeabilidad, en los casos en que se utilizó agua de mar. Los ensayos se realizaron de acuerdo al procedimiento descrito en el Manual de Carreteras Volumen 8.

Además, se realizó un procedimiento modificado para estudiar el contenido de sales solubles totales (SST) al agua de mar utilizada, donde se filtró y se obtuvo un litro de esta muestra, luego se tomó una muestra de 50gr y se obtuvo la cantidad de sales presente en el agua de mar. Este procedimiento se realizó con el objetivo de medir el contenido de SST original en la muestra de agua de mar utilizada, y poder estimar si la concentración de sales aumenta en el relave durante el tiempo de circulación del agua de mar.

Adicionalmente, se realizó un ensayo de SST para la muestra original de relave extraído de la planta Las Tórtolas, determinando que el contenido de SST era nulo.

## **5.5 ENSAYOS DE SEDIMENTACIÓN**

Este ensayo se realizó en el laboratorio de Sólidos y Medios Particulados de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, este se efectuó sobre pulpas con el mismo contenido de sólidos que las utilizadas para los ensayos de permeabilidad y los ensayos edométricos

El objetivo de este ensayo es determinar la densidad o índice de vacíos inicial, para el proceso de consolidación para una determinada concentración en una pulpa. Además se desea estudiar si el agua de mar tiene algún efecto en la velocidad de sedimentación.

Este ensayo consiste en colocar la pulpa en una probeta graduada, y luego medir la velocidad de sedimentación de la muestra, esto se logra midiendo el agua libre residual tras la depositación del relave. Se trabajó con aproximadamente 1000cc de pulpa, utilizando las concentraciones establecidas para los ensayos edométricos y de permeabilidad (70% y 75% para un contenido de finos de 55% y 33% respectivamente).

Se realizaron cuatro ensayos, utilizando agua de mar y agua potable para cada una de las muestras utilizadas en esta memoria (55% de finos y 33% de Finos).



Figura 5.11 Probeta Graduada para ensayo de sedimentación



Figura 5.12 Ensayos de Sedimentación.

Para adecuar el volumen de la probeta con la graduación utilizada se realizó una calibración, donde se transformó cada medición en el volumen correspondiente a la probeta.

Tabla 5.2 Calibración Probeta Ensayo Sedimentación

Volumen [ml]	Graduación [cm]
1000	34.0
900	30.6
800	27.2
700	23.8
600	20.4
500	17.0
400	13.6
300	10.2
200	6.8
100	3.4
0	0.0

Mediante una regresión lineal sobre los puntos medidos se obtiene la ecuación para la relación.

$$\text{Volumen [ml]} = \text{Graduación [cm]} * 0.034$$

Ecuación 5.8

## 6 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL RELAVE ENSAYADO

En este capítulo se presentará el material utilizado para en los ensayos y sus características geotécnicas, tales como la granulometría, plasticidad, densidades máximas y mínimas entre otros.

El relave ensayado corresponde a relave extraído de la planta Las Tórtolas, perteneciente a la minera Los Bronces, del grupo Angloamerican Chile, este fue retirado y extraído antes de ingresar al ciclón. Se extrajeron dos tambores de 200 lts cada uno. En el laboratorio el relave fue secado en el horno a 100°C y luego disgregado y almacenado en bolsas. Para lograr homogeneidad, se mezcló varias veces, de forma de obtener una muestra representativa. Finalmente, se lavó parte del material, eliminando los finos, para luego recomponer un material con un contenido de finos menor al original, fijado inicialmente en un 30%, que posteriormente se determinó experimentalmente.

El relave ensayado es de color gris claro. No presenta plasticidad y los granos al microscopio se ven angulosos. En las figuras 6.1 y 6.2 se presenta una imagen tomada con el microscopio electrónico del laboratorio de Sólidos y Medios Particulados de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, donde se puede observar algunos de los tamaños de los granos y su forma.

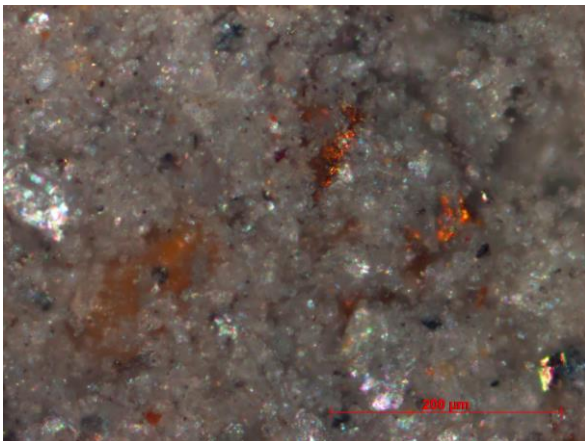


Figura 6.1 Relave original, secado al horno, visto al microscopio electrónico.

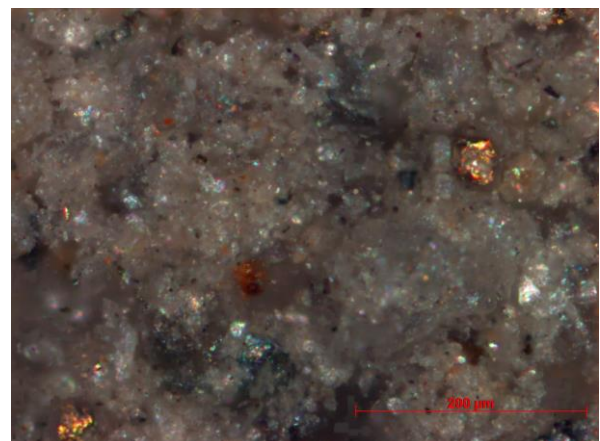


Figura 6.2 Relave reconstituido, secado al horno, visto al microscopio electrónico.

## 6.1 PESO ESPECÍFICO DE LOS SÓLIDOS ( $G_s$ )

Se determinó el valor del peso específico ( $G_s$ ) de acuerdo a la metodología explicada en 5.1.1.

Tabla 6.1 Valores de Peso Específico ( $G_s$ ).

Muestra	Picnómetro	Vaso Esmerilado
55% Finos	2.80	2.84
32% Finos	2.73	2.80
100% Finos	-	2.89

Los resultados utilizados en este trabajo corresponden a los obtenidos en el vaso esmerilado, pues trabajos previos en el laboratorio de sólidos y medios particulados de la Universidad de Chile, muestran que con este aparato se obtienen resultados con una menor dispersión.

## 6.2 GRANULOMETRÍA

El contenido inicial de finos es de un 53% para el tambor N°1, mientras que para el tambor N°2 es de un 56%. Para el caso de la muestra reconstituida se obtuvo un 31%. Se utilizaron muestras tanto del tambor N°1 como del N°2, por lo que se hablará indistintamente de la procedencia de la muestra, y se simplificará a utilizar un contenido de finos del 55%.

Para los cálculos de la curva granulométrica de tamaños menores a la malla #200 (0.074mm), se utilizó el  $G_s$  obtenido del ensayo de peso específico para la muestra original, obtenida con el vaso esmerilado de 2.84.

Se presenta la curva granulométrica obtenida en la figura 6.1, se observa que la curva para ambos tambores es la misma. Además se presenta la curva obtenida para la muestra reconstituida. La curva obtenida para tamaños menores a 0.074mm se obtuvo con el ensayo hidrométrico, donde sólo una muestra de finos fue ensayada, y luego dependiendo del contenido de finos obtenido en cada granulometría se ajustó el 100% de lo ensayado en el hidrómetro al porcentaje correspondiente.

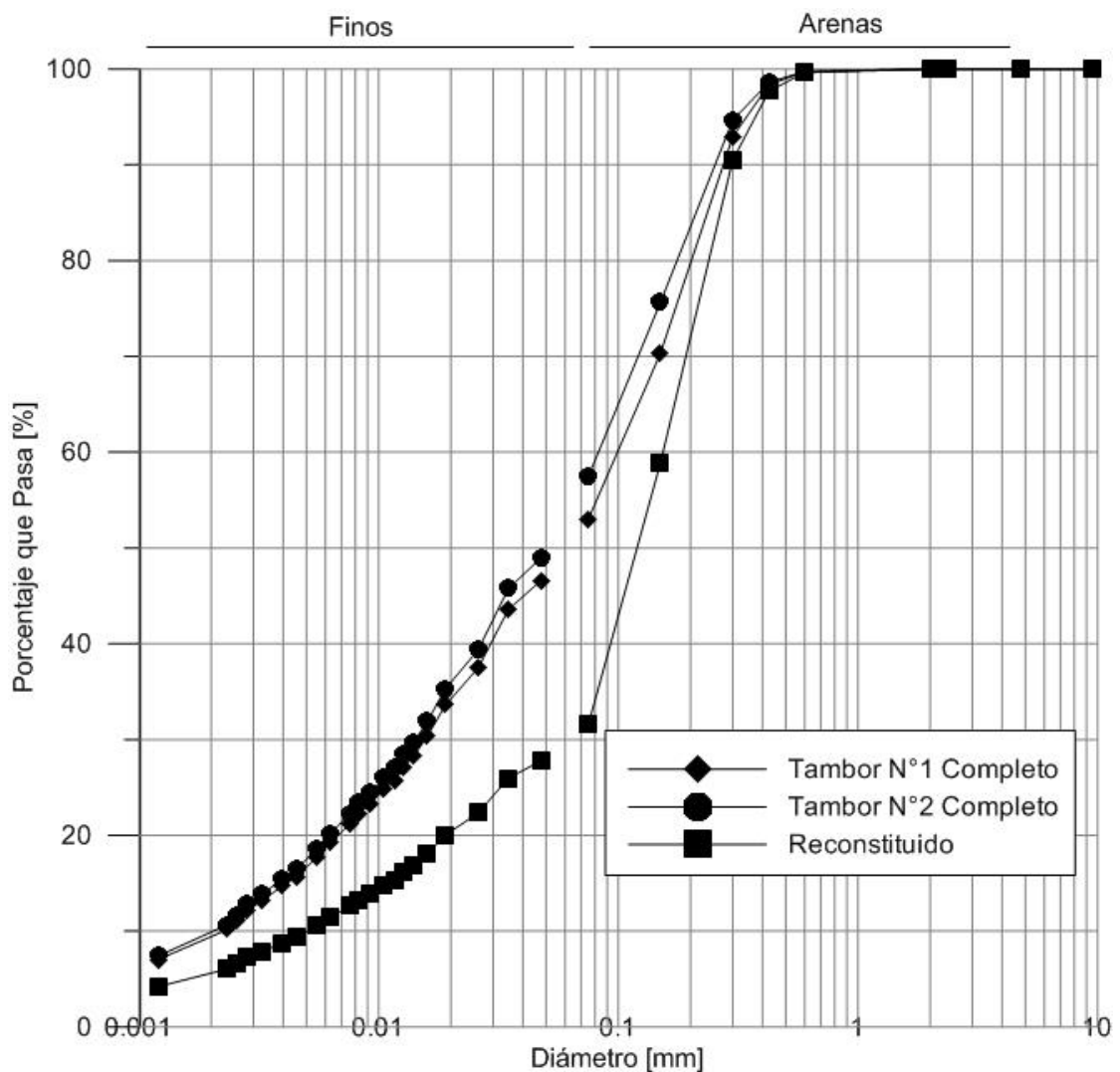


Figura 6.3 Granulometría completa para todas las muestras ensayadas.

En la tabla 6.1 se presentan los valores del coeficiente de uniformidad y del coeficiente de curvatura.

Tabla 6.2 Valores de  $C_c$  y  $C_u$  de las muestras utilizadas.

Muestra	$D_5$ [mm]	$D_{10}$ [mm]	$D_{30}$ [mm]	$D_{60}$ [mm]	$C_c$	$C_u$
Tambor N°1	0.001	0.002	0.016	0.122	0.90	51.42
Tambor N°2	0.001	0.002	0.014	0.108	0.78	45.81
Reconstituido	0.001	0.006	0.074	0.172	5.73	30.99

Se observa que las muestras originales son bastante similares, además de poseer todos los tamaños de partícula y ser poco uniformes, mientras que para el caso del material reconstituido si existe un cambio y se observa una pequeña falta en ciertos tamaños de partículas, aunque puede deberse al empalme entre el ensaye hidrométrico y el ensaye con los tamices. En el último caso también se obtiene que es poco uniforme, aunque más uniforme que las muestras originales.



### 6.3 LÍMITES DE ATTERBERG

Se realizaron 6 ensayos de límites de Atterberg, sobre la muestra original con un contenido de finos de 55% , sobre la muestra reconstituida con un 32% de finos y sobre una tercera muestra reconstituida con un 100% de finos, con el fin de estudiar el efecto del agua de mar sobre el índice de plasticidad.

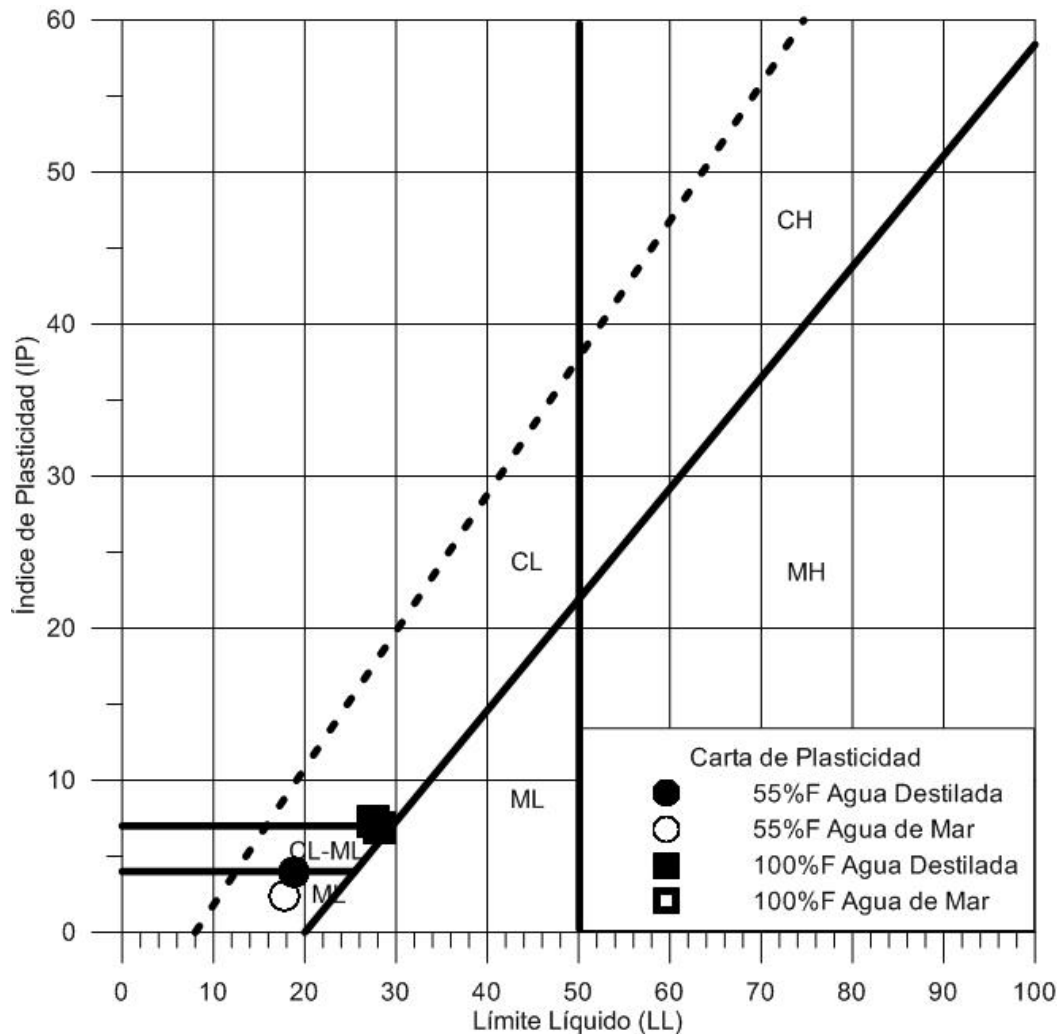


Figura 6.4 Carta de Plasticidad, para las muestras con un 55% de contenido de finos y para una muestra con un 100% de contenido de finos. Análisis de Resultados.

Se obtuvo un bajo índice de plasticidad para todas las muestras, incluso sobre la muestra reconstituida no fue posible determinar el límite líquido, por lo que se clasificó que el relave con un 33% de finos como NP (No Plástico).

Como se aprecia en la carta de plasticidad, el relave ensayado clasifica como un limo de baja plasticidad (ML) al igual que la muestra de 100% de contenido de finos. Sin cambios significativos por efectos del agua de amasado.

## 6.4 DENSIDAD MÁXIMA Y MÍNIMA

Se utilizó la metodología descrita en 5.1 correspondiente al método Japonés.

Tabla 6.3 Densidad Máxima y Mínima Secas

Muestra	Densidad Mínima [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad Máxima [g/cm <sup>3</sup> ]
32% Finos	1.08	1.70
55% Finos	0.94	1.56

## 6.5 PROCTOR ESTÁNDAR

Se realizaron cuatro ensayos de compactación Proctor estándar, con la metodología explicada en 5.1.1.

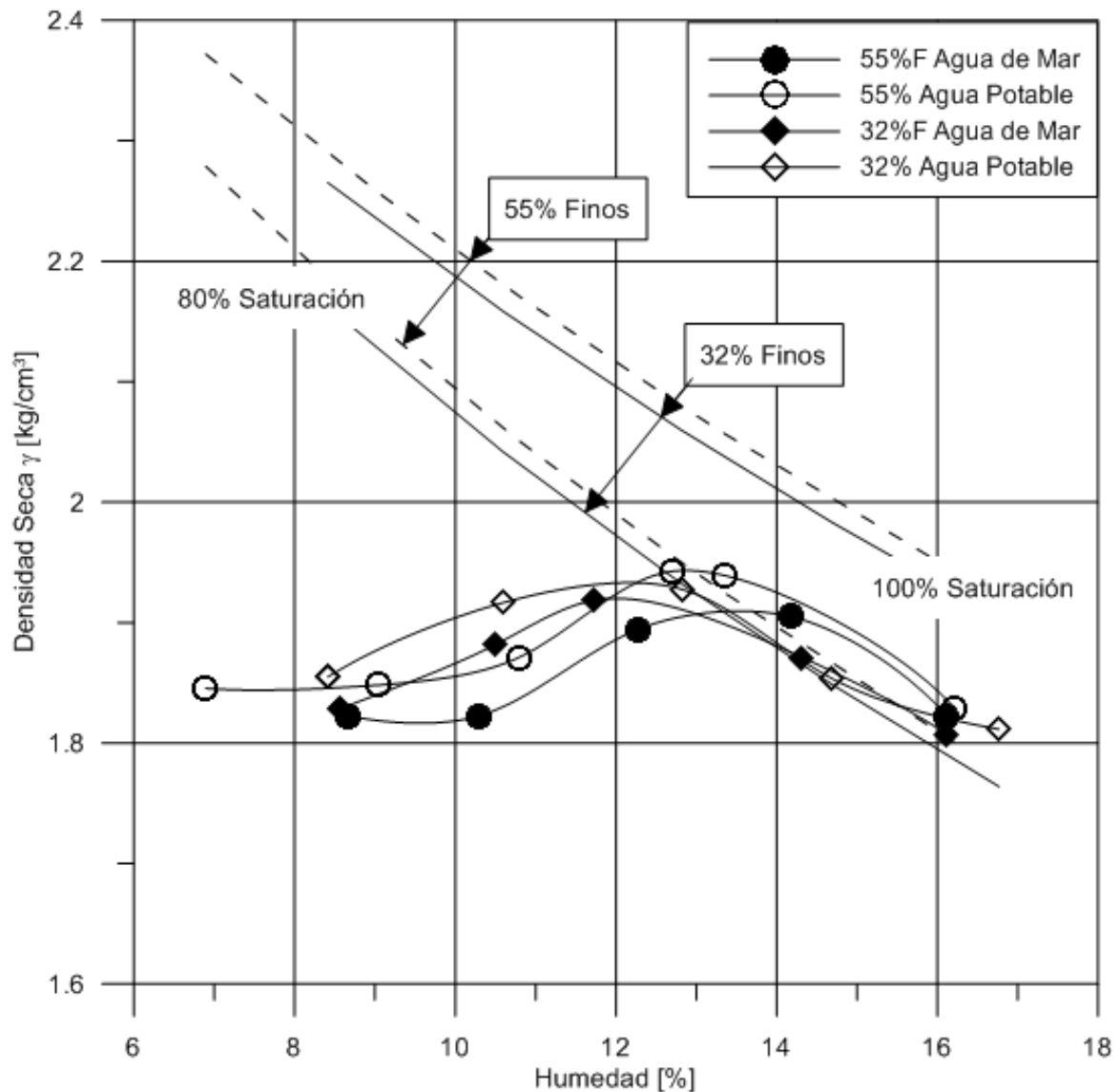


Figura 6.5 Curvas de Humedad Ensayo Proctor Estándar

De los ensayos se obtiene que la humedad óptima, para el caso del material con un contenido de finos de 55% se encuentra cercana al 13%, para el caso realizado tanto con agua potable como con agua de mar. Mientras que para el caso del material ensayado con un 32% de finos se obtuvo que la humedad óptima es de un 12%. Cabe destacar que los ensayos de permeabilidad y de consolidación fueron confeccionados con humedades sobre el 30%.

## 6.6 CLASIFICACIÓN USCS

De los resultados obtenidos de las granulometrías y de los ensayos de plasticidad se obtiene la clasificación USCS para las distintas muestras utilizadas en los ensayos. En la tabla 6.4 se muestra el resumen con la plasticidad, las características de las curvas granulométricas y finalmente la clasificación USCS correspondiente.

Tabla 6.4 Clasificación USCS

Agua de Amasado	%Finos	LL	IP	Cu	Cc	Clasificación USCS
Agua Destilada	55	19	4	51	0.9	ML
Agua Destilada	32	NP	NP	31	5.7	SM
Agua Destilada	100	28	7	-	-	ML
Agua de Mar	55	18	2	51	0.9	ML
Agua de Mar	32	NP	NP	31	5.7	SM
Agua de Mar	100	27	7	-	-	ML

## 6.7 ENSAYOS QUÍMICOS DE AGUA

Los ensayos químicos fueron realizados en el laboratorio AsquimChile S.A., los resultados se presentan en la tabla 6.5 y 6.6, en el anexo D, se presentan los certificados de los ensayos.

Tabla 6.5 Resultados Ensayos Químicos Agua de Mar

Muestra	Agua de Mar	
Parámetro	Metodología	Muestra
Valor pH a 20°C	NCh 413	7.8
Cloruros, (Cl), mg/l	NCh 419	19800
Sólidos disueltos, mg/l	NCh 416	38866
Sulfatos, (SO <sub>4</sub> , mg/l	NCh 420	2654
Alcalinidad Total, (CaCO <sub>3</sub> ), mg/l	NCh 415	149
Dureza Total, (CaCO <sub>3</sub> ), mg/l	NCh 418	6658
Dureza Cálctica, (CaCO <sub>3</sub> ), mg/l	NCh 418	1030
Dureza Magnésica, (MgCO <sub>3</sub> ), mg/l	NCh 418	4671
Sólidos en Suspensión, mg/l	NCh 416	2.7
Materias Orgánica como Oxígeno Consumido, mg/l	NCh 1448	24

Tabla 6.6 Resultados Ensayos Químicos Agua Potable

Muestra	Agua Potable	
Parámetro	Metodología	Muestra
Valor pH a 20°C	NCh 413	7.15
Cloruros, (Cl), mg/l	NCh 419	149
Sólidos disueltos, mg/l	NCh 416	818
Sulfatos, (SO <sub>4</sub> , mg/l	NCh 420	259
Alcalinidad Total, (CaCO <sub>3</sub> ), mg/l	NCh 415	140
Dureza Total, (CaCO <sub>3</sub> ), mg/l	NCh 418	345
Dureza Cálctica, (CaCO <sub>3</sub> ), mg/l	NCh 418	310
Dureza Magnésica, (MgCO <sub>3</sub> ), mg/l	NCh 418	25
Sólidos en Suspensión, mg/l	NCh 416	ND <sup>1</sup>
Materias Orgánica como Oxígeno Consumido, mg/l	NCh 1448	ND <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Parámetro no determinado.

## **7 RESULTADOS OBTENIDOS**

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de permeabilidad, consolidación y sedimentación obtenidos en laboratorio.

### **7.1 ENSAYOS DE SEDIMENTACIÓN**

Estos ensayos fueron realizados de acuerdo al procedimiento descrito en 5.5, utilizando el mismo porcentaje de sólidos utilizado en los ensayos de consolidación y de permeabilidad.

En la figura 7.1 se observa que las muestras con un menor porcentaje de finos, tienen una mayor velocidad de sedimentación, aun cuando la concentración de la muestra es mayor en este caso, y se espera una disminución en la velocidad de sedimentación con el aumento de la concentración. Esto es explicable debido a la mayor cantidad de partículas con un mayor diámetro.

En cuanto a los ensayos realizados con agua de mar no se observa una gran diferencia en la velocidad de sedimentación, es más, es bastante apreciable que de acuerdo a la diferencia de densidad inicial, se mantiene a lo largo del ensayo, estas diferencias son pequeñas y pueden asociarse a errores experimentales.

En la figura 7.1 se presentan los resultados según la variación de la densidad seca  $\gamma$  y en la figura 7.2, según la variación del índice de vacíos  $e$ .

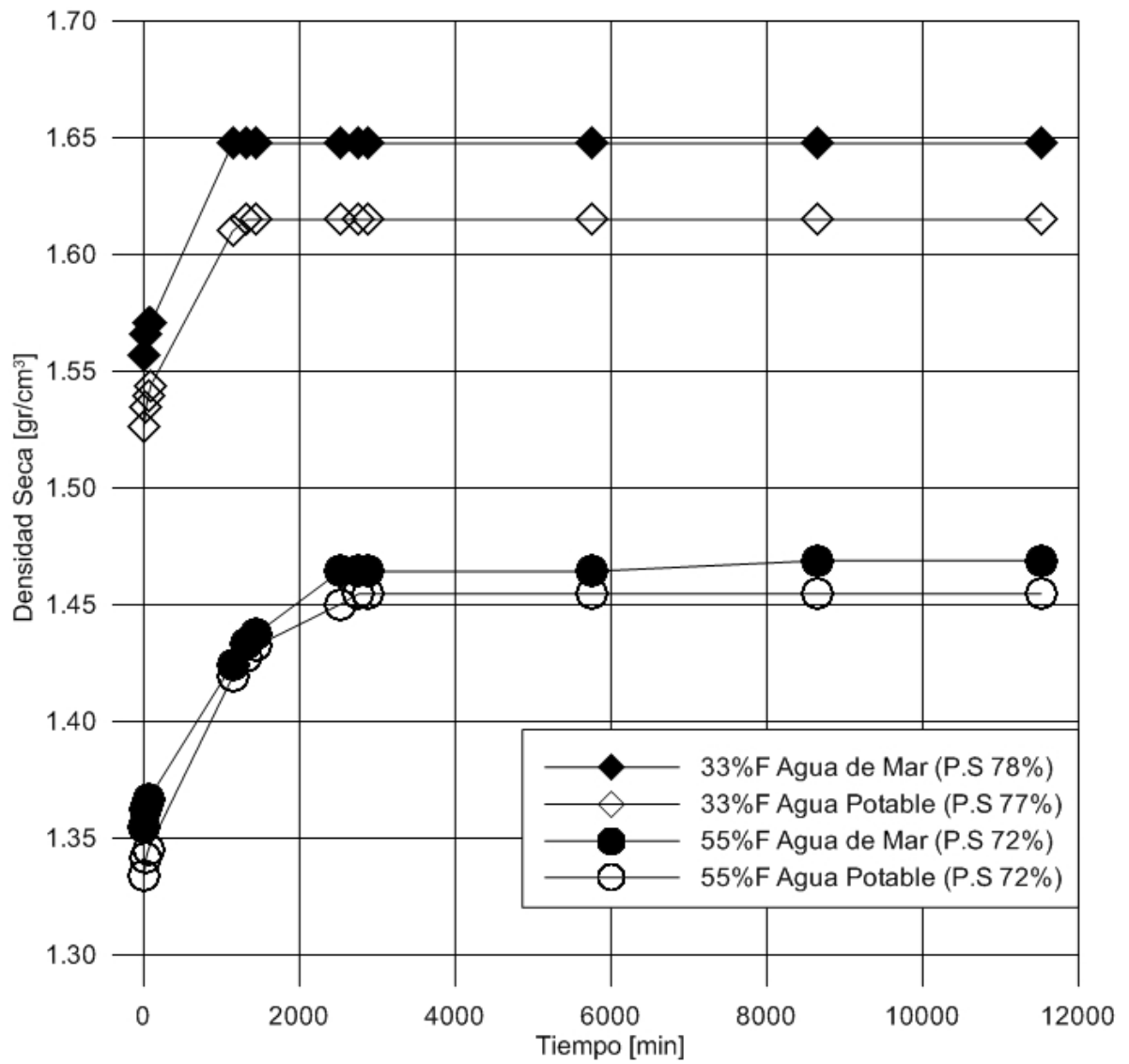


Figura 7.1 Ensayo de sedimentación, densidad seca en función del tiempo. P.S corresponde al porcentaje de sólidos de confección de cada una de las muestras.

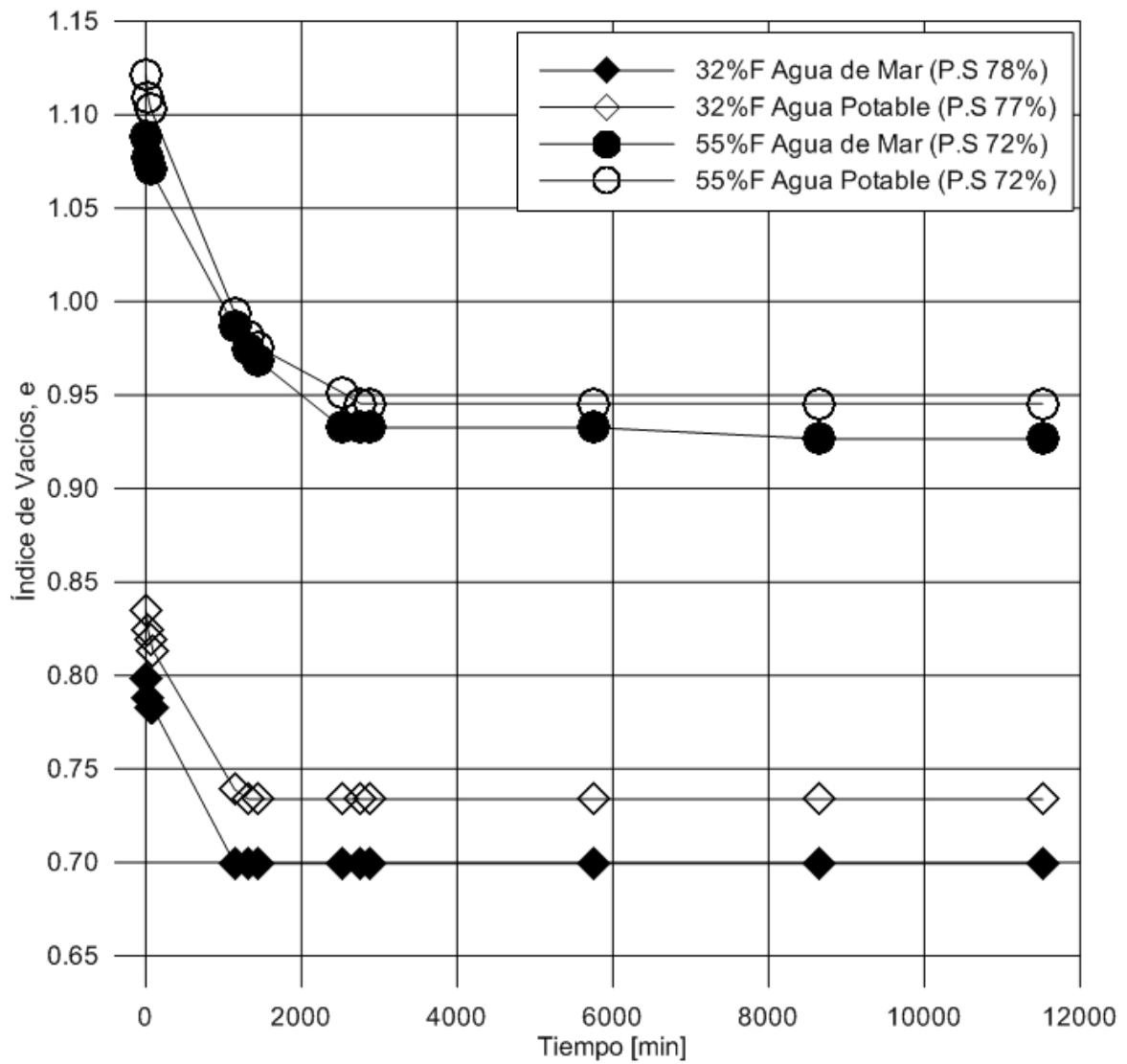


Figura 7.2 Ensayo de sedimentación, índice de vacíos en función del tiempo. P.S corresponde al porcentaje de sólidos de confección de cada una de las muestras.

Con este ensayo se puede calcular el porcentaje de sólidos final, la cual será la concentración inicial para el ensayo de consolidación y de permeabilidad, esta se verificará experimentalmente en los otros ensayos.

Finalmente, con el índice de vacíos final, se puede determinar la concentración final para cada una de las probetas ensayadas.

Tabla 7.1 Concentración Final ensayos de Sedimentación

	P.S Final[%]
55%F.C Agua de Mar	75%
55% FC Agua Potable	75%
32%F.C Agua de Mar	80%
32% FC Agua Potable	79%

## 7.2 ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos con los ensayos edométricos. Se realizaron 5 ensayos, pero el primero en realizarse fue descartado, pues no fue confeccionado en forma de pasta, como el resto de los cuatro ensayos. En la figura 7.3, se presentan los resultados según la variación del índice de vacíos y presión vertical. En la figura 7.4, los valores de índice de vacíos han sido normalizados.

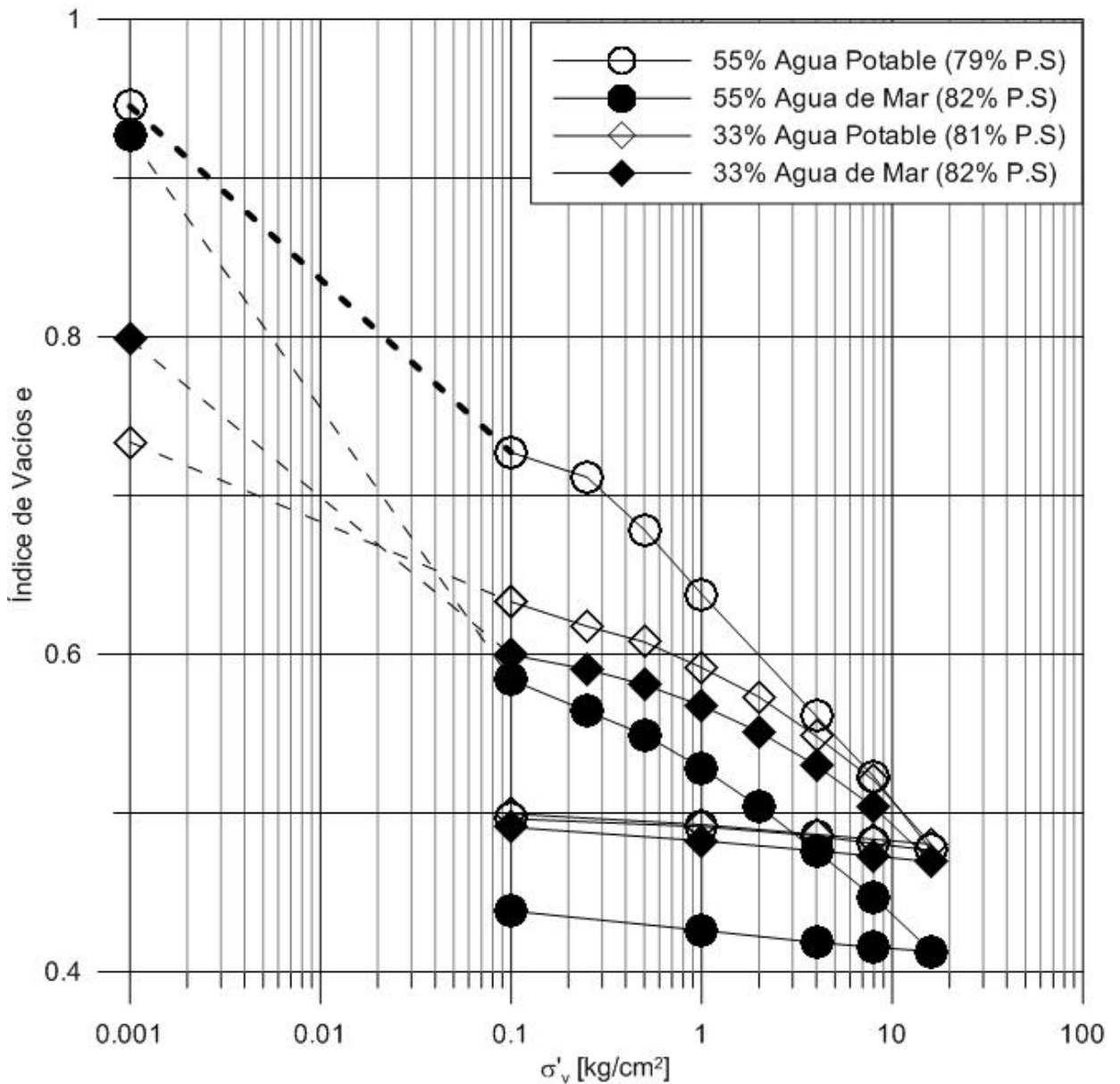


Figura 7.3 Índice de vacíos v/s tensión vertical. El índice de vacíos inicial corresponde al obtenido a partir del ensayo de sedimentación.



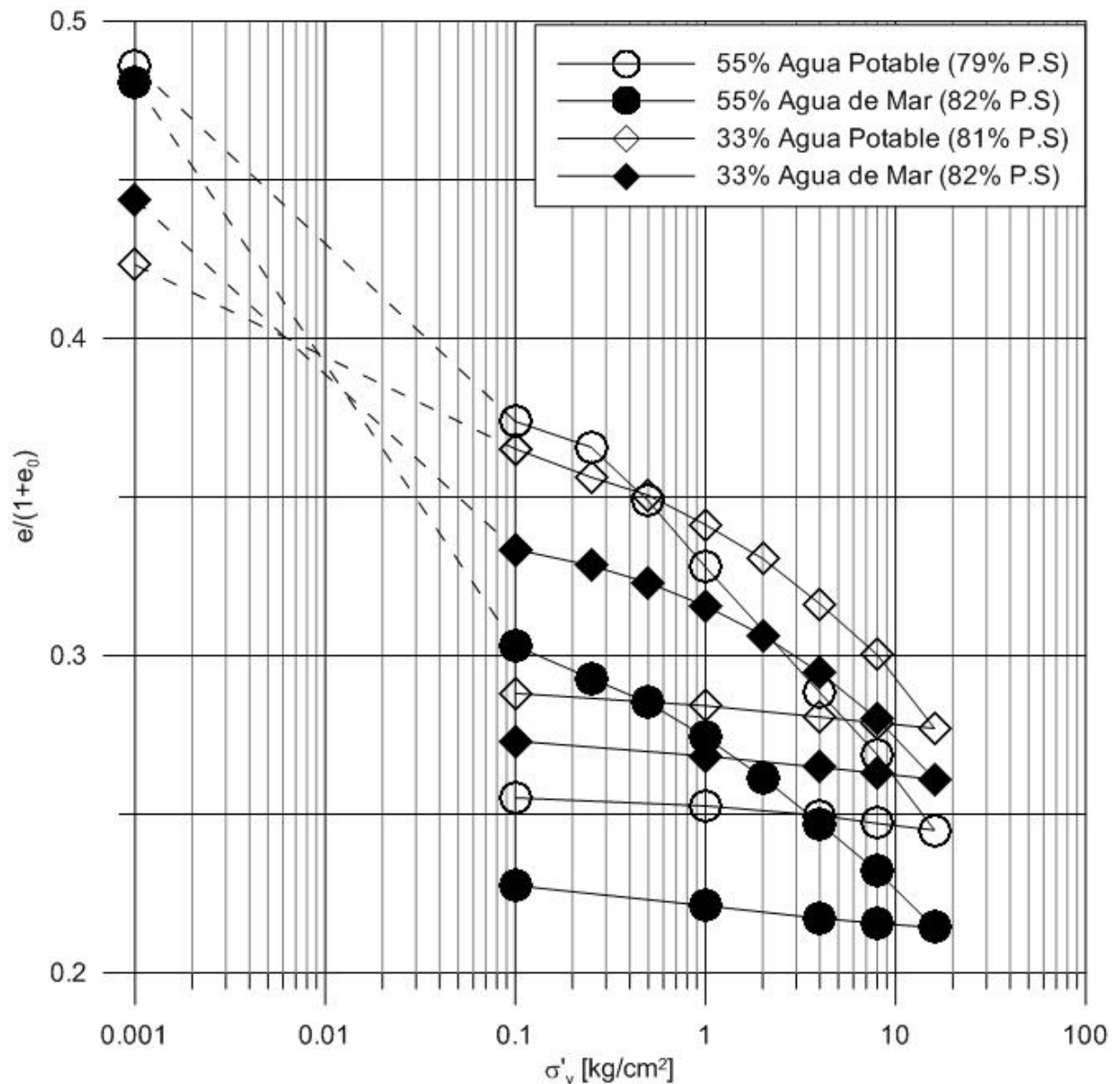


Figura 7.4 Índice de vacíos normalizado por el índice de vacíos inicial, en función de la tensión vertical. El índice de vacíos inicial  $e_0$  corresponde al obtenido del ensayo de sedimentación.

El índice de vacíos inicial utilizado, fue el obtenido a través de los ensayos de sedimentación (7.1), mientras que los restantes se calcularon a partir de la humedad final del ensayo, asumiendo la saturación de la muestra y restando las deformaciones para las distintas cargas.

Las probetas, al ser confeccionadas en forma de pasta, debiese encontrarse que la presión de preconsolidación es 0, sin embargo se ha encontrado que existe un cambio de pendiente en los resultados obtenidos, especialmente para el caso de las muestras con un 33% de finos. Esto no se tomó en cuenta para el cálculo, pues se debe a problemas experimentales. Se consideró que no existe una carga de preconsolidación.

Se presentan diferencias en los índices de vacíos iniciales y finales de los ensayos, esto se debe a que la densidad es distinta al inicio de cada ensayo. Las probetas al ser confeccionadas en forma de pastas son muy susceptibles a las vibraciones provocadas durante la confección, por lo que éstas sufren una densificación. La diferencia para los índices de vacíos entre los

ensayos realizados con agua potable y los realizados con agua de mar, se ve disminuida al finalizar los ensayos, esto probablemente se debe a un efecto de rotura de partículas a un alto nivel de presiones, sin importar el índice de vacíos inicial, las curvas de consolidación comienzan a acoplarse. Aunque este efecto no se logra observar completamente en los ensayos, si se observa una tendencia hacia ello.

Además se obtuvo el índice de compresibilidad  $C_c$  y  $C_r$  en descarga realizando una regresión logarítmica sobre los puntos obtenidos. En la tabla 7.2 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 7.2 Índice de Compresibilidad  $C_c$ ,  $C_r$  en descarga y Presión de Preconsolidación.

Muestra	$C_c$	$C_r$
55% Agua Potable	0.048	0.004
55% Agua de Mar	0.050	0.002
33% Agua Potable	0.025	0.001
33% Agua de Mar	0.032	0.002

Se obtuvo además el coeficiente de consolidación  $C_v$  y el coeficiente de cambio volumétrico  $m_v$  para cada una de las cargas aplicadas (en la rama de carga) en cada una de las muestras.

En la figura 7.5 se presenta el gráfico carga en función de la deformación axial, cuya pendiente es el coeficiente de cambio volumétrico  $m_v$ .

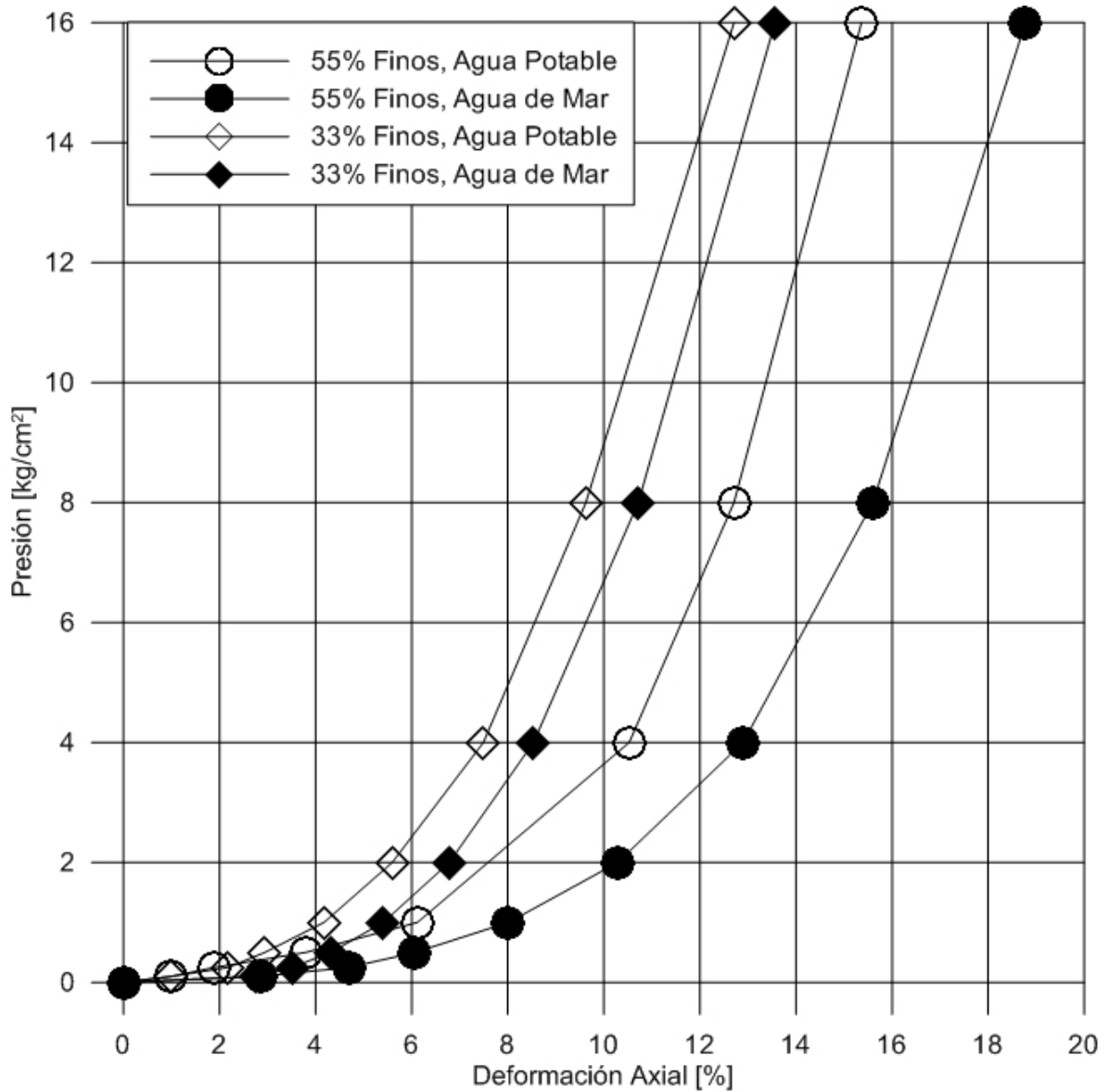


Figura 7.5 Presión vertical en función de la deformación, la pendiente de esta curva corresponde al valor de  $m_v$ .

En la figura 7.5 se presenta que las muestras con un mayor contenido de finos, presentan una mayor deformación para el mismo nivel de carga.

En la figura se observa que la pendiente cambia a medida que aumenta la deformación, por lo que se calculó la pendiente para cada uno de los puntos necesarios.

Finalmente utilizando la ecuación 5.7 se obtiene la permeabilidad asociada para cada uno de los índice de vacíos obtenidos durante el ensayo edométrico.

En la tabla 7.3 se presenta un resumen con los coeficientes calculados para cada una de las muestras.

Tabla 7.3 Resumen resultados consolidación muestra 55% de Finos. Muestra ensayada con agua potable.

55% Finos/ Agua Potable						
$C_r$ [cm <sup>2</sup> /kg]	0.004		$C_c$ [cm <sup>2</sup> /kg]	0.048	$h_i$ [cm]	2.109
$\sigma_v$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$h$ [cm]	$\epsilon$	$e$	$C_v$ [cm <sup>2</sup> /min]	$m_v$ [cm <sup>2</sup> /kg]	$k$ [cm/seg]
0.00	0.00	0.00	0.95	-	-	-
0.10	0.02	0.01	0.73	0.104	0.1006	1.7E-04
0.25	0.04	0.02	0.71	0.057	0.0601	5.7E-05
0.50	0.08	0.04	0.68	0.036	0.0759	4.5E-05
1.00	0.13	0.06	0.64	0.024	0.0465	1.8E-05
4.00	0.22	0.11	0.56	0.022	0.0147	5.4E-06
8.00	0.27	0.13	0.52	0.015	0.0055	1.4E-06
16.00	0.32	0.15	0.48	0.014	0.0033	7.9E-07
8.00	0.32	0.15	0.48			
4.00	0.31	0.15	0.49			
1.00	0.31	0.15	0.49			
0.10	0.30	0.14	0.50			
0.00	0.27	0.13	0.52			

Tabla 7.4 Resumen resultados consolidación muestra 55% de Finos. Muestra ensayada con agua de mar.

55% Finos/ Agua de Mar						
$C_r$ [cm <sup>2</sup> /kg]	0.002		$C_c$ [cm <sup>2</sup> /kg]	0.050	$h_i$ [cm]	3.17
$\sigma_v$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$h$ [cm]	$\epsilon$	$e$	$C_v$ [cm <sup>2</sup> /min]	$m_v$ [cm <sup>2</sup> /kg]	$k$ [cm/seg]
0.00	0.00	0.00	0.93	-	-	-
0.10	0.06	0.03	0.58	0.084	0.2874	4.0E-04
0.25	0.10	0.05	0.56	0.067	0.1233	1.4E-04
0.50	0.13	0.06	0.55	0.055	0.0550	5.0E-05
1.00	0.17	0.08	0.53	0.039	0.0389	2.6E-05
2.00	0.22	0.10	0.50	0.029	0.0228	1.1E-05
4.00	0.27	0.13	0.48	0.025	0.0130	5.5E-06
8.00	0.33	0.16	0.45	0.017	0.0068	2.0E-06
16.00	0.40	0.19	0.41	0.02	0.0040	1.1E-06
8.00	0.39	0.19	0.42			
4.00	0.39	0.18	0.42			
1.00	0.37	0.18	0.43			
0.10	0.35	0.16	0.44			
0.00	0.33		0.45			

Tabla 7.5 Resumen resultados consolidación muestra 33% de Finos. Muestra ensayada con agua potable.

33% Finos/ Agua Potable						
$C_r$ [cm <sup>2</sup> /kg]	0.001		$C_c$ [cm <sup>2</sup> /kg]	0.025	$h_i$ [cm]	2.662
$\sigma_v$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$h$ [cm]	$\epsilon$	$e$	$C_v$ [cm <sup>2</sup> /min]	$m_v$ [cm <sup>2</sup> /kg]	$k$ [cm/seg]
0.00	0.00	0.00	0.73	-	-	-
0.10	0.02	0.01	0.63	0.166	0.1006	2.78E-04
0.25	0.05	0.02	0.62	0.120	0.0790	1.57E-04
0.50	0.06	0.03	0.61	0.040	0.0303	2.03E-05
1.00	0.09	0.04	0.59	0.034	0.0247	1.38E-05
2.00	0.12	0.06	0.57	0.028	0.0142	6.72E-06
4.00	0.16	0.07	0.55	0.021	0.0095	3.34E-06
8.00	0.20	0.10	0.52	0.020	0.0053	1.81E-06
16.00	0.27	0.13	0.48	0.02	0.0039	9.9E-07
8.00	0.26	0.12	0.48			
4.00	0.26	0.12	0.49			
1.00	0.25	0.12	0.49			
0.10	0.24	0.11	0.50			
0.00	0.23		0.50			

Tabla 7.6 Resumen resultados consolidación muestra 33% de Finos. Muestra ensayada con agua de mar.

33%Finos/ Agua de Mar						
$C_r$ [cm <sup>2</sup> /kg]	0.002		$C_c$ [cm <sup>2</sup> /kg]	0.032	$h_i$ [cm]	2.857
$\sigma_v$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$h$ [cm]	$\epsilon$	$e$	$C_v$ [cm <sup>2</sup> /min]	$m_v$ [cm <sup>2</sup> /kg]	$k$ [cm/seg]
0.00	0.00	0.00	0.80	-	-	-
0.10	0.06	0.03	0.60	0.188	0.2778	8.72E-04
0.25	0.07	0.04	0.59	0.103	0.0506	8.70E-05
0.50	0.09	0.04	0.58	0.045	0.0322	2.44E-05
1.00	0.11	0.05	0.57	0.033	0.0218	1.19E-05
2.00	0.14	0.07	0.55	0.025	0.0138	5.65E-06
4.00	0.18	0.09	0.53	0.019	0.0088	2.78E-06
8.00	0.23	0.11	0.50	0.018	0.0055	1.67E-06
16.00	0.29	0.14	0.47	0.01	0.0036	8.50E-07
8.00	0.28	0.13	0.47			
4.00	0.27	0.13	0.48			
1.00	0.26	0.12	0.48			
0.10	0.25	0.12	0.49			
0.00	0.23		0.50			

Los valores obtenidos de las permeabilidades fueron graficados en función del índice de vacíos, en las figuras 7.6 y 7.7, se presentan separadamente las muestras con un 33% de finos y aquellas con un 55% de finos.

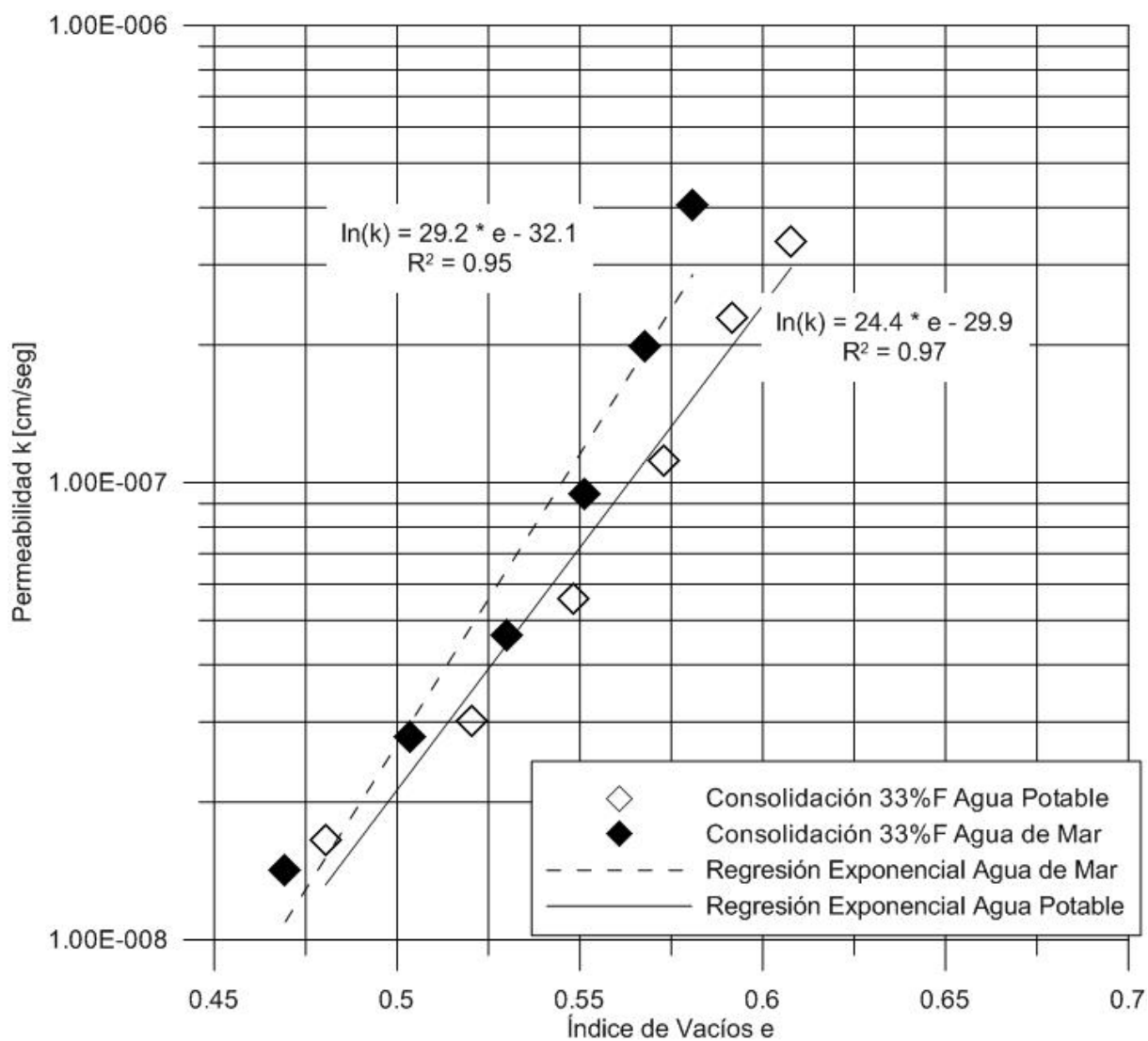


Figura 7.6 Variación del coeficiente de permeabilidad en función del índice de vacíos, para muestras con un 33% de finos.

Los resultados obtenidos para las muestras con un 55% de finos se presentan en la figura 7.6.

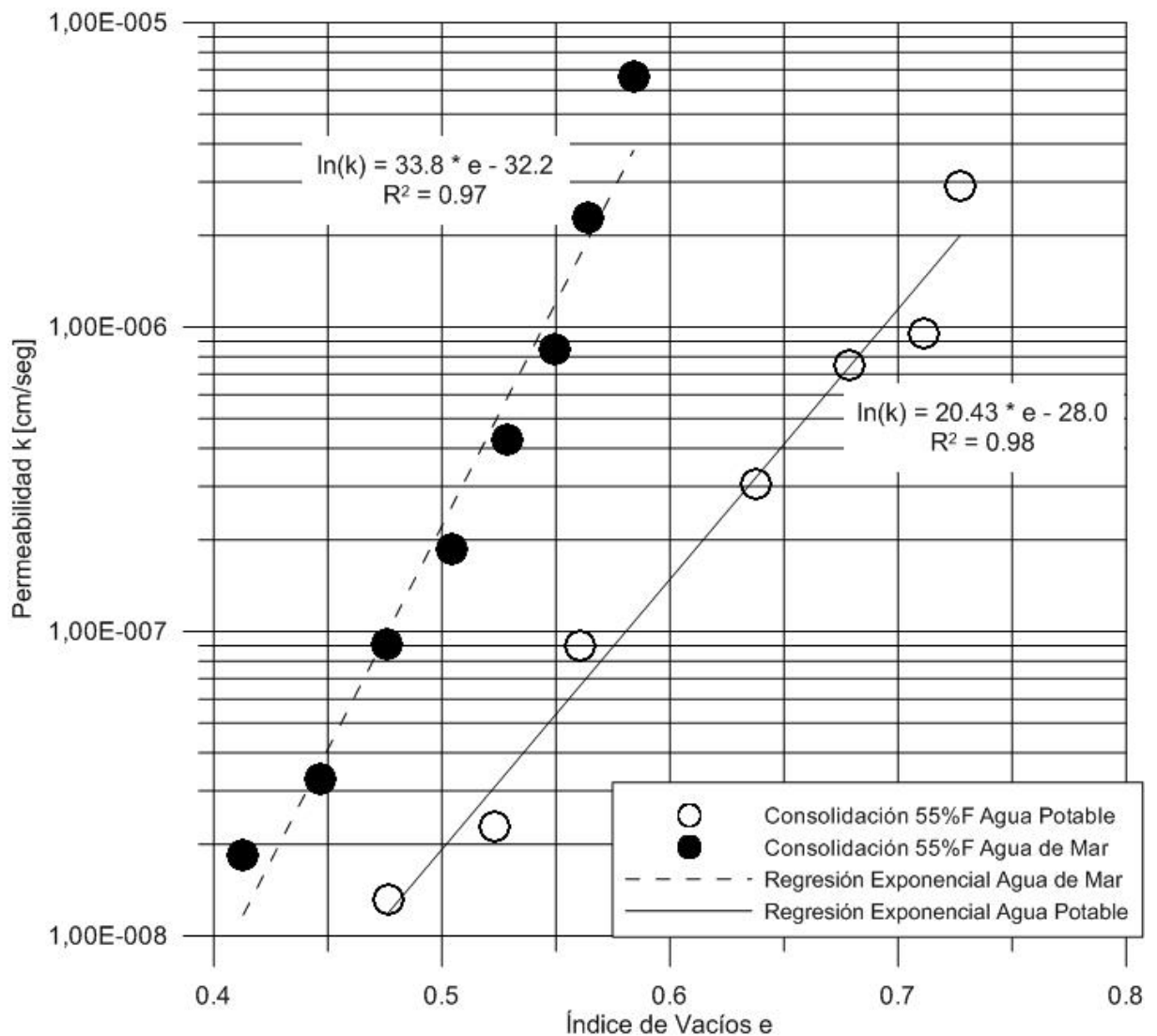


Figura 7.7 Variación del coeficiente de permeabilidad en función del índice de vacíos, para muestras con un 55% de finos.

Para las muestras con un 33% de finos, se observa una pequeña diferencia entre los ensayos realizados con agua potable y con agua de mar, mientras que para el caso de las muestras con un 55% de finos, esta diferencia alcanza un orden de magnitud para el mismo valor de índice de vacíos. En ambos casos se logra un muy buen ajuste de la curva que relaciona el coeficiente de permeabilidad con el índice de vacíos.

### 7.3 ENSAYOS DE PERMEABILIDAD

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de permeabilidad en pared flexible. Se realizaron varios ensayos de prueba, con distintas formas de confeccionar las probetas, finalmente se realizaron las probetas en forma de slurry, realizando cuatro ensayos. Los ensayos no utilizados para el desarrollo de esta memoria se presentan en el anexo B.

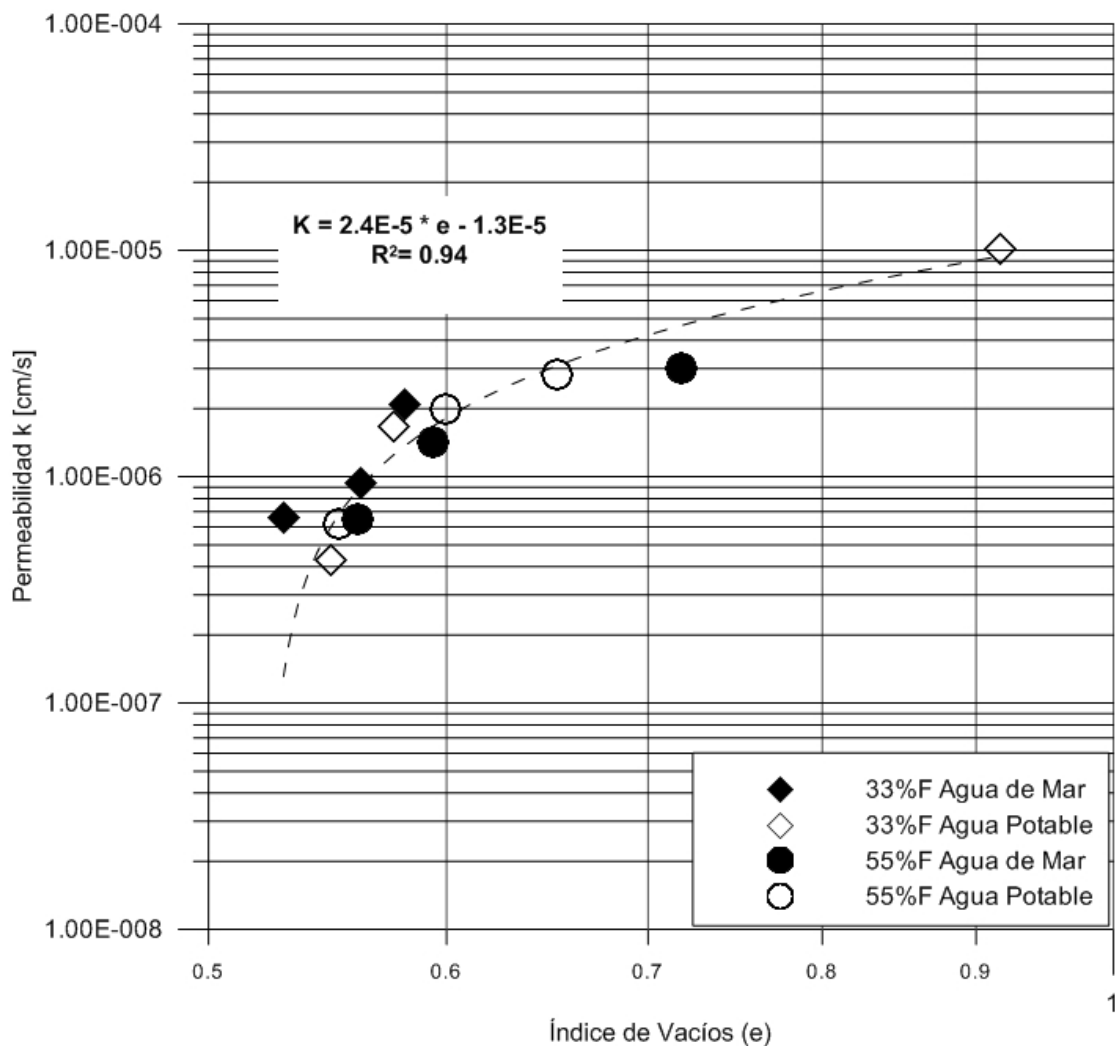


Figura 7.8 Variación de la permeabilidad en función del índice de vacíos, para muestras tratadas con agua potable y con agua de mar.

En este caso se observa que no existe una diferencia entre los resultados de permeabilidad efectuados con ambos fluidos, e incluso se observa una muy ligera diferencia para las muestras con diferente contenido de finos. Esto se condice con los resultados obtenidos por Hazen 1892 y Kenney 1984 (López, 2012), donde se determina que el coeficiente de permeabilidad depende del tamaño de las partículas más pequeñas, y en este caso, al ser el mismo suelo, con granulometrías reconstituidas, se obtienen valores similares de permeabilidad para el  $D_{10}$  y el  $D_5$ .



## 7.4 SALES SOLUBLES TOTALES

Al finalizar los ensayos de permeabilidad, se le efectuó un ensayo a cada una de las muestras ensayadas, para medir el porcentaje de sales solubles totales presentes. Esto con el fin de poder determinar si existe un aumento en el porcentaje de sales solubles totales (SST), que podría eventualmente colmatar las muestras y disminuir la permeabilidad de estas.

Además se efectuó un ensayo a una muestra con 33% de finos, como muestra de control, la cual fue preparada para un ensayo de pared flexible, pero la cual no fue ensayada por problemas de montaje, esto para evaluar un aumento en el porcentaje de sales solubles en función del tiempo en que el agua de mar circula por la muestra.

Finalmente se le realizó un ensayo similar a una muestra de agua de mar, donde sólo se filtró y luego fue llevada al horno, para determinar el porcentaje de sales contenido en el agua.

En la tabla 7.7 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 7.7 Resultados Ensayos Sales Solubles Totales, muestras post ensayos en permeámetro de pared flexible.

Muestra	S.S.T. [%]
55% Finos	1.59%
33% Finos	1.11%
33% Finos no Ensayada	1.00%
Agua de Mar	4.66%

## 8 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 8.1 VARIACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD OBTENIDOS

En los coeficientes de permeabilidad obtenidos con los ensayos en permeámetros de pared flexible no se presentan diferencias significativas para los valores obtenidos con los dos tipos de agua a ensayar. Esto implica que no hay un efecto químico a corto plazo, entre las sales y el relave utilizado que modifique la permeabilidad de la muestra. La diferencia encontrada entre los ensayo con diferente contenido de finos para las muestras ensayadas con el permeámetro de pared flexible son despreciables. Se puede determinar una sola curva para los cuatro ensayos realizados por este método. Lo cual es consecuente con la literatura, donde se afirma que la permeabilidad está relacionada, además de la porosidad, con el tamaño de los granos más finos, su gradación.

En general, como ambos relaves son del mismo proceso minero, tienen similares características, en ambos casos se tiene un suelo poco uniforme y poseen la misma mineralogía por lo que es consistente que los resultados para ambos contenidos de finos sean similares.

Para los resultados obtenidos a través del ensayo de consolidación, se observan diferencias de hasta un orden de magnitud para las muestras ensayadas con un 55% de finos, mientras que para las muestras ensayadas con un 33% de finos no se encuentran diferencias.

Los resultados de permeabilidad obtenidos del ensayo de consolidación son medidas indirectas, que provienen del cálculo de  $C_v$  y  $m_v$ . El coeficiente de consolidación ( $C_v$ ) al depender de  $t_{90}$ , es un parámetro con un error de estimación importante asociado, por lo que grandes variaciones en la permeabilidad pueden atribuirse a cambios en las estimaciones de  $C_v$ . Es importante mencionar que una de las suposiciones del ensayo de consolidación, es el 100% de disipación de presión de poros, lo cual podría no haberse alcanzado en los ensayos, implicando una medición incorrecta de la deformación y en consecuencia de la permeabilidad. Finalmente, el ensayo edométrico es de pared rígida, por lo que existe una alta probabilidad en la formación de vías preferenciales de flujo entre la pared y el relave, aumentando el valor medido del coeficiente de permeabilidad.

Los resultados obtenidos con los ensayos edométricos son bastante mayores que los obtenidos a través del permeámetro de pared flexible, esto es consecuente con lo explicado en el punto anterior, pues el ensayo edométrico es un ensayo menos preciso que el edométrico.

## 8.2 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN OBTENIDOS

El coeficiente de consolidación es bastante similar para cada una de las cargas aplicadas, la mayor diferencia se observa para el ensayo con agua potable con un 55% de contenido de finos. Esto probablemente se debe a que este ensayo inicialmente se encuentra en un estado más suelto que el resto. El resto de los ensayos son bastante similares.

En la figura 8.1 se presenta el gráfico  $C_v$  en función del índice de vacíos, y en la 8.2 se puede el coeficiente de consolidación en función de la presión aplicada.

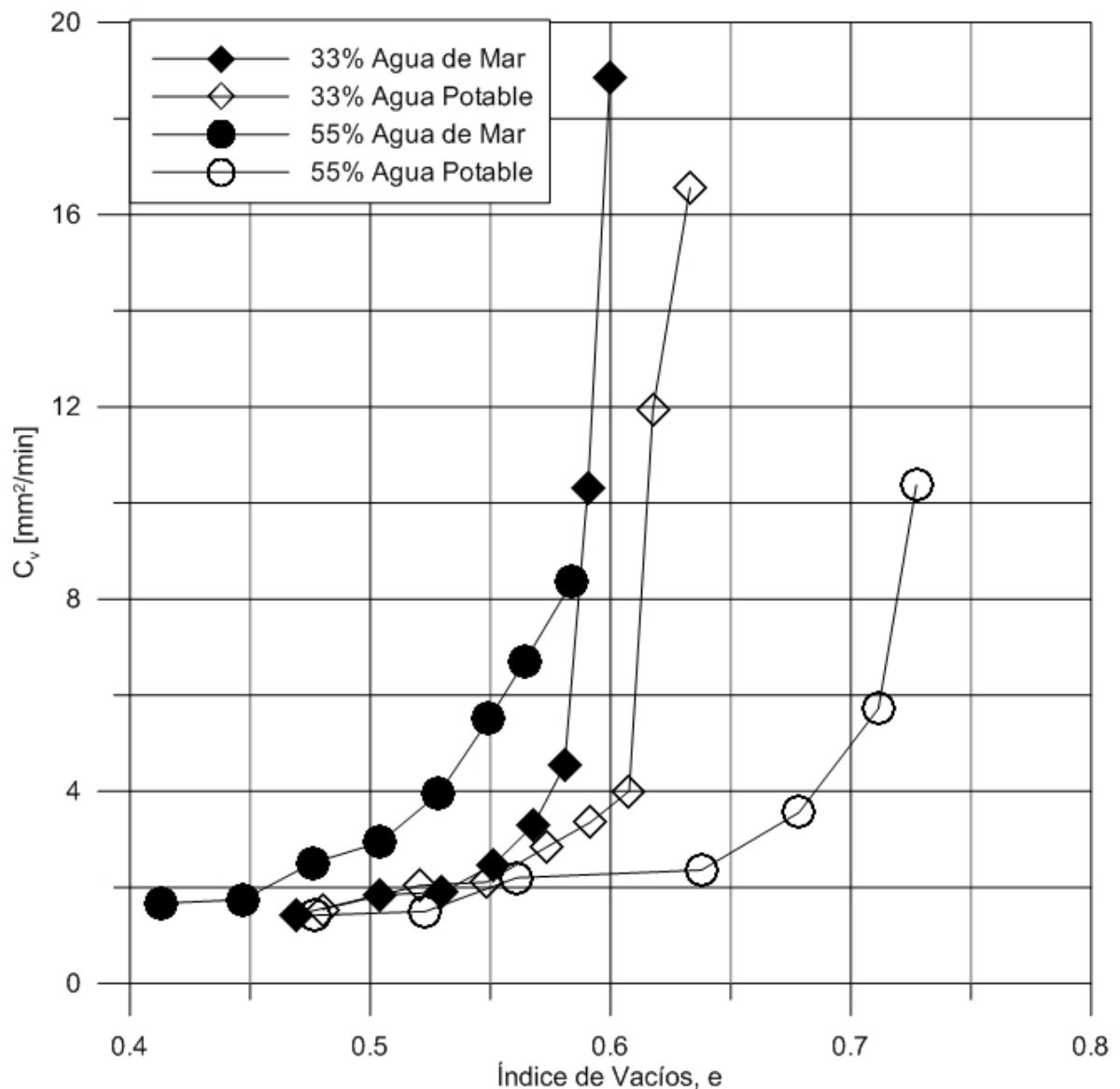


Figura 8.1 Coeficiente de Consolidación en función del índice de vacíos, e.

Para índices de vacíos altos se observa que existe una diferencia en los resultados obtenidos para los diferentes ensayos, esto puede deberse a la elección del  $t_{90}$ , parámetro determinado a partir de un método gráfico, el cual tiene un grado de subjetividad. Un cambio en el  $t_{90}$  afecta directamente el valor de  $C_v$ . Esta diferencia se acrecienta, pues los primeros puntos de las curvas deformación en función de la raíz del tiempo son más empinadas en las primeras cargas, siendo más incierto el cálculo del  $t_{90}$ .

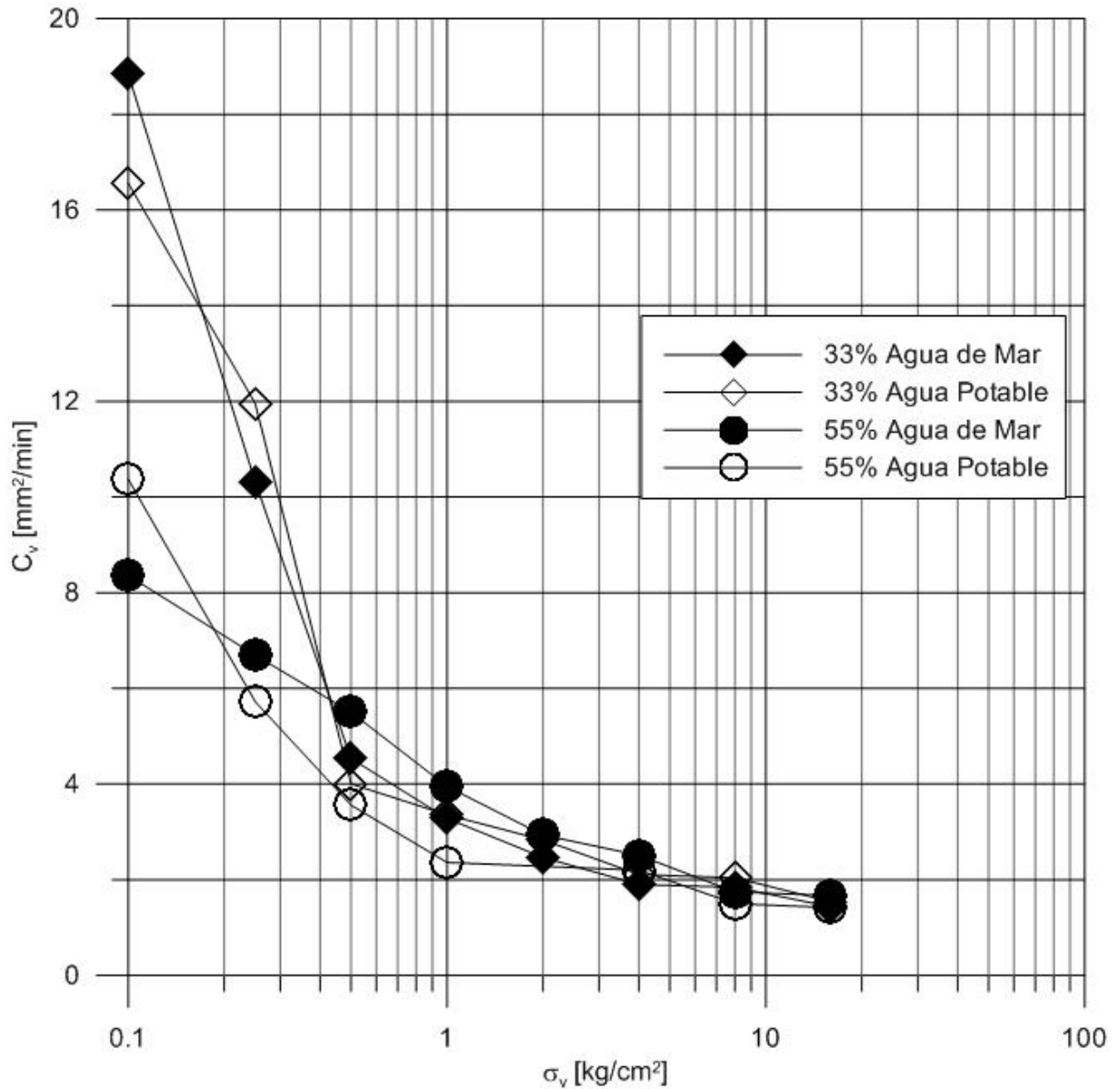


Figura 8.2 Coeficiente de consolidación en función de la presión aplicada.

El módulo de deformación volumétrica presenta para los ensayos con un 33% de contenido de finos un resultado bastante similar, pero para las muestras con un 55% de contenido de finos se presenta una diferencia. Los resultados tienden a igualarse para índices de vacíos menores.

Los resultados se muestran en la figura 8.3.

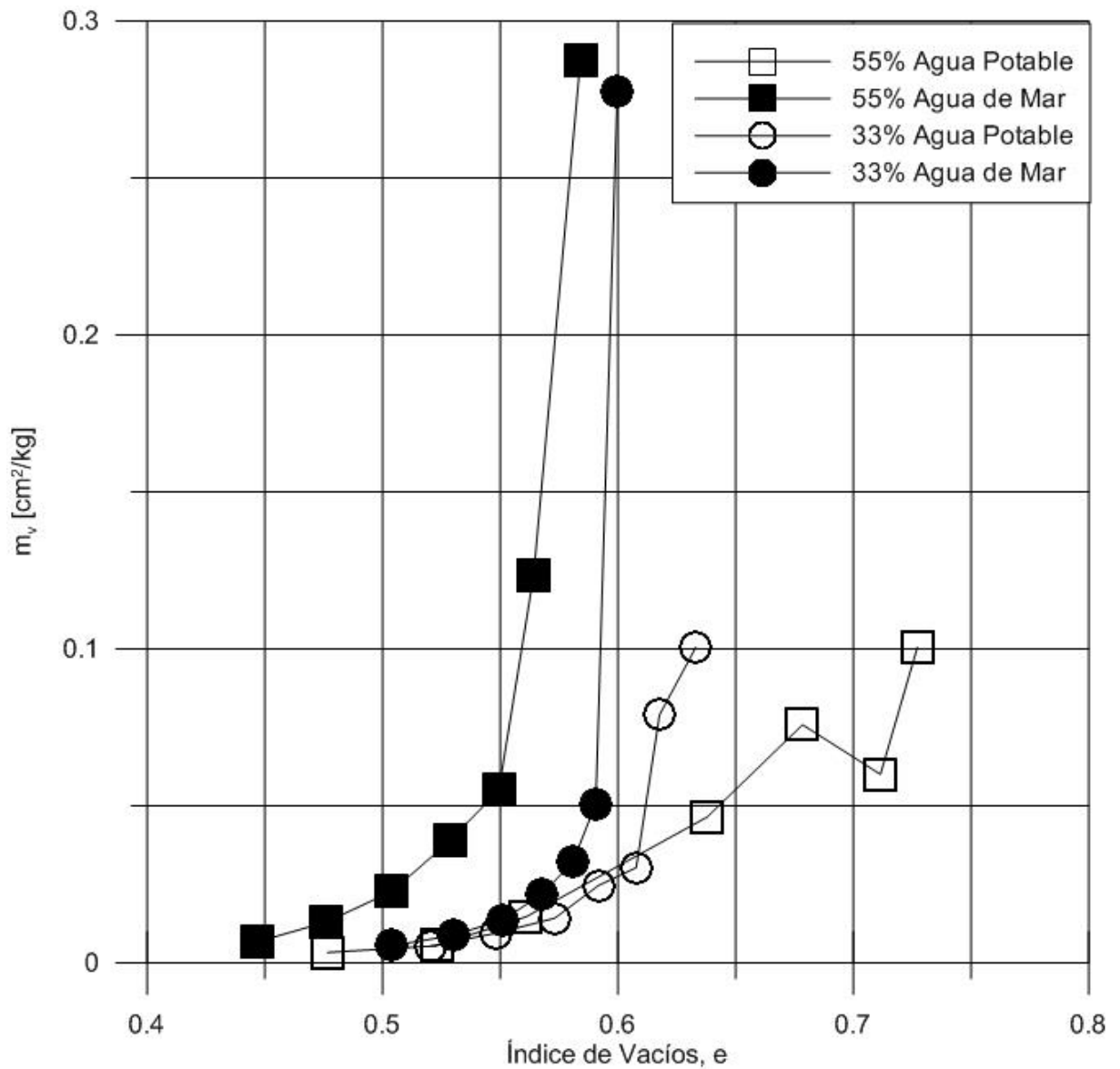


Figura 8.3 Módulo de deformación volumétrica  $m_v$  en función del índice de vacíos.

En la figura 8.3 se presentan diferencias para los índices de vacíos mayores a 0.55, esto puede explicarse que estas mediciones corresponden a los primeros puntos, que se encuentran a diferentes densidades. Estas diferencias disminuyen a medida que se consolidan las muestras a una mayor presión, pues las densidades comienzan a igualarse.

### 8.3 PREDICCIÓN DE COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD

Para comparar los resultados de los ensayos ejecutados se utilizó la fórmula de Kozeny-Carman modificada (Chapuis & Aubertin, 2003) (Ecuación 3.17) y la propuesta por Moulton (Moulton, 1980) (Ecuación 3.18) para predecir los valores de permeabilidad obtenidos, de acuerdo a las curvas granulométricas de las muestras ensayadas. En la figura 8.4 se presenta el gráfico comparativo para todas las muestras, comparando los resultados obtenidos con aquellos estimados a partir del índice de vacíos según algunos autores.

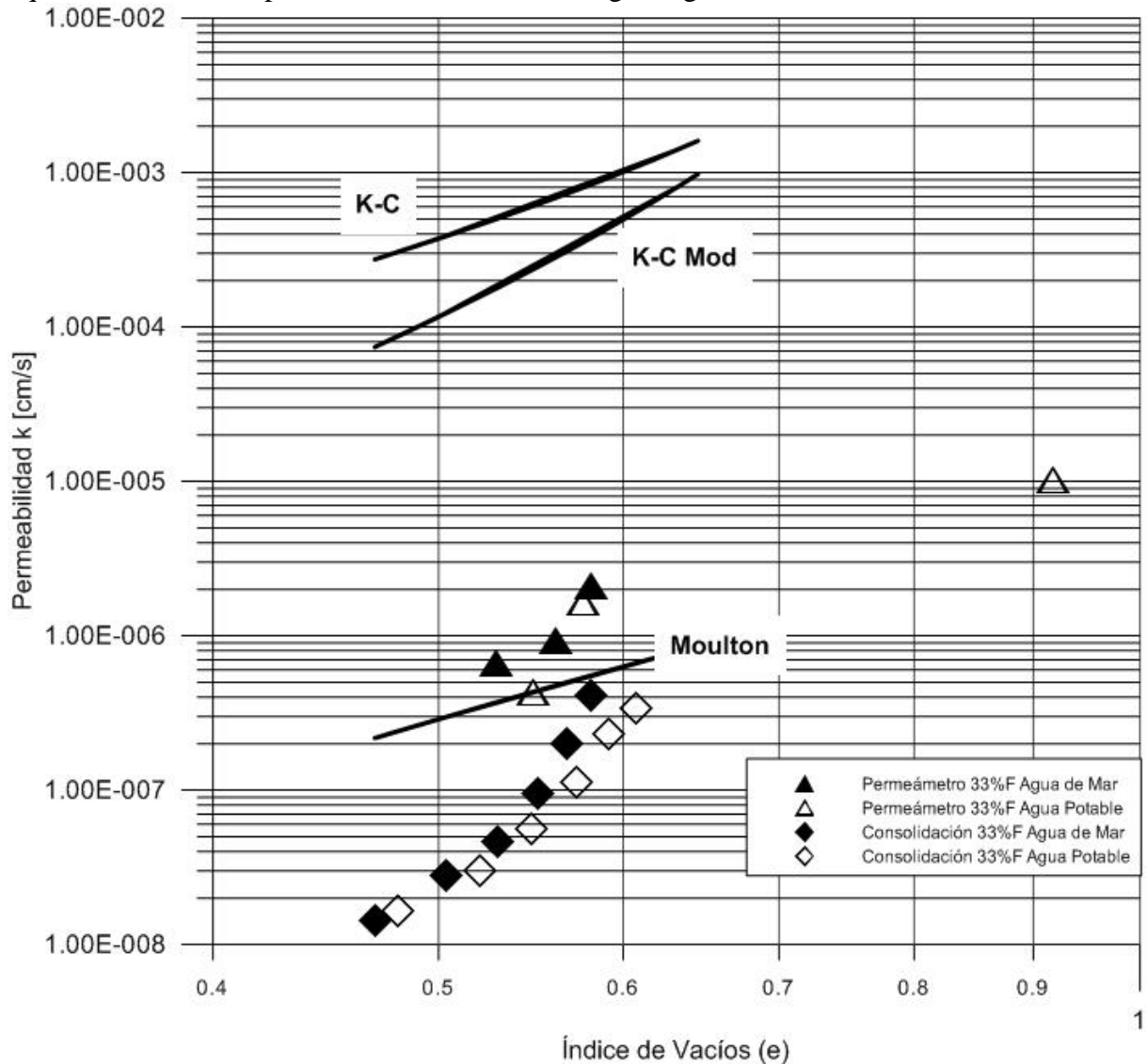


Figura 8.4 Comparación de los resultados obtenidos con los estimados por la ecuación de Kozeny-Carman (Carrier, 2003), la modificación a esta ecuación (Chapuis & Aubertin, 2003) y por la ecuación de Moulton (Moulton, 1980). Para las muestras ensayadas con un 33% de Finos.

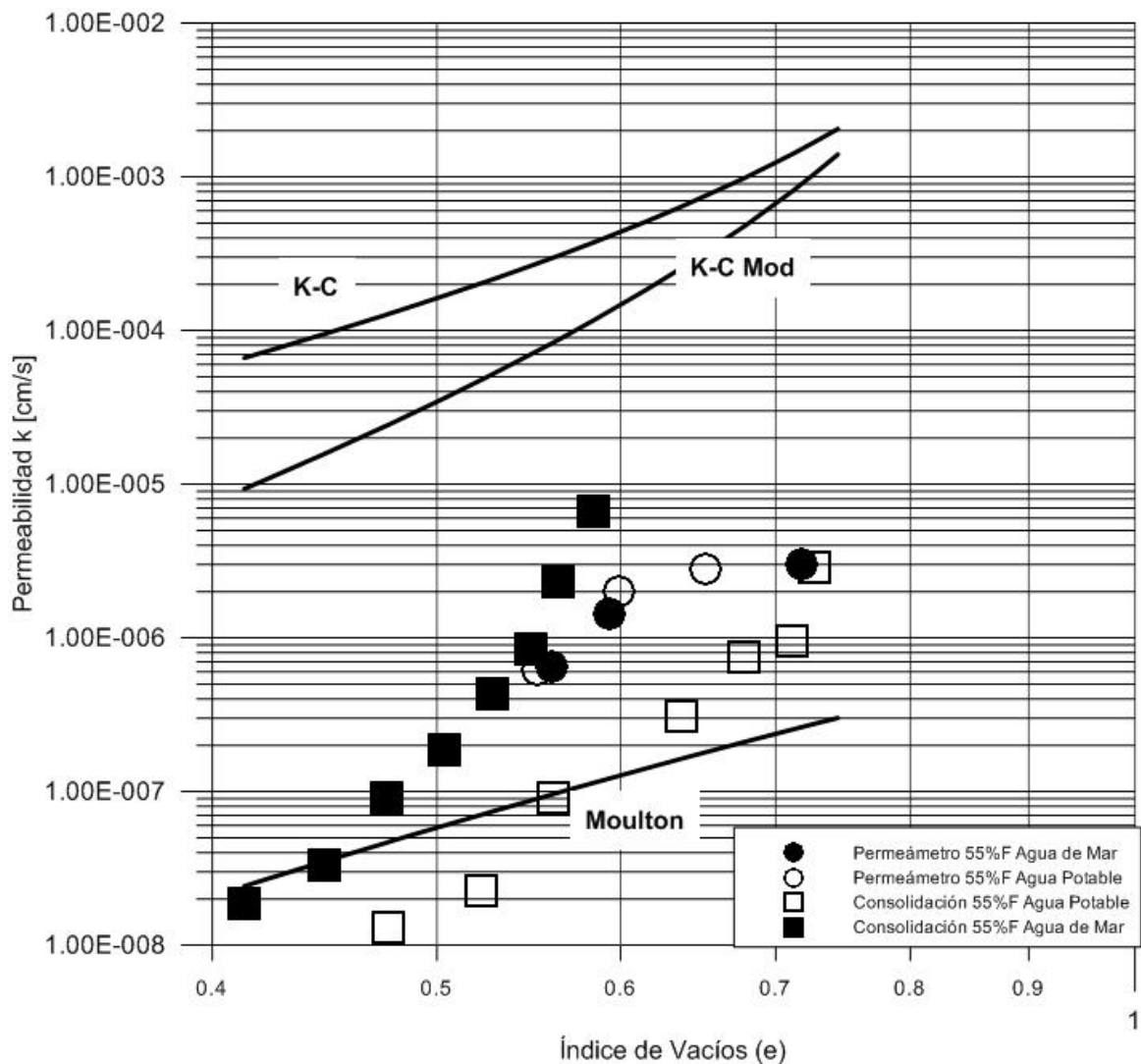


Figura 8.5 Comparación de los resultados obtenidos con los estimados por la ecuación de Kozeny-Carman (Carrier, 2003), la modificación a esta ecuación (Chapuis & Aubertin, 2003) y por la ecuación de Moulton (Moulton, 1980). Para las muestras ensayadas con un 55% de Finos.

Se observa en la figura 8.5 que los resultados obtenidos son bastante menores que los estimados con la ecuación de Kozeny-Carman, e incluso la modificación realizada por Chapuis y Aubertin (Chapuis & Aubertin, 2003) para estimar la permeabilidad en relaves se aleja de los resultados. Según Chapuis & Aubertin (2003), la estimación de la permeabilidad con fórmulas empíricas puede estar entre 1/3 a 3 veces el valor real. En este contexto, la ecuación de Moulton cumple con este criterio, aunque fue desarrollada para otros materiales.

La diferencia con respecto a los resultados obtenidos por Kozeny-Carman, o por la ecuación de Kozeny-Carman modificada pueden deberse al tipo de confección de las probetas de ensayo (*slurry*). Además durante el desarrollo de la memoria se realizaron ensayos sobre muestras confeccionadas con el método *wet tamping*, obteniendo valores de permeabilidad más altos que los obtenidos con las muestras confeccionadas en *slurry*, los que fueron desechados por la formación de glomérulos en la confección, cuya influencia continuaría después de la saturación.

Los resultados obtenidos a través de los distintos tipos de ensayos son bastante diferentes, aunque en los resultados reportados en la literatura esta diferencia también se presenta. Los resultados obtenidos del ensayo de consolidación se calcularon de manera indirecta, por lo

que al estimar parámetros como el módulo de deformación volumétrica  $m_v$ , o calcular el coeficiente de consolidación  $C_v$ , se pueden sumar diferentes errores. Considerando que los criterios de montaje, lectura y cálculo son los mismos (incluidos los errores), no se observan grandes diferencias en los resultados obtenidos con agua de mar en comparación a los obtenidos con agua potable para el mismo tipo de ensayo.

Se observan diferencias menores en los resultados obtenidos para las muestras con un diferente contenido de finos, esto se contradice con lo expuesto por Hazen que indica que la permeabilidad queda determinada por la fracción más pequeña de la granulometría. Este fenómeno no se observa para los resultados obtenidos con los ensayos realizados en el permeámetro de pared flexible, donde no hay diferencias prácticas entre muestras ensayadas con 33% de Finos y 55% de Finos.

#### 8.4 COMPARACIÓN PARÁMETROS DE CONSOLIDACIÓN CON LA LITERATURA.

Para evaluar la consistencia de los parámetros de consolidación, se tomó como referencia la estimación de Biarez & Hicher (1994), quien presenta correlaciones para estimar  $C_c$  en función del límite líquido e índice de vacíos. En la figura 8.6 se han superpuesto los resultados de los ensayos de consolidación obtenidos en este trabajo, con el gráfico propuesto por Biarez & Hicher (1994).

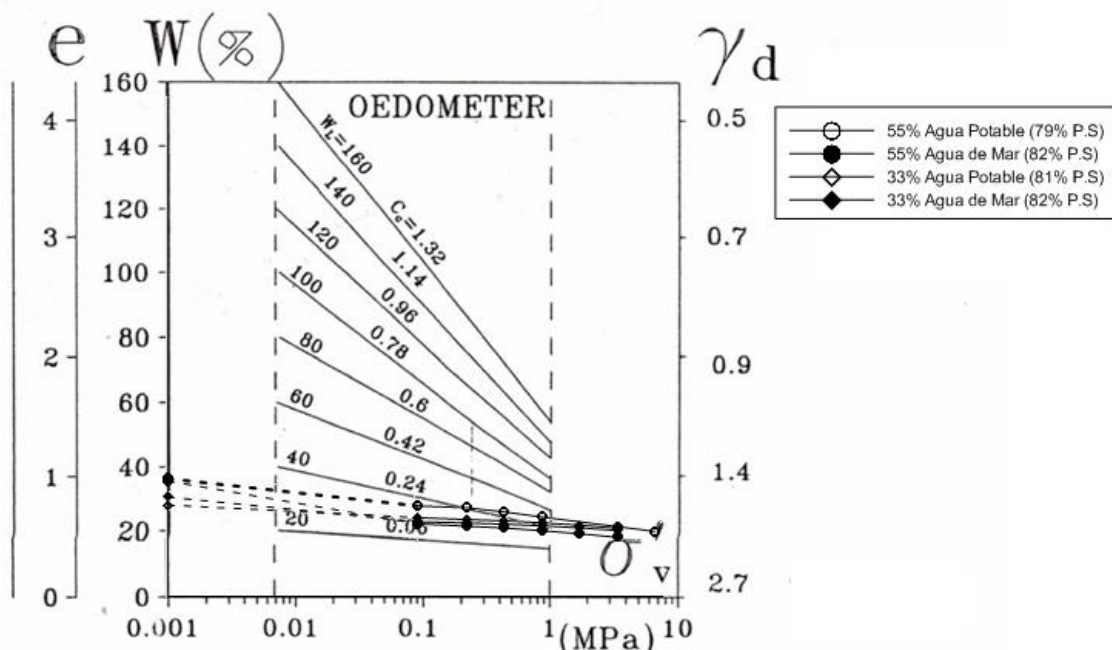


Figura 8.6 Valores de  $C_c$  en función del límite líquido de la muestra. (Biarez & Hicher, 1994.)

Los resultados de límite líquido para el relave ensayado corresponde a valores cercanos al 20% y se obtuvo un índice de compresibilidad entre 0.03 y 0.05, valores que se encuentran un poco por debajo de los valores presentados en la figura 8.6 y en la tabla 3.2.

El  $C_v$  obtenido varía entre 2 y 10  $\text{mm}^2/\text{min}$  o  $3.3 \times 10^{-4}$  y  $1.6 \times 10^{-3}$   $\text{cm}^2/\text{seg}$ , valores similares a los reportados en la literatura técnica, según lo mostrado en la tabla 3.2.



## 8.5 AUMENTO EN EL PORCENTAJE DE SALES SOLUBLES TOTALES

Al finalizar los ensayos de permeabilidad en el permeámetro de pared flexible, las muestras fueron secadas al horno para determinar su humedad, luego se realizó a las muestras ensayadas con agua de mar la determinación de sales solubles totales. Los resultados de estos ensayos fueron presentados en la sección 7.4.

Con la humedad en las muestras de relave y el porcentaje de sales solubles presente en el agua de mar, se puede determinar si hubo un aumento en el porcentaje de sales durante el ensayo, el cuál puede provocar la colmatación de los canales de flujo por cristalización de sales en el largo plazo.

Tabla 8.1 Comparación del porcentaje de sales solubles totales (SST) medido en la muestra y el estimado a partir de la humedad residual.

	%SST [%]	Humedad Residual [%]	%SST*
55% Finos Agua de Mar	1.59	20	0.92
33% Finos Agua de Mar	1.11	19	0.88

El %SST\* corresponde al que debiese existir sin un aumento del contenido de sal de la muestra. Este fue calculado determinando el porcentaje de sales solubles presentes en el agua de mar utilizada y luego multiplicando este valor por la humedad residual de cada muestra.

Se observa que existe un aumento en las sales presentes en la muestra luego del ensayo de permeabilidad, esto puede indicar que una muestra expuesta un tiempo suficientemente largo a un flujo de agua de mar, puede aumentar su salinidad y eventualmente llegar a la saturación del agua con sales, provocando la precipitación de estas y colmatar las líneas de flujo.

## 8.6 RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS

En las tablas 8.2 y 8.3 se presenta un resumen con los parámetros más relevantes deducidos de este trabajo.

Tabla 8.2 Resumen parámetros obtenidos muestras 33% de Finos.

Muestra	Límite Líquido	Índice de Plasticidad	Índice de Vacíos	$C_v$ [cm <sup>2</sup> /seg]	$m_v$	K-Edómetro	K-Permeámetro
55% de Finos Agua Potable	18.8%	4%	0.95	-	0.10	-	-
			0.73	1.7E-03	0.06	1.0E-04	-
			0.71	9.5E-04	0.08	7.2E-05	-
			0.68	5.9E-04	0.05	2.8E-05	-
			0.64	3.9E-04	0.01	5.8E-06	-
			0.56	3.7E-04	0.01	2.0E-06	-
			0.52	2.5E-04	0.00	8.3E-07	-
			0.48	2.4E-04	0.00	7.0E-08	-
			0.65	-	-	-	2.8E-06
			0.60	-	-	-	2.0E-06
			0.55	-	-	-	6.2E-07
55% de Finos Agua de Mar	17.8%	2%	0.93	-	0.29	-	-
			0.58	1.4E-03	0.12	2.9E-06	-
			0.56	1.1E-03	0.06	1.0E-06	-
			0.55	9.2E-04	0.04	6.0E-07	-
			0.53	6.6E-04	0.02	2.5E-07	-
			0.50	4.9E-04	0.01	1.1E-07	-
			0.48	4.2E-04	0.01	4.7E-08	-
			0.45	2.9E-04	0.00	1.9E-08	-
			0.41	0.00	0.00	1.4E-09	-
			0.72	-	-	-	3.0E-06
			0.59	-	-	-	1.4E-06
0.56	-	-	-	6.5E-07			

Tabla 8.3 Resumen parámetros obtenidos muestras 33% de Finos.

Muestra	Límite Líquido	Índice de Plasticidad	Índice de Vacíos	$C_v$ [cm <sup>2</sup> /seg]	$m_v$	K-Edómetro	K-Permeámetro
33% de Finos Agua Potable	N.P.	N.P.	0.73	-	0.10	-	-
			0.63	2.8E-03	0.08	3.6E-06	-
			0.62	2.0E-03	0.03	1.0E-06	-
			0.61	6.7E-04	0.02	2.7E-07	-
			0.59	5.6E-04	0.01	1.3E-07	-
			0.57	4.7E-04	0.01	7.5E-08	-
			0.55	3.5E-04	0.01	3.1E-08	-
			0.52	3.4E-04	0.00	2.2E-08	-
			0.48	0.00	0.00	1.3E-09	-
			0.92	-	-	-	1.0E-05
			0.58	-	-	-	1.7E-06
			0.55	-	-	-	4.3E-07
			33% de Finos Agua de Mar	N.P.	N.P.	0.80	-
0.60	3.1E-03	0.05				2.7E-06	-
0.59	1.7E-03	0.03				9.2E-07	-
0.58	7.6E-04	0.02				2.8E-07	-
0.57	5.5E-04	0.01				1.3E-07	-
0.55	4.1E-04	0.01				6.0E-08	-
0.53	3.2E-04	0.01				2.9E-08	-
0.50	3.1E-04	0.00				1.8E-08	-
0.47	0.00	0.00				1.48E-09	-
0.58	-	-				-	2.1E-06
0.56	-	-				-	9.3E-07
0.53	-	-				-	6.6E-07

## 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 9.1 CONCLUSIONES

En el objetivo general de este trabajo de título se planteó determinar el coeficiente de permeabilidad, el coeficiente de consolidación y los índices de compresibilidad para relaves tratados con agua de mar y comparar su resultado con relaves tratados con agua potable.

Para obtener los parámetros requeridos se realizaron ensayos de permeabilidad en un permeámetro de pared flexible con carga variable y ensayos edométricos.

Se observó que los resultados obtenidos con el permeámetro de pared flexible no presentan diferencias significativas para aquellas muestras ensayadas con agua de mar o con agua potable, incluso con un amplio rango de contenido de finos (33% a 55%).

Se observa que las muestras del ensayo edométrico con un 55% de finos y con agua de mar presentan una permeabilidad de hasta un orden de magnitud menor, mientras que las muestras con un 33% de finos no presentan diferencias significativas en el coeficiente de permeabilidad determinado. Estas diferencias podrían explicarse por un aumento en la concentración de sales del fluido del ensayo debido a la evaporación y a la corrosión de la celda de cobre por las sales presentes en el agua.

Los valores de coeficiente de permeabilidad obtenidos del ensayo edométrico son mediciones indirectas, dependiente del  $C_v$ , cuyo valor es muy variable y casi subjetivo al ser calculado con el  $t_{90}$ . Además este ensayo al ser de pared rígida es menos preciso que el ensayo con permeámetro de pared flexible, pues es altamente probable la formación de vías preferenciales entre el relave y la pared del edómetro.

Es importante señalar que medir  $k$  es muy complejo y se debe tener presente que no siempre el parámetro obtenido es el correcto, en efecto la literatura reporta que se puede encontrar variaciones entre un 68% y un 90% (Duncan, 2000). Estas dificultades se deben principalmente a las condiciones de las muestras y a las condiciones del ensayo. En el caso de esta memoria las probetas fueron confeccionadas en forma de *slurry*, esto puede provocar una segregación de las partículas, lo que podría afectar la correcta medición de la permeabilidad. En ambos tipos de ensayos realizados no se pudo comprobar efectivamente la saturación de la probeta, en este caso cualquier burbuja de aire en la probeta, o en el sistema hidráulico del permeámetro de pared flexible, induce una disminución en el coeficiente de permeabilidad medido.

En cuanto al coeficiente de consolidación, se observa que no existen diferencias significativas ni concluyentes en comparación a las muestras obtenidas con ambos tipos de agua para las muestras ensayadas con un 33% de finos, mientras que para las muestras ensayadas con un

55% de finos se encuentra una diferencia en los estados más sueltos del relave, diferencia que desaparece a medida que este se consolida.

En lo referente al índice de compresibilidad  $C_c$ , se observa nuevamente que para las muestras con un 33% de contenido de finos es bastante similar, pero para el caso de las muestras con un 55% de finos se observa que la muestra ensayada con agua de mar tiene un  $C_c$  un 65% menor.

Al comparar los resultados con los reportados en la literatura, se obtiene que los valores de este estudio son menores a los esperados, en el caso del coeficiente de permeabilidad se obtiene que los resultados pueden variar bastante dependiendo del tipo de ensayo que se utilice, además de la forma de confeccionar las probetas. En el caso de los parámetros de consolidación, los resultados obtenidos son ligeramente menores a los reportados en la literatura, aunque esto puede deberse principalmente a las propiedades del relave estudiado.

Se observó que el porcentaje de sales solubles en las muestras de relave aumenta en función del tiempo de circulación de agua de mar. Una muestra de control (no ensayada) presentó un %SST de un 1%, mientras que la muestra ensayada por alrededor de 3 a 4 días de circulación de agua de mar, presentó un %SST de 1.11%, evidenciando que los relaves retienen parte de las sales contenidas en el agua de mar. A largo plazo, el aumento progresivo podría cambiar las propiedades geotécnicas de los relaves.

Es importante recalcar que un cambio en la variable  $k$  del relave afecta directamente el caudal de salida de un elemento de suelo, afectando directamente los tiempos de consolidación de un depósito de relaves. Es muy importante, especialmente en la fase de cierre de operaciones del tranque, pues determina el tiempo de monitoreo de este. Un aumento en el valor de  $k$  influye en un tiempo más corto de recuperación de aguas y una consolidación más rápida.

## **9.2 RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES**

Se estima que debido a las dificultades y a las variabilidades de los ensayos para medir el coeficiente de permeabilidad, se debe profundizar más en este estudio, realizando una mayor cantidad de ensayos en permeámetro de pared flexible con una mayor variedad de contenidos de finos, variaciones del gradiente hidráulico, distintas presiones de confinamiento y distintos tipos de relaves. Además se recomienda utilizar agua destilada para un mayor control de los resultados.

Debido a los problemas asociados al ensayo edométrico, se propone buscar alguna solución para intercambiar el anillo rígido por uno de pared flexible, de forma de evitar la formación de vías preferenciales. Se recomienda realizar los ensayos de consolidación en Celda de Rowe.

Existen otros parámetros geotécnicos que pueden verse afectados por las sales presentes en el agua de mar y es necesario estudiar su impacto en las propiedades de los relaves. Es de especial cuidado, estudiar el efecto sobre la resistencia al corte de los relaves, pues este parámetro determina la estabilidad del tranque.

Debido a la sismicidad de nuestro país, se debe estudiar el efecto sísmico sobre la resistencia al corte, es decir, el efecto de las sales sobre la respuesta cíclica de los relaves, respuesta que puede estar ligada a los cambios en el coeficiente de permeabilidad que puedan existir.

Es importante el estudio del efecto que tendrán las sales sobre los sistemas de drenaje de los tranques de relave, estudiar su posible colmatación, como el efecto químico que podría existir sobre los materiales que constituyen los sistemas de drenajes. Por ejemplo la posible colmatación de geotextiles utilizados como sistemas de filtros. Se debe estudiar las condiciones bajo las cuales precipitarán.

## 10 REFERENCIAS

- Biarez, J., & Hicher, P.-I. (1994.). *Elementary Mechanics of Soil Behaviour : Saturated Remoulded Soils*. Rotterdam : A.A. Balkema.
- Bussière. (2007). Colloquium 2004: Hydrogeotechnical Properties of Hard Rock Railings from Metal Mines and Emerging Geoenvironmental Disposal Approaches. *Canadian Geotechnical Journal*, 44 (9), 1019-1052.
- Carrier, D. (November de 2003). Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman. *Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering*, 129(11), 1054-1056.
- Chapuis, R., & Aubertin, M. (2003). Predicting the Coefficient of Permeability of Soils using the Kozeny-Carman Equation. Departement des génies civil, géologique et des mines. École Polytechnique de Montréal.
- Craig, R. F. (2004). *Craig's Soil Mechanics*. New York: Spon Press.
- Delleur, J. (1999). *The Handbook of Groundwater engineering*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- DS248. (2007). *Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves*. Santiago.
- Duncan, J. (2000). Factor of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(4), 307-316.
- Fredlund, M. (June de 1995). Finite Strain Consolidation. *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*.
- Galaz, J. (31 de Agosto de 2011). Estado del Arte en la Disposición de Relaves Espesados. Relpas 2011.
- Geier, D., Gjerapic, G., & Morrison, K. (2011). Determination of Consolidation Properties, Selection of Computational Methods, and Estimation of Potential Error in Mine Tailings Settlement Calculations. *Proceedings Tailings and Mine Waste, Vancouver, BC, November 6 to 9, 2011*.
- Jiménez, M. (2004). *Determinación de coeficientes convectivos de transferencia de calor natural y forzada para aletas radiales en agua y agua de mar*. Tesis Licenciatura. Ingeniería Química con área en Ingeniería Ambiental. Departamento de Ingeniería Química y Alimentos, Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla.
- Kenney, T., Veen, W. A., Swallow, M., & Sungaila, M. (1992). Hydraulic Conductivity of Compacted Bentonite-Sand Mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 29, 364-374.
- Lambe, T., & Whitman, R. (1969). *Soil Mechanics*. John Wiley & Sons.

- López, E. (2012). Estudio Experimental de la Permeabilidad de Materiales Depositados en Pilas de Lixiviación. *Tesis Para Optar al Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Ingeniería Geotécnica. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.*
- Moulton, L. (1980). *Highway Subdrainage Design*. Washington D.C: Federal Highway Administration Offices of Research and Development.
- Olguín, R. (2006). Geotecnia de los Suelos Salinos del Norte de Chile. *Tesis para optar al grado de magíster en ciencias de la Ingeniería, mención Ingeniería Geotécnica, Universidad de Chile.*
- Petrukhin, V. (1993). *Construction of Structures on Saline Soils*. Rotterdam: A.A Balkema.
- Santos, E. (2011). Comportamiento Monotono y Cíclico no Drenado de Arenas de Relaves Integrales. *Tesis Para Optar al Grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería Mención Ingeniería Geotécnica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.*
- SERNAGEOMIN, S. N., SONAMI, S. N., & BGR, I. F. (2003). *Guía de Buenas Prácticas Ambientales*.
- Terzaghi, K., Peck, R., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. JOHN WILEY & SONS, INC.
- Tolosa, P. (2009). Análisis de Modelos de Consolidación Aplicados a Depósitos de Relave. *Memoria Para Obtener el Título de Ingeniero Civil en Obras Civiles, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile.*



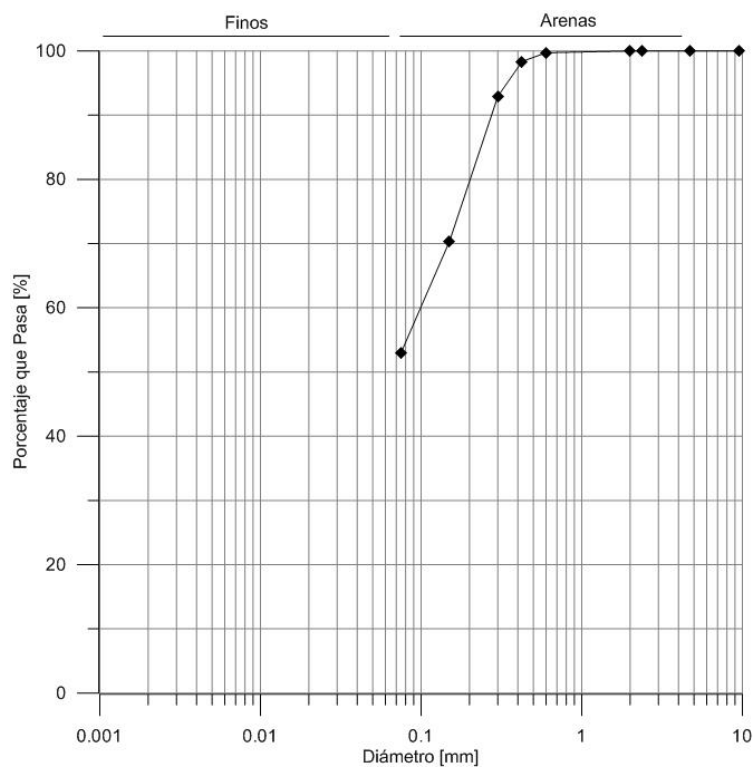
# ANEXO A ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

## GRANULOMETRÍAS

### 1. Material Completo Tambor 1 N°1

Tamiz N°	Diámetro [mm]	Pesos [g]	% Retenido	% que Pasa
<b>2 1/2"</b>	<b>63.0</b>	0	0%	100%
<b>2"</b>	<b>50.0</b>	0	0%	<b>100%</b>
<b>1 1/2"</b>	<b>37.5</b>	0	0%	<b>100%</b>
<b>1"</b>	<b>25.0</b>	0	0%	<b>100%</b>
<b>3/4"</b>	<b>19.0</b>	0	0%	<b>100%</b>
<b>3/8"</b>	<b>9.5</b>	0	0%	<b>100%</b>
<b>4</b>	<b>4.750</b>	0	0%	<b>100%</b>
<b>8</b>	<b>2.360</b>	0	0%	<b>100%</b>
<b>16</b>	<b>2.000</b>	0	0%	<b>100%</b>
<b>30</b>	<b>0.600</b>	1.36	0%	<b>100%</b>
<b>40</b>	<b>0.425</b>	6.83	1%	<b>98%</b>
<b>50</b>	<b>0.300</b>	27.14	5%	<b>93%</b>
<b>100</b>	<b>0.150</b>	113.04	23%	<b>70%</b>
<b>200</b>	<b>0.075</b>	86.46	17%	<b>53%</b>

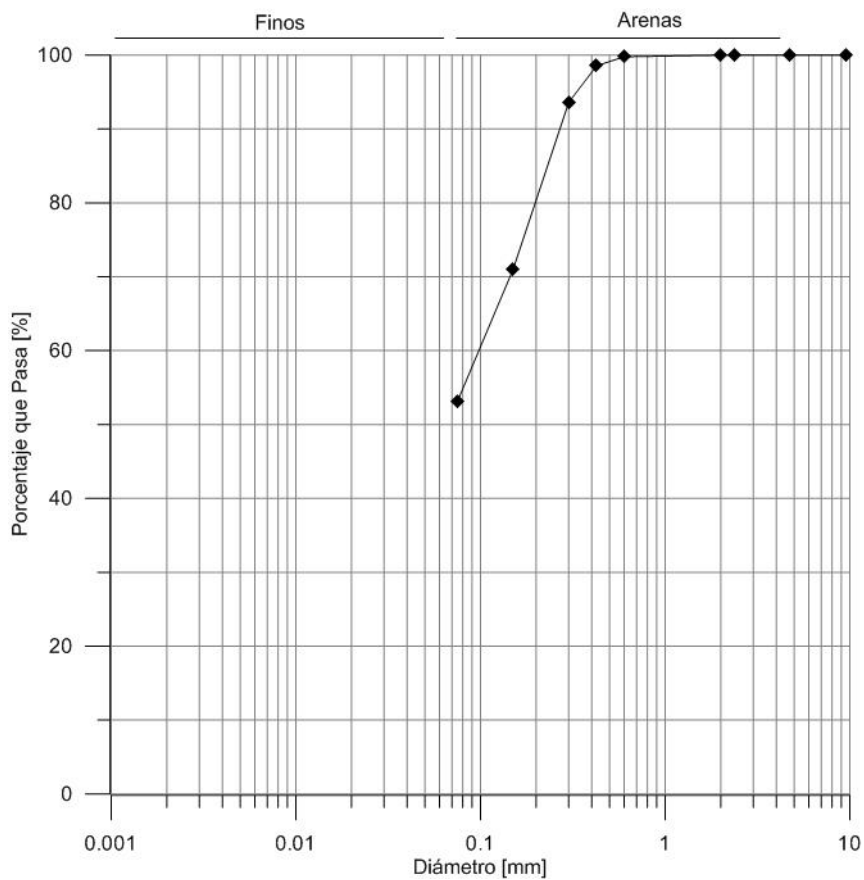
Lavado	bajo # 200	263.81	53%	0.272%
--------	------------	--------	-----	--------



## 2. Material Completo Tambor 1 N°2

	Diámetro	Pesos	%	%
N°	[mm]	[g]	Retenido	que Pasa
<b>2 1/2"</b>	<b>63.0</b>	0	0%	100%
<b>2"</b>	<b>50.0</b>	0	0%	<b>100%</b>
<b>1 1/2"</b>	<b>37.5</b>	0	0%	<b>100%</b>
<b>1"</b>	<b>25.0</b>	0	0%	<b>100%</b>
<b>3/4"</b>	<b>19.0</b>	0	0%	<b>100%</b>
<b>3/8"</b>	<b>9.5</b>	0	0%	<b>100%</b>
<b>4</b>	<b>4.750</b>	0	0%	<b>100%</b>
<b>8</b>	<b>2.360</b>	0	0%	<b>100%</b>
<b>16</b>	<b>2.000</b>	0	0%	<b>100%</b>
<b>30</b>	<b>0.600</b>	1.07	0%	<b>100%</b>
<b>40</b>	<b>0.425</b>	6.14	1%	<b>99%</b>
<b>50</b>	<b>0.300</b>	24.76	5%	<b>94%</b>
<b>100</b>	<b>0.150</b>	113.1	23%	<b>71%</b>
<b>200</b>	<b>0.075</b>	89.03	18%	<b>53%</b>

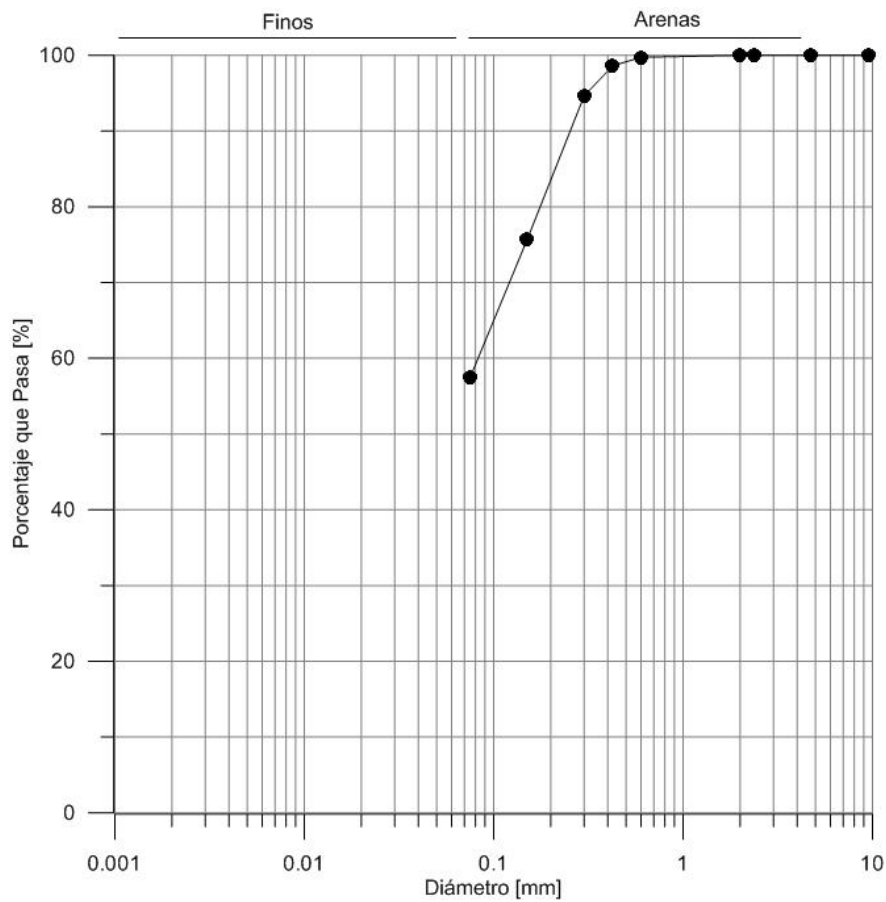
Lavado	bajo # 200	265.32	53%	0.116%
--------	------------	--------	-----	--------



### 3. Material Completo Tambor 2 N°1

Tamiz	Diámetro	Pesos	%	%
N°	[mm]	[g]	Retenido	que Pasa
2 1/2"	63.0	0	0%	100%
2"	50.0	0	0%	100%
1 1/2"	37.5	0	0%	100%
1"	25.0	0	0%	100%
3/4"	19.0	0	0%	100%
3/8"	9.5	0	0%	100%
4	4.750	0	0%	100%
8	2.360	0	0%	100%
16	2.000	0	0%	100%
30	0.600	1.23	0%	100%
40	0.425	5.72	1%	99%
50	0.300	19.74	4%	95%
100	0.150	95.09	19%	76%
200	0.075	90.76	18%	57%

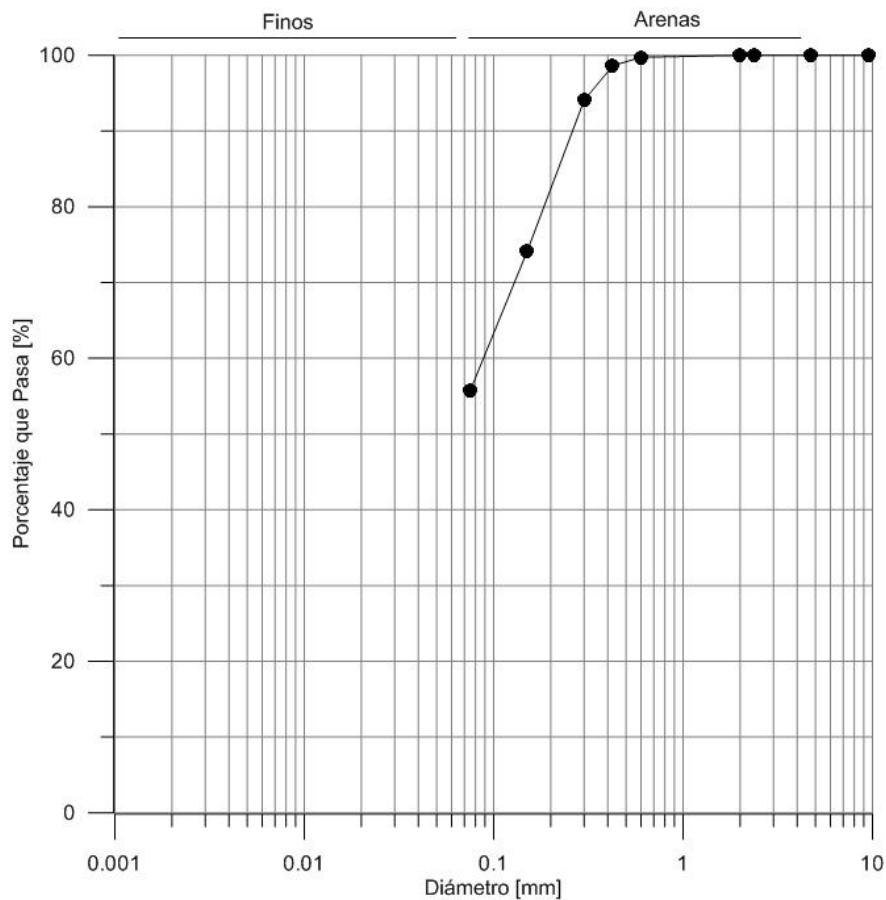
Lavado	bajo # 200	287.42	57.48%	0.008%
--------	------------	--------	--------	--------



#### 4. Material Completo Tambor 2 N°2

Tamiz	Diámetro	Pesos	%	%
N°	[mm]	[g]	Retenido	que Pasa
2 1/2"	63.0	0	0%	100%
2"	50.0	0	0%	100%
1 1/2"	37.5	0	0%	100%
1"	25.0	0	0%	100%
3/4"	19.0	0	0%	100%
3/8"	9.5	0	0%	100%
4	4.750	0	0%	100%
8	2.360	0	0%	100%
16	2.000	0	0%	100%
30	0.600	1.27	0%	100%
40	0.425	5.62	1%	99%
50	0.300	22.7	5%	94%
100	0.150	99.99	20%	74%
200	0.075	91.85	18%	56%

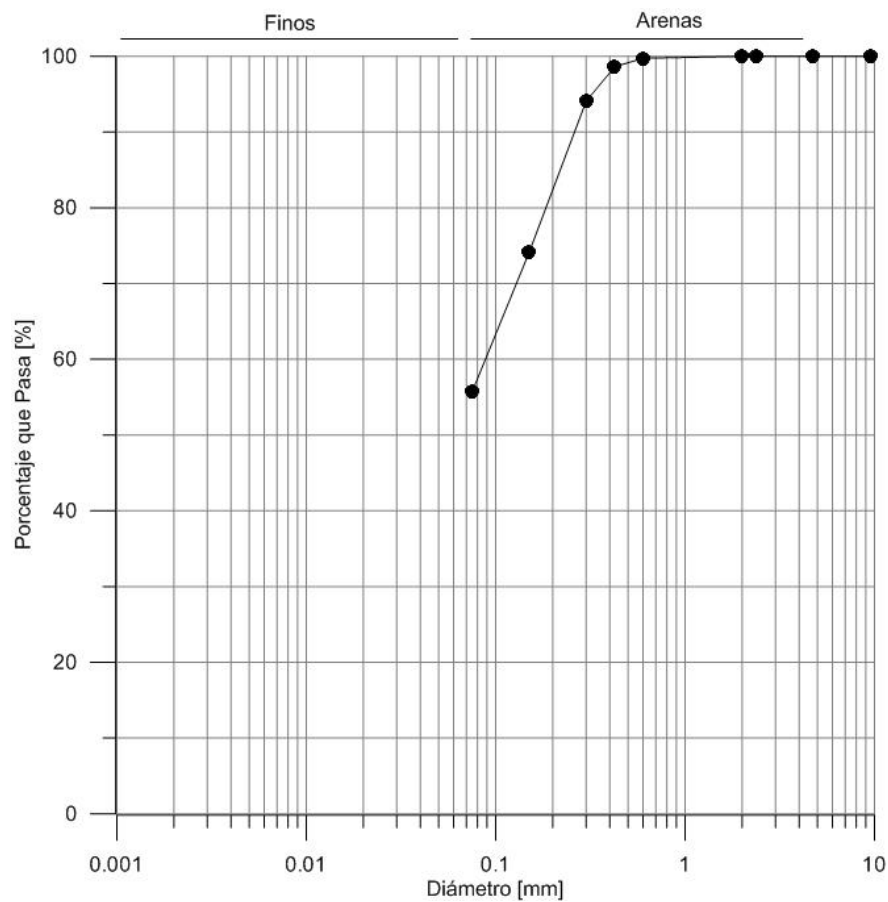
Lavado	bajo # 200	278.5	55.70%	0.014%
--------	------------	-------	--------	--------



## 5. Material Reconstituido.

Tamiz	Diámetro	Pesos	%	%
N°	[mm]	[g]	Retenido	que Pasa
<b>2 1/2"</b>	<b>63.0</b>	0	0%	100%
<b>2"</b>	<b>50.0</b>	0	0%	<b>100%</b>
<b>1 1/2"</b>	<b>37.5</b>	0	0%	<b>100%</b>
<b>1"</b>	<b>25.0</b>	0	0%	<b>100%</b>
<b>3/4"</b>	<b>19.0</b>	0	0%	<b>100%</b>
<b>3/8"</b>	<b>9.5</b>	0	0%	<b>100%</b>
<b>4</b>	<b>4.750</b>	0	0%	<b>100%</b>
<b>8</b>	<b>2.360</b>	0	0%	<b>100%</b>
<b>16</b>	<b>2.000</b>	0	0%	<b>100%</b>
<b>30</b>	<b>0.600</b>	1.8	0%	<b>100%</b>
<b>40</b>	<b>0.425</b>	9.81	2%	<b>98%</b>
<b>50</b>	<b>0.300</b>	35.85	7%	<b>91%</b>
<b>100</b>	<b>0.150</b>	158.24	32%	<b>59%</b>
<b>200</b>	<b>0.075</b>	136.24	27%	<b>32%</b>

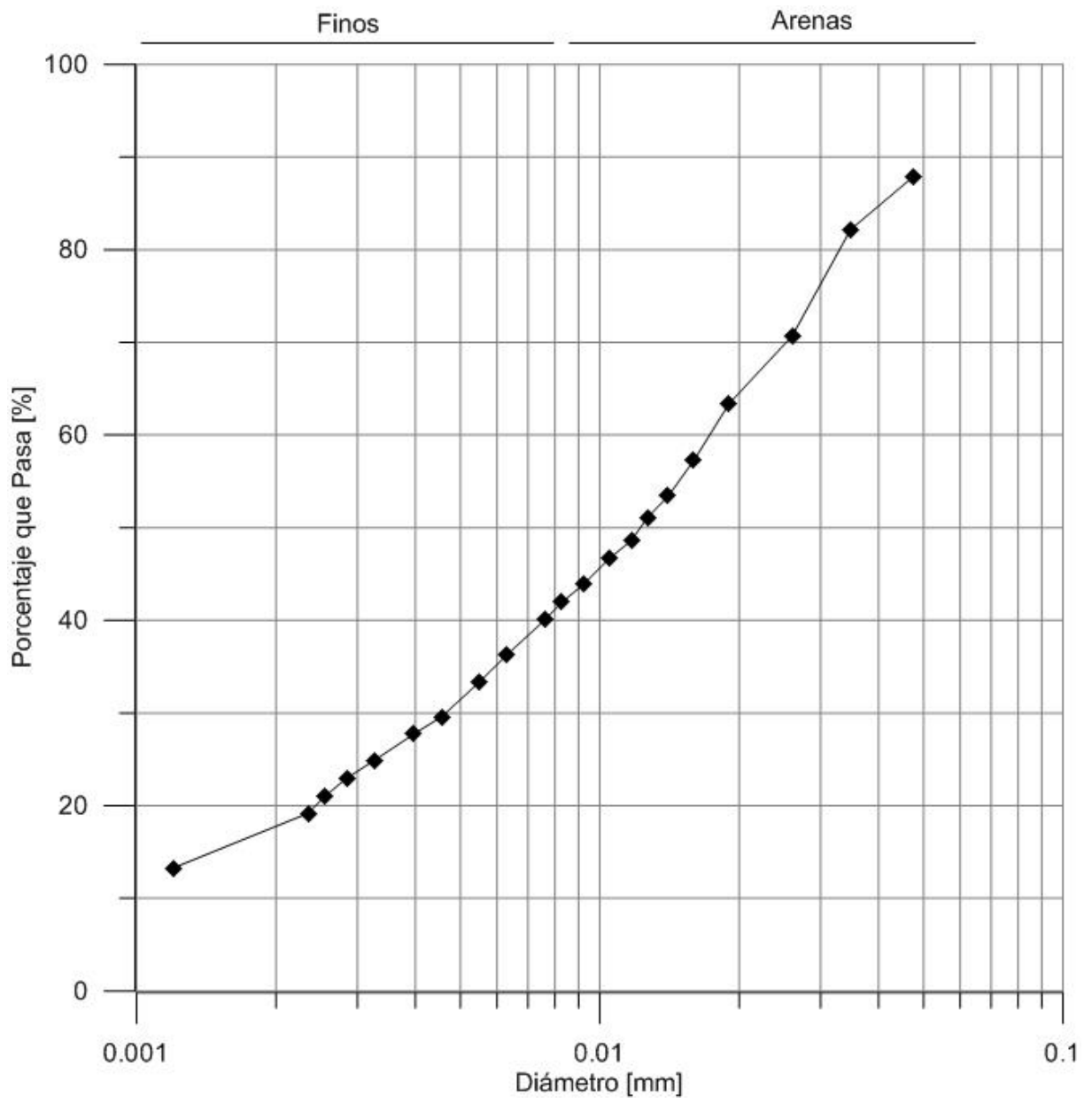
Lavado	bajo # 200	158.12	31.62%	-0.012%
--------	------------	--------	--------	---------



## HIDRÓMETRO

Hidrómetro	N°	08DEAM110
Gs de los sólidos		2.84
Peso de suelo	[g]	50
Corrección de cero		7
Corrección del menisco		1
Agente Dispersante		Hexametafosfato de Sodio
Cantidad	[g]	5
Factor de Corrección a por Gs		0.96

Tiempo		Lectura del	Temperatura
	unidad	Hidrómetro	°C
30	seg	53	19.3
1	min	50	19.3
2	min	44	19.4
4	min	40.2	19.4
6	min	37	19.4
8	min	35	19.4
10	min	33.8	19.4
12	min	32.5	19.4
15	min	31.5	19.5
20	min	30	19.5
25	min	29	19.6
30	min	28	19.6
45	min	26	19.7
1	hrs	24.5	19.7
1.5	hrs	22.5	19.8
2	hrs	21.5	19.9
3	hrs	20	20
4	hrs	19	20
5	hrs	18	20
6	hrs	17	20.1
24	hrs	14	19.8



## PESO ESPECÍFICO DE LOS SÓLIDOS G<sub>s</sub>

### 1. 55% de Finos, Picnómetro.

DATOS DE CONFECCION	VALOR	UNIDAD
Densidad de Agua $\gamma_{\text{Agua a } 4^{\circ}\text{C}}$	1	(gm/cm <sup>3</sup> )
Peso Picnómetro + Agua + Suelo, $W_1$	363.38	(gm)
Peso Picnómetro + Agua, $W_2$	344.09	(gm)
Peso Suelo Seco, $W_3$	30	(gm)
Temperatura de Agua	20.2	(°C)
Volumen del Sólido $V_s$	10.71	(cm <sup>3</sup> )
Densidad Seca del Sólido, $\gamma_d$	2.80	(gm/cm <sup>3</sup> )
Gravedad Específica de los Sólidos, $G_s$	2.80	--

### 2. 55% de Finos, Vaso Esmerilado.

DATOS DE CONFECCION	VALOR	UNIDAD
Densidad de Agua $\gamma_{\text{Agua a } 4^{\circ}\text{C}}$	1	(gm/cm <sup>3</sup> )
Peso Picnómetro + Agua + Suelo, $W_1$	511.9	(gm)
Peso Picnómetro + Agua, $W_2$	492.46	(gm)
Peso Suelo Seco, $W_3$	30	(gm)
Temperatura de Agua	26.6	(°C)
Volumen del Sólido $V_s$	10.56	(cm <sup>3</sup> )
Densidad Seca del Sólido, $\gamma_d$	2.84	(gm/cm <sup>3</sup> )
Gravedad Específica de los Sólidos, $G_s$	2.84	--

### 3. 33% de Finos, Picnómetro.

DATOS DE CONFECCION	VALOR	UNIDAD
Densidad de Agua $\gamma_{\text{Agua a } 4^{\circ}\text{C}}$	1	(gm/cm <sup>3</sup> )
Peso Picnómetro + Agua + Suelo, $W_1$	360.72	(gm)
Peso Picnómetro + Agua, $W_2$	341.72	(gm)
Peso Suelo Seco, $W_3$	30	(gm)
Temperatura de Agua	25.7	(°C)
Volumen del Sólido $V_s$	11	(cm <sup>3</sup> )
Densidad Seca del Sólido, $\gamma_d$	2.73	(gm/cm <sup>3</sup> )
Gravedad Específica de los Sólidos, $G_s$	2.73	--



4. 33% de Finos, Vaso Esmerilado

DATOS DE CONFECCION	VALOR	UNIDAD
Densidad de Agua $\gamma_{\text{Agua a } 4^{\circ}\text{C}}$	1	(gm/cm <sup>3</sup> )
Peso Picnómetro + Agua + Suelo, $W_1$	508.09	(gm)
Peso Picnómetro + Agua, $W_2$	488.8	(gm)
Peso Suelo Seco, $W_3$	30	(gm)
Temperatura de Agua	27.3	(°C)
Volumen del Sólido $V_s$	10.71	(cm <sup>3</sup> )
Densidad Seca del Sólido, $\gamma_d$	2.80	(gm/cm <sup>3</sup> )
Gravedad Específica de los Sólidos, $G_s$	2.80	--

5. 100% de Finos, Vaso Esmerilado.

DATOS DE CONFECCION	VALOR	UNIDAD
Densidad de Agua $\gamma_{\text{Agua a } 4^{\circ}\text{C}}$	1	(gm/cm <sup>3</sup> )
Peso Picnómetro + Agua + Suelo, $W_1$	510.84	(gm)
Peso Picnómetro + Agua, $W_2$	491.21	(gm)
Peso Suelo Seco, $W_3$	30	(gm)
Temperatura de Agua	27.3	(°C)
Volumen del Sólido $V_s$	10.37	(cm <sup>3</sup> )
Densidad Seca del Sólido, $\gamma_d$	2.89	(gm/cm <sup>3</sup> )
Gravedad Específica de los Sólidos, $G_s$	2.89	--

## LÍMITES DE ATTERBERG

### 1. 55% de Finos, Agua Destilada

Determinación límite líquido						
N° de puntos	1	2	3	4	5	6
N° de golpes, N	16	20	24	25	28	32
Peso cápsula + S. húmedo [gr]	47.42	50.53	51.33	56.73	52.71	42.02
Peso cápsula + suelo seco [gr]	41.58	44.48	44.99	49.67	46.41	37.42
Peso cápsula [gr]	12.1	13.97	11.94	12.23	12.26	11.96
Humedad [%]	19.81%	19.83%	19.18%	18.86%	18.45%	18.07%

Determinación límite plástico		
N° de puntos	1	2
Peso cápsula + suelo húmedo [gr]	17.78	13.07
Peso cápsula + suelo seco [gr]	17.41	12.9
Peso cápsula [gr]	14.84	11.79
Humedad [%]	14.40%	15.32%

Límite Líquido	18.84%
Límite Plástico	14.86%
Índice de Plasticidad	3.98%

2. 55% de Finos, Agua de Mar

Determinación límite líquido					
N° de puntos	1	2	3	4	5
N° de golpes, N	18	21	22	25	29
Peso cápsula + suelo húmedo [gr]	49.78	51.17	53.03	61.28	53.62
Peso cápsula + suelo seco [gr]	44.15	45.24	46.73	53.79	47.58
Peso cápsula [gr]	14.08	13.15	12.32	11.98	12.25
Humedad [%]	18.72%	18.48%	18.31%	17.91%	17.10%

Determinación límite plástico		
N° de puntos	1	2
Peso cápsula + suelo húmedo [gr]	19.21	17.17
Peso cápsula + suelo seco [gr]	18.5	16.45
Peso cápsula [gr]	13.88	11.82
Humedad [%]	15.37%	15.55%

Límite Líquido	17.80%
Límite Plástico	15.46%
Índice de Plasticidad	2.34%

### 3. 100% de Finos, Agua Destilada

Determinación límite líquido					
N° de puntos	1	2	3	4	5
N° de golpes, N	15	17	20	26	31
Peso cápsula + suelo húmedo [gr]	25.78	42.42	36.8	34.01	28.67
Peso cápsula + suelo seco [gr]	22.71	35.97	31.42	29.24	25.26
Peso cápsula [gr]	12.47	13.73	12.91	12.1	12.79
Humedad [%]	29.98%	29.00%	29.07%	27.83%	27.35%

Determinación límite plástico		
N° de puntos	1	2
Peso cápsula + suelo húmedo [gr]	14.31	13
Peso cápsula + suelo seco [gr]	13.88	12.78
Peso cápsula [gr]	11.77	11.8
Humedad [%]	20.38%	22.45%

Límite Líquido	28.25%
Límite Plástico	21.41%
Índice de Plasticidad	6.84%

4. 100% de Finos, Agua de Mar

Determinación límite líquido					
N° de puntos	1	2	3	4	5
N° de golpes, N	15	18	21	30	29
Peso cápsula + suelo húmedo [gr]	31.15	32.61	32.35	38	38.62
Peso cápsula + suelo seco [gr]	26.75	28.39	27.87	32.93	33.49
Peso cápsula [gr]	11.86	13.49	11.94	13.98	13.88
Humedad [%]	29.55%	28.32%	28.12%	26.75%	26.16%

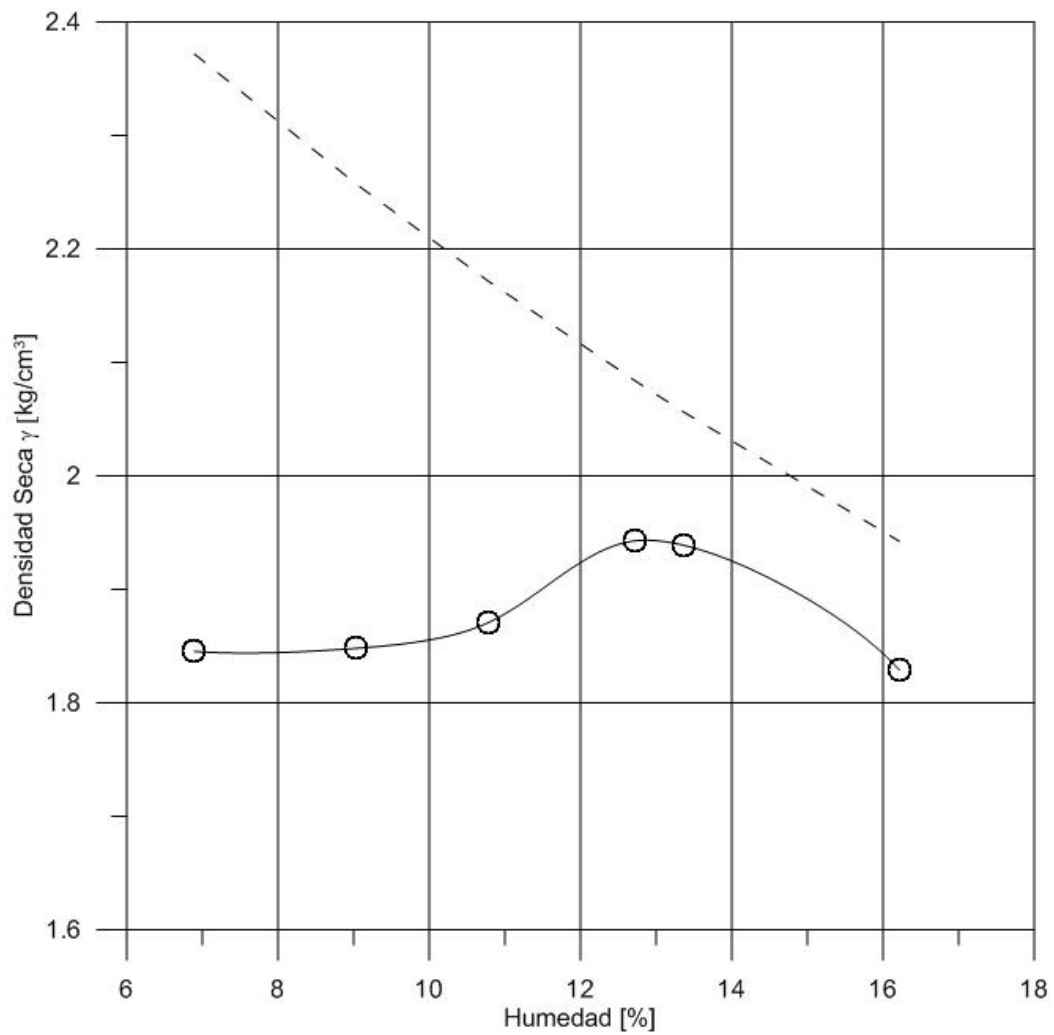
Determinación límite plástico		
N° de puntos	1	2
Peso cápsula + suelo húmedo [gr]	15.71	15.02
Peso cápsula + suelo seco [gr]	15.11	14.51
Peso cápsula [gr]	11.96	12.12
Humedad [%]	19.05%	21.34%

Límite Líquido	27.43%
Límite Plástico	20.19%
Índice de Plasticidad	7.24%

## ENSAYOS DE COMPACTACIÓN PROCTOR

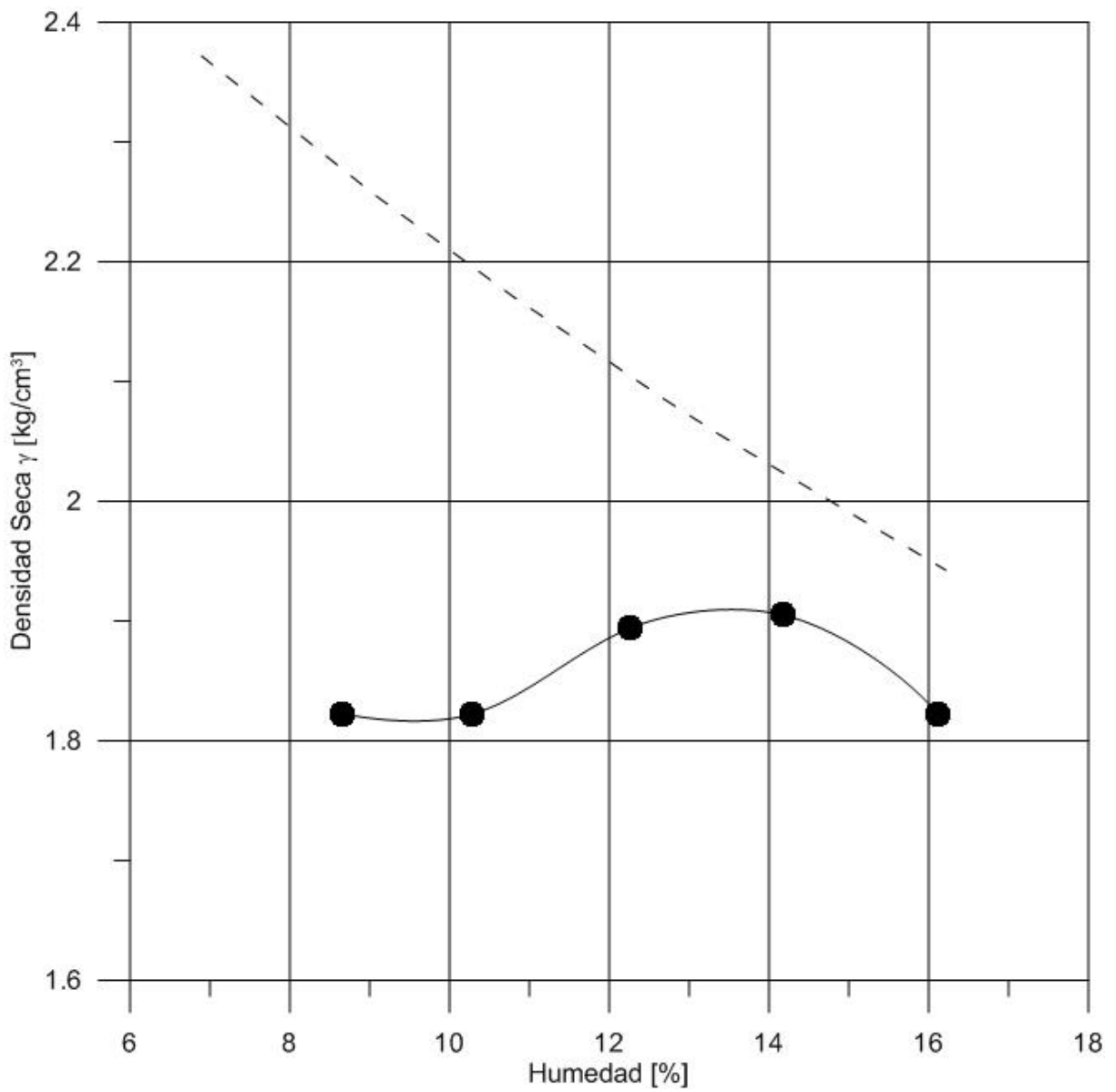
### 1. 55% de Finos Agua Potable

Determinación de la Densidad Compactada								
Molde Nº	Humedad		Pesos			Volumen molde [cm <sup>3</sup> ]	Densidad	
	Aparente [%]	Real [%]	Molde + material [g]	Molde [g]	Material [g]		Húmeda [g/cm <sup>3</sup> ]	Seca [g/cm <sup>3</sup> ]
1	5%	3.94%	3690	1922	<b>1768</b>	939.85	1.88	1.81
2	7%	6.89%	3776	1922	<b>1854</b>	939.85	1.97	1.85
3	9%	9.04%	3816	1922	<b>1894</b>	939.85	2.02	1.85
4	11%	10.78%	3870	1922	<b>1948</b>	939.85	2.07	1.87
6	13%	12.71%	3980	1922	<b>2058</b>	939.85	2.19	1.94
7	14%	13.36%	3990	1922	<b>2068</b>	940.85	2.20	1.94
8	15%	16.21%	3924	1922	<b>2002</b>	941.85	2.13	1.83



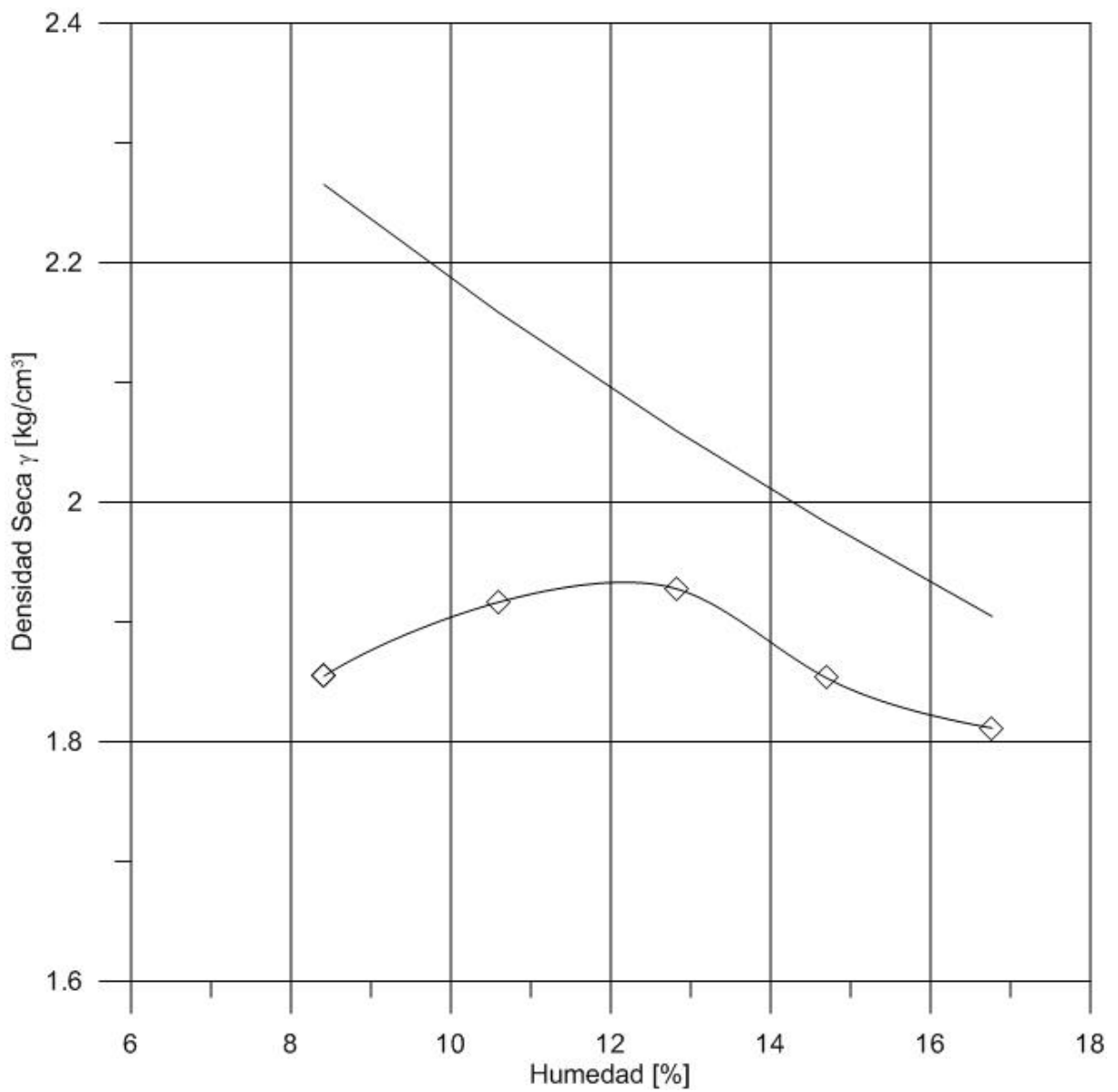
2. 55% de Finos Agua de Mar

Molde Nº	Humedad		Pesos			Volumen molde [cm <sup>3</sup> ]	Densidad	
	Aparente [%]	Real [%]	Molde + material [g]	Molde [g]	Material [g]		Húmeda [g/cm <sup>3</sup> ]	Seca [g/cm <sup>3</sup> ]
1	9%	8.65%	3796	1924	<b>1872</b>	945.27	1.98	1.82
2	11%	10.29%	3824	1924	<b>1900</b>	945.27	2.01	1.82
3	13%	12.26%	3934	1924	<b>2010</b>	945.27	2.13	1.89
4	15%	14.17%	3980	1924	<b>2056</b>	945.27	2.18	1.91
5	17%	16.12%	3924	1924	<b>2000</b>	945.27	2.12	1.82



3. 33% de Finos Agua Potable

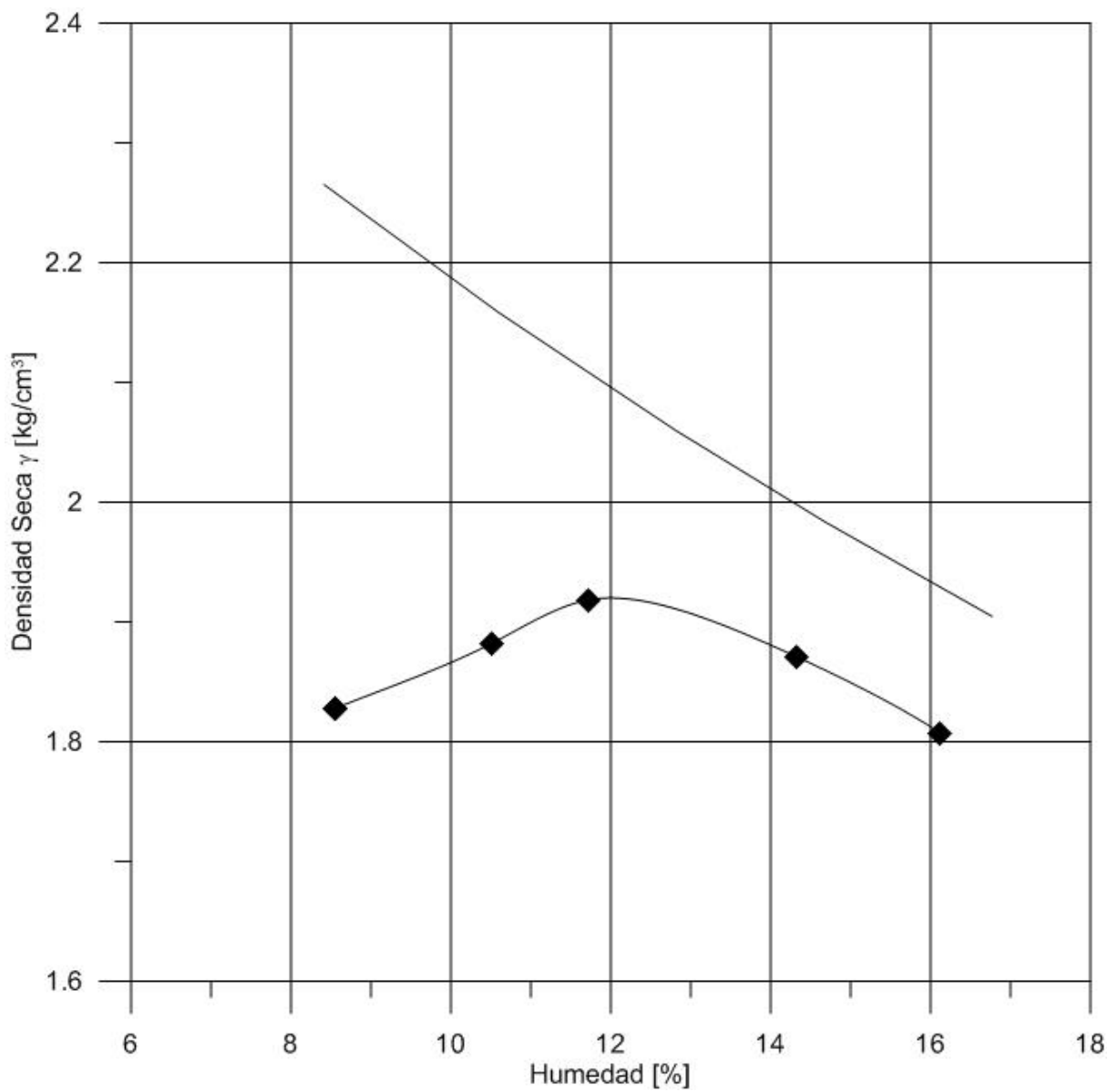
Determinación de la Densidad Compactada								
Molde Nº	Humedad		Pesos			Volumen molde [cm <sup>3</sup> ]	Densidad	
	Aparente [%]	Real [%]	Molde + material [g]	Molde [g]	Material [g]		Húmeda [g/cm <sup>3</sup> ]	Seca [g/cm <sup>3</sup> ]
1	9%	8.41%	3812	1922	<b>1890</b>	939.85	2.01	1.85
2	11%	10.59%	3914	1922	<b>1992</b>	939.85	2.12	1.92
3	13%	12.82%	3966	1922	<b>2044</b>	939.85	2.17	1.93
4	15%	14.69%	3920	1922	<b>1998</b>	939.85	2.13	1.85
5	17%	16.77%	3910	1922	<b>1988</b>	939.85	2.12	1.81





4. 33% de Finos Agua de Mar

Determinación de la Densidad Compactada								
Molde Nº	Humedad		Pesos			Volumen molde [cm <sup>3</sup> ]	Densidad	
	Aparente [%]	Real [%]	Molde + material [g]	Molde [g]	Material [g]		Húmeda [g/cm <sup>3</sup> ]	Seca [g/cm <sup>3</sup> ]
1	9%	8.56%	3800	1924	<b>1876</b>	945.27	1.98	1.83
2	11%	10.51%	3890	1924	<b>1966</b>	945.27	2.08	1.88
3	13%	11.72%	3950	1924	<b>2026</b>	945.27	2.14	1.92
4	15%	14.32%	3946	1924	<b>2022</b>	945.27	2.14	1.87
6	17%	16.12%	3908	1924	<b>1984</b>	945.27	2.10	1.81



## DENSIDAD MÍNIMA Y MÁXIMA.

### 1. 55% Finos

<b>Densidad Mínima</b>			
<b>Altura del molde</b>	h1	4	cm
	h2	4.045	cm
	h	4.045	cm
<b>Diámetro del molde</b>	d1	5.955	cm
	d2	5.98	cm
	d	5.98	cm
<b>Área del molde</b>	A	28.09	cm <sup>2</sup>
<b>Volumen del molde</b>	Vmin	113.61	cm <sup>3</sup>
<b>Peso suelo + molde</b>	P1	918.56	g
	P2	919.07	g
	P3	918.12	g
<b>Peso Molde</b>		811.17	g
<b>humedad</b>	$\omega_i$	0	%
<b>Densidad Mínima</b>	$\gamma_{dmin}$	0.94	g/cm <sup>3</sup>

<b>Densidad Mínima</b>			
<b>Altura del molde</b>	h1	7.075	cm
	h2	7.09	cm
	h	7.075	cm
<b>Diámetro del molde</b>	d1	3.6	cm
	d2	3.59	cm
	d	3.59	cm
<b>Área del molde</b>	A	10.12	cm <sup>2</sup>
<b>Volumen del molde</b>	Vmax	71.62	cm <sup>3</sup>
<b>Peso suelo + molde</b>	P1	742.94	g
	P2	740.96	g
	P3	743.33	g
<b>Peso Molde</b>		629.55	g
<b>humedad</b>	$\omega_i$	0	%
<b>Densidad Máxima</b>	$\gamma_{dmax}$	1.59	g/cm <sup>3</sup>

2. 33% Finos

<b>Densidad Mínima</b>			
<b>Altura del molde</b>	h1	4.00	cm
	h2	4.05	cm
	h	4.05	cm
<b>Diámetro del molde</b>	d1	5.96	cm
	d2	5.98	cm
	d	5.98	cm
<b>Área del molde</b>	A	28.09	cm <sup>2</sup>
<b>Volumen del molde</b>	Vmin	113.61	cm <sup>3</sup>
<b>Peso suelo + molde</b>	P1	934.19	g
	P2	936.43	g
	P3	934.92	g
<b>Peso Molde</b>		811.17	g
<b>humedad</b>	$\omega_i$	0	%
<b>Densidad Mínima</b>	$\gamma_{dmin}$	1.08	g/cm <sup>3</sup>

<b>Densidad Mínima</b>			
<b>Altura del molde</b>	h1	7.08	cm
	h2	7.09	cm
	h	7.08	cm
<b>Diámetro del molde</b>	d1	3.60	cm
	d2	3.59	cm
	d	3.59	cm
<b>Área del molde</b>	A	10.12	cm <sup>2</sup>
<b>Volumen del molde</b>	Vmax	71.62	cm <sup>3</sup>
<b>Peso suelo + molde</b>	P1	752.90	g
	P2	751.12	g
	P3	752.11	g
<b>Peso Molde</b>		629.55	g
<b>humedad</b>	$\omega_i$	0	%
<b>Densidad Máxima</b>	$\gamma_{dmax}$	1.72	g/cm <sup>3</sup>

## ANEXO B ENSAYOS DE PERMEABILIDAD

### 1. 55% Finos Agua Potable

Datos de Confección		
Diámetro Muestra	4.42	[cm]
Altura Muestra	10.57	[cm]
Área Muestra	15.34	[cm <sup>2</sup> ]
Volumen Muestra	162.24	[cm <sup>3</sup> ]
Diámetro Tubo Capilar	1.01	[cm]
Área Tubo Capilar	0.80	[cm <sup>2</sup> ]
Humedad Inicial	40%	[%]
e inicial	0.94	[]
e final	0.55	[]
Densidad Seca Inicial	1.46	[gr/cm <sup>3</sup> ]
Gs	2.84	[]

ENSAYE CARGA VARIABLE								
	$\sigma_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	0.5			e	0.653	Promedio K [cm/s]	2.82E-06
Ensayo N°	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$\Delta t$ [s]	$K_T$ [cm/s]	$\Delta V_{out}$ [cm <sup>3</sup> ]	$\Delta V_{in}$ [cm <sup>3</sup> ]	Temperatura °C	Gradiente Hidráulico Promedio
1	50	49.3	1800	4.33E-06	0.7	0.562	25.8	4.70
2	45	44.5	1800	3.43E-06	0.6	0.401	24.7	4.23
3	40	39.6	1800	3.09E-06	0.33	0.321		3.76
4	35	34.9	3600	4.40E-07	0.18	0.080		3.31
5	30	29.95	3600	2.56E-07	0.11	0.040		2.83

ENSAYE CARGA VARIABLE								
	$\sigma_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	1			e	0.600	Promedio K [cm/s]	1.98E-06
Ensayo N°	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$\Delta t$ [s]	$K_T$ [cm/s]	$\Delta V_{out}$ [cm <sup>3</sup> ]	$\Delta V_{in}$ [cm <sup>3</sup> ]	Temperatura °C	Gradiente Hidráulico Promedio
1	50	49.4	1800	3.71E-06	0.48	0.482	25.8	4.70
2	45	44.5	1800	3.43E-06	0.52	0.401	24.7	4.23
3	40	39.7	1800	2.31E-06	0.27	0.241		3.77
4	35	34.9	3600	4.40E-07	0.07	0.080		3.31
5	30	30	5400	0.00E+00		0.000		2.84

ENSAYE CARGA VARIABLE								
	$\sigma_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	1.5			e	0.55	Promedio K [cm/s]	6.15E-07
Ensayo N°	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$\Delta t$ [s]	$K_T$ [cm/s]	$\Delta V_{out}$ [cm <sup>3</sup> ]	$\Delta V_{in}$ [cm <sup>3</sup> ]	Temperatura °C	Gradiente Hidráulico Promedio
1	50	49.7	1800	1.85E-06	0.24	0.241	25.8	4.71
2	45	44.9	5400	2.28E-07	0.1	0.080	24.7	4.25
3	40	39.95	1800	3.84E-07	0.03	0.040		3.78
4	35	35	3600	0.00E+00	0	0.000		3.31
5								

Consolidación								
$\sigma_c = 0.5$			$\sigma_c = 1$			$\sigma_c = 1.5$		
Tiempo [s]	$\Delta h$ [cm]	$\Delta V$ [cm <sup>3</sup> ]	Tiempo [s]	$\Delta h$ [cm]	$\Delta V$ [cm <sup>3</sup> ]	Tiempo [s]	$\Delta h$ [cm]	$\Delta V$ [cm <sup>3</sup> ]
0	50	0.00	0	50	0.00	0	50	0.00
15	46.8	2.57	15	49.1	0.72	15	49.6	0.32
30	45.7	3.45	30	48.8	0.96	30	49.5	0.40
60	44.5	4.42	60	48.5	1.20	60	49.3	0.56
120	42.2	6.26	120	47.7	1.85	120	49	0.80
180	40	8.03	180	47.3	2.17	180	48.9	0.88
300	37.3	10.20	300	46.8	2.57	240	48.8	0.96
480	33.5	13.25	480			300	48.7	1.04
600	31.2	15.09	600			480	48.6	1.12
900	26.5	18.87	900	46.1	3.13	600	48.6	1.12
1200	23.6	21.19	1200	46	3.21	900	48.5	1.20
1800			1800			1200	48.4	1.28
2700	19	24.89	2700			1800	48.3	1.36
3600	18.5	25.29	3600			2700	48.2	1.44
5400	18	25.69	5400			3600	48.2	1.44
7200	17.6	26.01	7200			5400	48.1	1.53
10800	17.2	26.33	10800	45.1	3.93	7200	48	1.61
14400	16.9	26.57	14400			334800	44.1	4.74
18000	16.6	26.81	18000					
75600	14	28.90	72000	43.2	5.46			

2. 55% Finos Agua de Mar

<b>Datos de Confección</b>		
Diámetro Muestra	4.42	[cm]
Altura Muestra	10.57	[cm]
Área Muestra	15.34	[cm <sup>2</sup> ]
Volumen Muestra	162.24	[cm <sup>3</sup> ]
Diámetro Tubo Capilar	1.01	[cm]
Área Tubo Capilar	0.80	[cm <sup>2</sup> ]
Humedad Inicial	40%	[%]
e inicial	0.94	[ ]
e final	0.55	[ ]
Densidad Seca Inicial	1.46	[gr/cm <sup>3</sup> ]
Gs	2.84	[ ]



ENSAYE CARGA VARIABLE								
	$\sigma_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	0.5			e	0.653	Promedio K [cm/s]	2.82E-06
Ensayo N°	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$\Delta t$ [s]	$K_T$ [cm/s]	$\Delta V_{out}$ [cm <sup>3</sup> ]	$\Delta V_{in}$ [cm <sup>3</sup> ]	Temperatura °C	Gradiente Hidráulico Promedio
1	50	49.3	1800	4.33E-06	0.7	0.562	25.8	4.70
2	45	44.5	1800	3.43E-06	0.6	0.401	24.7	4.23
3	40	39.6	1800	3.09E-06	0.33	0.321		3.76
4	35	34.9	3600	4.40E-07	0.18	0.080		3.31
5	30	29.95	3600	2.56E-07	0.11	0.040		2.83

ENSAYE CARGA VARIABLE								
	$\sigma_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	1			e	0.599	Promedio K [cm/s]	1.98E-06
Ensayo N°	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$\Delta t$ [s]	$K_T$ [cm/s]	$\Delta V_{out}$ [cm <sup>3</sup> ]	$\Delta V_{in}$ [cm <sup>3</sup> ]	Temperatura °C	Gradiente Hidráulico Promedio
1	50	49.4	1800	3.71E-06	0.48	0.482	25.8	4.70
2	45	44.5	1800	3.43E-06	0.52	0.401	24.7	4.23
3	40	39.7	1800	2.31E-06	0.27	0.241		3.77
4	35	34.9	3600	4.40E-07	0.07	0.080		3.31
5	30	30	5400	0.00E+00		0.000		2.84

ENSAYE CARGA VARIABLE								
	$\sigma_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	1.5			e	0.552	Promedio K [cm/s]	6.15E-07
Ensayo N°	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$\Delta t$ [s]	$K_T$ [cm/s]	$\Delta V_{out}$ [cm <sup>3</sup> ]	$\Delta V_{in}$ [cm <sup>3</sup> ]	Temperatura °C	Gradiente Hidráulico Promedio
1	50	49.7	1800	1.85E-06	0.24	0.241	25.8	4.71
2	45	44.9	5400	2.28E-07	0.1	0.080	24.7	4.25
3	40	39.95	1800	3.84E-07	0.03	0.040		3.78
4	35	35	3600	0.00E+00	0	0.000		3.31
5								

Consolidación								
$\sigma_c = 0.5$			$\sigma_c = 1$			$\sigma_c = 1.5$		
Tiempo [s]	$\Delta h$ [cm]	$\Delta V$ [cm <sup>3</sup> ]	Tiempo [s]	$\Delta h$ [cm]	$\Delta V$ [cm <sup>3</sup> ]	Tiempo [s]	$\Delta h$ [cm]	$\Delta V$ [cm <sup>3</sup> ]
0	50	0.00	0	50	0.00	0	50	0.00
15	46.3	2.97	15	49.2	0.64	15	49.7	0.24
30	45.1	3.93	30	48.1	1.53	30	49.5	0.40
60	43.3	5.38	60	48.6	1.12	60	49.4	0.48
120	40.4	7.71	120	48.1	1.53	120	49.2	0.64
180	38.4	9.31	180	47.8	1.77	180	49	0.80
240	36.6	10.76	240	47.5	2.01	300	48.9	0.88
300	35	12.04	300	47.2	2.25	480	48.8	0.96
480	30.9	15.33	480	46.9	2.49	600	48.8	0.96
900	23.7	21.11	600	46.7	2.65	900	48.6	1.12
1200	19.6	24.40	900	46.5	2.81	1200	48.6	1.12
1800	13	29.70	1200	46.4	2.89	1800	48.5	1.20
2700	8.3	33.48	1800	46.2	3.05	2700	48.4	1.28
3600	7.7	33.96	2700	46	3.21	3600	48.3	1.36
5400	7.4	34.20	3600	45.9	3.29	5400	48.2	1.44
6300	7.3	34.28	5400	45.8	3.37	7200	48	1.61
68400	3.8	37.09	7200	45.5	3.61	66600	45.8	3.37
72000	3.8	37.09	9000	45.4	3.69	68400	45.8	3.37
			241200	34.4	12.52			

3. 33% Finos Agua Potable

<b>Datos de Confección</b>		
Diámetro Muestra	5.10	[cm]
Altura Muestra	10.32	[cm]
Área Muestra	20.43	[cm <sup>2</sup> ]
Volumen Muestra	210.82	[cm <sup>3</sup> ]
Diámetro Tubo Capilar	1.01	[cm]
Área Tubo Capilar	0.80	[cm <sup>2</sup> ]
Humedad Inicial	30%	[%]
e inicial	1.12	[ ]
e final	0.55	[ ]
Densidad Seca Inicial	1.32	[gr/cm <sup>3</sup> ]
Gs	2.80	[ ]

ENSAYE CARGA VARIABLE								
	$\sigma_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	0.5	Consolidación		e	0.917	Promedio K [cm/s]	1.02E-05
Ensayo N°	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$\Delta t$ [s]	$K_T$ [cm/s]	$\Delta V_{out}$ [cm <sup>3</sup> ]	$\Delta V_{in}$ [cm <sup>3</sup> ]	Temperatura °C	Gradiente Hidráulico Promedio
1	50	47.6	1800	1.11E-05	2.61	1.927	21.4	4.73
2	45	42.6	1800	1.23E-05	2.23	1.927	21.5	4.24
3	40	38.5	1800	8.61E-06	1.51	1.204		3.80
4	35	33.5	1800	9.87E-06	1.43	1.204		3.32
5	30	28.8	1800	9.20E-06	1.11	0.963		2.85

ENSAYE CARGA VARIABLE								
	$\sigma_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	1	Consolidación			0.576	Promedio K [cm/s]	1.67E-06
Ensayo N°	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$\Delta t$ [s]	$K_T$ [cm/s]	$\Delta V_{out}$ [cm <sup>3</sup> ]	$\Delta V_{in}$ [cm <sup>3</sup> ]	Temperatura °C	Gradiente Hidráulico Promedio
1	50	49.1	1800	4.09E-06	0.94	0.722	22.1	4.80
2	45	44.6	1800	2.01E-06	0.31	0.321	22.3	4.34
3	40	39.7	3600	8.48E-07	0.2	0.241		3.86
4	35	34.9	1800	6.45E-07	0.07	0.080		3.39
5	30	29.9	1800	7.52E-07	0.02	0.080		2.90

ENSAYE CARGA VARIABLE								
$\sigma_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	1.5	Consolidación			e	0.549	Promedio K [cm/s]	4.27E-07
Ensayo N°	h <sub>1</sub> [cm]	h <sub>2</sub> [cm]	$\Delta t$ [s]	K <sub>T</sub> [cm/s]	$\Delta V_{out}$ [cm <sup>3</sup> ]	$\Delta V_{in}$ [cm <sup>3</sup> ]	Temperatura °C	Gradiente Hidráulico Promedio
1	50	49.8	1800	9.03E-07	0.4	0.161	20.8	4.84
2	45	44.9	1800	5.01E-07	0.02	0.080	21.3	4.36
3	40	39.9	7200	1.41E-07	0.09	0.080		3.87
4	35	34.9	7200	1.61E-07	0.04	0.080		3.39

Consolidación								
$\sigma_c = 0.5$			$\sigma_c = 1$			$\sigma_c = 1.5$		
Tiempo [s]	$\Delta h$ [cm]	$\Delta V$ [cm <sup>3</sup> ]	Tiempo [s]	$\Delta h$ [cm]	$\Delta V$ [cm <sup>3</sup> ]	Tiempo [s]	$\Delta h$ [cm]	$\Delta V$ [cm <sup>3</sup> ]
0	50	0.00	0	50	0.00	0	50	0.00
15	40.4	7.71	15	49.1	0.72	15	49.6	0.32
30	39.3	8.59	30	48.8	0.96	30	49.4	0.48
60	36.1	11.16	60	48.5	1.20	60	49.2	0.64
120			120	48.3	1.36	120	49	0.80
180	30	16.06	180	48.2	1.44	180	49	0.80
240	26.5	18.87	240	48.2	1.44	300	49	0.80
300	23.7	21.11	300	48.1	1.53	480	48.9	0.88
480	23.4	21.35	480	48.1	1.53	600	48.9	0.88
600	23.1	21.59	600	48.1	1.53	900	48.8	0.96
900	23	21.67	900	48	1.61	1200	48.8	0.96
1200	22.9	21.76	1200	48	1.61	1800	48.8	0.96
1800	22.9	21.76	1800	47.9	1.69	2700	48.7	1.04
2700			2700	47.9	1.69	244800	46	3.21
3600	22.8	21.84	3600	47.8	1.77			
5400	22.8	21.84	64800	46.5	2.81			
7200					40.14			
10800	22.6	22.00			40.14			
14400	22.5	22.08			40.14			
18000	22.4	22.16			40.14			
21600	22.2	22.32			40.14			
90000	20.8	23.44			40.14			

4. 33% Finos Agua de Mar

<b>Datos de Confección</b>		
Diámetro Muestra	4.89	[cm]
Altura Muestra	10.34	[cm]
Área Muestra	18.78	[cm <sup>2</sup> ]
Volumen Muestra	194.19	[cm <sup>3</sup> ]
Diámetro Tubo Capilar	1.01	[cm]
Área Tubo Capilar	0.80	[cm <sup>2</sup> ]
Humedad Inicial	31%	[%]
e inicial	0.79	[ ]
e final	0.00	[ ]
Densidad Seca Inicial	1.56	[gr/cm <sup>3</sup> ]
Gs	2.80	[ ]



ENSAYE CARGA VARIABLE								
	$\sigma_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	0.5	Consolidación		e	0.581	Promedio K [cm/s]	2.08E-06
Ensayo N°	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$\Delta t$ [s]	$K_T$ [cm/s]	$\Delta V_{out}$ [cm <sup>3</sup> ]	$\Delta V_{in}$ [cm <sup>3</sup> ]	Temperatura °C	Gradiente Hidráulico Promedio
1	50	48.3	3600	4.25E-06	8.57	1.719	22.3	4.75
2	45	44.1	3600	2.48E-06	1.1	0.910	22.3	4.31
3	40	39.6	3600	1.23E-06	0.22	0.404		3.85
4	35	34.9	3600	3.51E-07	0.13	0.101		3.38
5	30	30	3600		0	0.000		2.90

ENSAYE CARGA VARIABLE								
	$\sigma_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	1	Consolidación			0.562	Promedio K [cm/s]	9.30E-07
Ensayo N°	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$\Delta t$ [s]	$K_T$ [cm/s]	$\Delta V_{out}$ [cm <sup>3</sup> ]	$\Delta V_{in}$ [cm <sup>3</sup> ]	Temperatura °C	Gradiente Hidráulico Promedio
1	50	49.4	1800	2.96E-06	0.34	0.607	23.6	4.81
2	45	44.9	3600	2.73E-07	0.05	0.101	25	4.35
3	40	39.9	3600	3.07E-07	0.04	0.101		3.86
4	35	34.95	3600	1.76E-07	0	0.051		3.38
5	30	30	3600		0	0.000		2.90

ENSAYE CARGA VARIABLE								
$\sigma_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	1.5	Consolidación			e	0.530	Promedio K [cm/s]	6.64E-07
Ensayo N°	h <sub>1</sub> [cm]	h <sub>2</sub> [cm]	$\Delta t$ [s]	K <sub>T</sub> [cm/s]	$\Delta V_{out}$ [cm <sup>3</sup> ]	$\Delta V_{in}$ [cm <sup>3</sup> ]	Temperatura °C	Gradiente Hidráulico Promedio
1	50	49.1	3600	2.23E-06	0.11	0.910	23.3	4.79
2	45	44.9	3600	2.73E-07	0.08	0.101	23.3	4.35
3	40	39.95	3600	1.54E-07	0.08	0.051		3.87
4	35	35	3600		0	0.000		3.38
	30	30	3600	0.00E+00	0	0.000		2.90

Consolidación								
Sc =0.5			Sc =1			Sc =1.5		
Tiempo [s]	$\Delta h$ [cm]	$\Delta V$ [cm <sup>3</sup> ]	Tiempo [s]	$\Delta h$ [cm]	$\Delta V$ [cm <sup>3</sup> ]	Tiempo [s]	$\Delta h$ [cm]	$\Delta V$ [cm <sup>3</sup> ]
0	50	0.00	0	50	0.00	0	50	0.00
15	38.6	9.15	15	49.5	0.40	15	49.6	0.32
30	35.9	11.32	30	48.8	0.96	30	49.4	0.48
60	31.9	14.53	60	48.5	1.20	60	49.3	0.56
120	27	18.46	120			120	49.3	0.56
180	25.4	19.75	180	48.2	1.44	180	49.2	0.64
240	25	20.07	300	48.1	1.53	300	49.1	0.72
300	24.7	20.31	480	48.1	1.53	480	49.1	0.72
480	24.5	20.47	600	48.1	1.53	600	49	0.80
600	24.5	20.47	900	48	1.61	900	49	0.80
900	24.4	20.55	1200	48	1.61	1200	49	0.80
1200	24.3	20.63	1800	48	1.61	1800	48.9	0.88
1800	24.2	20.71	2700	47.9	1.69	2700	48.9	0.88
2700	24.1	20.79	3600	47.8	1.77	3600	48.8	0.96
3600	23.9	20.95	5400	47.7	1.85	5400	48.7	1.04
5400	23.5	21.27	7200	47.5	2.01	7200	48.5	1.20
7200	23.2	21.51	10800	47.3	2.17	66600	45.2	3.85
72000	18.9	24.97	14400	47.1	2.33	68400	45.2	3.85
			18000	46.9	2.49			
			25200	46.4	2.89			
			86400	44	4.82			

5. 80% Proctor wet tamping, 55% Finos, Agua Potable.

<b>Datos de Confección</b>		
Diámetro Muestra	5.01	[cm]
Altura Muestra	10.27	[cm]
Área Muestra	19.73	[cm <sup>2</sup> ]
Volumen Muestra	202.66	[cm <sup>3</sup> ]
Peso Material	361.71	[gr]
Peso por Capa	72.34	[gr]
Diámetro Tubo Capilar	1.01	[cm]
Área Tubo Capilar	0.80	[cm <sup>2</sup> ]
Humedad Inicial	15%	[%]
Humedad Final	17%	[%]
Densidad Húmeda	2.00	[gr/cm <sup>3</sup> ]
Densidad Seca	1.74	[gr/cm <sup>3</sup> ]
Grado de Compactación	80%	[%]
Temperatura del Agua	19.40	[°C]
Densidad del Agua	1.00	[gr/cm <sup>3</sup> ]
Gs	2.80	

ENSAYE CARGA VARIABLE						
$\sigma_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	0.50	Consolidación	$\Delta V$ [cc]	2.48	e	0.59
Ensayo N°	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$\Delta t$ [s]	$K_T$ [cm/s]	$\Delta V_{out}$ [cc]	$\Delta V_{in}$ [cc]
1.00	50.00	47.80	1200.00	1.57E-05	2.21	1.77
2.00	45.00	43.50	1380.00	1.03E-05	1.55	1.20
3.00	40.00	36.30	3682.00	1.10E-05	3.78	2.97
4.00	35.00	32.30	2260.00	1.48E-05	2.93	2.17
5.00						

ENSAYE CARGA VARIABLE						
$\sigma_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	1.00	Consolidación	$\Delta V$ [cc]	2.30	e	0.57
Ensayo N°	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$\Delta t$ [s]	$K_T$ [cm/s]	$\Delta V_{out}$ [cc]	$\Delta V_{in}$ [cc]
1.00	50.00	47.50	2147.00	9.99E-06	2.53	2.01
2.00	50.00	49.30	600.00	9.82E-06	0.72	0.56
3.00	45.00	44.20	665.00	1.13E-05	0.70	0.64
4.00	40.00	39.40	600.00	1.05E-05	0.52	0.48
5.00	35.00	34.60	600.00	8.01E-06	0.41	0.32
	30.00	29.60	600.00	9.35E-06	0.32	0.32

ENSAYE CARGA VARIABLE						
$\sigma_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	1.50	Consolidación	$\Delta V$ [cc]	1.91	e	0.55
Ensayo N°	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$\Delta t$ [s]	$K_T$ [cm/s]	$\Delta V_{out}$ [cm <sup>3</sup> ]	$\Delta V_{in}$ [cm <sup>3</sup> ]
1.00	50.00	49.50	600.00	7.00E-06	0.42	0.40
2.00	45.00	44.60	600.00	6.22E-06	0.49	0.32
3.00	40.00	39.50	705.00	7.46E-06	0.62	0.40
4.00	35.00	34.70	600.00	6.00E-06	0.37	0.24
5.00	30.00	29.70	600.00	7.00E-06	0.26	0.24

ENSAYE CARGA VARIABLE						
$\sigma_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	2.00	Consolidación	$\Delta V$ [cc]	1.70	e	0.54
Ensayo N°	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$\Delta t$ [s]	$K_T$ [cm/s]	$\Delta V_{out}$ [cm <sup>3</sup> ]	$\Delta V_{in}$ [cm <sup>3</sup> ]
1.00	50.00	49.50	720.00	5.83E-06	0.32	0.40
2.00	45.00	44.50	1025.00	4.56E-06	0.49	0.40
3.00	40.00	39.80	600.00	3.49E-06	0.22	0.16
4.00	35.00	34.75	652.00	4.60E-06	0.04	0.20
5.00	30.00	29.90	600.00	2.33E-06		0.08

ENSAYE CARGA VARIABLE						
$\sigma_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	3.00	Consolidación	$\Delta V$ [cc]	1.70	e	0.52
Ensayo N°	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$\Delta t$ [s]	$K_T$ [cm/s]	$\Delta V_{out}$ [cm <sup>3</sup> ]	$\Delta V_{in}$ [cm <sup>3</sup> ]
1.00	50.00	49.80	600.00	2.79E-06	0.08	0.16
2.00	45.00	44.95	720.00	6.45E-07	0.16	0.04
3.00	40.00	39.90	1200.00	8.72E-07	0.17	0.08
4.00	35.00	34.95	1328.00	4.50E-07	0.09	0.04
5.00	30.00	29.95	1200.00	5.81E-07	0.06	0.04

ENSAYE CARGA VARIABLE						
$\sigma_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	4.00	Consolidación	$\Delta V$ [cc]	1.26	e	0.51
Ensayo N°	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$\Delta t$ [s]	$K_T$ [cm/s]	$\Delta V_{out}$ [cm <sup>3</sup> ]	$\Delta V_{in}$ [cm <sup>3</sup> ]
1.00	50.00	44.50	14400.00	3.38E-06	0.70	4.42
2.00	45.00	44.90	1800.00	5.17E-07	0.10	0.08
3.00	40.00	39.80	1200.00	1.75E-06	0.12	0.16
4.00	50.00	41.40	61200.00	1.29E-06	2.82	6.90
5.00	50.00	49.95	1200.00	3.48E-07	0.90	0.04
	45.00	44.90	1200.00	7.75E-07	0.05	0.08
	30.00	29.90	1440.00	9.69E-07	0.04	0.08

6. 90% Proctor wet tamping, 55% Finos, Agua Potable.

<b>Datos de Confección</b>		
Diámetro Muestra	5.01	[cm]
Altura Muestra	10.27	[cm]
Área Muestra	19.73	[cm <sup>2</sup> ]
Volumen Muestra	202.66	[cm <sup>3</sup> ]
Peso Material	67.07	[gr]
Peso por Capa	335.34	[gr]
Diámetro Tubo Capilar	1.01	[cm]
Área Tubo Capilar	0.80	[cm <sup>2</sup> ]
Humedad Inicial	15%	[%]
Humedad Final	19.6%	[%]
Densidad Húmeda	1.90	[gr/cm <sup>3</sup> ]
Densidad Seca	1.65	[gr/cm <sup>3</sup> ]
Grado de Compactación	90%	[%]
Temperatura del Agua	19.6	[°C]
Densidad del Agua	1	[gr/cm <sup>3</sup> ]
Gs	2.84	



ENSAYE CARGA VARIABLE						
	$\sigma_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	0.5		e	0.700	
Ensayo N°	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$\Delta t$ [s]	$K_T$ [cm/s]	$\Delta V_{out}$ [cc]	$\Delta V_{in}$ [cm <sup>3</sup> ]
1	50	41.3	3000	2.66325E-05	9.16	6.98411602
2	40	31.1	3900	2.69715E-05	8.92	7.14467041
3	30	27.2	3600	1.13755E-05	2.74	2.24776148
4	25	23.4	3600	7.67884E-06	1.48	1.28443513

ENSAYE CARGA VARIABLE						
	$\sigma_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	1		e	0.686	
Ensayo N°	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$\Delta t$ [s]	$K_T$ [cm/s]	$\Delta V_{out}$ [cc]	$\Delta V_{in}$ [cm <sup>3</sup> ]
1	50	47.2	1800	1.33815E-05	2.75	2.24776148
2	45	42.3	1800	1.43675E-05	2.79	2.16748428
3	40	37.3	1800	1.62276E-05	2.71	2.16748428
4	35	33.4	1800	1.08652E-05	1.54	1.28443513
5	30	28.4	2400	9.54486E-06	1.63	1.28443513

ENSAYE CARGA VARIABLE						
	$\sigma_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	2		e	0.665	
Ensayo N°	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$\Delta t$ [s]	$K_T$ [cm/s]	$\Delta V_{out}$ [cc]	$\Delta V_{in}$ [cm <sup>3</sup> ]
1	50	46.5	1800	1.68509E-05	3.44	2.80970185
2	45	43.2	2100	8.12475E-06	1.77	1.44498952
3	40	38.1	2400	8.47505E-06	0.92	1.52526672
4	35	34.1	1800	6.04897E-06	0.57	0.72249476
5	30	29.5	1800	3.90262E-06	0.34	0.40138598

ENSAYE CARGA VARIABLE						
	$\sigma_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	3		e	0.619	
Ensayo N°	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$\Delta t$ [s]	$K_T$ [cm/s]	$\Delta V_{out}$ [cc]	$\Delta V_{in}$ [cm <sup>3</sup> ]
1	50	49.1	1800	4.21768E-06	1.07	0.72249476
2	45	44.6	1800	2.07323E-06	0.45	0.32110878
3	40	39.7	2400	1.31105E-06	0.41	0.24083159
4	35	34.8	1800	1.33066E-06	0.16	0.16055439
5	30	29.9	4800	2.90735E-07	0.15	0.0802772

Consolidación														
Sc =0.5			Sc =1			Sc =2			Sc =3			Sc =4		
Tiempo [s]	$\Delta h$ [cm]	$\Delta V$ [cm <sup>3</sup> ]	Tiempo [s]	$\Delta h$ [cm]	$\Delta V$ [cm <sup>3</sup> ]	Tiempo [s]	$\Delta h$ [cm]	$\Delta V$ [cm <sup>3</sup> ]	Tiempo [s]	$\Delta h$ [cm]	$\Delta V$ [cm <sup>3</sup> ]	Tiempo [s]	$\Delta h$ [cm]	$\Delta V$ [cm <sup>3</sup> ]
0	50	0.00	0	50	0.00	0	50	0.00	0	50	0.00	0	17	0.00
6	49.95	0.04	60	49.4	0.48	30	49.4	0.48	15	49.5	0.40	15	16.3	0.56
60	49.9	0.08	300	49.4	0.48	4560	49	0.80	60	49.4	0.48	30	16.2	0.64
240	49.85	0.12	600	49.4	0.48	12000	48.8	0.96	210	49.3	0.56	60	16	0.80
1500	49.8	0.16	1800	49.3	0.56	16500	48.6	1.12	4920	48.9	0.88	120	15.9	0.88
5400	49.7	0.24	8100	49.1	0.72	74100	47	2.41	12000	48.6	1.12	300	15.8	0.96
7200	49.65	0.28	63600	47.9	1.69				238620	43.3	5.38	600	15.6	1.12
12600	49.4	0.48										1800	15.5	1.20
16200	49.3	0.56										2700	15.4	1.28
21600	49.1	0.72										3600	15.4	1.28
25200	49	0.80										5400	15.3	1.36
32400	48.8	0.96										7200	15.2	1.44
86400	47.7	1.85										10800	15	1.61
												14400	15	1.61
												18000	15	1.61
												73800	14	2.41
												86400	13.7	2.65

7. 85% Proctor wet tamping, 55% Finos, Agua Potable.

<b>Datos de Confección</b>		
Diámetro Muestra	5.01	[cm]
Altura Muestra	10.27	[cm]
Área Muestra	19.73	[cm <sup>2</sup> ]
Volumen Muestra	202.66	[cm <sup>3</sup> ]
Peso Material	361.71	[gr]
Peso por Capa	72.34	[gr]
Diámetro Tubo Capilar	1.01	[cm]
Área Tubo Capilar	0.80	[cm <sup>2</sup> ]
Humedad Inicial	5%	[%]
Humedad Final	19.6%	[%]
Densidad Húmeda	1.85	[gr/cm <sup>3</sup> ]
Densidad Seca	1.61	[gr/cm <sup>3</sup> ]
Grado de Compactación	85%	[%]
Temperatura del Agua	19.1	[°C]
Densidad del Agua	1	[gr/cm <sup>3</sup> ]
Gs	2.84	

ENSAYE CARGA VARIABLE						
$\sigma_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	0.5	Consolidación	$\Delta V$ [cc]	11.32	e	0.665
Ensayo N°	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$\Delta t$ [s]	$K_T$ [cm/s]	$\Delta V_{out}$ [cc]	$\Delta V_{in}$ [cc]
1	50	48.8	1200	8.46E-06	1.23	0.963
2	45	43.9	1200	8.62E-06	1.21	0.883
3	40	39	1200	8.82E-06	1.09	0.803
4	35	34.1	1200	9.07E-06	1.04	0.722
5	30	29.2	1200	9.41E-06	0.8	0.642

ENSAYE CARGA VARIABLE						
$\sigma_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	1	Consolidación	$\Delta V$ [cc]	4.37	e	0.627
Ensayo N°	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$\Delta t$ [s]	$K_T$ [cm/s]	$\Delta V_{out}$ [cc]	$\Delta V_{in}$ [cc]
1	50	49	1500	5.63E-06	1.08	0.803
2	45	44.9	1800	5.17E-07	1.18	0.080
3	40	39.2	1500	5.63E-06	0.9	0.642
4	35	34.5	1200	5.01E-06	0.62	0.401
5	30	29.5	1200	5.85E-06	0.57	0.401

ENSAYE CARGA VARIABLE						
$\sigma_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	2	Consolidación	$\Delta V$ [cc]	1.91	e	0.611
Ensayo N°	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$\Delta t$ [s]	$K_T$ [cm/s]	$\Delta V_{out}$ [cc]	$\Delta V_{in}$ [cc]
1	50	49.2	1200	5.62E-06	0.7	0.642
2	45	44.5	1200	3.89E-06	0.41	0.401
3	40	39.8	1200	1.75E-06	0.21	0.161
4	35	34.8	1200	2.00E-06	0.62	0.161
5	30	29.8	1200	2.33E-06	0.49	0.161

ENSAYE CARGA VARIABLE						
$\sigma_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	3	Consolidación	$\Delta V$ [cc]	1.7	e	0.596
Ensayo N°	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$\Delta t$ [s]	$K_T$ [cm/s]	$\Delta V_{out}$ [cc]	$\Delta V_{in}$ [cc]
1	50	49.4	1500	3.36E-06	0.6	0.482
2	45	44.8	1500	1.24E-06	0.25	0.161
3	40	39.9	1500	6.97E-07	0.2	0.080
4	35	35	1500	0.00E+00	0.12	0.000
5	30	30	1500	0.00E+00	0.17	0.000

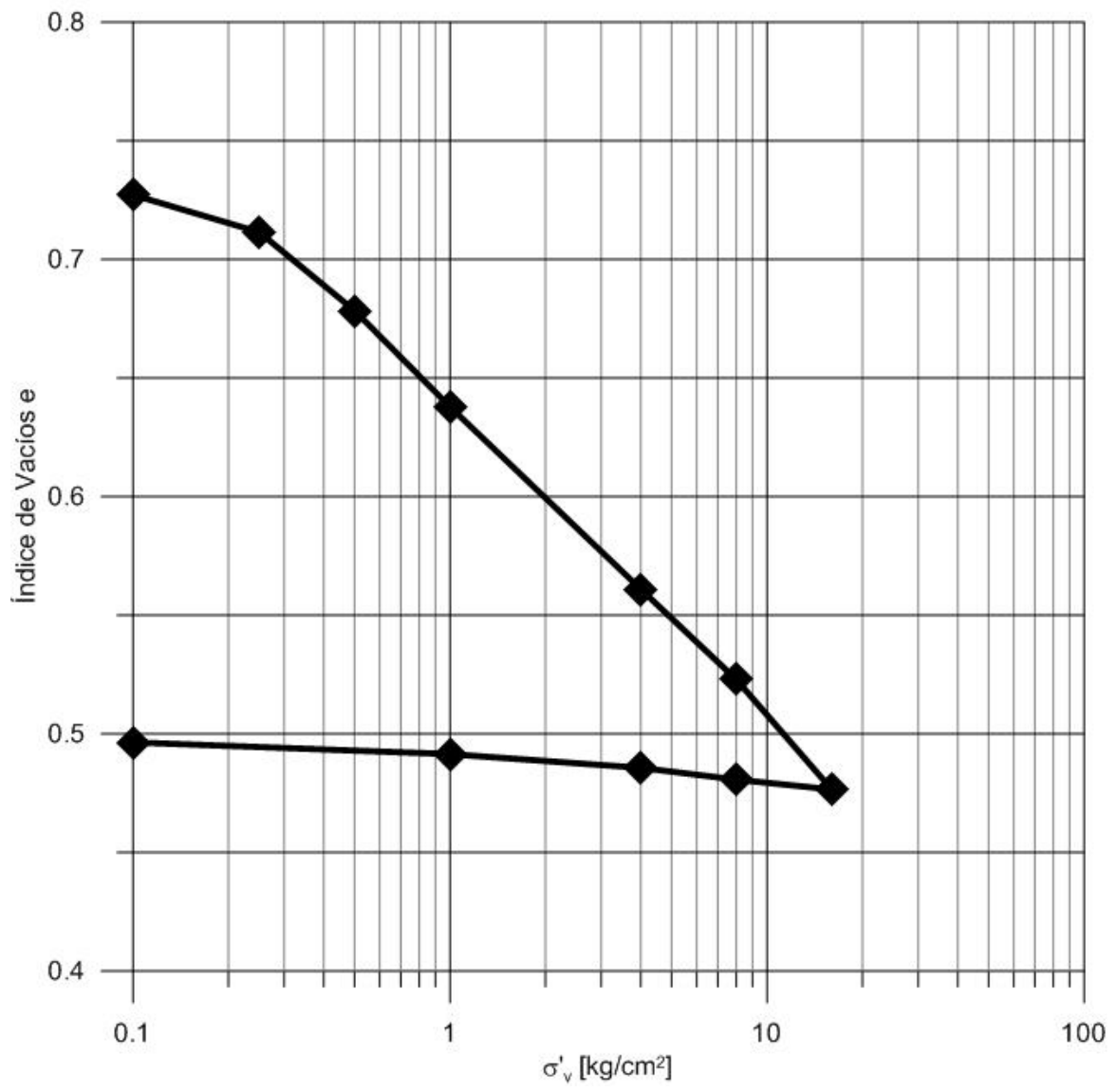
## ANEXO C ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN

### 1. 55% Finos Agua Potable

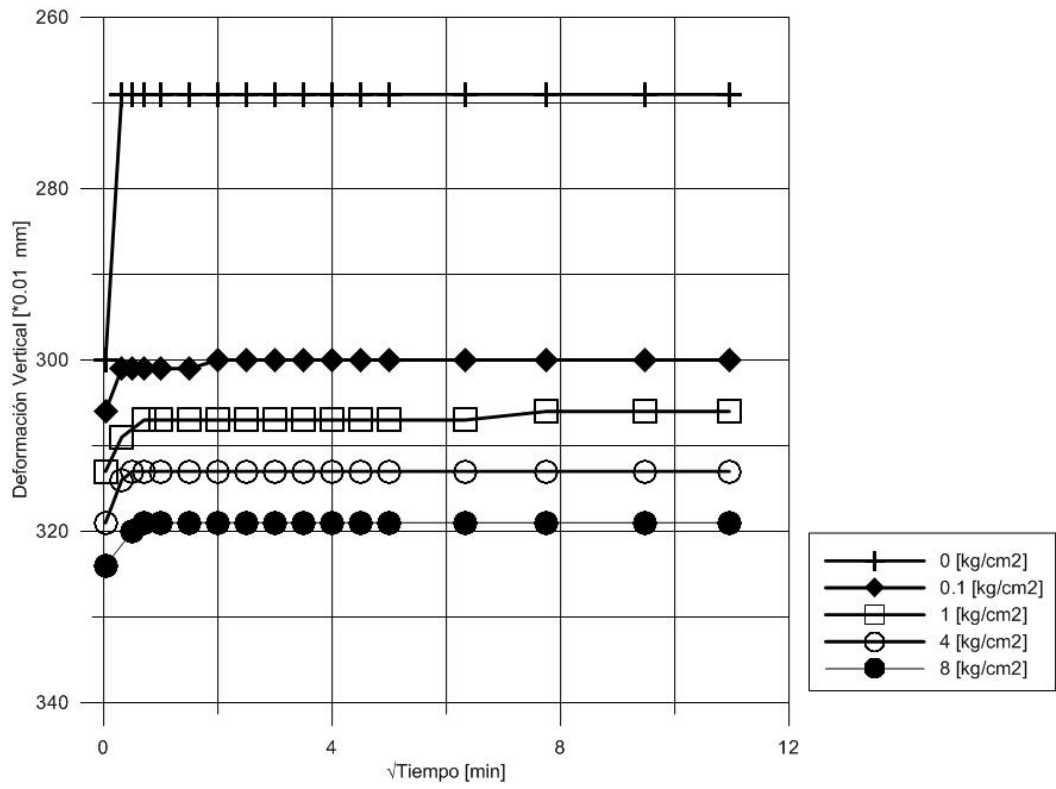
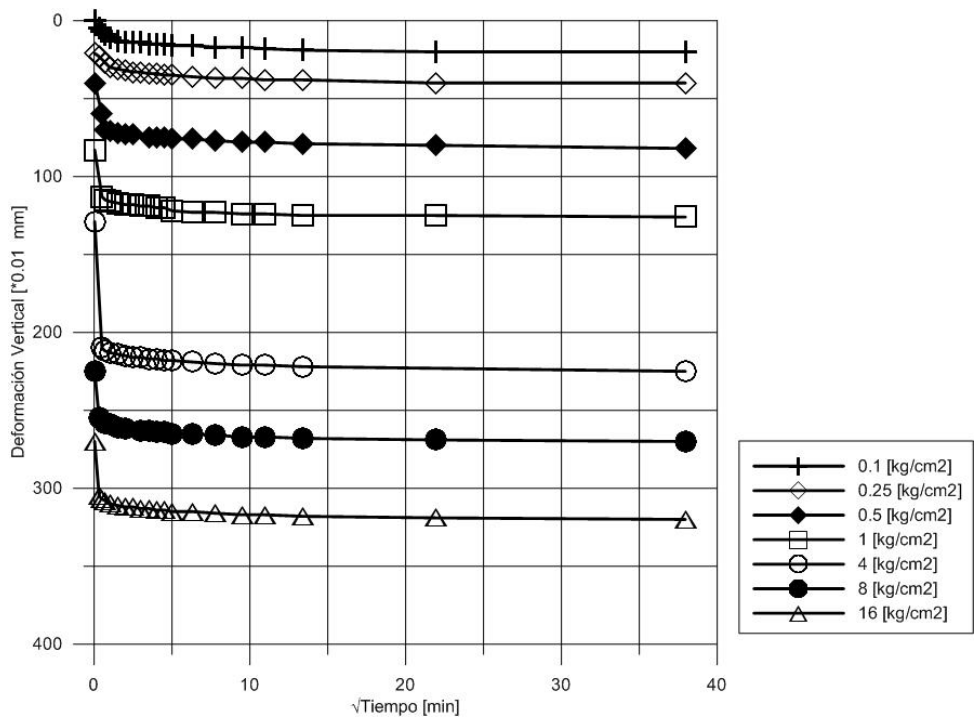
DATOS INICIALES		
Área probeta	[cm <sup>2</sup> ]	40.376
Altura muestra	[cm]	2.109
Peso específico		2.84
Calibración Dial Deformación	[cm]	0.001

DATOS DE CONFECCION		Inicial	Final
Peso Suelo Húmedo	[g]	174.96	164.10
Peso Suelo Seco	[g]	138.62	138.62
Peso Unitario Húmedo	[ g/cm <sup>3</sup> ]	2.05	2.21
Humedad	[%]	26.22	18.38
Peso Unitario Seco	[g/cm <sup>3</sup> ]	1.63	1.87
Relación de Vacíos		0.74	0.52

Tiempo [min]	Tensión Vertical [kg/cm <sup>2</sup> ]											
	0.1	0.25	0.5	1	4*	8	16	8	4	1	0.1	0
0.00	0	21	40	83	129	225	270	324	319	313	306	300
0.10	5	23				255	305		314	309	301	269
0.25	7		60	113	210		307	320	313		301	269
0.50	9	27	70	115	212	258	308	319	313	307	301	269
1.00	11	30	71	116	213	259	310	319	313	307	301	269
2.25	13	31	72	117	214	261	311	319	313	307	301	269
4.00	14	32	73	118	215	262	312	319	313	307	300	269
6.25	14	33	73	118	216		312	319	313	307	300	269
9.00	14	33		119	216	263	313	319	313	307	300	269
12.25	15	34	75	119	217	263	313	319	313	307	300	269
16.00	15	34	75	120	217	264	314	319	313	307	300	269
20.25	15	35	75	120	218	264	314	319	313	307	300	269
25.00	16	35	76	122	218	265	315	319	313	307	300	269
40.00	16	36	76	123	219	265	315	319	313	307	300	269
60.00	17	37	77	123	220	266	316	319	313	306	300	269
90.00	17	37	78	124	221	267	317	319	313	306	300	269
120.00	18	38	78	124	221	267	317	319	313	306	300	269
180.00	19	38	79	125	222	268	318	319	313	306	300	269
480.00	20	40	80	125		269	319	319	313	306	300	269
1440.00	20	40	82	126	225	270	320	319	313	306	300	269
2880.00	21		83	129								
4320.00				129			324					
5760.00							324					





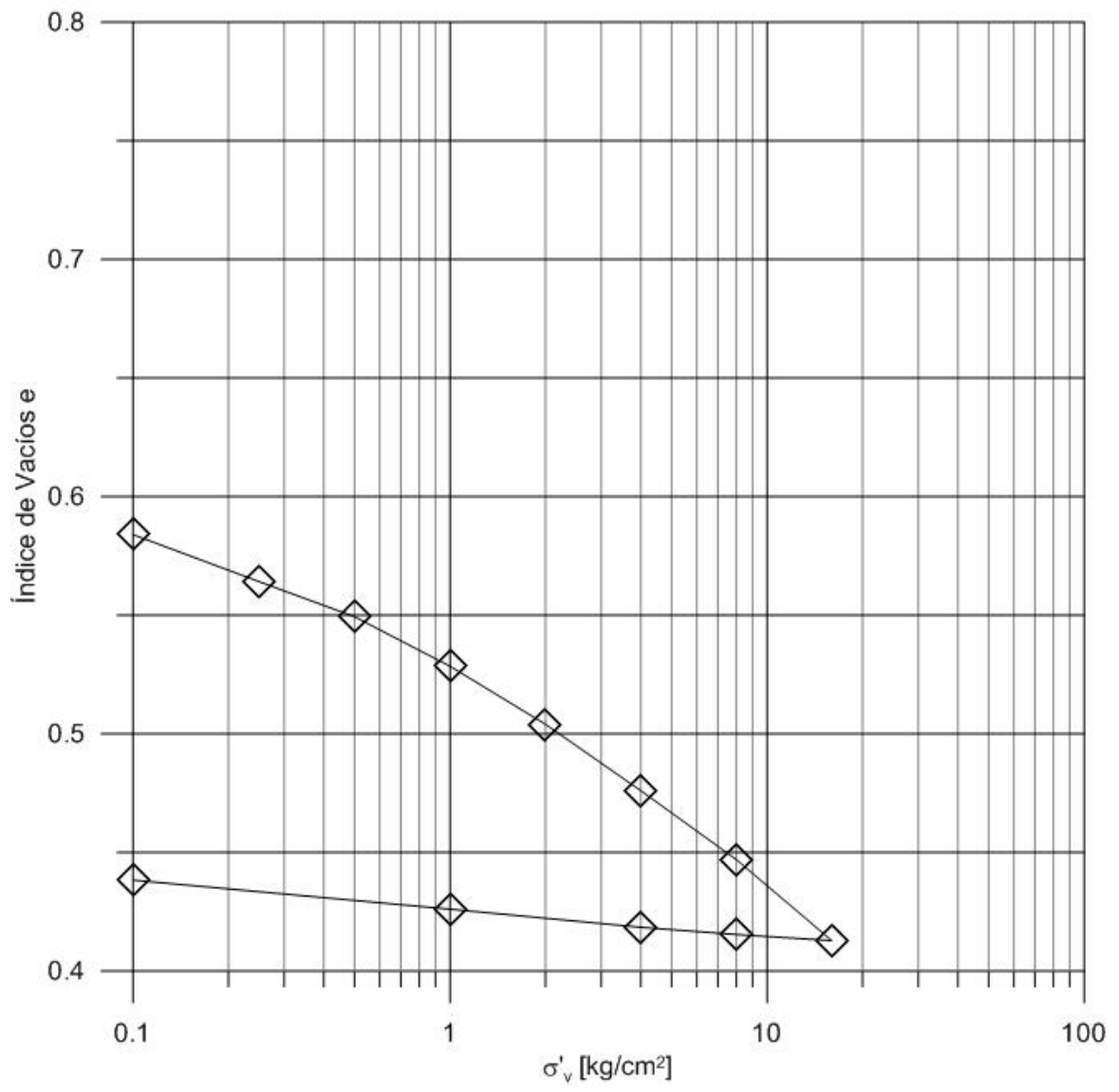


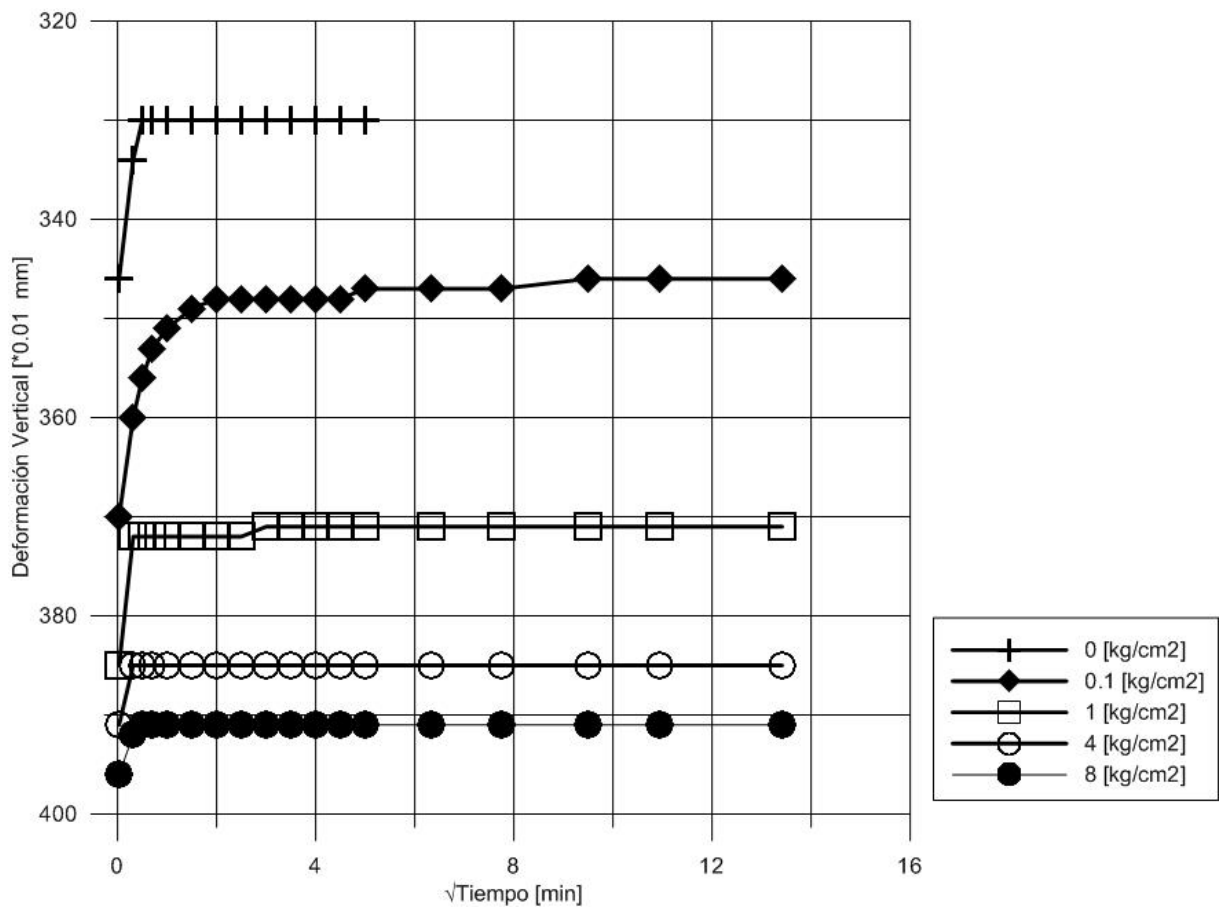
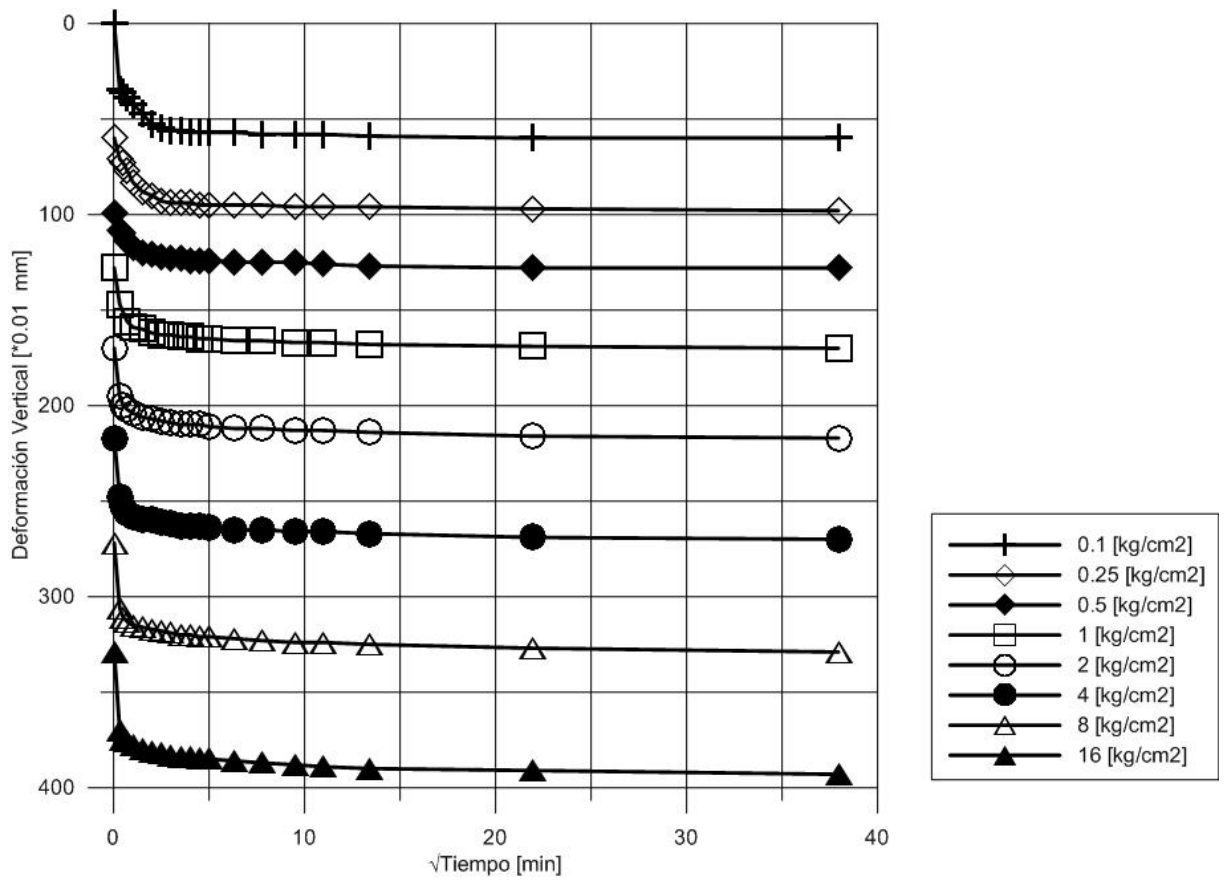
## 2. 55% Finos Agua de Mar

<i>DATOS INICIALES</i>		
Área probeta	[cm <sup>2</sup> ]	39.704
Altura muestra	[cm]	3.170
Peso específico		2.84
Calibración Dial Deformación	[cm]	0.001

<i>DATOS DE CONFECCION</i>		Inicial	Final
Peso Suelo Húmedo	[g]	269.29	256.19
Peso Suelo Seco	[g]	221.39	221.39
Peso Unitario Húmedo	[ g/cm <sup>3</sup> ]	2.14	2.27
Humedad	[%]	21.64	15.72
Peso Unitario Seco	[g/cm <sup>3</sup> ]	1.76	1.96
Relación de Vacíos		0.61	0.45

Tiempo	Tensión Vertical [kg/cm <sup>2</sup> ]												
	0.1	0.25	0.5	1	2	4	8	16	8	4	1	0.1	0
0.00	0	60	99	128	170	217	272	329	396	391	385	370	346
0.10	35	71	108	147	195	248	306	370	392	385	372	360	334
0.25	36	73	110		200	253	311	375	391	385	372	356	330
0.50	39	77	114	156	202	256	313	376	391	385	372	353	330
1.00	42	83	117	159	204	258	315	378	391	385	372	351	330
2.25	47	88	120	160	206	260	316	380	391	385	372	349	330
4.00	53	90	121	162	207	260	317	381	391	385	372	348	330
6.25	55	93	122	163	208	261	318	382	391	385	372	348	330
9.00	56	94	123	163	209	262	319	383	391	385	371	348	330
12.25	56	94	123	164	210	263	320	384	391	385	371	348	330
16.00	57	94	124	164	210	263	320	384	391	385	371	348	330
20.25	57	95	124	165	210	263	321	385	391	385	371	348	330
25.00	57	95	124	165	211	264	321	385	391	385	371	347	330
40.00	57	95	125	166	212	265	322	386	391	385	371	347	330
60.00	58	95	125	166	212	265	323	387	391	385	371	347	330
90.00	58	96	125	167	213	266	324	388	391	385	371	346	330
120.00	58	96	126	167	213	266	324	389	391	385	371	346	330
180.00	59	96	127	168	214	267	325	390	391	385	371	346	330
480.00	60	97	128	169	216	269	327	391	391	385	371		
1440.00	60	98	128	170	217	270	329	393	391	385	370		
2880.00	60					271							
4320.00		99				272							
5760.00		99				272		396					
7200.00		99						396					
8640.00								396					



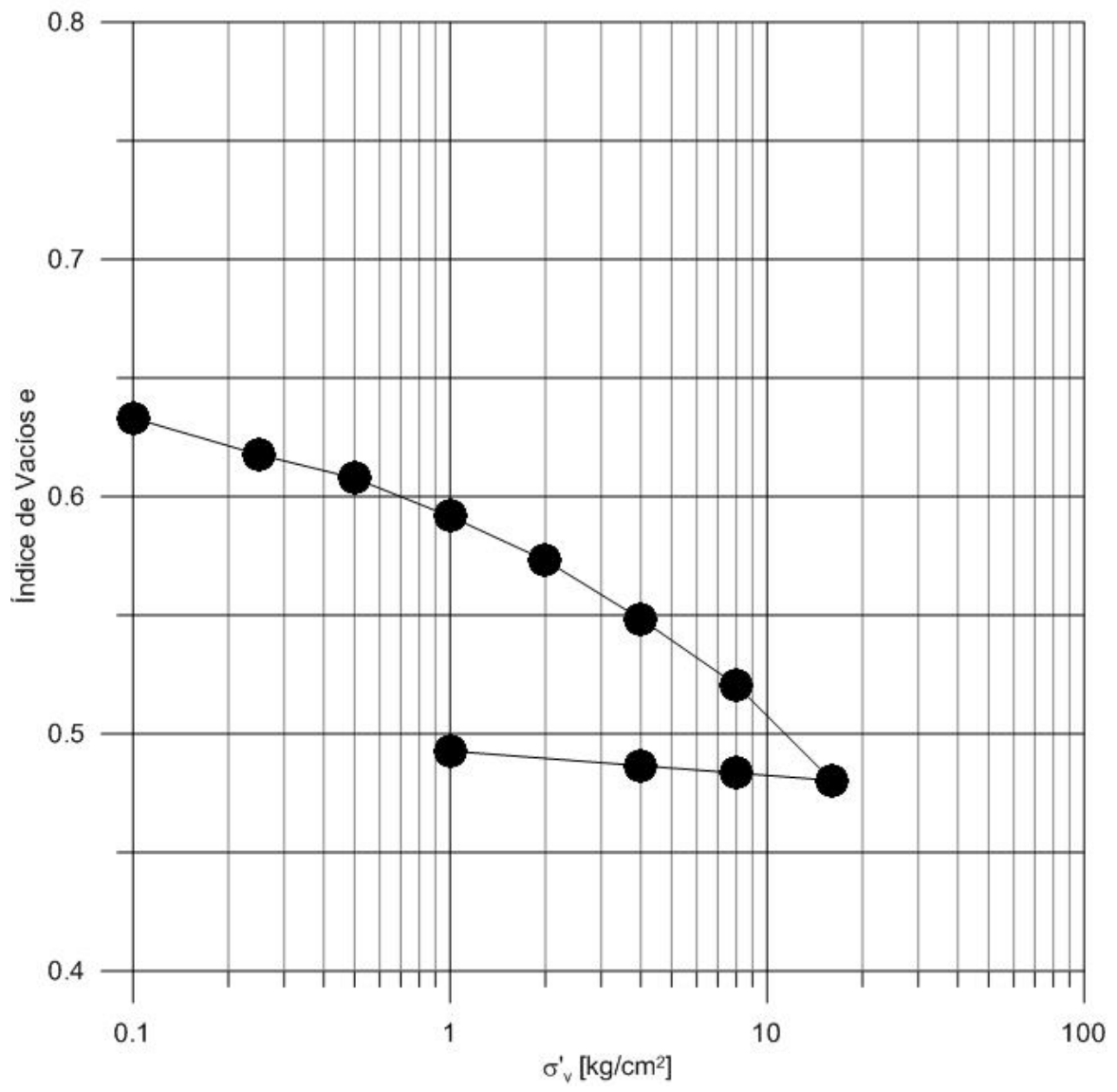


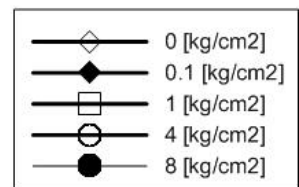
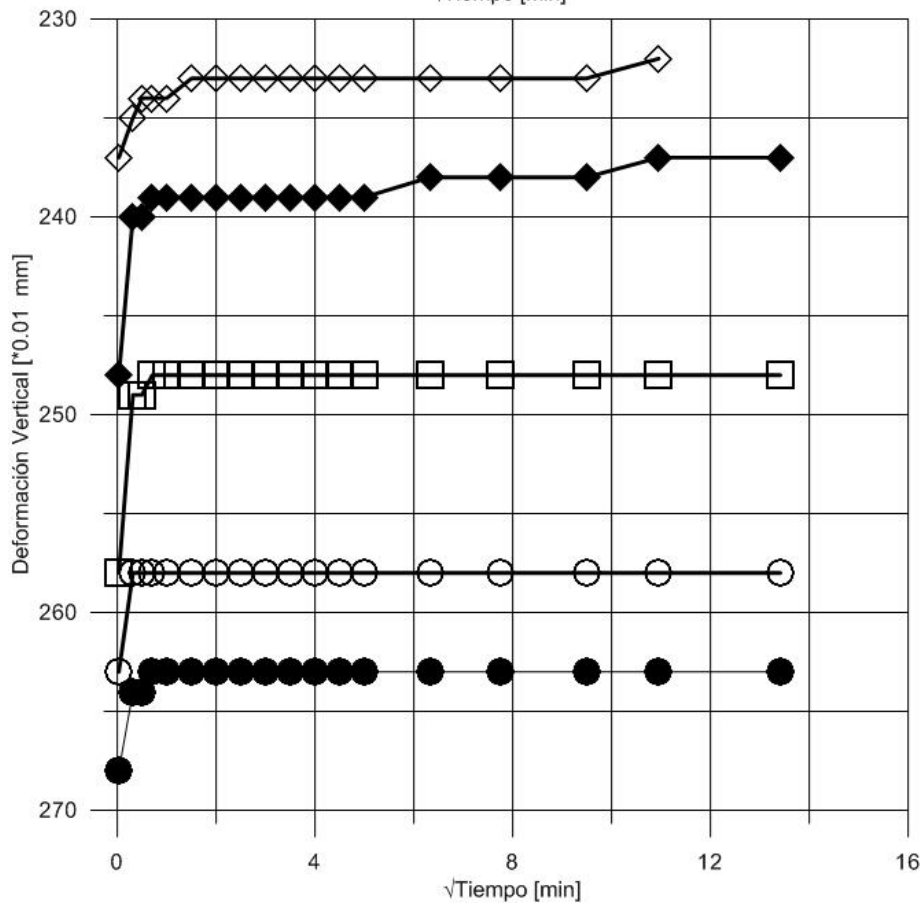
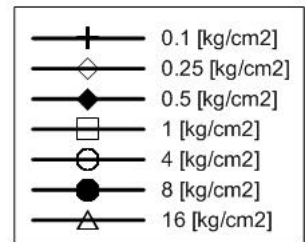
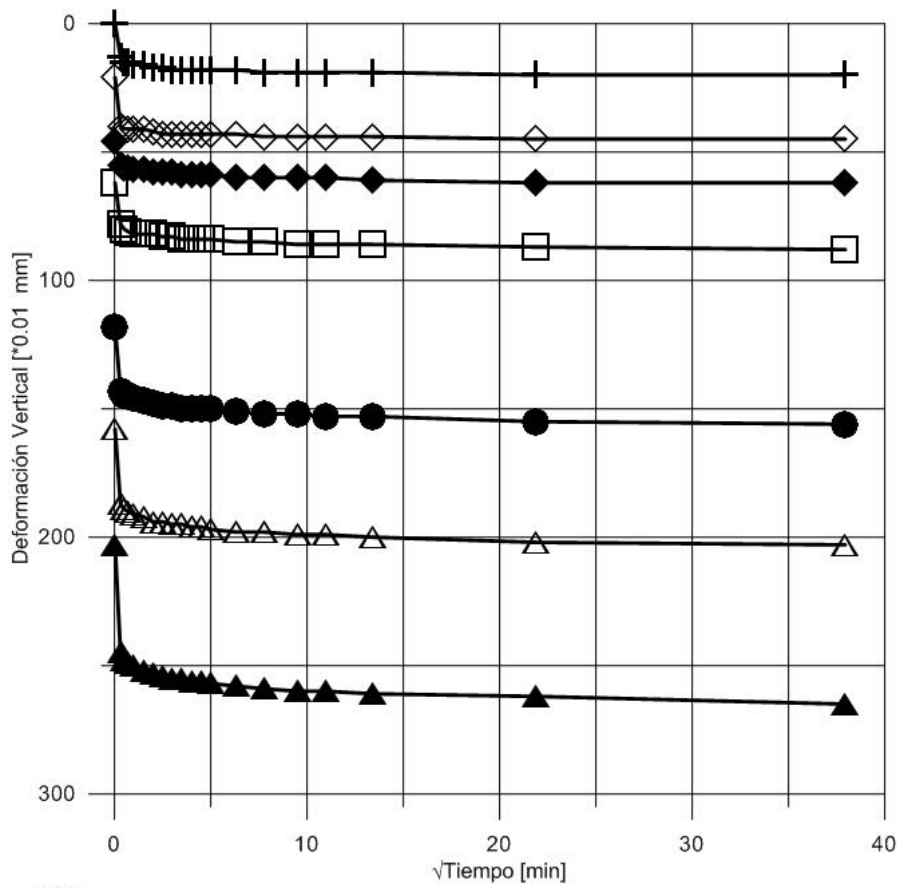
### 3. 33% Finos Agua Potable

<i>DATOS INICIALES</i>		
Área probeta	[cm <sup>2</sup> ]	40.152
Altura muestra	[cm]	2.662
Peso específico		2.80
Calibración Dial Deformación	[cm]	0.001

<i>DATOS DE CONFECCION</i>		Natural	Final
Peso Suelo Húmedo	[g]	223.76	214.44
Peso Suelo Seco	[g]	181.81	181.81
Peso Unitario Húmedo	[ g/cm <sup>3</sup> ]	2.09	2.20
Humedad	[%]	23.08	17.95
Peso Unitario Seco	[g/cm <sup>3</sup> ]	1.70	1.86
Relación de Vacíos		0.65	0.50

Tiempo [min]	Tensión Vertical [kg/cm <sup>2</sup> ]												
	0.1	0.25	0.5	1	2	4	8	16	8	4	1	0.1	0
0.00	0	21	46	62	88	118	158	203	268	263	258	248	237
0.10	13	40	55	78	107	143	187	245	264	258	249	240	235
0.25	15	41	56	80	108	145	189	248	264	258	249	240	234
0.50	15	41	56	81	109	145	190	249	263	258	248	239	234
1.00	16	41	57	82	110	146	191	250	263	258	248	239	234
2.25	16	41	57	82	111	147	192	252	263	258	248	239	233
4.00	17	42	58	82	111	148	194	253	263	258	248	239	233
6.25	17	43	58	83	112	149	194	254	263	258	248	239	233
9.00	18	43	58	83	112	149	195	255	263	258	248	239	233
12.25	18	43	59	84	113	150	195	255	263	258	248	239	233
16.00	18	43	59	84	113	150	196	256	263	258	248	239	233
20.25	18	43	59	84	113	150	196	256	263	258	248	239	233
25.00	18	43	59	84	113	150	197	257	263	258	248	239	233
40.00	18	43	60	85	114	151	198	258	263	258	248	238	233
60.00	19	44	60	85	114	152	198	259	263	258	248	238	233
90.00	19	44	60	86	115	152	199	260	263	258	248	238	233
120.00	19	44	60	86	115	153	199	260	263	258	248	237	232
180.00	19	44	61	86	116	153	200	261	263	258	248	237	232
480.00	20	45	62	87	117	155	202	262	263	258	248	237	232
1440.00	20	45	62	88	118	156	203	265	263	258	248	237	232
2880.00	21					157							
4320.00		46				158							
5760.00		46				158		268					
7200.00													
8640.00								268					
10080.00								268					





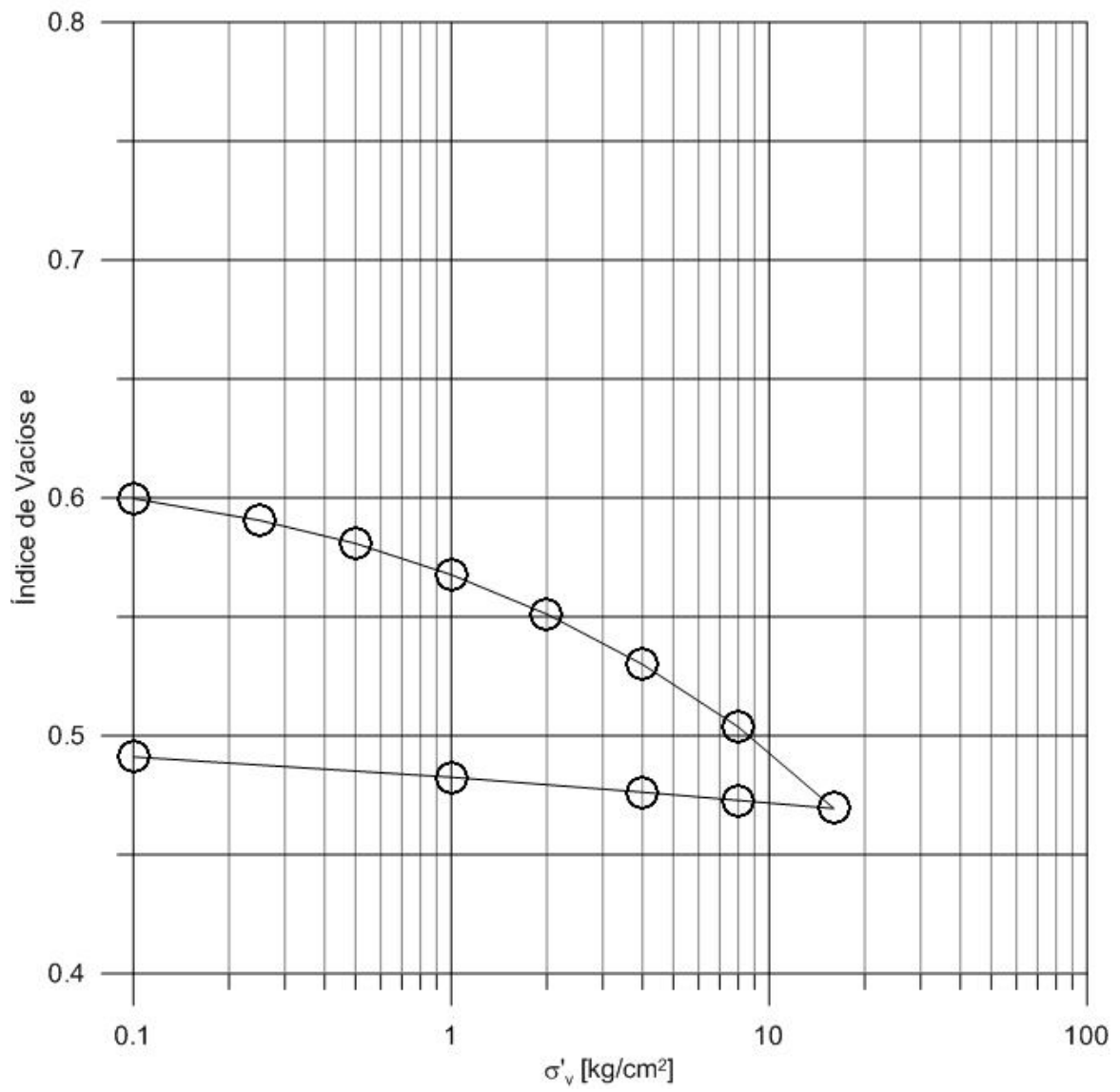
4. 33% Finos Agua de Mar

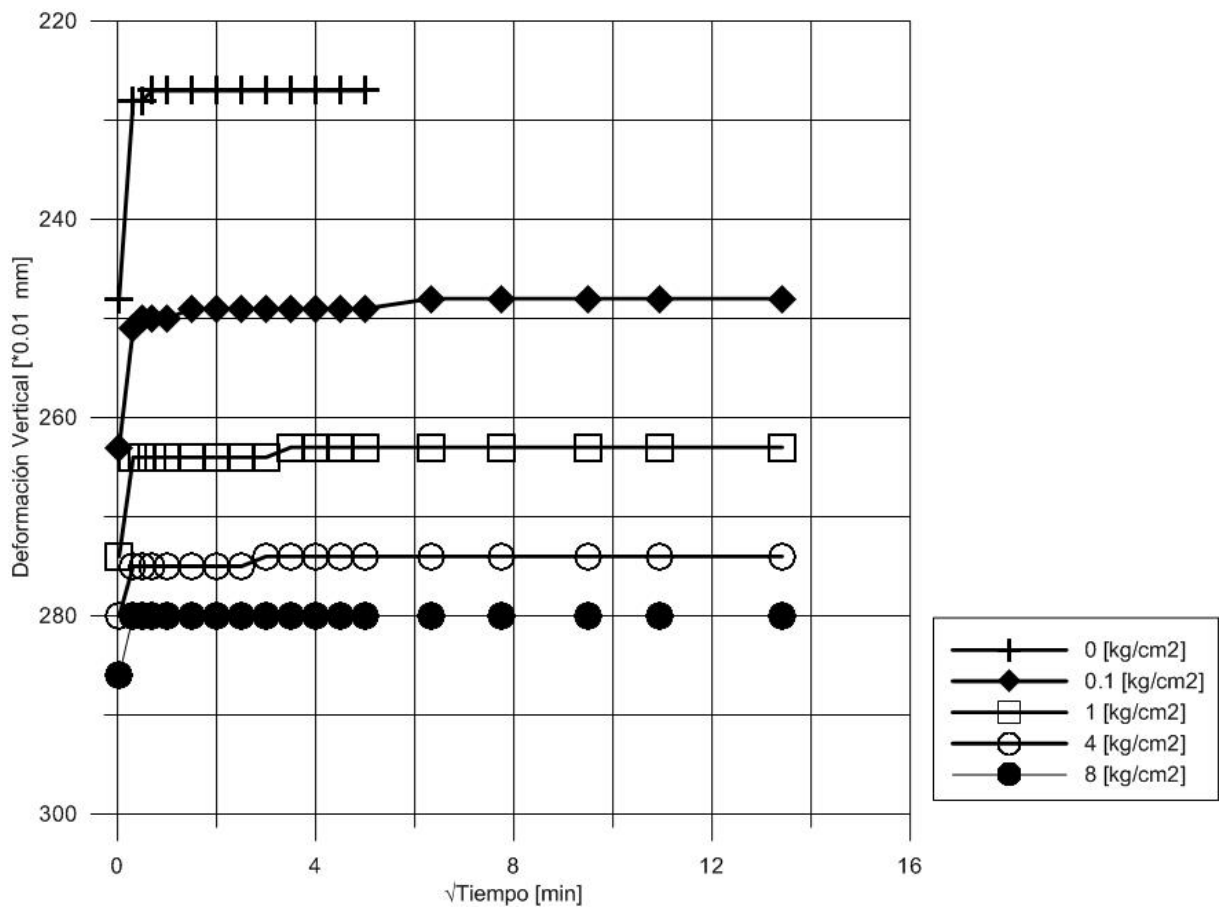
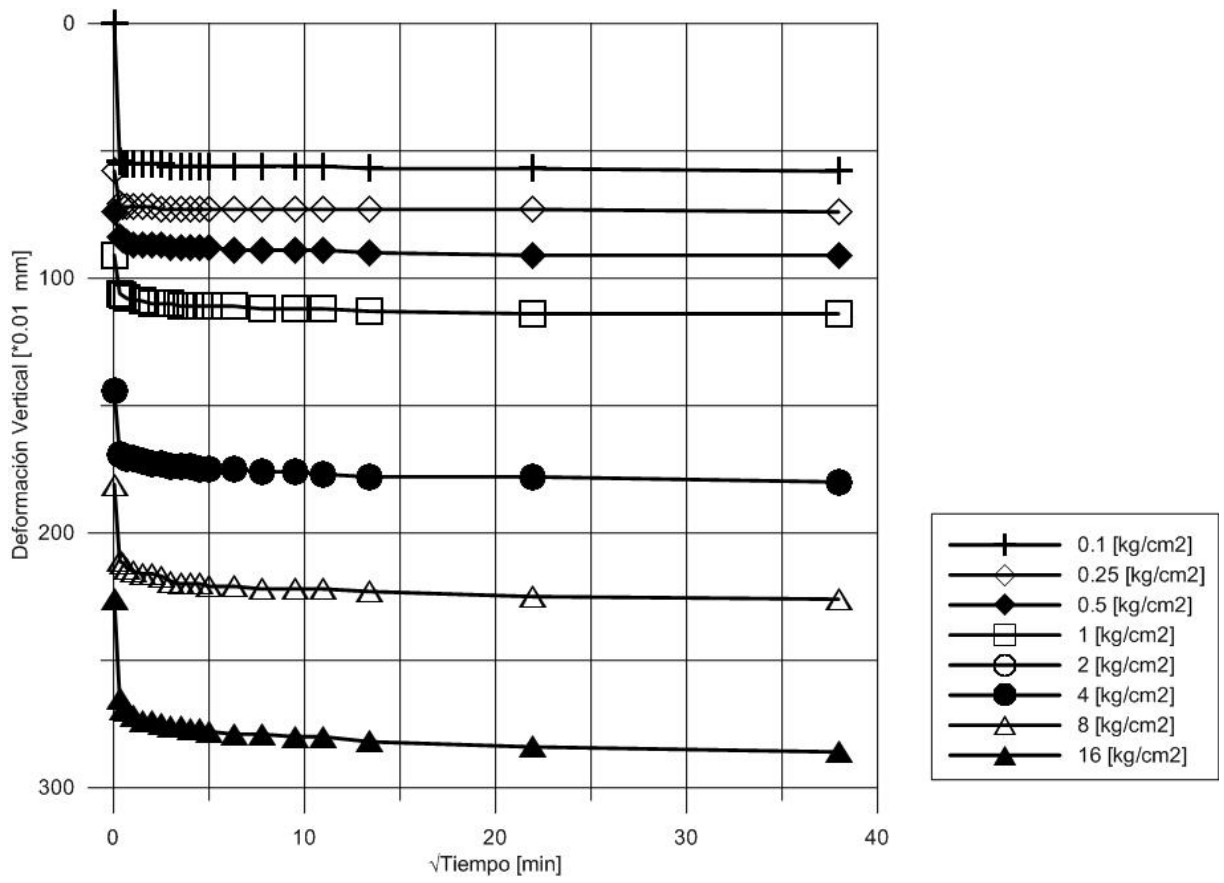
<b>DATOS INICIALES</b>		
Área probeta	[cm <sup>2</sup> ]	39.704
Altura muestra	[cm]	2.857
Peso específico		2.80
Calibración Dial Deformación	[cm]	0.001

<b>DATOS DE CONFECCION</b>		Inicial	Final
Peso Suelo Húmedo	[g]	238.48	229.46
Peso Suelo Seco	[g]	194.51	194.51
Peso Unitario Húmedo	[ g/cm <sup>3</sup> ]	2.10	2.20
Humedad	[%]	22.60	17.97
Peso Unitario Seco	[g/cm <sup>3</sup> ]	1.71	1.86
Relación de Vacíos		0.63	0.50

Tiempo [min]	Tensión Vertical [kg/cm <sup>2</sup> ]												
	0.1	0.25	0.5	1	2	4	8	16	8	4	1	0.1	0
0.00	0	58	74	91	115	144	181	226	286	280	274	263	248
0.10	54	71	84	106		169	211	265	280	275	264	251	228
0.25	55	72	85	107	135	170	212	269	280	275	264	250	228
0.50	55	72	86	108	136	171	214	270	280	275	264	250	227
1.00	55	72	87		137	171	215	272	280	275	264	250	227
2.25	55	72	87	109	138	172	216	274	280	275	264	249	227
4.00	55	72	87	110	138	173	216	274	280	275	264	249	227
6.25	55	73	87	110	138	173	217	275	280	275	264	249	227
9.00	56	73	88	110	139	174	219	276	280	274	264	249	227
12.25	56	73	88	111	139	174	220	276	280	274	263	249	227
16.00	56	73	88	111	139	174	220	277	280	274	263	249	227
20.25	56	73	88	111	140	175	220	277	280	274	263	249	227
25.00	56	73	88	111	140	175	221	278	280	274	263	249	227
40.00	56	73	89	111	140	175	221	279	280	274	263	248	227
60.00	56	73	89	112	140	176	222	279	280	274	263	248	227
90.00	56	73	89	112	141	176	222	280	280	274	263	248	227
120.00	56	73	89	112	141	177	222	280	280	274	263	248	227
180.00	57	73	90	113	141	178	223	282	280	274	263	248	227
480.00	57	73	91	114	143	178	225	284	280		263		
1440.00	58	74	91	114	144	180	226	286	280		263		
2880.00													
4320.00													
5760.00				115									







# ANEXO D CERTIFICADOS DE ENSAYOS QUÍMICOS EN AGUA



ASESORIA Y CONTROL QUIMICO  
CORROSION Y PROTECCION

## CERTIFICADO ASA 765712-1.

A solicitud Sr Carlos Carmi se efectuó control químico a una muestra de agua entregada por el solicitante .

### 1.- Análisis de Agua de Mar

Parámetro	Metodología	Muestra
Valor pH a 20 C°	NCh 413	7,8
Cloruros ,( Cl ), mg/l	NCh 419	19.800
Sólidos disueltos , mg/l	NCh 416	38.866
Sulfatos , ( SO <sub>4</sub> ), mg/l	NCh 420	2.654
Alcalinidad Total ,( CaCO <sub>3</sub> ), mg/l	NCh 415	149
Dureza Total ,( CaCO <sub>3</sub> ), mg/l	NCh 418	6.658
Dureza Cálcica ,( CaCO <sub>3</sub> ), mg/l	NCh 418	1.030
Dureza Magnésica ,( MgCO <sub>3</sub> ),mg/l	NCh 418	4.671
Sólidos en suspensión, mg/l	NCh 416	2,7
Materias orgánica como Oxígeno consumido, mg/l	NCh 1448	24,0

  
Ing. Héctor Varela Díaz

Santiago , 12 de Diciembre del 2012

JUAN CARRERA 2883 - FONO:/FAX: 5317627 - MAIPU - SANTIAGO  
E-mail: hectorvarela@vtr.net - www.asquimchile.cl



## CERTIFICADO ASA 765712-2.

A solicitud Sr Carlos Carmi se efectuó control químico a una muestra de agua entregada por el solicitante .

### 1.- Análisis de Agua Potable .

Parámetro	Metodología	Muestra
Valor pH a 20 C°	NCh 413	7,15
Cloruros ,( Cl ), mg/l	NCh 419	149
Sólidos disueltos , mg/l	NCh 416	818
Sulfatos , ( SO <sub>4</sub> ), mg/l	NCh 420	259
Alcalinidad Total ,( CaCO <sub>3</sub> ) , mg/l	NCh 415	140
Dureza Total ,( CaCO <sub>3</sub> ) , mg/l	NCh 418	345
Dureza Cálcica ,( CaCO <sub>3</sub> ) , mg/l	NCh 418	310
Dureza Magnésica ,( MgCO <sub>3</sub> ),mg/l	NCh 418	25
Sólidos en suspensión, mg/l	NCh 416	N.D
Materias orgánica como Oxígeno consumido, mg/l	NCh 1448	N.D

N.D .- No detectado

  
Ing. Héctor Varela Díaz

Santiago , 12 de Diciembre del 2012