



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Coeficiente de permeabilidad en  
muestras inalteradas y  
reconstituidas de jal en un  
permeámetro de carga  
constante**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero de Minas y Metalurgia**

**P R E S E N T A**

Edjan Eduardo Bustamante Méndez

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Osvaldo Flores Castrellón



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020**

## Dedicatoria

A mis padres, Jannet y Eduardo, por su gran esfuerzo para que yo pudiera llegar a donde estoy hoy, por su apoyo incondicional en malos y buenos momentos, simplemente no hubiera sido posible todo sin su guía.

A mis abuelos, Eduardo y Pina, que me recibieron en su casa con las puertas abiertas durante toda mi trayectoria escolar y que me han tratado como a su hijo, no hay palabras para agradecerles tanto.

A mi papi Miguel, por haber sido un gran abuelo y a mi mami Juanela por su cariño y aliento.

## Agradecimientos

A la UNAM.

A mi Facultad de ingeniería.

Al Instituto de Ingeniería.

Al Dr. Osvaldo, por la confianza y orientación durante la realización de este trabajo.

A Andrea, por enseñarme y orientarme todo lo referente a este trabajo, su ayuda fue fundamental, ¡gracias!

A todos mis amigos del Instituto, Zay, Uriel, Hazel, Alan, Rose y Monse por las risas y el conocimiento compartido.

A los laboratoristas, Eduardo, Javier y Norma por enseñarme mucho de lo que realice para esta tesis.

A los sinodales, M.I. Santos, Ing. Mancera, M. A. Gabriel y a la Ing. Viridiana por el tiempo invertido y opiniones sobre este trabajo.

A Kit Kat, que me brindó gran apoyo en los peores momentos, que estuvo conmigo durante todo el proceso incluso cuando enfermé, por su consejos para escribir esta tesis, los momentos divertidos durante el transcurso de este año y por escucharme siempre.

A mis amigos, Ricardo, que es como mi hermano, Benja, el mejor amigo que alguien podría desear, Ana, una amiga muy solidaria y Celis, un gran amigo.

A mis hermanos, Ernesto, Adrián, Jorge, Ale, Mon, Mich y Soph.

A mis tíos, Norma, Mario, Miguel, Linda, Ernesto, Mony y Jorge.

# ÍNDICE

Dedicatoria.....	II
Agradecimientos.....	II
Índice de figuras.....	V
Índice de gráficas.....	VII
Índice de tablas.....	XI
Resumen.....	XIII
Capítulo 1 Introducción.....	1
Justificación.....	2
Objetivos generales.....	2
Objetivos específicos.....	2
Alcances.....	2
Capítulo 2 Etapas en el proceso de beneficio.....	3
2.1 Trituración.....	3
2.2 Molienda.....	4
2.3 Procesos de concentración.....	4
2.4 Almacenamiento de jales.....	6
Capítulo 3 Marco teórico.....	12
3.1 Relaciones fundamentales peso-volumen.....	12
3.2 Granulometría.....	14
3.3 Consistencia del suelo.....	15
3.4 El sistema unificado de clasificación de suelo (SUCS).....	16
3.5 Coeficiente de permeabilidad.....	17
3.6 Factores que influyen en la permeabilidad.....	26
3.7 Coeficiente de permeabilidad en jales.....	27
Capítulo 4 Descripción y calibración del equipo.....	34

4.1	Elementos del sistema.....	34
4.2	Sensores.....	36
4.3	Calibración del equipo .....	45
Capítulo 5 . Metodología y descripción del material.....		52
5.1	Contenido de agua .....	52
5.2	Densidad de sólidos .....	52
5.3	Límites de consistencia .....	54
5.4	Granulometría.....	57
5.5	Formación de probetas.....	59
5.6	Determinación del coeficiente permeabilidad. ....	63
Capítulo 6 Presentación y análisis de resultados .....		66
Consolidación.....		66
Resultados de los ensayos de permeabilidad .....		68
Influencia de la carga hidráulica en el coeficiente de conductividad hidráulico. ....		71
Influencia del esfuerzo efectivo y la relación de vacíos .....		72
Influencia de finos .....		75
Influencia de la compacidad .....		77
Comparativa en muestras inalteradas y reconstituidas. ....		77
Conclusiones.....		80
Referencias.....		81
Anexo A.....		85
Anexo B.....		89

# Índice de figuras

Figura 2.1. Quebradoras. Modificado de Kelly & Spottiswood, 1990 .....	3
Figura 2.2. Efecto de cascada y caída dentro de un molino. Modificado de Kelly & Spottiswood, 1990.....	4
Figura 2.3. Diagrama de flujo de una planta concentradora. Tomado de Subsecretaría de Economía de Chile, Consejo Nacional de Producción Limpia, Consejo Minero de Chile, Subsecretaría de Minería, Ministerio de Minería (2002).....	5
Figura 2.4. Concentración de sólidos. Tomada de Orozco (2004). .....	7
Figura 2.5. Presa convencional graduada. Tomada de Orozco (2004). .....	7
Figura 2.6. Arena Cicloneada (aguas abajo). Tomada de Orozco (2004).....	8
Figura 2.7. Espigas (Aguas arriba). Tomada de Orozco (2004).....	8
Figura 2.8. Enrocamiento (Aguas abajo). Tomado de Orozco (2004).....	9
Figura 2.9. Chimenea y delantal (Aguas abajo). Tomado de Orozco (2004).....	9
Figura 2.10. Arena cicloneada y compactada (Aguas abajo). Tomado de Orozco (2004)..	10
Figura 2.11. Enrocamiento y arena cicloneada (Aguas abajo y aguas arriba). Tomado de Orozco 2004 .....	10
Figura 2.12. Enrocamiento y espigas (Aguas abajo y aguas arriba). Tomado de Orozco (2004).....	11
Figura 3.1. Esquema de fases en una muestra de suelo. Tomado de Padilla Velázquez (2008). .....	12
Figura 3.2. Cargas totales para el flujo de agua. Tomado de Das (2015). .....	18
Figura 3.3. Permeámetro de carga constante. Modificado de Terzaghi & Peck (1978). .....	21
Figura 3.4. Prueba de bombeo en campo. Tomado de Lucero Rivera (2018).....	23
Figura 3.5. Gráfica de consolidación. Tomada de Das (2015). .....	25
Figura 4.1. Esquema general del equipo. 1. Regulador de contrapresión inferior, 2. Regulador de contrapresión superior, 3. Regulador de confinamiento, 4. Bureta de flujo inferior, 5. Bureta de flujo superior, 6. Depósito de agua, 7. Sensor de cambio volumétrico, 8. Sensor de presión de confinamiento, 9. Sensor de contrapresión inferior, 10. Sensor de contrapresión superior, 11. Interfaz aire agua, 12. Cámara de ensaye, 13. Depósito de agua de gasto de salida, 14. Depósito de agua para circulación y 15. Bureta para recolectar agua de salida en la etapa de circulación. Tomado de Acevedo (2017). .....	34

Figura 4.2. Cámara de ensaye. Tomado de Acevedo (2017). .....	35
Figura 4.3. Sensor de cambio volumétrico.....	36
Figura 4.4. Sensor de presión. ....	36
Figura 4.5. Menú de calibración. ....	37
Figura 4.6. Menú de constantes de calibración. ....	37
Figura 4.7 Registro de calibración.....	38
Figura 4.8. Menú general de la prueba.....	38
Figura 4.9. Datos generales de la prueba. ....	39
Figura 4.10. Dimensiones de la probeta.....	39
Figura 4.11. Características del suelo. ....	39
Figura 4.12. Carpeta.....	40
Figura 4.13. Archivo .....	40
Figura 4.14. Vector de tiempo.....	41
Figura 4.15. Pantalla de transductores. ....	41
Figura 4.16. Saturación por CP. ....	42
Figura 4.17. Arreglo de válvulas abiertas para saturar a CP. ....	42
Figura 4.18. Medición de la B de Skempton.....	43
Figura 4.19. Arreglo de válvulas abiertas para medir B de Skempton. ....	43
Figura 4.20. Prueba de consolidación. ....	44
Figura 4.21. Arreglo de válvulas abiertas para la consolidación.....	44
Figura 4.22. Etapa de ensaye. ....	45
Figura 4.23. Arreglo de válvulas abiertas para el ensaye experimental de permeabilidad. .	45
Figura 4.24. Curva de calibración del sensor de cambio volumétrico inferior. ....	46
Figura 4.25. Gráfica de verificación del sensor de cambio de volumétrico.....	47
Figura 4.26. Curva de calibración del sensor de confinamiento. ....	48
Figura 4.27. Curva de calibración del sensor de CPS.....	48
Figura 4.28. Curva de calibración del sensor de CPI.....	49

Figura 4.29. Verificación cruzada.....	49
Figura 5.1. Fotografía de la metodología para la densidad de sólidos.....	53
Figura 5.2. Fotografías de la metodología para la densidad de sólidos. ....	54
Figura 5.3. Fotografía del cono inglés. ....	55
Figura 5.4 Fotografía del procedimiento de granulometría por vía húmeda.....	57
Figura 5.5. Fotografías del procedimiento de hidrómetro.....	58
Figura 5.6. Fotografías del procedimiento de extracción para una probeta inalterada. ....	59
Figura 5.7. Fotografías del procedimiento de reconstitución de probetas. ....	60
Figura 5.8. Fotografías del montaje. ....	61

## Índice de gráficas

Gráfica 3.1. Carta de plasticidad. Tomada de la norma D 2487-10. ....	16
---	----

Gráfica 3.2. Relación de finos y coeficiente de permeabilidad. Tomado de Hernández V. et al. (2018).	29
Gráfica 3.3 Relación de vacíos y permeabilidad. Modificado de Qui y Segó (2001).	29
Gráfica 3.4. Relación de permeabilidad, relación de vacíos y finos. Modificado de Valenzuela (2015).	30
Gráfica 3.5. Permeabilidad en función de la relación de vacíos. Modificado de Acevedo (2017).	32
Gráfica 3.6. Permeabilidad en función de la compacidad relativa. Modificado de Acevedo (2017)	32
Gráfica 3.7. Comparación de k para muestras inalteradas y reconstituidas. Tomado de García (2019).	33
Gráfica 5.1. Curva de fluidez en la muestra ss-3-1, San Martín, Zac., profundidad 25-25.8 m.	56
Gráfica 5.2. Carta de plasticidad. M1, cruz roja, M2, círculo amarillo, M3, triángulo verde y M4, cruz negra.	57
Gráfica 5.3. Distribución granulométrica.	58
Gráfica 5.4. Estimación del $t_{50}$ mediante el método de Casagrande aplicado en la curva de disipación de presión de poro.	64
Gráfica 5.5. Cálculo de Q.	65
Gráfica 5.6. Determinación del coeficiente de conductividad hidráulico de manera gráfica en la muestra M3, $\sigma' = 3.2 \text{ kg/cm}^2$ .	65
Gráfica 6.1. Curva de consolidación de la prueba M2 inalterada y reconstituida a un esfuerzo de $3.2 \text{ kg/cm}^2$ .	67
Gráfica 6.2. Variación de las curvas de disipación en la presión de poro y cambio de volumen durante la prueba M2 inalterada.	67
Gráfica 6.3. Curvas de compresibilidad, donde R representa a las reconstituidas y F la cantidad de finos.	68
Gráfica 6.4. Medición gráfica del coeficiente de conductividad hidráulico en la muestra M2 y M2 R.	69
Gráfica 6.5 Relación de permeabilidades medidas de manera directa.	70
Gráfica 6.6. Relación de permeabilidad medida y calculada.	70
Gráfica 6.7. Medición de la permeabilidad con la metodología de carga constante muestra M4.	71

Gráfica 6.8. Efecto de la carga hidráulica por esfuerzo efectivo muestra M3. ....	72
Gráfica 6.9. Influencia del esfuerzo efectivo para la muestra M4. ....	72
Gráfica 6.10. Influencia de la relación de vacíos para la muestra M4. ....	73
Gráfica 6.11. Permeabilidad en función de los esfuerzos efectivos en M2 y M2 R. ....	73
Gráfica 6.12. Permeabilidad en función de la relación de vacíos en M2 y M2 R. ....	74
Gráfica 6.13. Influencia de la relación de vacíos. (Triángulos para García 2017, Círculos para Acevedo y cuadrados en color para el presente trabajo). ....	75
Gráfica 6.14. Influencia de finos en la permeabilidad. ....	76
Gráfica 6.15. Permeabilidad influenciada por relación de vacíos y cantidad de finos comparados con Valenzuela 2015. ....	77
Gráfica 6.16. Influencia de la compacidad en la permeabilidad. ....	77
Gráfica 6.17. Relación entre muestras inalteradas y reconstituidas. ....	78
Gráfica 6.18. Comparación de muestras inalteradas y reconstituidas de jal (modificado de Bussiére, 2004). ....	79
Gráfica 6.19. Verificación de la precisión en el sensor de cambio volumétrico. ....	85
Gráfica 6.20. Verificación de la precisión en el sensor de confinamiento. ....	85
Gráfica 6.21. . Verificación de la precisión en el sensor de cambio CPI. ....	86
Gráfica 6.22. . Verificación de la precisión en el sensor de cambio CPS. ....	86
Gráfica 6.23. Curva de fluidez de la muestra ss-2-1, San Martín, Zac., profundidad 18-18.8 m. ....	88
Gráfica 6.24. Curva de fluidez de la muestra ss-4-1, Charcas, S.L.P., profundidad 17-17.5 m. ....	88
Gráfica 6.25 Curva de fluidez de la muestra ss-1-1, Charcas, S.L.P., profundidad 20-21 m. ....	88
Gráfica 6.26. Curva de compresibilidad para la muestra M1. ....	89
Gráfica 6.27. Curva de compresibilidad para la muestra M2. ....	89
Gráfica 6.28. Curva de compresibilidad para M3. ....	90
Gráfica 6.29. "k" Medida gráficamente para $\sigma' = 0.8 \text{ kg/cm}^2$ M2. ....	90
Gráfica 6.30. "k" Medida gráficamente para $\sigma' = 1.6 \text{ kg/cm}^2$ M2. ....	91

Gráfica 6.31. "k" Medida gráficamente para $\sigma' = 2.5 \text{ kg/cm}^2$ M2.....	91
Gráfica 6.32. "k" Medida gráficamente para $\sigma' = 3.2 \text{ kg/cm}^2$ M2.....	91
Gráfica 6.33. Relación de "k" medida gráficamente contra calculada.....	92
Gráfica 6.34. Relación de "k" medida contra calculada.....	92
Gráfica 6.35. Influencia de la relación de vacíos.....	93
Gráfica 6.36. Influencia de la relación de vacíos y contenido de finos. ....	93
Gráfica 6.37. Relación de vacíos y finos para muestras inalteradas y reconstituidas.....	94

## Índice de tablas

Tabla 3.1. Tabla 1. Juego de mallas.. Modificado de Zea Constantino & Rivera Constantino (2004).....	14
Tabla 3.2. Recomendaciones para clasificar un suelo con el SUCS. Modificado de Zea Constantino & Rivera Constantino (2004).....	17
Tabla 3.3. Tipos de jal. Modificado de SRK Consulting (2010).....	17
Tabla 3.4. Ejemplos de "K". Tomado de Alvarez-Manilla Aceves et al. (2002) .....	19
Tabla 4.1. Cálculos de error, precisión y tolerancia en el sensor de cambio volumétrico. ..	50
Tabla 4.2. Cálculos de error, precisión y tolerancia en el sensor de confinamiento.....	50
Tabla 4.3. Cálculos de error, precisión y tolerancia en el sensor de CPS. ....	51
Tabla 4.4. Resumen de resultados de la calibración y verificación. ....	51
Tabla 5.1. Contenido de agua en la muestra ss-3-1, San Martín, Zac., profundidad 25-25.8 m. ....	52
Tabla 5.2. Densidad de sólidos en la muestra ss-3-1, San Martín, Zac., profundidad 25-25.8 m. ....	54
Tabla 5.3. Resumen de resultados en los límites de consistencia.....	56
Tabla 5.4. Clasificación de las muestras de acuerdo al SUCS. ....	59
Tabla 6.1. Relaciones volumétricas iniciales. ....	66
Tabla 6.2. Resultados. ....	69
Tabla 6.3. Resumen de resultados. ....	79
Tabla 0.1. Contenido de agua en la muestra ss-2-1, San Martín, Zac., profundidad 18-18.8 m. ....	87
Tabla 0.2 Contenido de agua en la muestra ss-4-1, Charcas, S.L.P., profundidad 17-17.5 m. ....	87
Tabla 0.3 Contenido de agua en la muestra ss-1-1, Charcas, S.L.P., profundidad 20-21 m.87	
Tabla 0.4.Densidad de sólidos en la muestra ss-2-1, San Martín, Zac., profundidad 18-18.8 m. ....	87
Tabla 0.5 Densidad de sólidos en la muestra ss-4-1, Charcas, S.L.P., profundidad 17-17.5 m. ....	87

Tabla 0.6 Densidad de sólidos en la muestra ss-1-1, Charcas, S.L.P., profundidad 20-21 m.  
..... 87

# Resumen

La creciente demanda de materias primas ha dado como resultado un incremento en la minería y la principal consecuencia ha sido la generación de residuos mineros por vía húmeda, los cuales deben ser almacenados en depósitos de jales con mayores capacidades que sean capaces de garantizar su disposición final de una forma segura y económica.

Dentro de las propiedades más importantes para el diseño, operación y construcción de este tipo de depósitos se pueden mencionar las hidráulicas ya que son muy importantes para evaluar las condiciones de estabilidad de un depósito en sus diferentes etapas de crecimiento. Por otra parte, es esencial poder determinar estos parámetros en laboratorio mediante diversos métodos (directos e indirectos) evaluando alternativas tales como la reconstitución de probetas, esto debido a que no siempre es posible tener muestras inalteradas de jal. Partiendo de lo anterior, esta tesis se divide en tres etapas. La primera etapa consiste en el manejo del permeámetro de carga constante del posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM y posteriormente ensayar las muestras de jal procedentes de Charcas, S. L. P. y de San Martín, Zacatecas (M1, M2, M3 Y M4, respectivamente). Durante la segunda etapa se elaboraron pruebas de contenido natural de agua, densidad, límites de consistencia y granulometría para caracterizar el jal con base a la clasificación del SUCS. En la tercera y última etapa se ensayaron 4 probetas inalteradas en un permeámetro de carga constante a 4 cargas hidráulicas (100, 200, 300 y 400 cm de columna de agua) para cada esfuerzo de consolidación; así mismo, la probeta fue consolidada a 5 esfuerzos efectivos (0.2, 0.8, 1.6, 2.5 y 3.2 kg/cm<sup>2</sup>). Este proceso se repitió reconstituyendo las probetas inalteradas, con el fin de comparar los resultados entre probetas inalteradas y reconstituidas.

Al culminar las etapas descritas en el párrafo anterior, se calculó el coeficiente de permeabilidad en cada prueba utilizando dos metodologías diferentes: carga constante y mediante curvas de disipación de presión de poro durante la consolidación. Finalmente, se compararon los resultados obtenidos en las pruebas con los valores descritos por otros autores, así mismo, se analizó la influencia de la cantidad de finos, relación de vacíos, esfuerzo efectivo y compacidad en la determinación del coeficiente de permeabilidad.

## Capítulo 1 Introducción

---

La minería en México inició durante la época de la colonia y desde entonces se colocó como uno de los principales productores de plata a nivel mundial; por esta razón, esta actividad forma parte importante de la historia y cultura de nuestro país. Actualmente, la minería contribuye con el 4% del producto interno bruto (PIB), además de ocupar el décimo lugar en la explotación de otros 16 minerales a nivel mundial y representa uno de los primeros lugares en inversión extranjera dentro de América Latina (Servicio Geológico Mexicano, 2019).

Debido al incremento en la demanda de los metales, no sólo a nivel nacional sino también a nivel global, la minería se ha visto forzada a crecer generando que la cantidad de residuos provenientes de las plantas metalúrgicas también y sea cada vez mayor. Estos residuos anteriormente por conveniencia operativa eran depositados en sitios cercanos a las minas, sin embargo, en la actualidad y por el conocimiento del daño ambientes que generan, surge la necesidad de contar con un óptimo almacenaje para este tipo de desechos (Santos, 2012). Por lo anterior, en la actualidad se buscan nuevas alternativas tanto en la investigación sobre el comportamiento de los jales así como de sus depósitos y su óptimo tratamiento, ya que actualmente sigue siendo un campo poco estudiado en nuestro país. Es por todo lo anterior que en la actualidad se debe optar por tener mayor investigación sobre el comportamiento de los jales, sus depósitos y su debido tratamiento, ya que actualmente en México es un campo con muy poco estudio.

Los jales también llamados colas, relaves o “*tailings*” son uno de los principales residuos, los cuales se generan como resultado de procesos extractivos para metales en plantas de beneficio, ahí el material que proviene de mina es reducido de tamaño (Kelly & Spottiswood, 1990) y una vez que se tiene material fino se busca concentrarlo por medio de algún método, este método dependerá de la naturaleza de las especies mineralógicas presentes, siendo el más usual la flotación, esto para separar la mena (mineral de valor económico) de la ganga (mineral sin valor económico), de tal forma que se pueda enriquecer el elemento metálico de mayor interés, ya que han sido separados, la ganga pasará a ser un residuo (jal), el cual es almacenado en un depósito de jales, mientras que la mena será considerado un concentrado para obtener en un metal en su forma más pura. (Furstenau & Han, 2001).

# Justificación

El poco estudio sobre las presas de jales ha terminado por la ruptura o falla inminente de algunas de ellas y en muchos de estos casos ha sido provocado por problemas relacionados con el flujo del agua. Por tanto, es indispensable conocer las características básicas para la construcción y operación de los depósitos, como lo son la permeabilidad, los parámetros mecánicos del jal, geometría y capacidad de la estructura almacenadora, tipos y forma de drenaje, volumen de la producción, entre otras.

Por lo anterior, es muy importante el correcto almacenamiento de los residuos mineros debido a tres razones principales (Sánchez, 2013):

- i. La importancia de la minería metálica en el país.
- ii. La enorme cantidad de residuos generados de esto.
- iii. El riesgo que representa al tener EPT (elementos potencialmente tóxicos) y sulfuros, que puedan generar drenaje ácido.

Por otra parte, es importante determinar alternativas para obtener características de estos residuos debido a que no siempre es posible realizar todas las pruebas en un laboratorio.

La determinación de parámetros mecánicos e hidráulicos para la generación de los modelos geotécnicos que permitan evaluar las condiciones de estabilidad de un depósito en sus diferentes etapas de crecimientos se vuelve un tema muy importante de atender ya que una buena calidad de datos obtenidos de esta caracterización, sumado a una buena información geométrica del depósito dará como resultado un modelo representativo del depósito y los factores de seguridad que se determinen corresponderán de manera más fiel a las condiciones de estabilidad en el momento del estudio.

Para estudiar la variación del coeficiente de permeabilidad en los jales, es importante revisar la influencia del porcentaje de finos y de la compacidad del suelo.

## Objetivos generales

Determinar el coeficiente de permeabilidad en muestras de jal.

## Objetivos específicos

- a) Poner en operación y calibrar un permeámetro de carga constante.
- b) Realizar ensayos de permeabilidad variando los esfuerzos efectivos y las cargas hidráulicas en probetas inalteradas y reconstituidas de jal.

## Alcances

- a) Recopilación bibliográfica.
- b) Determinación de las propiedades índice de los materiales estudiados y su clasificación según el SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos).
- c) Determinación del coeficiente de permeabilidad en muestras inalteradas y reconstituidas, con las mismas relaciones volumétricas iniciales.  
Análisis de los resultados.

## Capítulo 2 Etapas en el proceso de beneficio

Para entender de donde provienen los jales resulta importante mencionar las etapas realizadas en una planta de beneficio, las cuales se mencionan a continuación:

### 2.1 Trituración

El proceso de trituración consiste en la reducción del tamaño de las partículas de las rocas. Para ello se utilizan máquinas especiales conocidas como trituradoras o quebradoras, las cuales varían en modelo y cantidad según el volumen y la dureza del mineral a procesar, así como del tamaño de la alimentación y la producción (Fueyo, 1999).

Según lo anterior, existen dos tipos de quebradoras: a) primarias, las cuales son máquinas pesadas que manejan material de alimentación en seco con un tamaño máximo de 1 m, con una reducción de partícula de hasta 10 cm y b) secundarias, las cuales son más livianas, con alimentación inferior a 15 cm, por ello tienden a tener reducciones menores a 1 cm (Furstenau & Han, 2001; Fueyo, 1999). A su vez, el grupo de las quebradoras primarias tiene dos tipos: i) quebradoras giratorias (Figura 2.1, lado derecho) y ii) quebradoras de quijada (Figura 2.1, lado izquierdo), ambas generan la fractura de la roca por compresión entre dos caras limitantes. Mediante un movimiento de liberación posterior, durante el cual el material se asienta por gravedad hasta que es atrapado y sometido a una mayor compresión para ser liberado nuevamente, ya que este es el método más eficiente para aplicar fuerza y así conseguir la fractura. (Kelly & Spottiswood, 1990). Así mismo, las quebradoras secundarias pueden ser de cono, de rodillo y de impacto, las cuales se utilizan cuando el material es poco abrasivo. (Furstenau & Han, 2001).

Una vez terminado el proceso de trituración, el material puede regresar a la quebradora si no tiene el tamaño de partícula deseado o pasar al siguiente proceso de beneficio, lo anterior dependerá del proceso metalúrgico empleado.

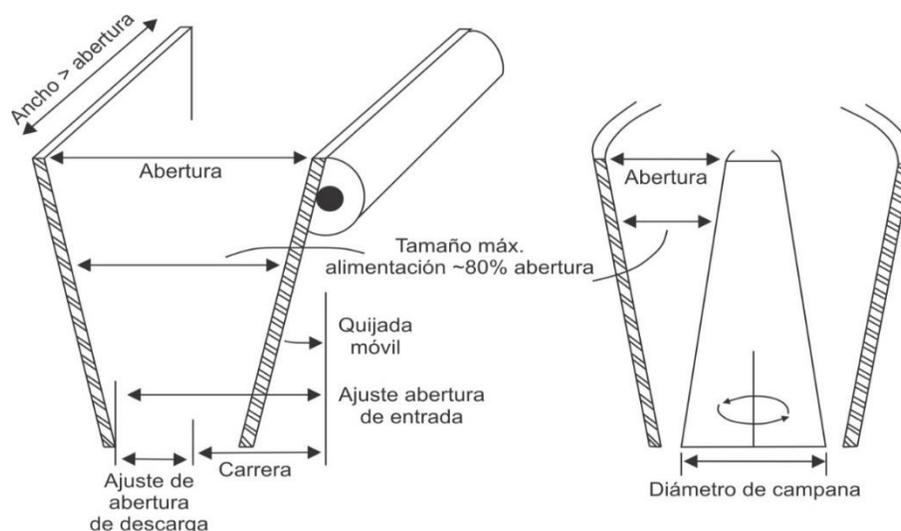


Figura 2.1. Quebradoras. Modificado de Kelly & Spottiswood, 1990

## 2.2 Molienda

Posteriormente al proceso de trituración se realiza la molienda, cuya finalidad es para generar material más fino. Lo anterior consiste en depositar el material resultante en tambores giratorios, el tamaño de las partículas debe ser menor a 1 cm y generalmente se obtienen partículas menores a 2  $\mu\text{m}$ . Para alcanzar tales dimensiones, en un proceso de molienda intervienen los efectos combinados de impacto, abrasión y estallido, estos se generan por la transferencia de energía de los medios de molienda (barras de acero, bolas de acero o cerámica y partículas de mineral) y por efecto del giro del molino, (cascada y caída) (Figura 2.2) (Furstenau & Han, 2001)

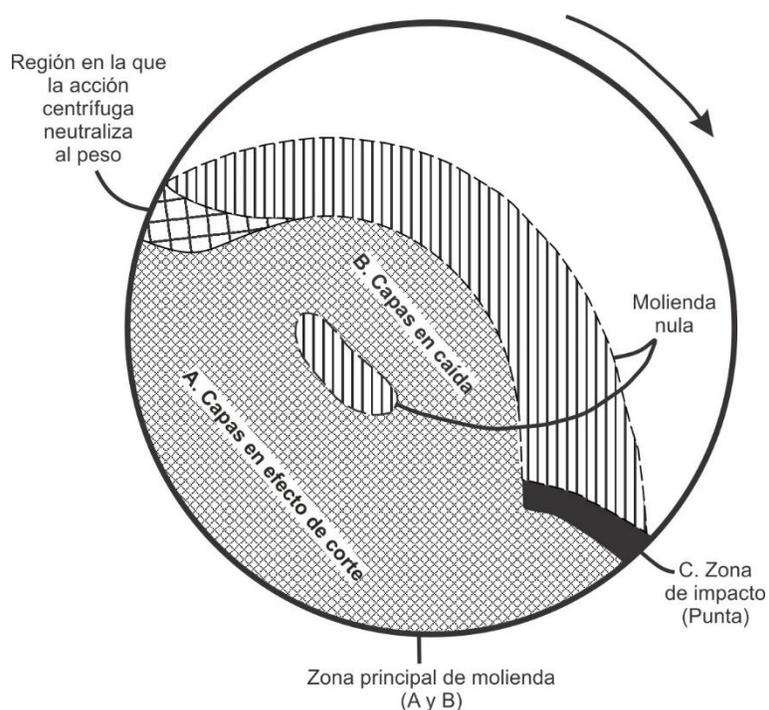


Figura 2.2. Efecto de cascada y caída dentro de un molino. Modificado de Kelly & Spottiswood, 1990.

## 2.3 Procesos de concentración

Un proceso de concentración tiene la finalidad de diferenciar los minerales de valor económico de los que no lo tienen. Es decir, se busca la separación entre los minerales de mena y de ganga. Lo anterior dependerá de la liberación del mineral, de la naturaleza de la mena y la diferencia que exista entre el resto de las especies mineralógicas presentes en la roca (color, reflectancia de la superficie, radiactividad, susceptibilidad y conductividad magnética).

Los procesos de concentración pueden llevarse a cabo por distintos métodos, los cuales se mencionan a continuación:

### 2.3.1 Concentración por gravedad

Este método consiste en la separación de fases minerales a partir de la diferencia de densidades. Sin embargo, también es posible separar partículas con base en su tamaño o forma. El procedimiento consiste en la separación del mineral inmerso en un fluido ya sea por la acción de la fuerza de gravedad o por medio de fuerza centrífuga (Furstenau & Han, 2001).

### 2.3.2 Concentración magnética y electrostática

El método de concentración magnética y electrostática se utiliza cuando hay minerales ferromagnéticos, paramagnéticos y diamagnéticos. El procedimiento consiste en emplear un imán, el cual puede ser de baja intensidad para elementos ferromagnéticos o de alta intensidad para elementos paramagnéticos, para llevar a cabo la separación de los minerales. En una variante se ioniza la superficie mineral para conseguir que la partícula este cargada y sea susceptible magnéticamente (Furstenau & Han, 2001).

### 2.3.3 Flotación

Para llevar a cabo un proceso de flotación, la pulpa proveniente del molino (mezcla de material sólido y material líquido) es tratada con químicos cuya función propiciar adsorción en las partículas de interés (colectores). Con lo anterior, dichas partículas se vuelven hidrofóbicas. Posteriormente, la pulpa se coloca en tanques donde se inyectan burbujas de aire a las cuales se adhiere la mena, las burbujas ascienden rebasando el borde del tanque de tal forma que se pueden coleccionar. Por otra parte, es necesario asegurar que las partículas sin valor no floten con el resto, para esto se agrega una sustancia conocida como depresor, la cual convierte la partícula en hidrofílica. Otro factor a considerar es mantener una capa de espuma lo suficientemente estable, para lo cual es necesario agregar químicos (espumantes) que aumenten la tensión superficial de la burbuja (Cytec, 2002).

A partir del proceso de flotación (Figura 2.3) se obtienen dos productos: el concentrado el cual se encuentra en menor proporción y contiene la mayor cantidad de mineral de interés económico, y por último y en mayor proporción el residuo minero o jal.



Figura 2.3. Diagrama de flujo de una planta concentradora. Tomado de Subsecretaría de Economía de Chile, Consejo Nacional de Producción Limpia, Consejo Minero de Chile, Subsecretaria de Minería, Ministerio de Minería (2002).

## 2.4 Almacenamiento de jales

“Los jales son suelos de comportamiento viscoelástico muy complejo y de alta susceptibilidad a fenómenos como erosión pluvial, tubificación y la licuación provocada por un sismo o una explosión.” (Orozco S., 2010). Es por eso que actualmente la NOM-141-SEMARNAT-2003, con el fin de evitar desastres ambientales establece especificaciones y caracterizaciones en lo referente a la construcción, operación y post-operación de las presas de jales en México. (NORMA Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, 2004).

A diferencia de las presas comunes de almacenamiento de agua construidas para generar electricidad o riego, las presas de jales están contempladas para almacenar residuos sólidos con agua para su transporte. De esto deriva la principal diferencia entre ambas estructuras; la cortina para presas hidroeléctricas debe ser impermeable, mientras que para las presas de jales debe ser permeable (Orozco Santoyo & Flores Castellón, 2005)

### 2.4.1 Elementos de un depósito de jales

Un depósito de jales debe estar compuesto de los siguientes elementos (ANCOLD, 1999)

- a) Sistema de transporte de pulpa.
- b) Estructura de almacenamiento.
- c) Estructura de captación, desvío y conducción de agua fluvial.
- d) Estructuras para re direccionar exceso de agua.
- e) Medidas para prevenir la erosión en la estructura de contención.

Orozco (2010) menciona los siguientes elementos constitutivos de una presa de jales:

- a) Cortina contendora. La cual como ya ha sido mencionado debe ser permeable y resistente a la erosión, a la tubificación, licuación y deslizamientos de talud
- b) Vaso de almacenamiento. Debe estar bien definido y ser estable en las laderas que lo conforman,
- c) Sistema decantador drenante. Debe tener capacidad suficiente y resistente estructuralmente.
- d) Vertederos de excedencias. Capacidad para expulsar agua en caso de que se exceda la cantidad de agua.

### 2.4.2 Métodos constructivos

La norma oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003 cataloga los depósitos de jales según su forma de construcción. Es importante recalcar que los depósitos de jales son las únicas obras que se construyen y se operan al mismo tiempo (Orozco S., 2010).

- 1) Concentración de sólidos.
- 2) Presa convencional graduada.
- 3) Aguas arriba.
  - a) Arena cicloneada.
  - b) Espigas.

- c) Enrocamiento y arena cicloneada.
- d) Enrocamiento y espigas.
- 4) Aguas abajo
  - a) Enrocamiento.
  - b) Chimenea y delantal.
  - c) Arena cicloneada y compactada.
  - d) Enrocamiento y arena cicloneada.
  - e) Enrocamiento y espigas.

*Concentración de sólidos*

Se realiza depositando los jales de forma que se auto soporten, sin la necesidad de estanque o cortina de soporte (Escobedo R., 2011). Y se construye con un camino perimetral (Figura 2.4)

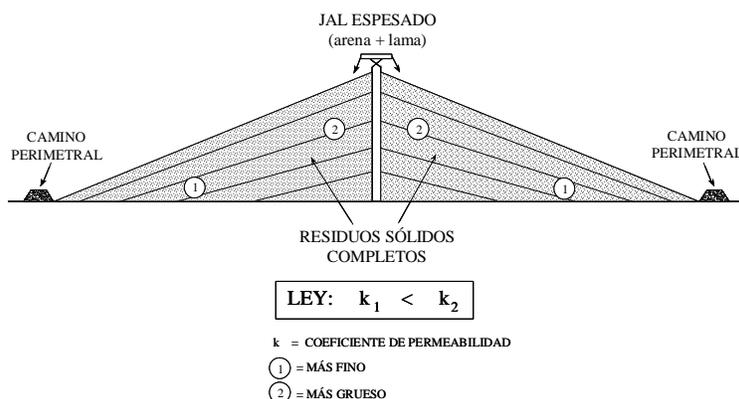


Figura 2.4. Concentración de sólidos. Tomada de Orozco (2004).

*Presa convencional graduada*

Se construye de adentro hacia afuera con un centro impermeable, después se coloca grava para darle soporte al jal, en el medio se coloca un sistema drenante (Figura 2.5)

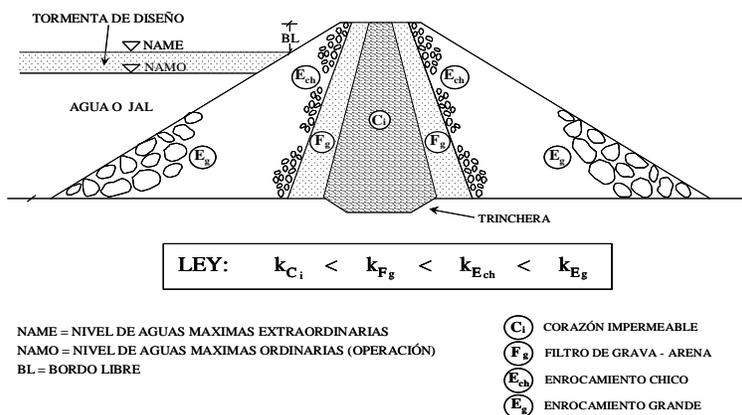


Figura 2.5. Presa convencional graduada. Tomada de Orozco

*Arena cicloneada (Aguas arriba)*

Consiste en la construcción de un bordo primario, para ir desplazando la cortina contendora hacia el vaso. (Vick, 1990). Las partículas gruesas son las que forman la cortina, mientras que las finas se depositan en el vaso de almacenamiento (Figura 2.6), para este proceso es utilizado un hidrociclón, el cual es un separador de partículas. (Escobedo R., 2011).

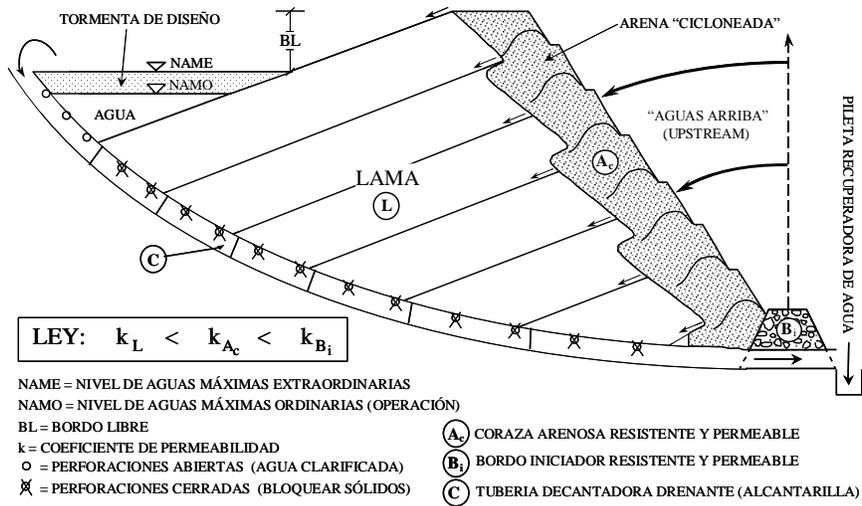


Figura 2.6. Arena Cicloneada (aguas abajo). Tomada de Orozco (2004).

*Espigas (Aguas arriba)*

Los jales son depositados hacia el vaso de almacenamiento (Escobedo R., 2011), utilizando espigas, las cuales son tuberías pequeñas que dan origen a múltiples puntos e intervalos regulares a lo largo de una línea de conducción principal. (Acevedo V., 2017). El material depositado en la periferia de la zona es más permeable debido a que las partículas son más gruesas, esto a su vez le confiere mayor estabilidad (Figura 2.7). En dado caso que los jales sean homogéneos se produce un manto freático por debajo del nivel usual (Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, A. C. , 1993).

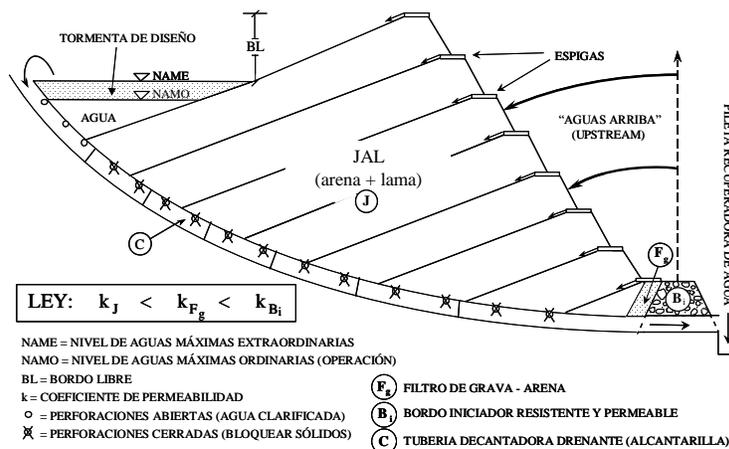


Figura 2.7. Espigas (Aguas arriba). Tomada de Orozco (2004).

Enrocamiento (Aguas abajo)

En este método se va desplazando la cortina hacia abajo, conforme se va incrementado la altura (Figura 2.8), al mismo tiempo se va haciendo un dique con rocas, esto lo hace particularmente efectivo contra zonas con mucha sismicidad (Escobedo R., 2011).

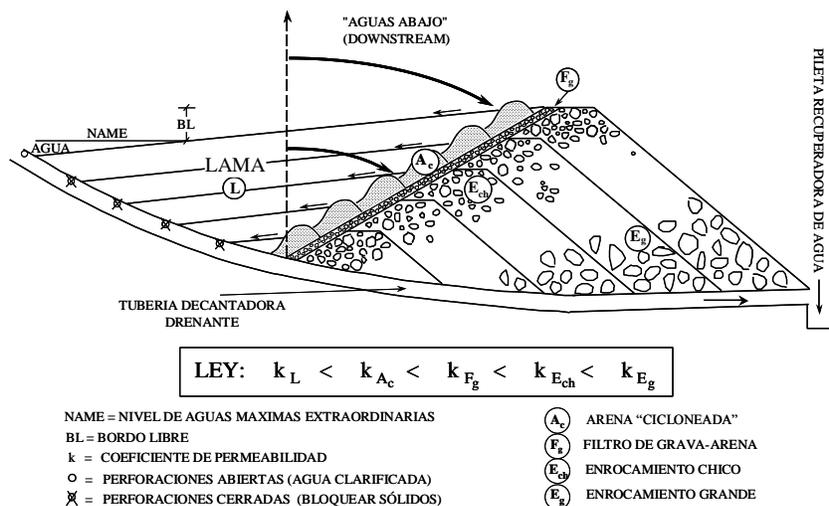


Figura 2.8. Enrocamiento (Aguas abajo). Tomado de Orozco (2004).

Chimenea y delantal (Aguas abajo)

Los jales se sostienen por una pared impermeable, por lo cual es necesaria la colocación de drenes (Figura 2.9), en la figura se observa que es la chimenea con el delantal (Escobedo R., 2011).

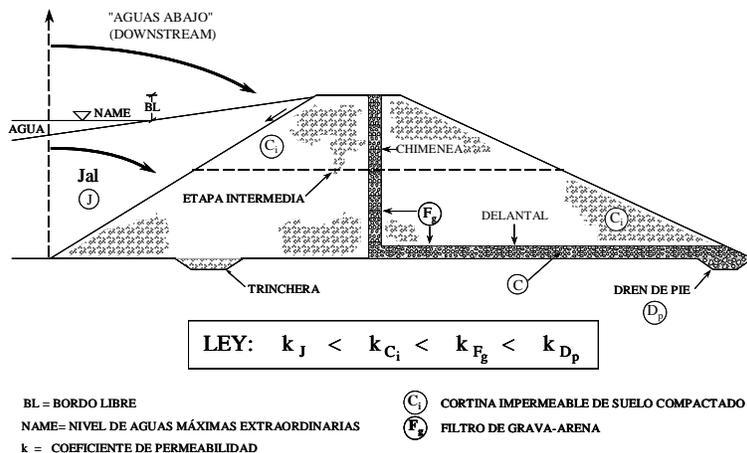


Figura 2.9. Chimenea y delantal (Aguas abajo). Tomado de Orozco

Arena cicloneada y compactada (Aguas abajo)

Se usan dos bordos, uno interno y otro externo, de tal forma que el bordo sirva como pivote para ir haciendo crecer la cortina de forma externa y a lo alto, hasta alcanzar el bordo externo (Figura 2.10). La cortina se hace con arena cicloneada (Escobedo R., 2011).

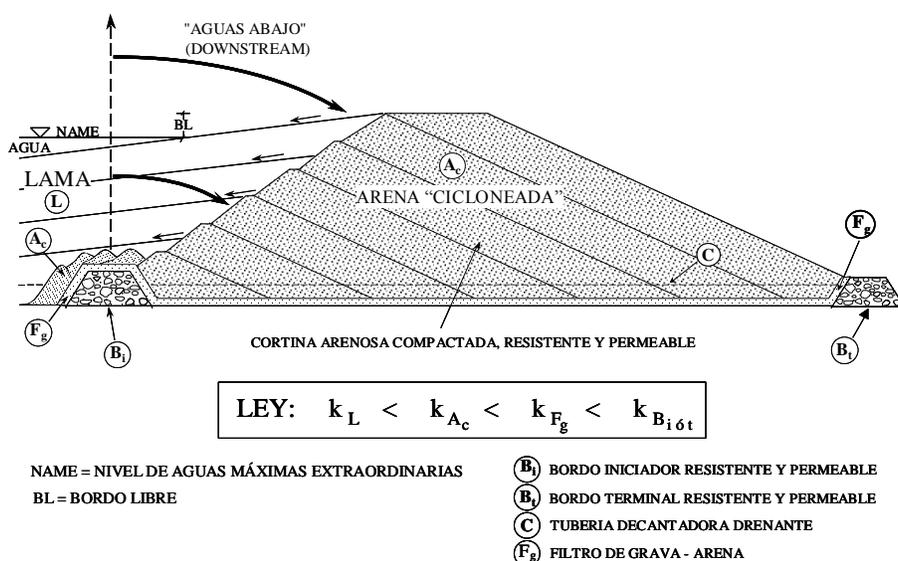


Figura 2.10. Arena cicloneada y compactada (Aguas abajo). Tomado de Orozco (2004)

Enrocamiento y arena cicloneada (Aguas abajo y aguas arriba)

Se hace una capa de roca en la cortina con una distribución granulométrica regida por la NOM-141-SEMARNAT-2003, en donde la parte inferior de la capa tiene material grueso, después se colocará una capa de material mediano y por último grueso, junto con alguna lina impermeable (Figura 2.11), justo donde descansará el vaso de la presa (Escobedo R., 2011).

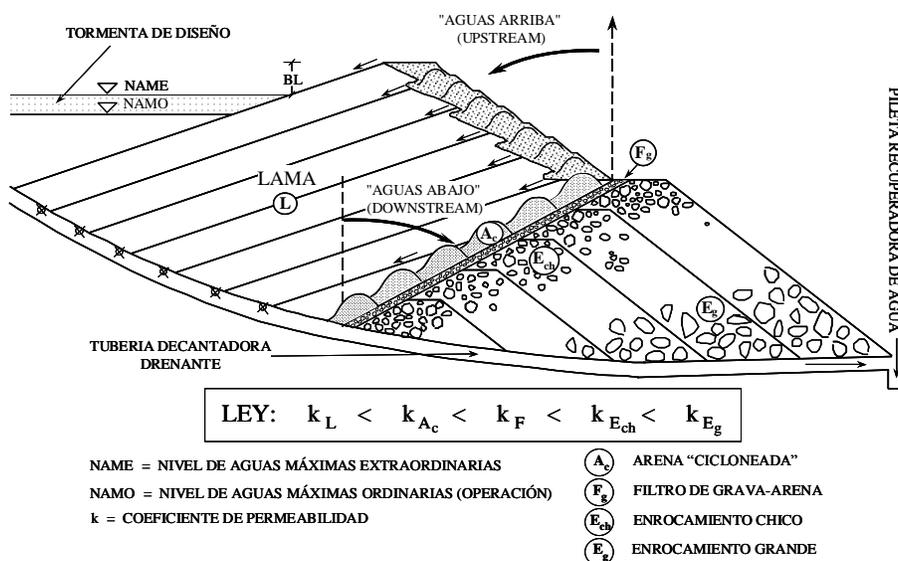


Figura 2.11. Enrocamiento y arena cicloneada (Aguas abajo y aguas arriba). Tomado de Orozco 2004

*Enrocamiento y espigas (Aguas abajo y aguas arriba)*

Es muy similar al anterior, con la diferencia que en lugar de usar arena cicloneada en el proceso se usan las espigas para verter el jal (Figura 2.12).

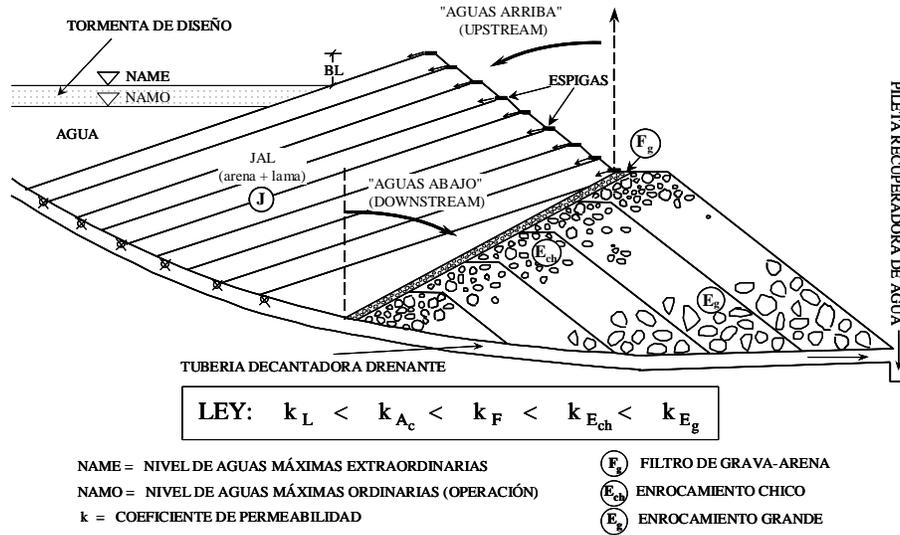


Figura 2.12. Enrocamiento y espigas (Aguas abajo y aguas arriba). Tomado de Orozco (2004).

Para empezar a comprender el comportamiento de un depósito de suelos o en este caso de jales, es necesario analizar las relaciones peso-volumen, propiedades índice y distribución de tamaños en los suelos, las cuales fungen como punto de referencia para predecir el posible comportamiento del material en estudio (Zea Constantino & Rivera Constantino, 2004)

### 3.1 Relaciones fundamentales peso-volumen

Un suelo se compone de un sistema trifásico (líquido, sólido y gas), el entender esto es fundamental para poder desarrollar las relaciones entre los elementos del sistema. A continuación se muestra un esquema general de fases (Figura 3.1) en función de sus masas y volúmenes que ayuda a desarrollar las relaciones fundamentales. (Padilla Velázquez, 2008)

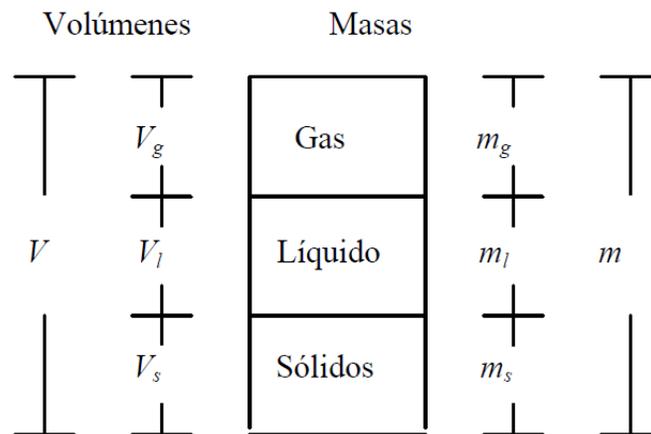


Figura 3.1. Esquema de fases en una muestra de suelo. Tomado de Padilla Velázquez (2008).

Donde  $V$  o  $V_m$ = volumen de la muestra;  $V_s$ = volumen de sólidos;  $V_l$  o  $V_w$ =volumen de agua;  $V_g$  o  $V_v$ = Volumen de vacíos;  $m$  o  $m_m$ =masa de la muestra;  $m_s$ =masa de sólidos;  $m_l$  o  $m_w$ =masa de agua y  $m_g$  o  $m_v$ =masa de vacíos.

Las relaciones de peso-volumen más importantes son las siguientes:

- 1) **Densidad de sólidos** ( $G_s$ ), es la relación entre masa y volumen de la parte sólida del suelo. Para los jales tiene un rango de 2.65 a 2.75, pero en ocasiones pueden llegar hasta los 3.5 (Ali, Naderi, Jami, & Hosentalepur, 2013).
- 2) **Relación de vacíos**, se define como la relación entre volumen de vacíos y sólidos (Das, 2015). Varía entre 0.25 y 15 para suelos (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).

Vic (1990) menciona que para las arenas de jal las relaciones de vacíos (ec. 3.1) oscila entre 0.6 y 0.9, mientras que para los limos de baja plasticidad entre 0.7 a 1.3.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3.1)$$

- 3) *Porosidad*, se define como la razón de volumen de vacíos con respecto al volumen total y se expresa en porcentaje (Das, 2015). Para los jales ronda valores cercanos al 40 % (Vick, 1990).

$$n(\%) = \frac{V_v}{V_m} \times 100 \quad (3.2)$$

- 4) *Grado de saturación*, es la relación de volumen de agua y vacíos (ec. 3.3), se expresa en porcentaje (Das, 2015). Sus valores van de 0 (seco) a 100 (totalmente saturado) dependiendo de la cantidad de agua presente (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).

$$Gw(\%) = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (3.3)$$

- 5) *Contenido de agua*, es define como la relación entre la fase sólida y el contenido de agua (ec. 3.4) (Das, 2015). Para los jales varía entre 20% y 60%. (García Alva, 2019).

$$W = \frac{W_w}{W_s} \quad (3.4)$$

- 6) *Peso unitario*, es el peso del suelo por unidad de volumen (ec. 3.5) (Das, 2015).

$$\gamma = \frac{W}{V} \tag{3.5}$$

7) **Peso unitario seco**, al igual que el peso unitario es la relación peso y volumen (ec. 3.6), pero despreciando el peso del agua (Das, 2015).

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \tag{3.6}$$

## 3.2 Granulometría

El análisis granulométrico se realiza con el propósito de conocer la distribución en el tamaño de partículas y el porcentaje de la fracción fina (material que pasa la malla 200), es por eso que sólo sirve para partículas mayores a 0.75 mm. El procedimiento consiste en cribar una muestra de suelo por medio de tamices, acomodados en orden descendente (Tabla 3.1) de acuerdo con la abertura de las mallas (número de aberturas por pulgada lineal), luego se pesa el suelo retenido por tamiz. Al terminar se gráfica el diámetro de partícula, en el eje de las abscisas, contra el porcentaje del peso retenido por malla, en el eje de las ordenadas, y así obtener la curva de distribución de tamaño de partículas, que en conjunto con los límites de consistencia permite asignar una clasificación al suelo (Terzaghi & Peck , 1978).

Tabla 3.1. Tabla 1. Juego de mallas.. Modificado de Zea Constantino & Rivera Constantino (2004).

Malla (#)	Abertura (mm)
3"	76.2
2"	50.8
1"	25.4
3/4"	19.1
1/2"	12.7
3/8"	9.52
4	4.76
10	2
20	0.84
40	0.42
60	0.25
100	0.149
200	0.074

No obstante, las mallas tienen una limitante de diámetro, entonces para las fracciones más finas de suelo se recurre a métodos de vía húmeda que se basan en la Ley de Stocks (ec. 3.7), la cual determina la velocidad de sedimentación de un partícula (que supone esférica) en un líquido a intervalos de tiempos determinados, mediante un hidrómetro especial (Terzaghi & Peck , 1978).

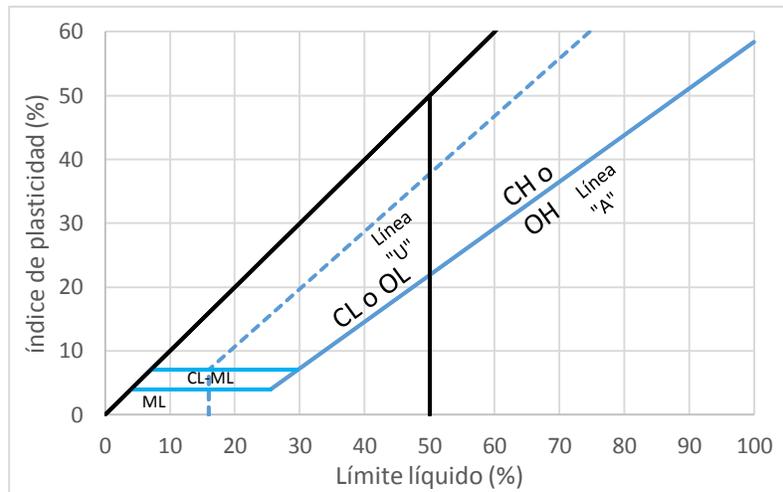
$$v = \frac{\rho_s - \rho_w}{18\eta} D^2 \quad (3.7)$$

### 3.3 Consistencia del suelo.

“El científico sueco llamado Albert Meutriz Atterberg desarrolló un método para describir la consistencia del suelo de granos fino con diferentes contenidos de humedad. A contenidos de humedad bajo el suelo se comporta como un sólido quebradizo. Cuando el contenido de humedad es muy alto el suelo y el agua pueden fluir como un líquido. Por ello, sobre una base arbitraria, dependiendo del contenido de humedad, el suelo puede ser dividido en cuatro estados básicos: sólido, semisólido, plástico y líquido.” Entre cada uno de los estados hay una etapa transición, la cual está en función del porcentaje de humedad. La primera transición es entre estado sólido y semisólido, denominado límite de contracción (LC), entre el estado semisólido a plástico se conoce como límite plástico (LP) y del estado plástico al líquido es llamado límite líquido (LL). (Das, 2015).

Para la determinación el LP y el LL se usan métodos tradicionales, que funcionan para suelos limosos y arcillosos, el método de percusión con la copa de Casgrande para el LL o el método de rollos de suelos para LP; aunque también hay métodos alternativos como lo son los conos de penetración en sus diferentes variedades (inglés, sueco, ruso, etc.). (Candelaria J, *et al.*, 2018).

Por último, es posible conocer la plasticidad del suelo por medio de la Carta de Plasticidad (Gráfica 3.1), aunque para usarla se debe calcular el índice plástico (IP), el cual resulta de la diferencia entre el LL y el LP. (Zea Constantino & Rivera Constantino , 2004).



Gráfica 3.1. Carta de plasticidad. Tomada de la norma D 2487-10.

La carta indica de la siguiente manera la clasificación para plasticidad: “M” para limosa, “C” para arcillosa y “O” para orgánico. Si tiene una baja plasticidad se denota con una “L” y por el contrario una “H” significa una alta plasticidad (Zea Constantino & Rivera Constantino , 2004).

Estos mismos elementos son usados para clasificar a los jales que se conforman de manera general en dos fracciones. Una fina (limo de jal) que usualmente presenta baja plasticidad y la otra gruesa (arena de jal) que presenta nula plasticidad (Shamsai, *et al.*, 2007).

### 3.4 El sistema unificado de clasificación de suelo (SUCS)

Das (2015) indica que el SUCS clasifica en dos grandes categorías a los suelos:

- 1) Suelos de grano grueso que son de grava y arena con menos del 50% que pasa el tamiz de malla 200. Los símbolos empiezan con un prefijo “G” (Grava) o “S” (Arena).
- 2) Suelos de grano fino con 50% o más que pasa por el tamiz de malla 200. Los símbolos empiezan con “M” para limo inorgánica, “C” para la arcilla inorgánica y “O” para limos orgánicos.

Y pueden estar catalogados según sus características como lo son bien graduados “W”, mal graduado o uniforme “P”, baja plasticidad “L” y alta plasticidad “H”. Para clasificar un suelo es útil conocer su fracción fina (% que pase la malla 200) y en función de ello escoger los símbolos que mejor le convengan (Tabla 3.3).

Tabla 3.2. Recomendaciones para clasificar un suelo con el SUCS. Modificado de Zea Constantino & Rivera Constantino (2004)

% de finos	Se debe proporcionar:
menor a 5	Nombre grueso y su característica.
5 a 12	El nombre del grueso, su característica y el nombre del fino.
12 a 50	El nombre del grueso y el nombre del fino.
mayor a 50	El nombre del fino y su característica.

Ahora bien, si hablamos de los jales, SRK Consulting (2010), clasifica los jales según sus características físicas de la siguiente forma (Tabla 3.4).

Tabla 3.3. Tipos de jal. Modificado de SRK Consulting (2010)

Categoría	Material	Descripción
Jales suaves	Potasa Cenizas	Arena con fracciones de limo
Jales de roca dura	Plomo / Zinc Cobre / Níquel Oro / Platino	Puede tener tanto arena como limo y son de baja plasticidad
Jales finos	Minerales de Hierro Lodo Bauxita Lodo de Alquitrán Lodo de Arena minerales	Pequeñas fracciones de arena. Mayormente limo y arcilla.
Jales gruesos	Jal de Arena	Contienen principalmente arena.

### 3.5 Coeficiente de permeabilidad

En un medio poroso el agua tiene la tendencia de fluir de lugares con mayor energía a donde haya menor energía, esta capacidad del agua para fluir está en función de la permeabilidad o conductividad hidráulica -interconexión entre poros- (Das, 2015). Dando como resultado que un material sea permeable cuando contiene vacíos continuos (Terzaghi & Peck , 1978).

Para comprender el flujo de agua en suelo es primordial recurrir a las ecuaciones que rigen el flujo de agua, como lo son Bernoulli y Darcy

#### *Ecuación de Bernoulli*

A partir de la ecuación de Bernoulli (ec. 3.8) sabemos que la altura en un punto de agua en movimiento puede conocerse sumando los cambios en la carga de elevación ( $z$ ), de presión ( $P/\gamma_w$ ) y de velocidad ( $v^2/2g$ ), suponiendo que no hay pérdidas o ganancias de energía (Mott, 2006).

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} + z \quad (3.8)$$

Donde  $h$ = carga total;  $u$ = presión;  $v$ = velocidad;  $g$ = aceleración debida a la gravedad y  $\gamma_w$ = peso unitario del agua.

Pero si la ecuación de Bernoulli es aplicada para un flujo de agua en un medio poroso, el término de la velocidad de carga puede ser despreciado, debido a que la velocidad de filtración es muy pequeña (Das, 2015). Así mismo, la pérdida de carga entre dos puntos puede reescribirse como en la ecuación 3.9 debida a la relación mostrada en la Figura 3.2.

$$\Delta h = h_a - h_b = \left( \frac{u_a}{\gamma_w} + z_a \right) - \left( \frac{u_b}{\gamma_w} + z_b \right) \quad (3.9)$$

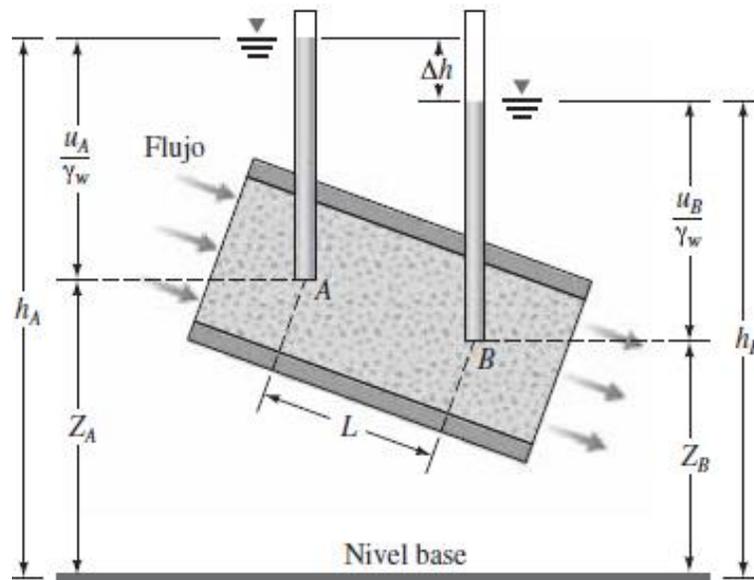


Figura 3.2. Cargas totales para el flujo de agua. Tomado de Das (2015).

De ahí, también se puede deducir el índice de pérdida de carga hidráulica por unidad de longitud o gradiente hidráulico (ec. 3.10).

$$i = \frac{\Delta h}{L} \tag{3.10}$$

Donde  $i$ = el gradiente hidráulico;  $L$ = longitud de flujo sobre el que ocurre la pérdida de carga.

3.5.2 Ley de Darcy

En 1856, Henry Philibert Gaspard Darcy demostró que el caudal que atravesaba una muestra de suelo era linealmente proporcional a la sección y al gradiente hidráulico (ec. 3.11), en condiciones de flujo laminar y se puede expresar de la siguiente forma (Terzaghi & Peck , 1978).

$$Q = \frac{dV}{dt} = kAi \tag{3.11}$$

Donde  $Q$ =gasto o caudal;  $A$ = área de sección transversal del filtro;  $i$ =gradiente hidráulico y  $k$ =coeficiente de conductividad hidráulico o coeficiente de permeabilidad.

De acuerdo con lo anterior podemos decir que el coeficiente de permeabilidad o de conductividad hidráulico es la representación de la velocidad de agua sujeto a un gradiente hidráulico unitario (ec. 3.13).

$$v = ki \tag{3.12}$$

En conclusión, el parámetro “ $k$ ” permite conocer la velocidad de flujo en un suelo y resulta de suma importancia entender el flujo de agua. A continuación, en la tabla 3.5 se muestran los valores típicos de “ $k$ ” (en m/s) para muestras no consolidadas.

Tabla 3.4. Ejemplos de "K". Tomado de Alvarez-Manilla Aceves et al. (2002)

	$k$		$k$
Grava	$10^{-1} - 10^{-2}$	Arena limosa	$10^{-5} - 10^{-7}$
Arena gruesa	$10^{-3}$	Arcilla limosa	$10^{-6} - 10^{-9}$
Arena mediana	$10^{-3} - 10^{-4}$	Arcilla	$< 10^{-9}$
Arena fina	$10^{-4} - 10^{-5}$		

Ahora bien, el flujo laminar se caracteriza por un movimiento ordenado y suave de las partículas en dirección al flujo del fluido, se da en bajas velocidades, conductos pequeños y

en suelos ocurre cuando el gradiente hidráulico es proporcional a la velocidad. De acuerdo con Reynolds, se puede asegurar que un flujo es laminar si la velocidad del agua se mantiene por debajo de la velocidad crítica (ec. 3.13) (Juaréz Badillo & Rico Rodríguez, 2005; Sowers & Sowers, 1972).

$$v_c = \frac{36}{D(1 + 0.0337 T + 0.00022 T^2)} \quad (3.13)$$

Donde  $v_c$ = Velocidad crítica; T temperatura de agua y D=Diámetro de conducción.

### 3.5.3 Coeficiente de permeabilidad

Existen diversos métodos para la determinación de la permeabilidad de suelos, dentro de los cuales destacan: 1) los directos, pues su finalidad es medir el coeficiente de conductividad hidráulica; y 2) los indirectos, los cuales se han desarrollado con otra finalidad, sin embargo, pueden ser usados para calcular el coeficiente (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).

- a) Directos
  - 1. Permeámetro de carga constante.
  - 2. Permeámetro de carga variable.
  - 3. Prueba de campo (pozos de bombeo).
- b) Indirectos
  - 1. Cálculo a partir de la prueba de consolidación.
  - 2. Cálculo a partir de la curva granulométrica.

#### Permeámetro de carga constante

En este tipo de permeámetro se mide el volumen de agua que pasa por medio de una sección de suelo con un área transversal definida, a intervalos de tiempo determinados, (Figura 3.3). Su funcionamiento consiste en ajustar el suministro de agua tanto a la salida como a la entrada, de tal manera que la diferencia en la carga de columna mantenga constante la presión durante la prueba. (Das, 2015; Taylor, 1961).

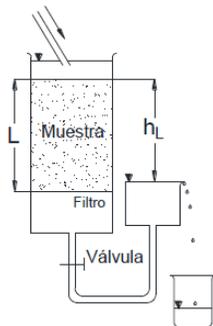


Figura 3.3. Permeámetro de carga constante. Modificado de Terzaghi & Peck (1978).

El gradiente hidráulico, de acuerdo con la figura 3.3 se escribe como:

$$i = \frac{h}{L} \quad (3.14)$$

La ec. 3.3 se puede reescribir conociendo que  $Q = V/t$  y sustituyendo con la ec. 3.14.

$$Q = kAi \text{ ó } \frac{V}{t} = Ak\left(\frac{h}{L}\right) \quad (3.15)$$

Despejando k obtenemos la ecuación 3.16, que se usa para medir el coeficiente de conductividad hidráulica en este tipo de permeámetros.

$$k = \frac{VL}{\Delta hAt} \quad (3.16)$$

#### *Permeámetro de carga variable*

La prueba es muy similar al permeámetro de carga constante, con la única diferencia de que la presión debida a la carga hidráulica es variable con respecto al tiempo, lo que genera que se tengas lecturas  $h_1$  en el tiempo  $t_1$  y  $h_2$  para  $t_2$ . Al realizar la integración entre los límites  $h_1$  y  $h_2$  para los respectivos tiempos se obtiene la permeabilidad con la siguiente ecuación (Lucero Rivera, 2018):

$$k = 2.3 \frac{LA_1}{A_2(t_2 - t_1)} \log \frac{h_1}{h_2} \quad (3.17)$$

Juaréz Badillo & Rico Rodríguez (2005), menciona los siguientes elementos a tomar en consideración al realizar pruebas en permeámetros:

- a) Los permeámetros de carga variables suelen usarse en suelos relativamente permeables, generalmente en arenas y limos o mezclas de esos materiales.
- b) Cuando el agua fluya de forma descendente a través del suelo, se debe cuidar en impedir una nata limosa sobre la superficie de la muestra, ya que esto sesga los datos durante la prueba.
- c) Es conveniente usar muestras de suelo pequeñas para que las pruebas sean más rápidas y son menos propensas a romperse durante la manipulación
- d) Debe usarse agua desaireada.
- e) Se debe tener especial cuidado en medir las dimensiones de la bureta que mide el volumen de agua que expulsa la probeta.
- f) Tener conocimiento de la temperatura.
- g) La estratificación y la compactación no uniforme de la muestra puede hacer que la permeabilidad de la misma disminuya.
- h) La estructura de la muestra puede verse afectada por una saturación demasiado rápida.

*Prueba de campo (Pozos de bombeo)*

“La prueba de bombeo consiste en extraer agua de un pozo o pozos perforados en el suelo de interés, bombeando de él un gasto constante y midiendo el abatimiento del nivel freático produciendo en varios puntos localizados en la cercanía del pozo, en los que se instalan piezómetros o tubos de observación.” (Lucero Rivera, 2018).

En estas pruebas se considera una superficie cilíndrica alrededor del pozo de bombeo y se acepta como que el gradiente hidráulico medio en cualquier punto de la superficie es igual a la pendiente (Fig. 3.4) de la curva de abatimiento, en consecuencia se deduce la ec. 3.18 (Lucero Rivera, 2018).

$$k = 2.3 \frac{q}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \log \frac{r_2}{r_1} \quad (3.18)$$

Si el depósito tiene un estrato impermeable y ese constante (H) se obtiene la ec. 3.19.

$$k = 2.3 \frac{q}{2\pi H(h_2^2 - h_1^2)} \log \frac{r_2}{r_1} \quad (3.19)$$

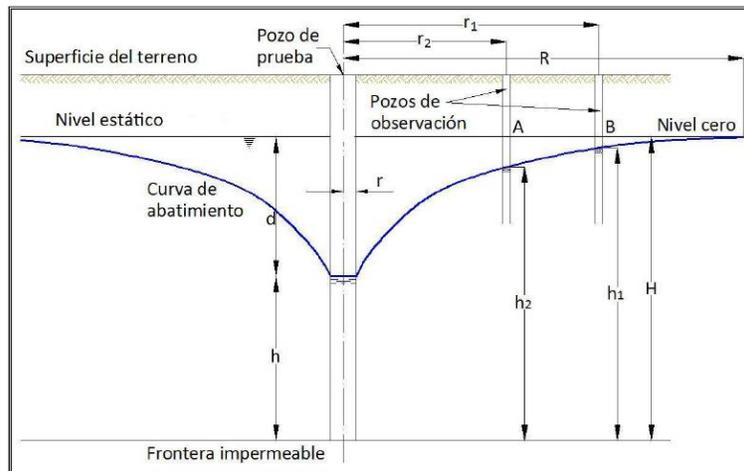


Figura 3.4. Prueba de bombeo en campo. Tomado de Lucero Rivera (2018).

*Coefficiente de conductividad hidráulica a partir de la consolidación*

La consolidación es una teoría propuesta por Terzagui que sucede cuándo una carga genera una compresión o presión sobre una capa suelo poroso, saturado y compresible, la cual es resistida, en un inicio, por el agua intersticial, de tal modo que existe sobre el suelo una presión hidrostática casi igual a la tensión de consolidación, lo que en consecuencia ocasiona que los poros expulsen el agua almacenada para disipar la sobrepresión hidrostática o presión de poro ( $u$ ), en consecuencia se transforma en presión efectiva, o sea, que es transmitida grano a grano (Terzaghi & Peck , 1978).

Terzaghi basó la hipótesis de la consolidación en las siguientes premisas:

- a) La masa de suelo es homogénea e isotrópica en sentido vertical en toda su extensión.
- b) El suelo se encuentra saturado y tanto las partículas sólidas como el agua son incompresibles
- c) El agua que expulsa el material es exclusivamente gravitacional por lo que se puede afirmar que la ley de Darcy es válida.
- d) El comportamiento del suelo es elástico, en términos de esfuerzos efectivos.
- e) La permeabilidad permanece constante durante todo el proceso de consolidación.

Con base en lo anterior es posible relacionar la presión de poro ( $u$ ) y el tiempo en la ecuación unidimensional de la consolidación (ec. 3.20). La cual permite conocer la distribución de presión en el suelo durante el proceso de la consolidación, pero también permite conocer el coeficiente permeabilidad despejando la ecuación.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \frac{k}{m_v \gamma_w} \quad \text{o} \quad c_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} \quad (3.20)$$

Donde  $k$ =coeficiente de permeabilidad de un suelo;  $c_v$ =coeficiente de consolidación;  $m_v$ =el coeficiente de compresibilidad volumétrica del suelo y  $\gamma_w$ =peso específico del agua.

A la compresión del suelo por unidad de espesor original bajo la influencia de un aumento unitario de presión se le denomina coeficiente de compresibilidad volumétrica (ec. 3.21) (Terzaghi & Peck , 1978).

$$m_v = \frac{a_v}{1 - e_0} \quad (3.21)$$

El coeficiente de compresibilidad (ec. 3.22) ocurre cuando la carga a la que sea sometido el suelo genera un incremento de esfuerzos desde  $\sigma'_0$  hasta  $\sigma'_1$ , por consiguiente origina una disminución en la relación de vacíos de  $e_0$  a  $e_1$  (Terzaghi & Peck , 1978).

$$a_v = \frac{e_0 - e_1}{\sigma'_1 - \sigma'_0} \quad \text{o} \quad a_v = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'} \quad (3.22)$$

Finalmente, se defina la expresión conocida como coeficiente de consolidación  $C_v$  (ec.3.23), el cual es la velocidad de compresibilidad por unidad de longitud de masa en un suelo (Hernández, *et al.*, 2018).

$$c_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} \quad (3.23)$$

Para la estimación del coeficiente de consolidación se recurre a la ecuación que involucra el tiempo (ec. 3.24)

$$c_v = \frac{t_v H^2}{t} \quad (3.24)$$

En donde t=tiempo de consolidación al 50% de una gráfica típica de consolidación de deformación contra tiempo en escala logarítmica (Fig. 3.5), H= altura de la probeta y  $t_v$  que es un valor que resulta de las tablas pero dado que en este caso se quiere obtener al 50%, el valor que corresponde es el de 0.197 .

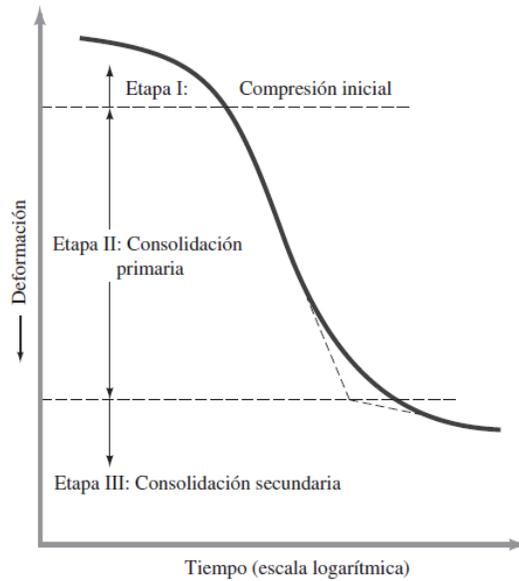


Figura 3.5. Gráfica de consolidación. Tomada de Das (2015).

*Determinación del coeficiente de conductividad hidráulico a partir de la granulometría del suelo.*

Distintos investigadores han encontrado correlaciones entre el diámetro de grano  $D_e$ , el cual corresponde al 10% de la curva granulométrica típica, y la permeabilidad, algunas de estas expresiones se ejemplifican a continuación.

Allen Hazen  $k = 100 D_e^2 C_t$  (3.25)

Schlichter  $k = \frac{771 D_e^2 C_t}{c}$  (3.26)

Terzaghi  $k = D_e^2 C_t C_0 \left( \frac{Cr - .13}{\sqrt[3]{1 - Cr}} \right)^2$  (3.27)

Donde Cr es la compacidad relativa de los suelos;  $C_t = 0.7 + .015T$  siendo T la temperatura en grados, los valores de c y Co vienen en la siguiente tabla:

Tabla 3.5. Valores de C y Co. Tomado de Zea Constantino & Rivera Constantino , (2004).

Cr	C	Tipo de suelo	Co
0.26	83.4	Arenas de grano redondeado	800
0.38	24.1	Arenas de grano anguloso	460
0.46	12.8	Arenas limosas	<400

### 3.6 Factores que influyen en la permeabilidad

- 1) **Las fuerzas de superficie** de los granos determinan principalmente la fuerza de atracción entre las moléculas del fluido y las partículas de suelo; este fenómeno determina en gran medida la velocidad de humectación de un suelo, la porosidad y la relación de vacíos (Alvarez-Manilla Aceves *et al.*, 2002).
- 2) **La porosidad y la relación de vacíos**, el tamaño y configuración de los poros del suelo determina el área por donde circulara el agua, por lo que, si es baja, habrá menor área disponible para fluir (CFE; IINGEN, UNAM., 2007).
- 3) **La tortuosidad del suelo**, ya que un fluido circula con mayor rapidez por un canal uniforme que por uno que presente una alta tortuosidad (Alvarez-Manilla Aceves *et al.*, 2002).
- 4) **Temperatura y viscosidad del fluido** es un factor ajeno al suelo y tiene un gran peso en la determinación de la permeabilidad porque afecta directamente a la velocidad del flujo, lo que en consecuencia provoca que se tenga que medir la temperatura del agua durante la prueba con el objeto de hacer una corrección por temperatura (ec. 3.28) (García Alva, 2019)

$$k_{20} = k_t \frac{\eta_t}{\eta_{20}} \quad (3.28)$$

Donde  $k_{20}$ = coeficiente de permeabilidad a 20°C;  $\eta_{20}$ = viscosidad cinemática a 20°C; mientras que  $k_t$  y  $\eta_t$  es el coeficiente de permeabilidad y viscosidad cinemática, respectivamente, a la temperatura del ensayo.

- 5) *La estratificación* ocasiona que los valores de su permeabilidad sean diferentes en cada estrato, incluso si se trata del mismo suelo con diferente grado de compactación o humedad (Alvarez-Manilla Aceves *et al.*, 2002).
- 6) *Grado de saturación* las burbujas de aire que queden atrapadas pueden obstaculizar el flujo de agua en los vacíos del suelo. Si el grado de saturación es menor al 85%, es probable, que las burbujas taponen la salida del agua e invaliden la Ley de Darcy (García Alva, 2019).
- 7) *Distribución del tamaño de las partículas*, entre más pequeñas las partículas, más pequeños los vacíos que hay entre ellas, lo que influye en la resistencia del flujo (Acevedo V., 2017).
- 8) *Tipo de flujo*, una de las hipótesis en las que se basa la aplicación de la ley de Darcy es para flujos laminares por lo que se el flujo se vuelve turbulento o transitorio no sería posible usar su ecuación (Acevedo V., 2017).
- 9) *El estado de esfuerzos*, varios parámetros del suelo cambian al modificarse el estado de esfuerzos, por ello la permeabilidad puede cambiar en forma importante.
- 10) *Forma y textura de los granos*, la disposición altera la interconectividad entre los vacíos, ocasionando que las líneas de flujo se distorsionen. También entre más angular un suelo menor serán los vacíos y mayor será la tortuosidad, así mismo una textura rugosa genera mayor resistencia friccionante (García Alva, 2019).

### 3.7 Coeficiente de permeabilidad en jales

Una de las propiedades más importantes para los depósitos de jales es la permeabilidad la cual influye en la consolidación, el flujo de agua y la migración de contaminantes al agua subterránea (Bussiére, 2007).

Diferentes autores han desarrollado trabajos de investigación para obtener un rango de valores de conductividad hidráulica, así como para determinar qué factores tienen mayor influencia en la permeabilidad. A continuación se mencionan algunos de los trabajos realizados para determinar dichos rangos de valores y las técnicas de laboratorio implementadas para obtenerlos.

Cancela Rey (1987), obtuvo los resultados tabla 3.6 para muestras de jal extraído en corona y playa de la presa, mediante métodos indirectos usando la curva de disipación de presión de poro y la ecuación de Hazen, la prueba la realizo variando tanto los esfuerzos efectivos como

los contenidos de fino y se concluyó el esfuerzo efectivo de consolidación es el que tiene mayor influencia en el coeficiente de permeabilidad.

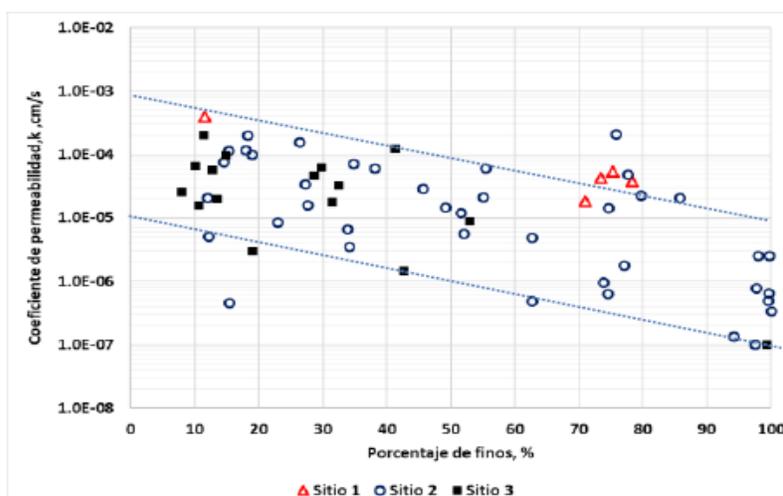
Tabla 3.6. Resultados del coeficiente de permeabilidad para diferentes esfuerzos efectivos. Tomado de Cancela Rey (1987).

Muestra	Porcentaje de finos	D <sub>10</sub> mm	Hazen	Estimación de la permeabilidad a partir de las curvas de consolidación K <sub>v</sub> (cm/s)			
	%		kv	σ' = 1.5	σ' = 3.0	σ' = 6.0	σ' = 12.0
			cm/s	kg/cm <sup>2</sup>			
M-1	23	0.020	4.00x10 <sup>-4</sup>	-	8.98x10 <sup>-6</sup>	2.33x10 <sup>-5</sup>	5.57x10 <sup>-6</sup>
M-2	18	0.032	1.00x10 <sup>-3</sup>	-	1.46x10 <sup>-5</sup>	3.85x10 <sup>-5</sup>	2.72x10 <sup>-6</sup>
M-3	65	0.010	1.00x10 <sup>-4</sup>	2.79x10 <sup>-5</sup>	5.67x10 <sup>-5</sup>	4.11x10 <sup>-5</sup>	9.45x10 <sup>-6</sup>
M-4	35	0.021	4.40x10 <sup>-4</sup>	4.04x10 <sup>-4</sup>	4.80x10 <sup>-5</sup>	6.30x10 <sup>-6</sup>	-
M-5	69	0.010	1.00x10 <sup>-4</sup>	9.25x10 <sup>-5</sup>	-	1.50x10 <sup>-5</sup>	6.10x10 <sup>-6</sup>
M-6	72	0.002	3.24x10 <sup>-6</sup>	-	2.69x10 <sup>-5</sup>	5.20x10 <sup>-5</sup>	3.62x10 <sup>-6</sup>
M-7	74	0.003	9.00x10 <sup>-6</sup>	9.84x10 <sup>-5</sup>	4.65x10 <sup>-5</sup>	2.60x10 <sup>-5</sup>	1.11x10 <sup>-5</sup>
M-8	77	0.003	7.84x10 <sup>-6</sup>	-	8.23x10 <sup>-5</sup>	2.25x10 <sup>-5</sup>	1.95x10 <sup>-6</sup>

Hernández V. *et al.* (2018) determinaron el coeficiente de permeabilidad para jales usando métodos directos e indirectos, acoplado una cámara triaxial tipo CU, ellos compararon la metodología de carga constante y las curvas de disipación de presión de poro obteniendo los valores que se muestran en la tabla 3.8, así mismo fueron capaces de determinar una clara relación entre la cantidad de finos y la permeabilidad, en donde a mayor cantidad de finos menor permeabilidad (gráfica 3.1).

Tabla 3.7. Comparativa entre metodología de carga constante y disipación de presión de poro. Tomado de Hernández V., *et al.* (2018).

Muestra	Método			
	Carga constante		Disipación de presión de poro	
	Carga hidráulica	Coefficiente de permeabilidad	Esfuerzo de consolidación	Coefficiente de permeabilidad
No	kg/cm <sup>2</sup>	cm/s	kg/cm <sup>2</sup>	cm/s
1	0.18	1.508E-05	0.5	2.06E-05
2	0.18	1.160E-05	0.5	1.77E-05
3	0.18	1.560E-05	0.5	3.40E-05

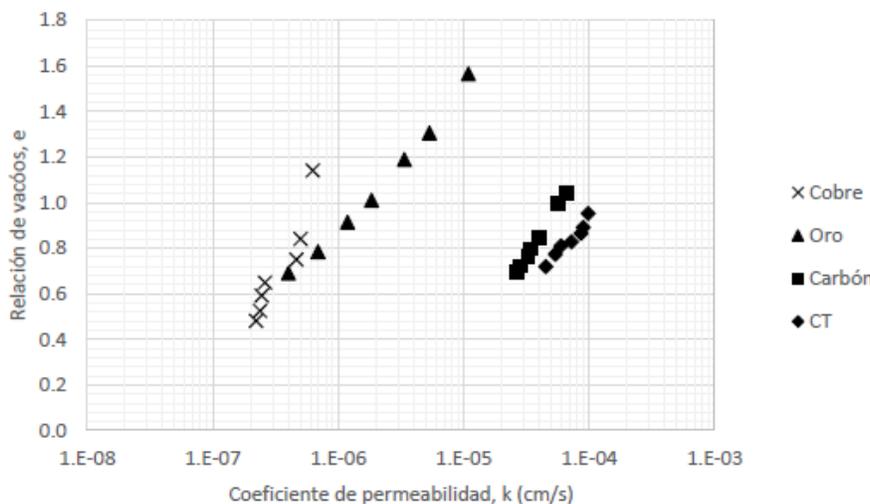


Gráfica 3.2. Relación de finos y coeficiente de permeabilidad. Tomado de Hernández V. et al. (2018).

Qui y Segó (2001) analizaron cuatro minas diferentes (carbón, oro, cobre y arenas bituminosas). Mediante una cámara triaxial usaron la metodología de carga constante variando los esfuerzos para medir el coeficiente de conductividad hidráulica en cada esfuerzo obteniendo los siguientes resultados (tabla 3.8) y al graficarlos (grafica 3.3) fue notorio la relación que existe entre la relación de vacíos por incremento del esfuerzo efectivo sobre el coeficiente de permeabilidad.

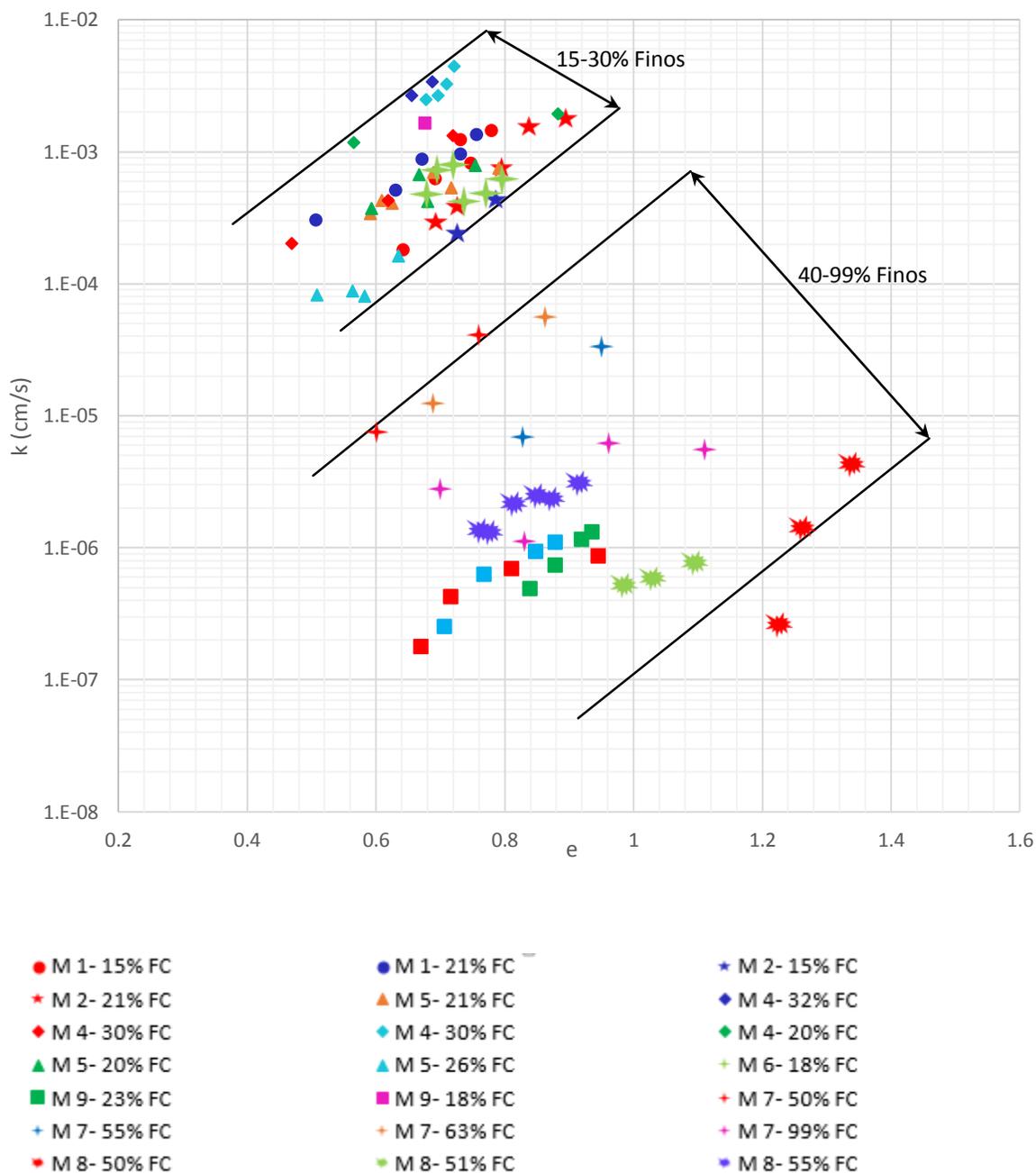
Tabla 3.8. Resultados de Qui y Segó (2001).

Tipo de jal	G <sub>s</sub>	Porcentaje de finos [%]	Clasificación SUCS	k <sub>z</sub> [cm/s]
Cobre	2.75	31.3	SM	4.5×10 <sup>-5</sup> - 9.8×10 <sup>-5</sup>
Oro	3.17	81.3	ML	2.7×10 <sup>-5</sup> - 6.7×10 <sup>-5</sup>
Carbón	1.94	66.4	CL	4.0×10 <sup>-7</sup> - 1.1×10 <sup>-5</sup>
CT	2.6	21.2	SM	2.2×10 <sup>-7</sup> - 6.3×10 <sup>-7</sup>



Gráfica 3.3 Relación de vacíos y permeabilidad. Modificado de Qui y Segó (2001).

Valenzuela (2015) ensayó una gran cantidad de muestras provenientes de minas en Perú y Chile. Con lo anterior fue capaz de determinar que para muestras con finos de entre 15 y 30% la permeabilidad depende de los esfuerzos de confinamiento, la relación de vacíos, así como de la densidad. Sin embargo, para contenidos arriba del 40% la permeabilidad cae abruptamente indicando que probablemente hay un reacomodo entre granos, lo cual disminuye el flujo del agua, esto se puede demostrar mediante la gráfica 3.4.



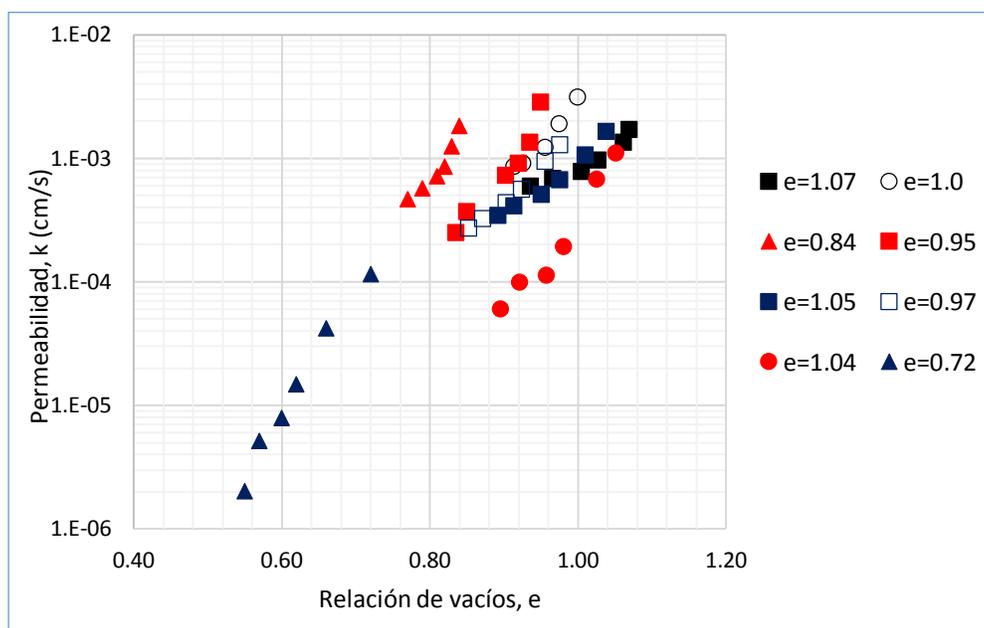
Gráfica 3.4. Relación de permeabilidad, relación de vacíos y finos. Modificado de Valenzuela (2015).

Bussiére (2004) hizo una recopilación una serie de valores de para permeabilidad de varios autores de muestras inalteradas y reconstituidas de jal (tabla 3.8), en consecuencia se percató de que los valores para del coeficiente de permeabilidad para muestras reconstituidas con grano fino (ML) rondan el orden  $1 \times 10^{-4}$  a  $1 \times 10^{-6}$  cm/s y para las inalteradas de  $1 \times 10^{-4}$  a  $1 \times 10^{-7}$  cm/s, esto como consecuencia de que las reconstituidas no tienen una estratificación que permita generar una capa impermeable.

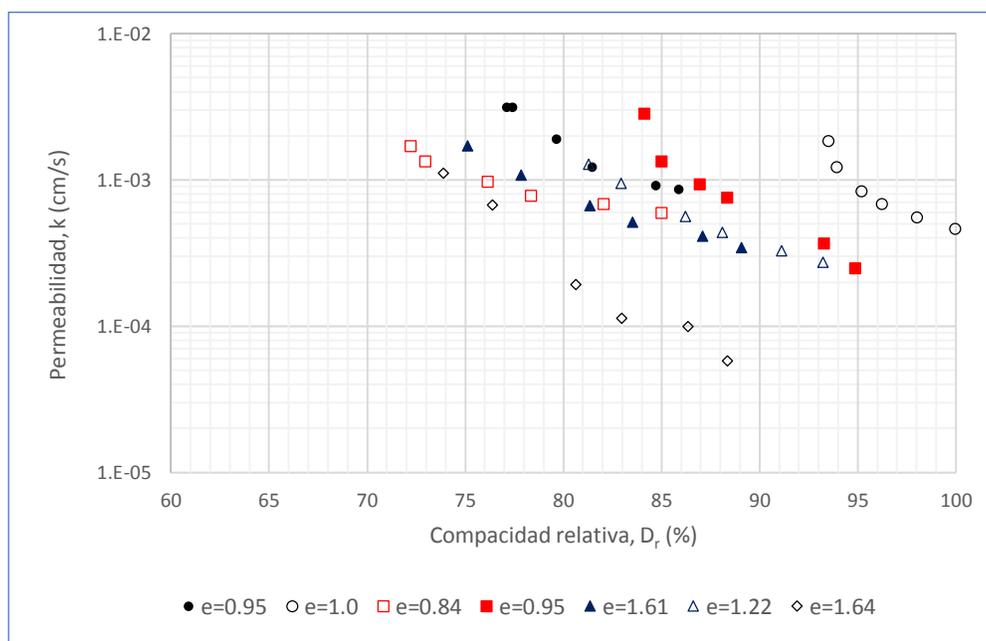
Tabla 3.8. . Valores de permeabilidad para pruebas reconstituidas e inalteradas por diferentes autores. Bussiére (2004).

$k_{sat}$ [cm/s]	e	Equipo utilizado	Clasificación SUCS	Referencia
Muestras reconstituidas				
$1.3 \times 10^{-4}$	0.55	Permeámetro de pared rígida	ML	Guerra 1973
$1 \times 10^{-2} - 5 \times 10^{-3}$	0.65-1.10	Permeámetro de pared rígida	SM-ML	Mittal y Morgenstern 1975
$1 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-7}$	0.60-1.25	Odómetro	SM-ML	Mittal y Morgenstern 1975
$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-6}$	0.45-1.20	Odómetro	ML	Mabes et al. 1977
$6 \times 10^{-3} - 2 \times 10^{-4}$	0.50-1.10	Permeámetro de pared rígida	SP	Nelson et al. 1977
$1 \times 10^{-5} - 7 \times 10^{-7}$	1.20-1.70	Permeámetro de pared flexible	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	Odómetro	ML	Barbour et al. 1993
$1 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-6}$	0.48-0.85	Odómetro	ML	Bussiére 1993
$5 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-5}$	0.50-1.00	Permeámetro de pared rígida	ML	Aubertin et al. 1996
$5 \times 10^{-4}$	0.87	Permeámetro de pared rígida	SM-ML	Bussiére 1998
$3 \times 10^{-5}$	0.8	-	ML	-
$4.5 \times 10^{-5} - 9.8 \times 10^{-5}$	0.50-1.60	Odómetro	SM-ML	Qiu y Sego 2001
$2.7 \times 10^{-5} - 6.7 \times 10^{-5}$	0.50-1.60	-	ML	-
$1.2 \times 10^{-5}$	0.72	Permeámetro de pared flexible	ML	Martin et al. 2005
Muestras inalteradas				
$3 \times 10^{-4} - 4 \times 10^{-4}$	0.48-0.62	Odómetro	SM	Mabes et al. 1977
$3 \times 10^{-5} - 3 \times 10^{-7}$	0.55-1.05	-	ML	-
$1.6 \times 10^{-5} - 9.5 \times 10^{-7}$	-	Permeámetro de pared flexible	ML	Blight y Steffen 1979
$3 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-6}$	1.00-1.40	Permeámetro de pared flexible	ML	Matyas et al. 1984
$1 \times 10^{-3} - 7 \times 10^{-7}$	0.70-1.65	Odómetro	ML	L'Écuyer et al. 1992
$6 \times 10^{-5} - 6 \times 10^{-6}$	-	Permeámetro de pared flexible	ML	Al y Blowes 2000
$4 \times 10^{-4}$	0.61	Permeámetro de pared flexible	SM	-
$4 \times 10^{-5} - 3 \times 10^{-6}$	0.59-0.89	-	ML	Brisson et al. 2002

Acevedo (2017), hizo una serie de ensayos en un permeámetro de carga constante donde por medio de probetas reconstituidas varió la relación de vacíos, de manera análoga variaba la compacidad, los resultados se muestran en la gráfica 3.5.



Gráfica 3.5. Permeabilidad en función de la relación de vacíos. Modificado de Acevedo (2017).

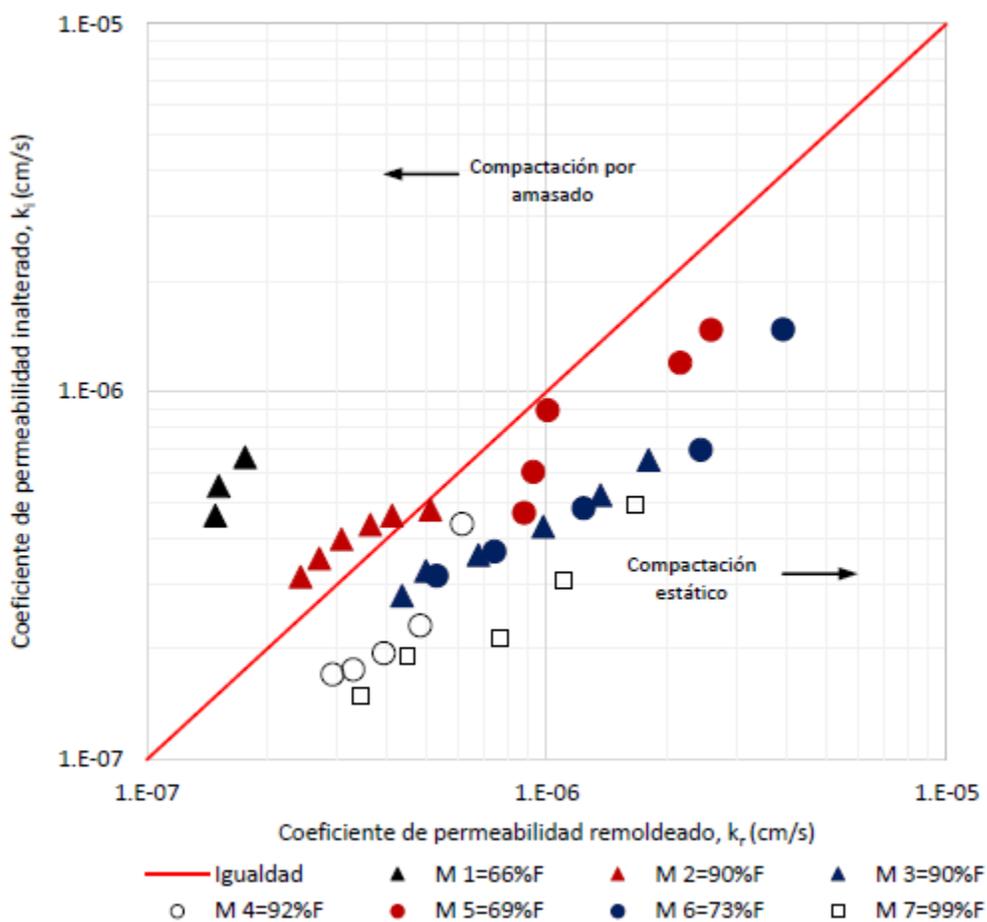


Gráfica 3.6. Permeabilidad en función de la compacidad relativa. Modificado de Acevedo (2017)

Por último, García (2018) ensayó muestras inalteradas y reconstituidas de jal en un permeámetro de carga constante (tabla 3.9), variando los esfuerzos de confinamiento de 0.2 a 3.2 kg/cm<sup>2</sup>, con un barrido de cargas hidráulicas de 150, 250 y 350 cm de columna de agua, de ahí obtuvo que la permeabilidad de las reconstituidas estaban una orden de magnitud por debajo en comparación a las inalteradas pero que a fines prácticos las reconstituidas eran representativas.

Tabla 3.9. Resultado de García (2017).

Etapa #	$\sigma'$ kg/cm <sup>2</sup>	h cm	k cm/s	k cm/s	k cm/s	k cm/s
			Muestra inalterada		Muestra remodelada	
1	0.2	150	5.63 x10 <sup>-7</sup>	6.53x10 <sup>-7</sup>	1.52 x10 <sup>-6</sup>	2.49x10 <sup>-6</sup>
		250	6.34 x10 <sup>-7</sup>		1.86 x10 <sup>-6</sup>	
		350	7.62 x10 <sup>-7</sup>		2.02 x10 <sup>-6</sup>	
2	0.4	150	5.26 x10 <sup>-7</sup>	5.11x10 <sup>-7</sup>	1.05 x10 <sup>-6</sup>	1.82x10 <sup>-6</sup>
		250	5.26 x10 <sup>-7</sup>		1.51 x10 <sup>-6</sup>	
		350	5.18 x10 <sup>-7</sup>		1.53 x10 <sup>-6</sup>	
3	0.8	150	4.25 x10 <sup>-7</sup>	4.41x10 <sup>-7</sup>	7.52 x10 <sup>-7</sup>	1.41x10 <sup>-6</sup>
		250	4.31 x10 <sup>-7</sup>		1.07 x10 <sup>-6</sup>	
		350	4.34 x10 <sup>-7</sup>		1.12 x10 <sup>-6</sup>	
4	1.6	150	3.43 x10 <sup>-7</sup>	3.87x10 <sup>-7</sup>	5.59 x10 <sup>-7</sup>	9.39x10 <sup>-7</sup>
		250	3.69 x10 <sup>-7</sup>		7.10 x10 <sup>-7</sup>	
		350	3.68 x10 <sup>-7</sup>		7.58 x10 <sup>-7</sup>	
5	2.5	150	3.35 x10 <sup>-7</sup>	3.12x10 <sup>-7</sup>	3.69 x10 <sup>-7</sup>	7.93x10 <sup>-7</sup>
		250	3.20 x10 <sup>-7</sup>		5.25 x10 <sup>-7</sup>	
		350	3.22 x10 <sup>-7</sup>		6.04 x10 <sup>-7</sup>	
6	3.2	150	2.59 x10 <sup>-7</sup>	2.99x10 <sup>-7</sup>	3.10 x10 <sup>-7</sup>	6.95x10 <sup>-7</sup>
		250	2.83 x10 <sup>-7</sup>		4.68 x10 <sup>-7</sup>	
		350	2.95 x10 <sup>-7</sup>		5.28 x10 <sup>-7</sup>	



Gráfica 3.7. Comparación de k para muestras inalteradas y reconstituidas. Tomado de García (2019).

## Capítulo 4 Descripción y calibración del equipo.

El equipo es un permeámetro de carga constante y pared flexible, que se compone de un tablero metálico de aluminio con 6 mm de espesor, un ancho de 1.25 m y una altura de 1.70 m, asimismo, cuenta con un sistema de válvulas interconectadas mediante tubería de 6 mm de diámetro que transportan presión de aire, transferida a tuberías saturadas con agua desaireada, con la finalidad de circular agua a través de la muestra de suelo (probeta). Además, el permeámetro está diseñado para ensayar probetas de entre 4-10 cm de altura y 10.13 cm (Flores C., *et al.*, 2008).

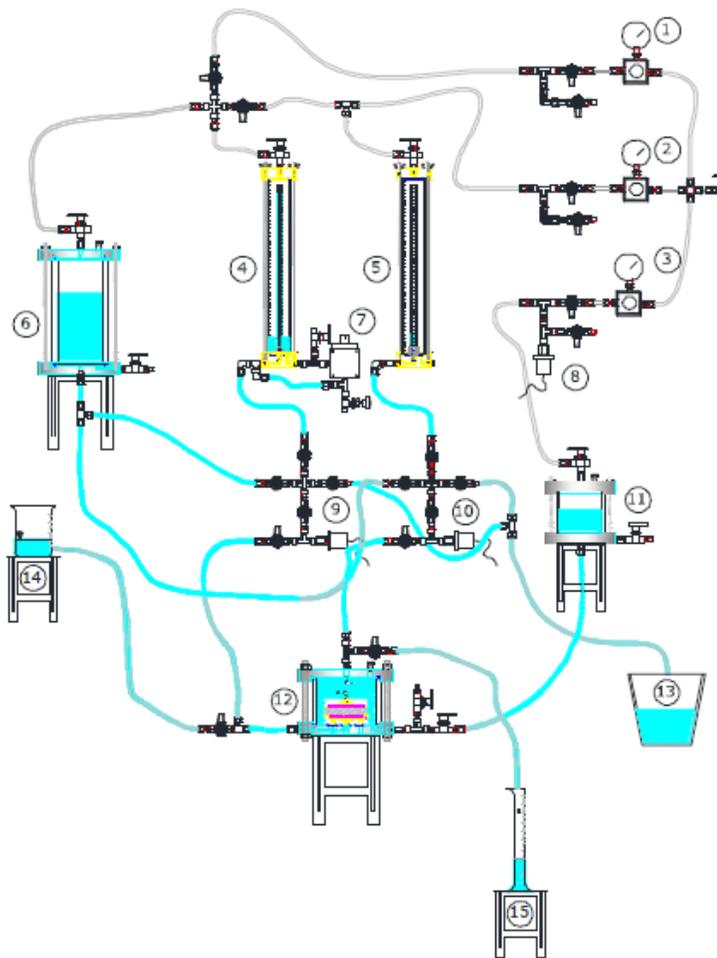


Figura 4.1. Esquema general del equipo. 1. Regulador de contrapresión inferior, 2. Regulador de contrapresión superior, 3. Regulador de confinamiento, 4. Bureta de flujo inferior, 5. Bureta de flujo superior, 6. Depósito de agua, 7. Sensor de cambio volumétrico, 8. Sensor de presión de confinamiento, 9. Sensor de contrapresión inferior, 10. Sensor de contrapresión superior, 11. Interfaz aire agua, 12. Cámara de ensayo, 13. Depósito de agua de gasto de salida, 14. Depósito de agua para circulación y 15. Bureta para recolectar agua de salida en la etapa de circulación. Tomado de Acevedo (2017).

### 4.1 Elementos del sistema

El permeámetro se constituye por 3 elementos, que en su conjunto generan que el sistema funcione, cada uno de ellos es de trascendencia y se describirán a continuación en los siguientes subtítulos.

### 4.1.1 Sistema de cambio de presiones.

El sistema de presiones está compuesto de: 1) Regulador de presión, ajusta la presión que entra al sistema, 2) manómetro, permite leer de forma manual la presión introducida, 3) sensor de presión, registra las lecturas durante las pruebas, 4) compresor, suministra presión por tres vías al permeámetro: a) contrapresión inferior (CPI) (Figura 4.1, elemento 1), la cual suministra presión a la bureta inferior que llega hasta el pedestal de la probeta, b) contrapresión superior (CPS) (Figura 4.1, elemento 2) que suministra la bureta superior que desemboca en el cabezal de la probeta y c) confinamiento (Figura 4.1, elemento 3), responsable de generar un esfuerzo isótropo a la probeta se conecta a la cámara (Figura 4.1, elemento 12) mediante un tanque con una interfaz aire-agua (Figura 4.1, elemento 11).

### 4.1.2 Sistema de cambio volumétrico

El sistema de volumen es dirigido por dos buretas externas, las cuales a su vez, almacenan dos buretas internas de menor diámetro (Figura 4.1, elementos 4 y 5); las buretas internas son de 32 cm de altura con un área de  $2.27 \text{ cm}^2$  y un flujo variable que permite la circulación de agua a través de la probeta, contrario a las buretas externas cuyo flujo se mantiene estático. Ambos pares de buretas se recargan por medio de un tanque externo con interfaz aire-agua (Figura 4.1, elemento 6). Finalmente, el sensor de cambio de volumen el cual se encuentra colocado de forma estratégica, por debajo de la bureta inferior para medir el flujo introducido a la probeta (Figura 4.1, elemento 7).

### 4.1.3 Cámara de ensaye

La cámara (Figura 4.1, elemento 12) es donde se encuentra alojada la probeta durante el ensaye. Se caracteriza por su recubrimiento de lucita con tapas de acero inoxidable sellada herméticamente. Durante la prueba, ésta se encuentra llena de agua confinante con un esfuerzo isótropo. Entonces, para introducir agua a la probeta, que se encuentra aislada con una membrana flexible, en la parte inferior del pedestal, donde descansa la muestra, se encuentra conectada a la bureta inferior y por la parte del cabezal se tiene conexión a la contrapresión superior, por cualquiera de las dos conexiones se puede introducir el agua. En la Figura 4.9 se muestra de manera esquemática a la cámara.

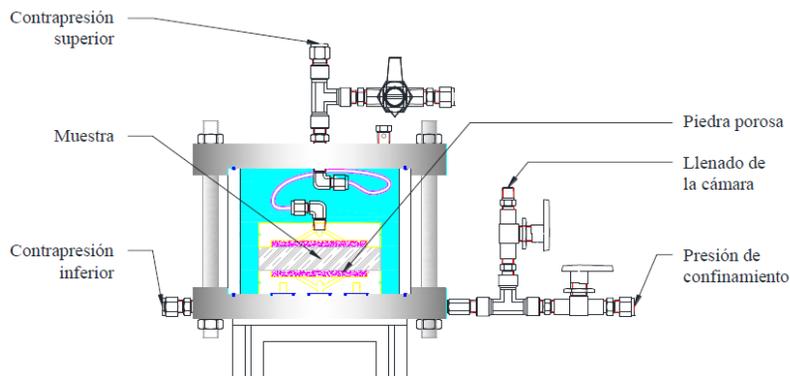


Figura 4.2. Cámara de ensaye. Tomado de Acevedo (2017).

## 4.2 Sensores

### 4.2.1 Sensor de cambio volumétrico

Se usa un sensor de la marca Valadyne (Figura 4.3), modelo DP15, el cual provee medidas de columna de agua de hasta 35 cm, también mide los cambios de presión en la columna de agua y los traduce a cambio de volumen. Debido a su configuración son útiles tanto para gases como para agua, ofreciendo una precisión de  $\pm 0.25\%$  (Flores C., *et al.*, 2008).



Figura 4.3. Sensor de cambio volumétrico.

### 4.2.2 Sensores de presión

Se emplea un sensor de presión de la marca MSI Sensor, modelo 300, sensible a cambios de presión en agua, vapor o fluidos contaminados. Los sensores tienen mediciones de 0 a 100 psi, con una desviación menor al 1%, confiables en intervalos de 40°C a 85°C.



Figura 4.4. Sensor de presión.

### 4.2.3 Programa de control y adquisición de datos

El programa de captura de datos y de semi-instrumentación fue desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (IIUNAM), en LabView®, lenguaje de programación de la plataforma National Instruments, y fue realizado por el Ing. Enrique Gómez en colaboración con personal del área de Geotecnia perteneciente al IIUNAM (Flores C., 2008). Para que los datos registrados por los sensores lleguen a la computadora y sea factible para el programa procesarlos, el permeámetro consta de un acondicionador de diez canales analógicos, que permiten la interpretación de datos en señales cuantitativas como presión y volumen.

El programa consta de dos módulos; el módulo de calibración, mediante el cual se determinan las constantes que rigen a los sensores, y el módulo de operación, el cual permite la realizar y registrar los ensayes.

#### 4.2.4 Módulo de calibración

Al ingresar al programa en el apartado de *calibración de transductores* se despliegan 3 opciones como se muestra en la figura 4.5; la primera es *calibrar transductores*, diseñada para hacer propiamente la calibración, la segunda, *cambiar constantes de calibración*, donde se pueden realizar ajustes o cambiar algunas de las constantes y la tercera, *terminar*, la cual sirve para salir de esta ventana.

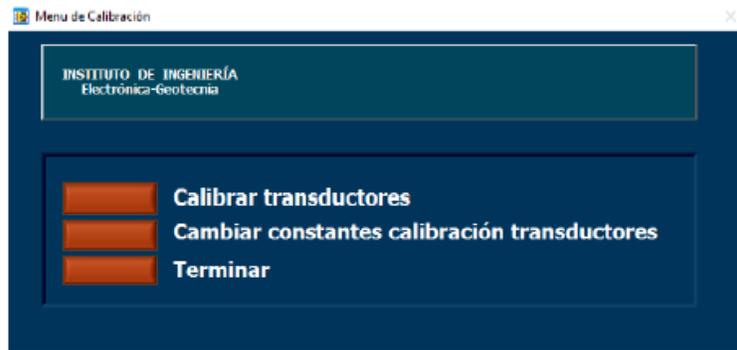


Figura 4.5. Menú de calibración.

Al seleccionar la primera opción abre una nueva pestaña (Figura 4.6) donde se indica la fecha de la última calibración, el transductor que se está calibrando, las unidades usadas y la pendiente, esta última será el parámetro de conversión entre el voltaje indicado por el sensor y el parámetro patrón contra el que se compare como medida patrón (en donde la pendiente para la presión es la densidad del mercurio y el área interior de la bureta para el volumen).

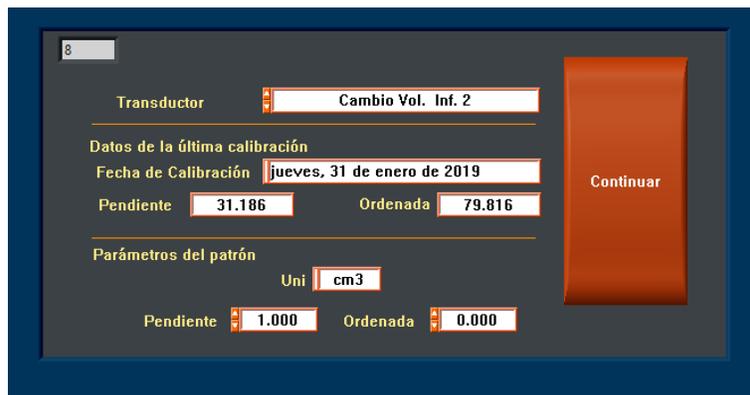


Figura 4.6. Menú de constantes de calibración.

Para continuar con la calibración se selecciona *Continuar*, es aquí donde el sensor referirá la medida patrón (columna de mercurio o bureta) con el voltaje que marca el sensor, para lograrlo es necesario hacer una serie de mediciones de las magnitudes físicas (presión y

volumen) introduciendo las lecturas patrón de forma manual y de manera simultánea el programa registrará la lectura correspondiente de cambio de voltaje, con ello se obtendrá la curva de calibración (Figura 4.7) que tendrá en el eje de las abscisas la variación de voltaje y en las ordenadas la magnitud física, en consecuencia la pendiente será la relación entre ambas. Al finalizar el programa permitirá guardar los datos que se almacenaran en archivo de texto.



Figura 4.7 Registro de calibración.

#### 4.2.4 Módulo de operación

Para realizar el ensaye se mostrara un menú (Figura 4.8) que despliega los pasos a seguir durante la prueba de manera general, el día, la hora y cual permeámetro se está usando.

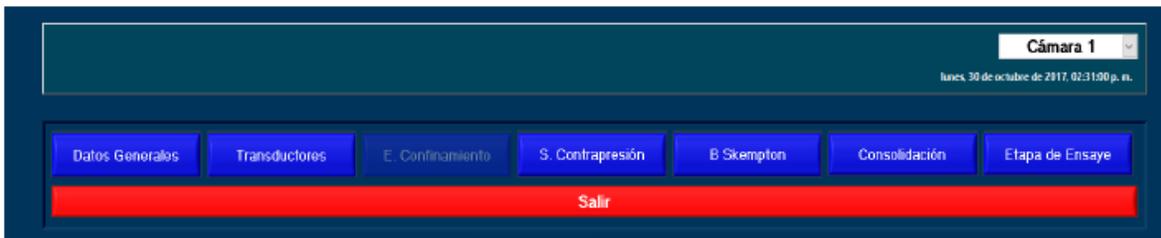


Figura 4.8. Menú general de la prueba.

#### Datos generales

##### Generales

Ahí se podrán registrar datos de la prueba como localización, sondeo, profundidad, observaciones, operador, proyecto y por último se podrá configurar el tipo de prueba.



Figura 4.9. Datos generales de la prueba.

### Dimensiones

Se registran las características físicas de la probeta como; peso, altura promedio y diámetro, superior medio e inferior (Figura 4.10).



Figura 4.10. Dimensiones de la probeta.

### Características del suelo

En este apartado se introducen las características más esenciales del suelo, como contenido de humedad, densidad relativa de sólidos, límite líquido y plástico, y clasificación SUCS.



Figura 4.11. Características del suelo.

### *Carpeta*

Aquí se podrá indicar la ubicación donde deseé almacenar el archivo.



Figura 4.12. Carpeta.

### *Archivo*

Es donde se le dará nombre al archivo (Figura 4.13), para guardarlo de esa manera.

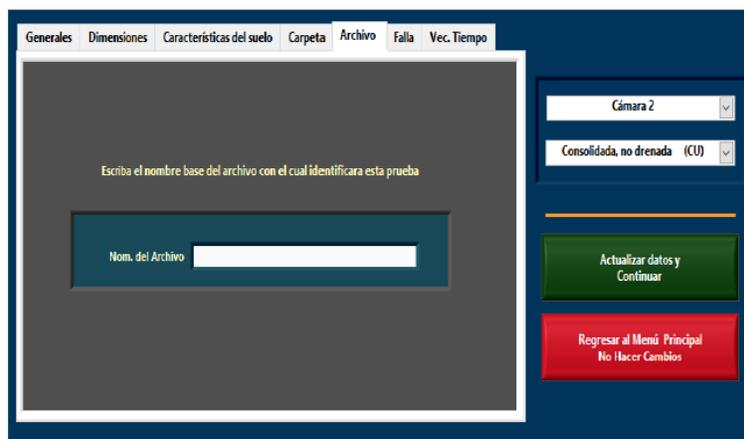


Figura 4.13. Archivo

### *Vector de tiempo*

Es donde se indicará el tiempo de la prueba y el número de puntos por prueba. Con base a lo anterior, se calculará los intervalos de tiempo en los cuales se capturaran los datos durante la fase de consolidación en la prueba.

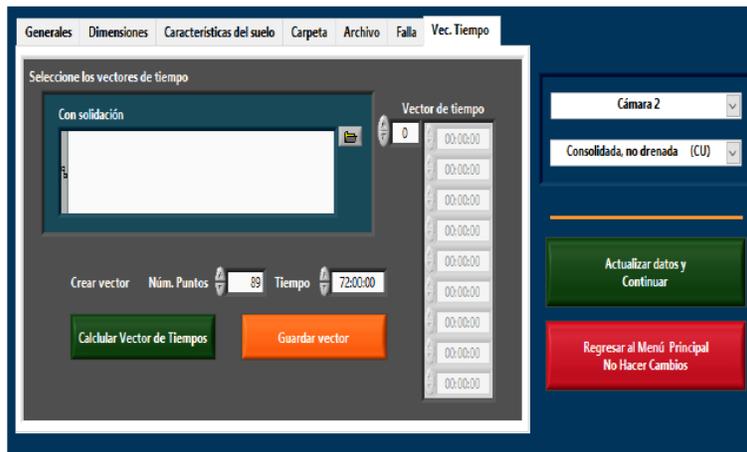


Figura 4.14. Vector de tiempo.

Una vez terminado la captura de datos se presionará el botón de *actualizar datos y continuar*, para generar el archivo de la nueva prueba.

#### Transductores

En esta subpestaña (Figura 4.15) se podrán observar lecturas de los sensores en tiempo real.

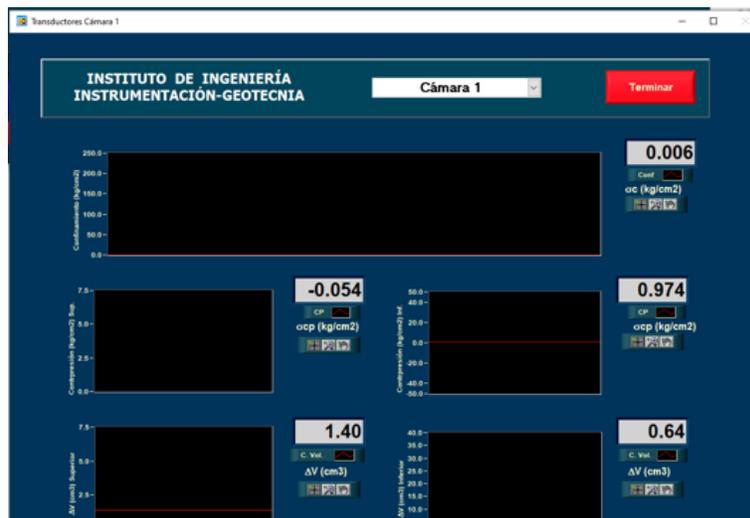


Figura 4.15. Pantalla de transductores.

#### Saturación por contrapresión

En la parte izquierda de la pantalla (Figura 4.16) se presentan los datos iniciales y finales de la bureta, del lado derecho se presentan el cambio volumétrico contra la presión de confinamiento aplicada.

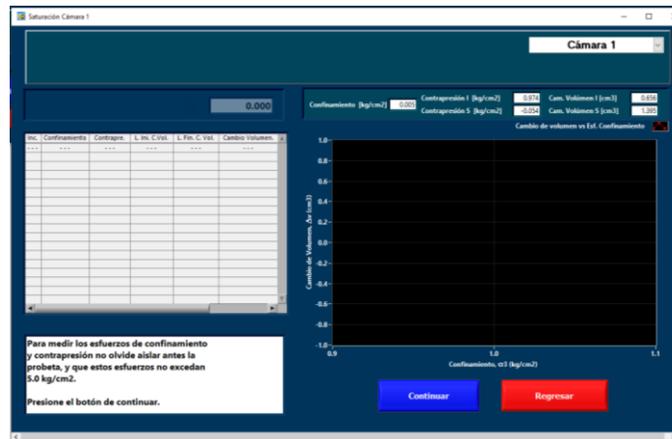


Figura 4.16. Saturación por CP.

Para aplicar la saturación a contrapresión (CP) se debe aplicar la misma carga, tanto por la contrapresión superior como la inferior, así como tener un esfuerzo de confinamiento aplicado a la cámara, para lograr esto ambas buretas se conectan a la contrapresión inferior y se abren todas las válvulas de la cámara para permitir la inyección de agua a la probeta como se muestran en la figura 4.17.

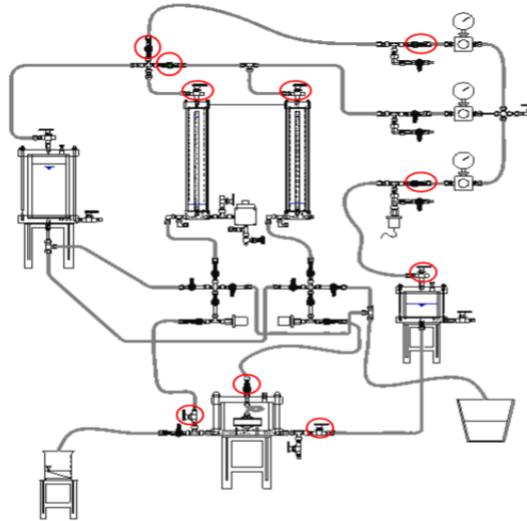


Figura 4.17. Arreglo de válvulas abiertas para saturar a CP.

### B de Skempton

Aquí se pretende analizar la B de Skempton con la meta de conocer el grado de saturación de la muestra, para ello es necesario aumentar la presión de confinamiento, sin permitir el drenaje, el programa registra los valores del confinamiento antes y después de aumentar la presión, así mismo, al aumentar el confinamiento se registrara un aumento en la presión de poro, el programa se encarga de guardar estos incremento en la presión, y a partir de los resultados obtenidos calcula la relación entre estos aumentos de presión para obtener un

parámetro adimensional que va de 0 a 1, llamado B de Skempton, en el cual se asegura que la probeta esta saturad con valores iguales o mayores a 0.96.

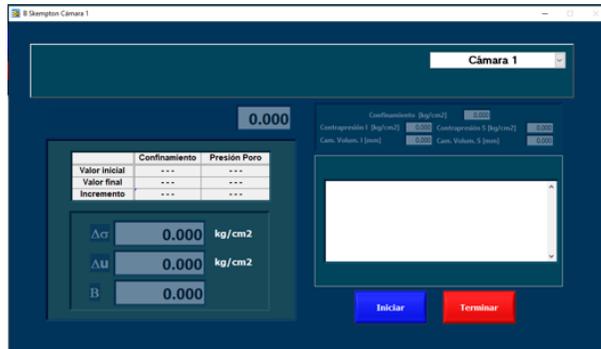


Figura 4.18. Medición de la B de Skempton.

Para lograr el registro de la B de Skempton ambas cargas de contra presión deben ser iguales, para ello se conectan por medio de la contrapresión superior, parecido a la saturación por contrapresión, la diferencia recae en que no se va inyectar agua a la probeta sino que solo se medirá la presión de poro y para ello se necesita cerrar el drenaje entre las bureta y la cámara, como se muestra en la figura 4.19 para permitir que la presión llegue al sensor.

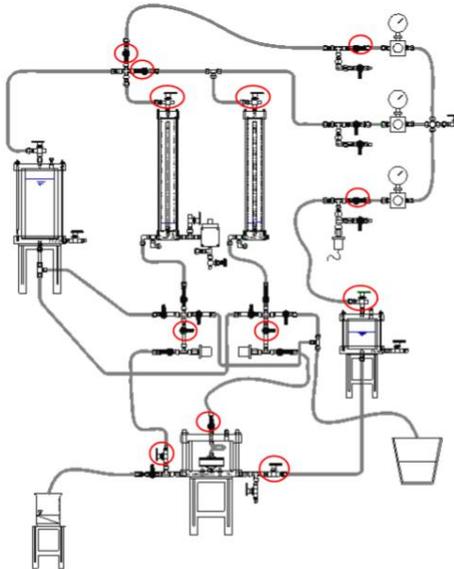


Figura 4.19. Arreglo de válvulas abiertas para medir B de Skempton.

#### Consolidación

En el apartado destinado a consolidación la ventana en la parte derecha muestra, el monitoreo en tiempo real de los sensores y también hace capturas del cambio de volumen a intervalos de tiempo determinados por el vector de tiempo. Mientras el programa gráfica en tiempo real el volumen expulsado por la probeta y el tiempo obteniendo la curva de Casagrande (Tiempo contra volumen) y de Taylor (Raíz de tiempo contra volumen) visualizadas en la Figura 4.20.



Figura 4.20. Prueba de consolidación.

Para que la prueba se pueda realizar de manera adecuada, es necesario aplicar un incremento en los esfuerzos efectivos (diferencia entre la contrapresión y el confinamiento), con el fin de crear un incremento en la presión de poro, ésta aumenta y se deja estabilizar sin ser drenada, una vez que esto sucede, se deja expulsar el agua para disipar la presión de poro por solo dren. Esto se logra haciendo que las buretas tengan la misma presión como ya se ha mencionado y dejando que el agua expulsada pase por el sensor de cambio volumétrico (Figura 4.21), ubicado en la bureta inferior, para así cuantificar el volumen expulsado durante la consolidación hasta la disipación en la presión de poro.

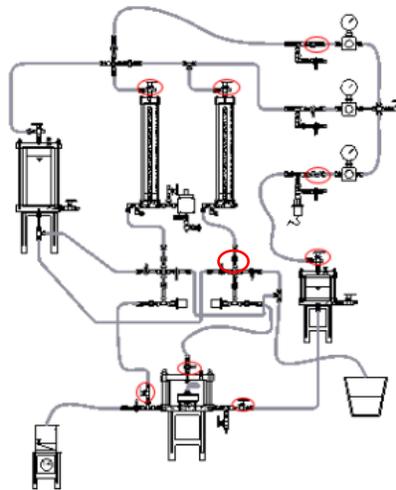


Figura 4.21. Arreglo de válvulas abiertas para la consolidación.

#### Ensayo de permeabilidad

Lo primero que se verá al abrir esta sección será la opción y la forma en la captura de los datos, ya sea; *manual o automática*, una vez que sea haya seleccionado la forma automática se procede a calcular el vector de tiempo para esta prueba, esto se hace diciéndole al programa cuantos puntos se quieren tomar en un tiempo predeterminado, una vez que se calcule el vector de tiempo se desplegará la pantalla principal (Figura 4.22) de la prueba en donde se

podrá ver el gasto hidráulico, la permeabilidad en ese momento, el volumen que ha ingresado a la probeta, la carga hidráulica y el tiempo transcurrido; por otro lado, en la parte derecha aparecen dos graficas; permeabilidad con respecto al tiempo y cambio de volumen con respecto al tiempo, con ello se puede monitorear de mejor manera el desempeño de la prueba en tiempo real.



Figura 4.22. Etapa de ensaye.

Para poder hacer que el permeámetro corra agua a través de la probeta es necesario generar una diferencia entre presiones, esto es posible haciendo que cada bureta trabaje de forma independiente con su propio regulador de contrapresión, una vez generado el gradiente de presión el agua fluirá a través de la probeta. Para ello las válvulas abiertas se muestran de forma esquemática en la figura 4.23.

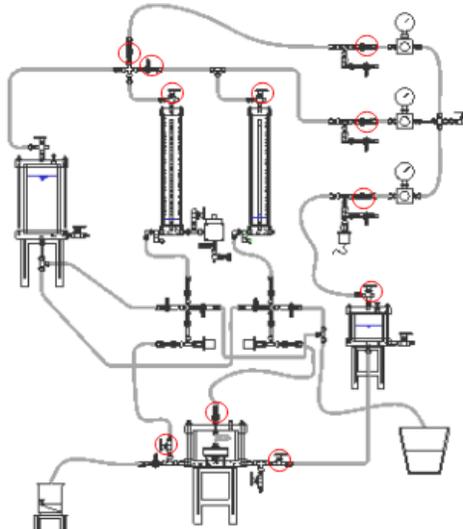


Figura 4.23. Arreglo de válvulas abiertas para el ensaye experimental de permeabilidad.

### 4.3 Calibración del equipo

La calibración es la relación entre datos registrados en forma de voltaje y magnitudes físicas, de tal forma que las señales emitidas por medio del sensor estén referidas a un medida patrón, el cual está regido por magnitudes físicas.

4.3.1 Sensor de cambio volumétrico

La calibración los transductores se rige por el principio de proporcionalidad, entre las lecturas de las columnas de agua al interior de las buretas, y los cambios de voltaje emitidos por el transductor al haber un cambio en la altura de las columnas (Acevedo V., 2017).

Es necesario asegurarse que el sensor no tenga aire en su interior, puesto que puede afectar las lecturas, de ahí que se purgue retirando un tornillo a su costado y dejando correr agua hasta que el flujo sea constante.

Antes de calibrar el transductor es necesario llenar la bureta interior con una columna de agua, hasta unos 30 cm de altura, aproximadamente, mientras se dejan unos 4 cm para la bureta exterior, es importante aclarar que el agua de la bureta exterior deberá estar siempre presente en la misma cantidad, ya que si se vacía o se le vierte más agua después de la calibración el transductor tendría que ser calibrado nuevamente. Así pues, para calibrar el sensor se accede a transductores en el programa, la interfaz pedirá introducir la pendiente y la ordenada, siendo está primera el área de la bureta y la segunda la altura de la columna de agua, con ello el programa podrá calcular el volumen de agua que se le dé por lectura de manera automática. Una vez que se hayan ingresado dichos datos se presiona el botón de continuar, ahí aparecerá otra ventana para tomar registro de las lecturas que se hacen de forma gradual, bajando entre dos y tres centímetros altura de la columna de agua por lectura, hasta llegar a la altura de la columna de la bureta exterior, cuando se tiene tanto el volumen de agua como el voltaje la máquina genera un punto, la sucesión de dichos puntos genera una curva de calibración.

En la figura 4.24 se puede observar la curva de calibración que obtuvo al calibrar el sensor de cambio volumétrico del permeámetro.

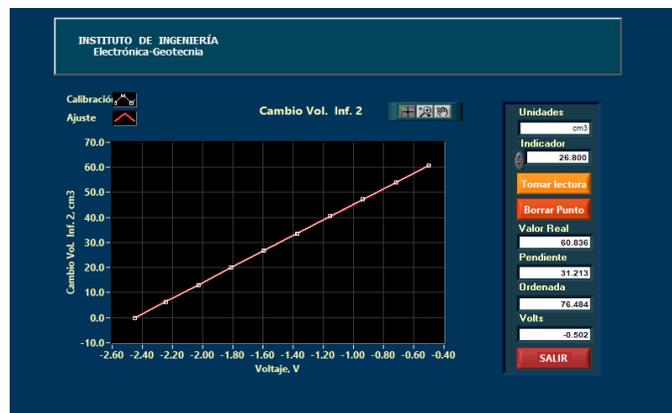


Figura 4.24. Curva de calibración del sensor de cambio volumétrico inferior.

Finalmente, hay que asegurar que el sensor se encuentre calibrado. Entonces, se lleva a cabo una verificación, el procedimiento es parecido al de calibración, sin embargo, en vez de seleccionar la pantalla de calibración dentro del programa se abre la de transductores y de forma manual, en Excel, se van tomando las lecturas tanto de la bureta como las que está registrando el sensor, en teoría, ambos resultados deben ser iguales, pero en la realidad no

los son con exactitud, es por eso que se gráfica el volumen patrón contra el volumen del sensor, y así al obtener hacer una ajuste lineal de los datos para conocer la variación existe en los resultados, si consideramos que la pendientes muy cercanas a 1 indican que los valores, son en fines prácticos, iguales, podemos asegurar que la calibración es adecuada y las mediciones serán correctas.

A continuación, en la figura 4.25 se muestra el resultado de la verificación del sensor.

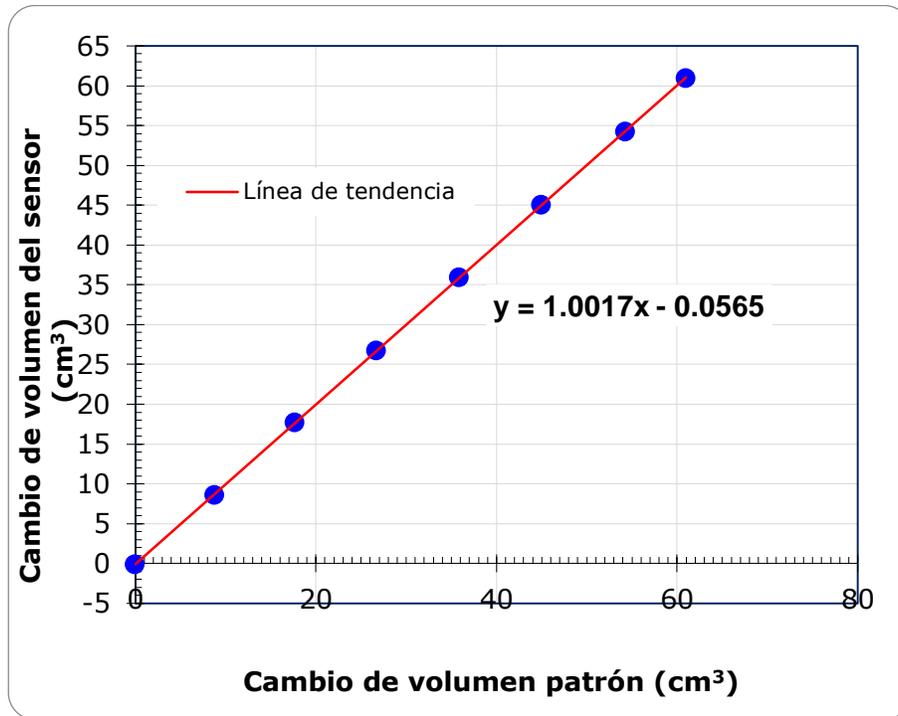


Figura 4.25. Gráfica de verificación del sensor de cambio de volumétrico.

#### 4.3.2 Sensores de presión.

El principio de calibración en los sensores de presión es el mismo que el cambio volumétrico, con la diferencia que la medida patrón será la altura de una columna de mercurio que se registrá por su densidad a 18 °C,  $\rho_{Hg} = 13.56 \text{ g/cm}^3$ .

La calibración comienza conectando el sensor de presión la columna de mercurio y se irán dando incrementos, según el manómetro, de  $0.5 \text{ kg/cm}^3$  que al igual que en el caso anterior se deben registrar en el software para poder cotejarlo contra los cambios de voltaje. Los resultados para el sensor de: confinamiento, CPS y CPI se mostrarán a continuación.

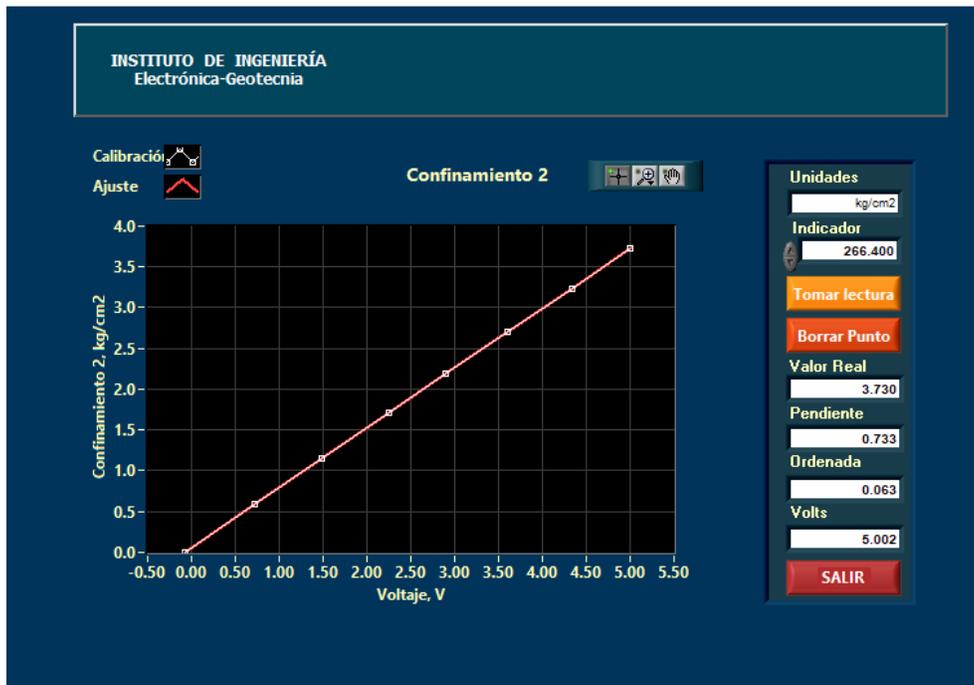


Figura 4.26. Curva de calibración del sensor de confinamiento.

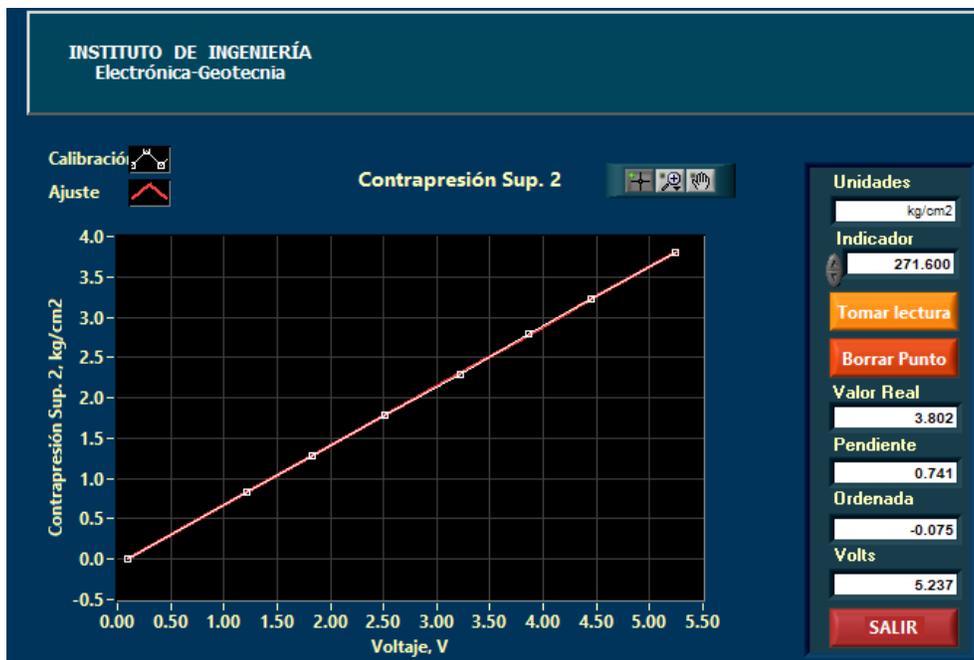


Figura 4.27. Curva de calibración del sensor de CPS.

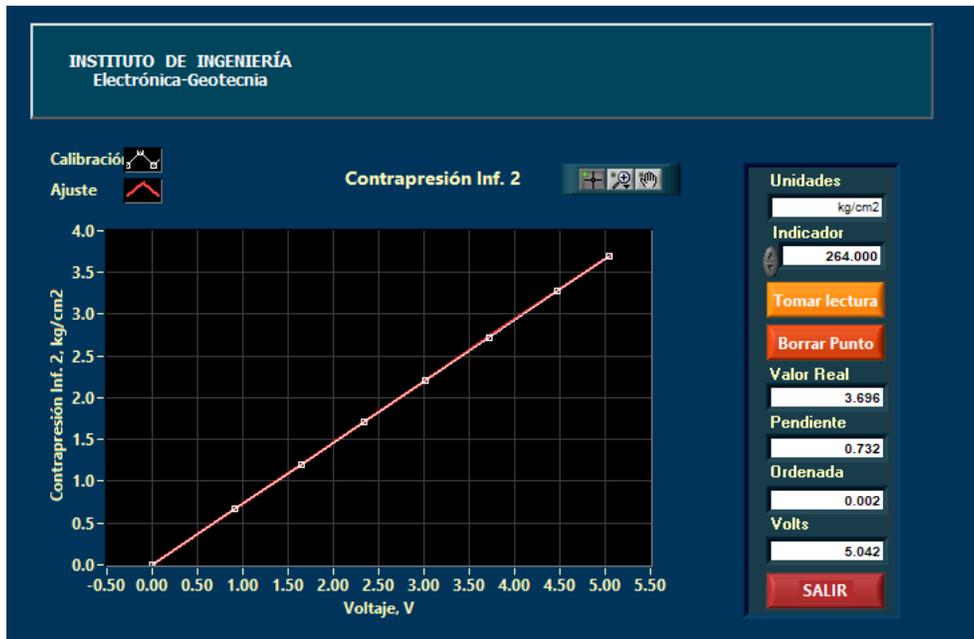


Figura 4.28. Curva de calibración del sensor de CPI.

Al finalizar se deben verificar los resultados, para ello se hace una verificación cruzada (Figura 4.29), es decir, los 3 sensores se verifican al mismo tiempo usando una sola línea de alimentación conectada a la columna de mercurio. Por último, se hace un ajuste lineal entre lecturas patrón y el registro del sensor usando los mismos incrementos de la calibración.

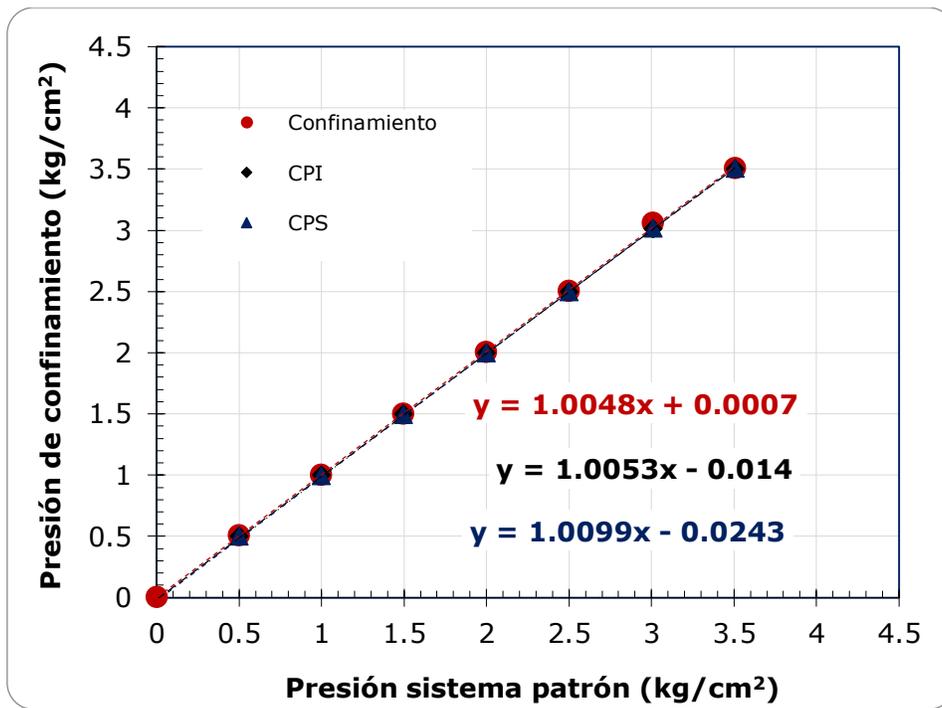


Figura 4.29. Verificación cruzada

## Capítulo 4 Descripción y calibración del equipo

Debido a que la instrumentación tiene como objetivo la precisión y confiabilidad de los datos se calculó la precisión, error parcial, error total y la tolerancia para cada uno de los sensores.

Tabla 4.1. Cálculos de error, precisión y tolerancia en el sensor de cambio volumétrico.

Lectura Sensor	Lectura Patrón	Diferencia cm <sup>3</sup>	Error parcial	Error total	Tolerancia
cm <sup>3</sup>		L.S.-L.P	$\frac{ L.S.-L.P }{L.P} \times 100$	$\frac{ L.S.-L.P }{\text{Capacidad del sensor}} \times 100$	$\frac{\text{Diferencia máxima}}{L.P} \times 100$
0	-0.07	0.07	-	-	-
8.8	8.73	0.07	0.80%	0.10%	1.03%
17.7	17.75	0.05	0.28%	0.07%	0.51%
26.7	26.77	0.07	0.26%	0.10%	0.34%
35.9	35.94	0.04	0.11%	0.06%	0.25%
45	45.09	0.09	0.20%	0.13%	0.20%
54.3	54.27	0.03	0.06%	0.04%	0.17%
61	61	0	0.00%	0.00%	0.15%
Promedio		0.0525	0.0024	0.0007	0.0038

Tabla 4.2. Cálculos de error, precisión y tolerancia en el sensor de confinamiento.

Lectura Sensor	Lectura Patrón	Diferencia kg/cm <sup>2</sup>	Error parcial	Error total	Tolerancia
kg/cm <sup>2</sup>		L.S.-L.P	$\frac{ L.S.-L.P }{L.P} \times 100$	$\frac{ L.S.-L.P }{\text{Capacidad del sensor}} \times 100$	$\frac{\text{Diferencia máxima}}{L.P} \times 100$
0.002	0.000	0.00200	-	-	-
0.505	0.498	0.00660	1.32%	0.11%	10.59%
1.001	0.997	0.00420	0.42%	0.07%	5.30%
1.499	1.495	0.00380	0.25%	0.06%	3.53%
2.001	1.999	0.00180	0.09%	0.03%	2.64%
2.501	2.498	0.00340	0.14%	0.06%	2.11%
3.060	3.007	0.05280	1.76%	0.88%	1.76%
3.504	3.506	0.00160	0.05%	0.03%	1.51%
Promedio		0.00952	0.0058	0.0018	0.0392

Tabla 4.3. Cálculos de error, precisión y tolerancia en el sensor de CPI.

Lectura Sensor	Lectura Patrón	Diferencia kg/cm <sup>2</sup>	Error parcial	Error total	Tolerancia
kg/cm <sup>2</sup>		L.S.-L.P	$\frac{ L.S.-L.P }{L.P} \times 100$	$\frac{ L.S.-L.P }{\text{Capacidad del sensor}} \times 100$	$\frac{\text{Diferencia máxima}}{L.P} \times 100$
-0.036	0.000	0.03600	-	-	-
0.500	0.498	0.00160	0.32%	0.03%	0.96%
0.997	0.997	0.00020	0.02%	0.00%	0.48%
1.496	1.495	0.00080	0.05%	0.01%	0.32%
1.996	1.999	0.00320	0.16%	0.05%	0.24%
2.497	2.498	0.00060	0.02%	0.01%	0.19%
3.012	3.007	0.00480	0.16%	0.08%	0.16%
3.500	3.506	0.00560	0.16%	0.09%	0.14%
Promedio		0.00660	0.0013	0.0004	0.0036

## Capítulo 4 Descripción y calibración del equipo

Tabla 4.3. Cálculos de error, precisión y tolerancia en el sensor de CPS.

Lectura Sensor	Lectura Patrón	Diferencia $kg/cm^2$	Error parcial	Error total	Tolerancia
$kg/cm^2$		$ L.S.-L.P $	$\frac{ L.S.-L.P }{L.P} \times 100$	$\frac{ L.S.-L.P }{Capacidad\ del\ sensor} \times 100$	$\frac{Diferencia\ máxima}{L.P} \times 100$
-0.057	0.000	0.05700	-	-	-
0.498	0.498	0.00040	0.08%	0.01%	1.36%
0.996	0.997	0.00080	0.08%	0.01%	0.68%
1.495	1.495	0.00020	0.01%	0.00%	0.45%
1.998	1.999	0.00120	0.06%	0.02%	0.34%
2.498	2.498	0.00040	0.02%	0.01%	0.27%
3.014	3.007	0.00680	0.23%	0.11%	0.23%
3.503	3.506	0.00260	0.07%	0.04%	0.19%
Promedio		0.00867	0.0008	0.0003	0.0050

A manera de resumen de la calibración y verificación de los sensores de muestra la tabla 4.5.

Tabla 4.4. Resumen de resultados de la calibración y verificación.

Sensor	Marca	Capacidad	Calibración		Verificación		Precisión
			Pendiente	Ordenada	Pendiente	Ordenada	
Cambio volumétrico	Validyne	70 $cm^3$	31.213	76.484	1.0017	-0.0565	0.090 $cm^3$
Confinamiento	MSI Sensors	6 $kg/cm^2$	0.733	0.063	1.0048	0.0001	0.007 $kg/cm^2$
CPI	MSI Sensors	6 $kg/cm^2$	0.732	0.002	1.0053	-0.0140	0.052 $kg/cm^2$
CPS	MSI Sensors	6 $kg/cm^2$	0.741	-0.075	1.0099	-0.0243	0.057 $kg/cm^2$

## Capítulo 5 . Metodología y descripción del material

Para la elaboración de esta tesis se llevaron a cabo 4 pruebas a muestras inalteradas de residuos mineros. Con base en lo anterior, en los siguientes sub capítulos se describe el material analizado, según el contenido de humedad, densidad de sólidos, límites de consistencia y granulometría. Las muestras M1 y M2 provienen de la mina San Martín de Grupo México, ubicada en Sombrerete, Zacatecas, mientras que las muestras M3 y M4 pertenecen a la mina Charcas de Grupo México, ubicada en Charcas, San Luis Potosí.

### 5.1 Contenido de agua

El contenido de agua en las muestras se obtuvo de acuerdo con la norma ASTM D-2216, el procedimiento consiste en obtener recortes (generalmente 4) del suelo al momento de labrarla, después se colocan en un recipiente de metal del cual se conozca su peso, posteriormente se pesa la muestra de suelo húmeda, se deja 24 horas en un horno a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C, se extrae del horno para dejarla enfriar en un desecador por 30 minutos y finalmente pesarla. Por medio del procedimiento anterior, se obtienen los datos necesarios para determinar el contenido de agua en la muestra al dividir el peso seco entre el peso. Los resultados arrojaron que el contenido de agua para las muestras variaba de 20% a 30%.

A continuación, se muestra una tabla resumen de los resultados para los contenidos de agua de la primera muestra (véase Anexo A).

Tabla 5.1. Contenido de agua en la muestra ss-3-1, San Martín, Zac., profundidad 25-25.8 m.

No. de cápsula	Peso de cápsula	Wsw + cápsula	Wss + cápsula	Wsw	Wss	Contenido de Agua
	g	g	g	g	g	%
42	8.09	17.89	16.01	1.88	7.92	23.74%
36	6.47	12.76	11.57	1.19	5.10	23.33%
47	8.23	18.22	16.32	1.90	8.09	23.49%
37	8.33	13.06	12.19	0.87	3.86	22.54%
Promedio						23.27%

### 5.2 Densidad de sólidos

Dentro de las pruebas de laboratorio más importantes se encuentra la determinación de la densidad de sólido (Gs) ya que permite calcular tanto las relaciones de fases como la relación de vacíos y grado de saturación de la muestra (García Alva, 2019). Esta prueba fue elaborada con base en la norma ASTM D-854.10, en la cual se indica que para material que pase la malla 4, se usan aproximadamente 200 g de muestra de suelo seco.

Para llevar a cabo esta prueba, el suelo debe de ser homogenizado hasta eliminar todos los grumos, esto se logra remodelando el material con una espátula encima de un vidrio y agregándole agua destilada hasta generar una mezcla de pasta semi-líquida (Figura 5.1, parte 1 y 2); posteriormente, es dividida en dos partes para pasar cada una a una batidora (Figura 5.1, parte 3 y 4). Como resultado, se forma una suspensión uniforme que puede verterse en un matraz aforado y calibrado.



Figura 5.1. Fotografía de la metodología para la densidad de sólidos.

El matraz se pone a baño maría (Figura 5.2, parte 1), a la vez que se conecta a una bomba de vacío entre 30 y 40 minutos, hasta que se observe que no haya más burbujas, esto con la finalidad de extraer el aire atrapado en el agua y el suelo. Después, el matraz se llena por encima de la marca de aforo con agua destilada sin aire y se deja sedimentar por 24 horas (Figura 5.2, parte 2). Transcurrido ese lapso de tiempo el matraz se afora, se pesa y se obtiene su temperatura, al final el suelo se vacía en una charola y se deja dentro de un horno a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C durante otras 24 horas para pesar el suelo seco al día siguiente .



Figura 5.2. Fotografías de la metodología para la densidad de sólidos.

La obtención de los resultados de la muestra M1 que proviene de Zacatecas se realiza como se muestra en la tabla 5.2, el resto se pueden consultar en el anexo A. Las pruebas indican que las densidades oscilan entre 2.9 y 3.2.

Tabla 5.2. Densidad de sólidos en la muestra ss-3-1, San Martín, Zac., profundidad 25-25.8 m.

Densidad de sólidos											
No. De ensaye	Matraz	Peso de matraz+ agua+ suelo g	T °C	Tara No.	Peso matraz + agua a T °C g	Peso de cápsula g	Peso del suelo + cápsula g	Ws g	Vs cm <sup>3</sup>	Densidad de sólidos Gs	% de error
1	4	844	22.2	30	682.2	183.4	417.5	234.1	72.3	3.238	1.25%
2	11	820.9	22.2	31	659.8	179.7	414.1	234.4	73.3	3.198	
Promedio										3.22	

### 5.3 Límites de consistencia

Para obtener el límite líquido, plástico e índice de plasticidad, se decidió usar un cono inglés, debido a la dificultad que presenta determinar estos parámetros en métodos de percusión para los residuos mineros, ya que tiene un origen artificial y plasticidad muy baja.

Para realizar la prueba se usa uno cono inglés de brazo ajustable verticalmente (Figura 5.3, parte 1), el cual soporta un cono de 30° de ápice y 80 g de masa, en su punta y tiene una base metálica para colocar el recipiente cilíndrico que contendrá al suelo por debajo del cono de penetración (Figura 5.3, parte 2).

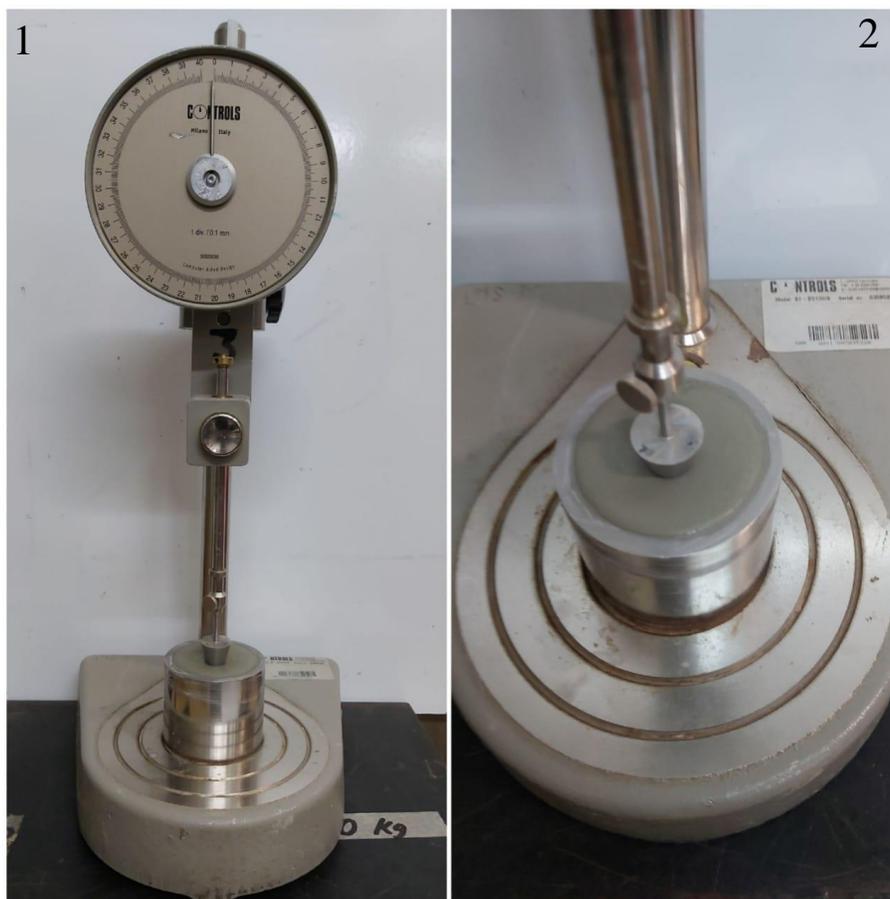
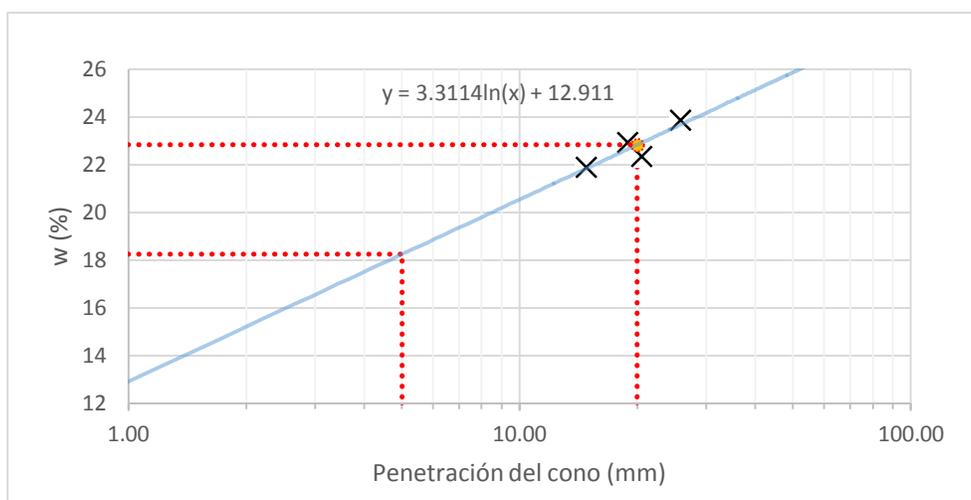


Figura 5.3. Fotografía del cono inglés.

El procedimiento comienza remoldeando el jal sobre un vidrio hasta obtener una pasta homogénea, es ahí cuando se llena el recipiente cilíndrico hasta un tercio de su altura, generando así la primera capa, entonces el recipiente se golpea contra una superficie robusta y lisa para dejar escapar las burbujas atrapadas, esto se hace dos veces más hasta llenar por completo el recipiente. Después, se quita el exceso del material enrasándolo con una espátula de cuchillo, luego el recipiente es colocado por debajo del cono, este a su vez debe acercarse a la superficie del jal. Por último, se deja caer el cono, se mide la penetración resultante y se saca con una espátula de cuchillo la parte del suelo que fue penetrada, la cual debe ser pesada y almacenada en el horno. El procedimiento se repite agregando agua la muestra para hasta obtener 4 puntos, 2 antes de los 20 mm (LL) de penetración y 2 después.

Al día siguiente se pesa el recipiente con el suelo seco, con el objeto de conocer el contenido de agua en cada penetración, teniendo dichos valores se grafica la curva de fluidez (Gráfica 5.1) mediante el uso de una regresión lineal.



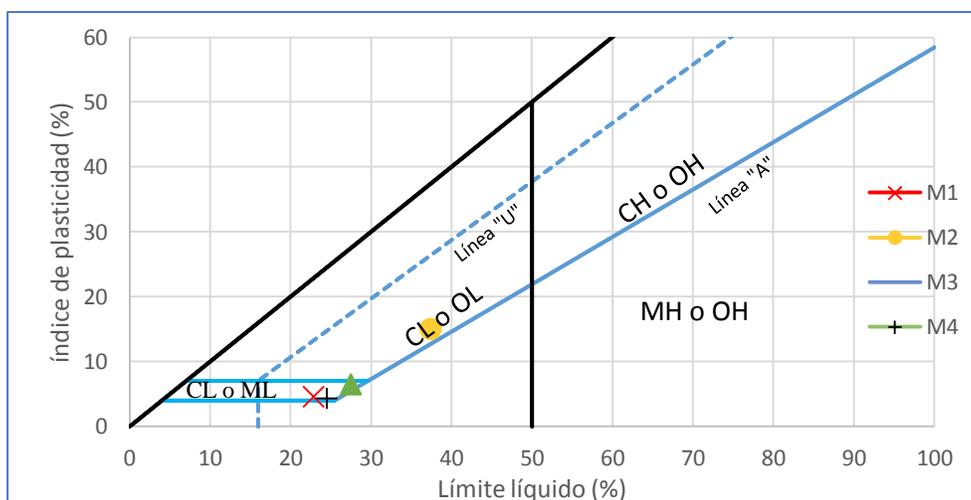
Gráfica 5.1. Curva de fluidez en la muestra ss-3-1, San Martín, Zac., profundidad 25-25.8 m.

Una vez teniendo la curva de fluidez se busca conocer el  $L_P$ , Candelaria J. *et al.*, 2018, determinaron tras comparar 429 ensayos de 8 minas diferentes, se ubicada a los 5 mm de penetración. Entonces extrapolando la recta de la regresión lineal hasta 5 mm y 20 mm ( $L_L$ ) podemos conocer el valor de ambos límites, de esta forma se obtuvo la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Resumen de resultados en los límites de consistencia.

Muestra		$L_L$ %	$L_P$ %	IP %
Zacatecas	M1. ss-3-1	22.83	18.24	4.59
	M2. ss-2-1	37.48	22.62	14.87
S. L. P.	M3. ss-4-1	27.46	20.94	6.50
	M4. ss-1-1	24.48	20.18	4.30

Clasificándolo en la carta de casa plasticidad se obtiene la gráfica 5.2.



Gráfica 5.2. Carta de plasticidad. M1, cruz roja, M2, círculo amarillo, M3, triángulo verde y M4, cruz negra.

## 5.4 Granulometría

La caracterización de la distribución del tamaño del material se realizó por el método de tamizado de acuerdo a la norma ASTM D 422 para partículas arriba de la malla 200 y por hidrómetro para las partículas que pasaran de dicha malla.

### 5.4.1 Tamizado

Para el tamizado se usaron 500 g de suelo seco por muestra, la cual se deja saturar durante un día para después cribarla mediante una serie de tamices que van desde la malla 10 hasta la 200 (Figura 5.4, parte 1), el cribado se hace por vía húmeda, lavando cada tamiz para deshacer todos los grumos y que solo se retenga el material que no pasa por medio de las aberturas de cada malla. Terminado lo anterior se deja secar nuevamente el material, para luego agitar los tamices con una máquina, asegurando que pasará la mayor cantidad de material seco (Figura 5.4, parte 2), al finalizar se pesa cada tamiz para conocer el peso retenido por malla.



Figura 5.4 Fotografía del procedimiento de granulometría por vía húmeda.

### 5.4.2 Hidrómetro

El análisis por hidrómetro se hace con 50 g que pasen de la malla 200, el material seco se deja saturar por un día, una vez que se ha saturado se vacía en un bureta llena de agua

destilada de 1 litro, con la finalidad de hacer que el material se asiente (Figura 5.5, parte 1) y se puedan tomar lecturas de sedimentación con un bulbo especial (Figura 5.5, parte 2).

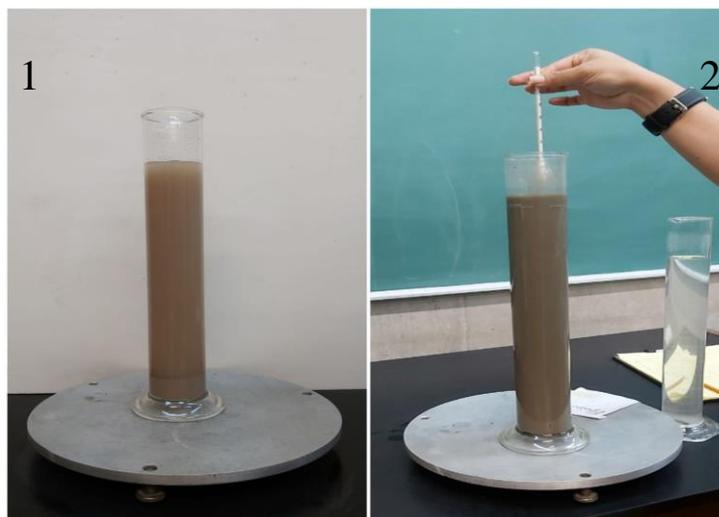
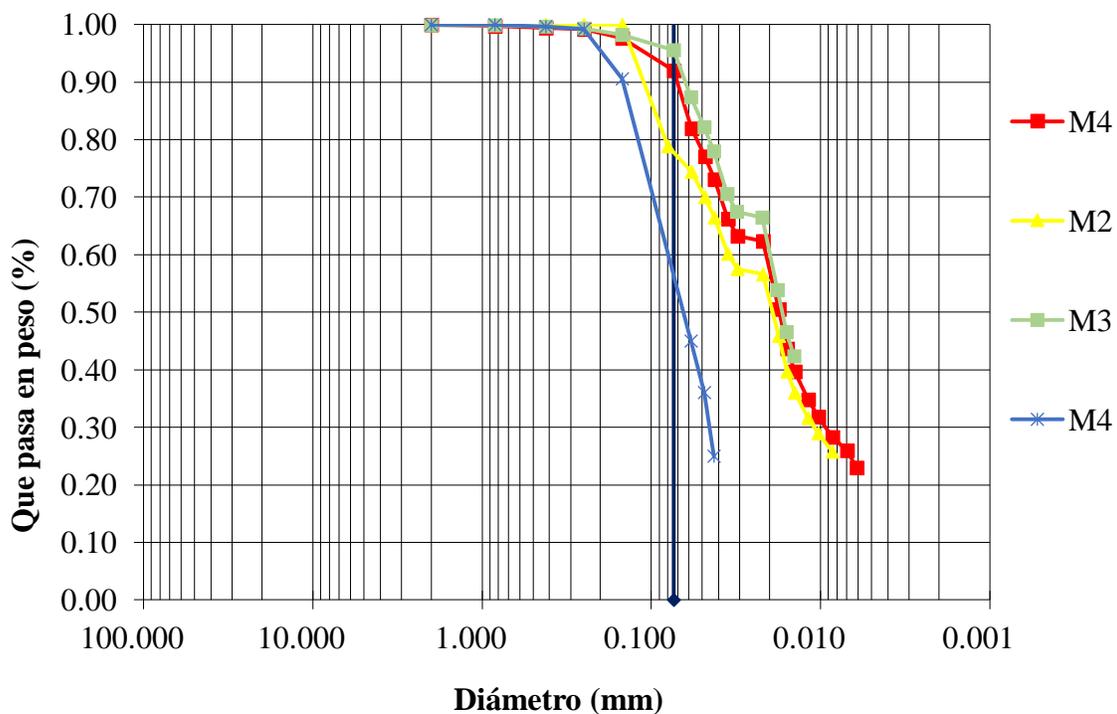


Figura 5.5. Fotografías del procedimiento de hidrómetro.

De ambos análisis se grafica el diámetro de partícula contra el peso retenido en porcentaje y se obtiene la curva de distribución granulométrica.



Gráfica 5.3. Distribución granulométrica.

Con todos los datos recabados y de acuerdo con la clasificación del SUCS en la norma D2487-10, las muestras se encuentran clasificadas de la siguiente manera:

Tabla 5.4. Clasificación de las muestras de acuerdo al SUCS.

Muestra	Finos %	IP %	Clasificación SUCS	
Zacatecas	M1. ss-3-1	91.97	4.59	CL-ML Arcilla limo arenosa
	M2. ss-2-1	99.92	14.87	CL-Arcilla de baja plasticidad
S. L. P.	M3. ss-4-1	95.56	6.5	CL-ML Arcilla limo arenosa
	M4. ss-1-1	55.64	4.3	CL-ML Arcilla limo arenosa

## 5.5 Formación de probetas

### 5.5.1 Inalteradas

La probeta se extrae de un tubo Shelby, para realizarlo se cortan entre 12 y 15 cm del tubo utilizando una segueta (Figura 5.6, parte 1), terminado el corte se procede a romper la fricción entre la pared del tubo y el suelo, para ello se introduce de manera progresiva una broca por periferia del tubo cuidando de no generar grietas (Figura 5.6, parte 2). Una vez que se haya roto la fricción se coloca sobre un gato hidráulico para extraer el suelo del tubo (Figura 5.6, parte 3). En última instancia, se procede a labrar la muestra para dejar una pastilla lisa en sus dos caras con una altura de 2" y un diámetro cercano a las 10" (Figura 5.6, parte 4).

El material que sobra al labrar la pastilla es usado para obtener la granulometría, densidades y límites. Antes de montar la probeta se pesa (Figura 5.6, parte 5) para poder calcular sus relaciones de volumen y peso.



Figura 5.6. Fotografías del procedimiento de extracción para una probeta inalterada.

### 5.5.2 Reconstituidas

Para reconstituir primero se debe preparar el molde, eso se logra removiendo el pedestal del permeámetro y atornillándolo en un consolidómetro de palanca, una vez fijo se le coloca una membrana con ayuda de una extensión del molde y se fija con un arosello; a continuación, las dos partes del molde se unen alrededor de la membrana por medio de dos abrazaderas metálicas (Figura 5.7, parte 3), mientras que en el pedestal se coloca una piedra porosa con papel filtro (ambos debidamente saturados); y finalmente, el molde se conecta a una línea de vacío para asegurar que la membrana esté pegada a las paredes.

Así pues, teniendo listo el molde se puede proceder a la reconstitución de la probeta, el cual se basa en la compactación estática, ya que es el método que permite igualar con mayor precisión las relaciones iniciales de las probetas inalteradas en los jales, esto debido a sus altos pesos específicos. Para comenzar con el procedimiento, el material usado en la probeta inalterada se deja secar al horno y se pesa para asegurar que sea la misma cantidad de materia de la primera probeta, luego se disgrega, homogeniza (Figura 5.7, partes 1 y 2) y divide en 3 partes iguales, una vez listo el material se le agrega 5% de agua para asegurar la adición de las partículas durante la compactación. Después el material es vertido en el molde en varias capas (3 ó 4), cada una es compactada de forma individual, adicionándole pesas al brazo de palanca del consolidómetro, con el objetivo de llegar a una altura previamente calculada, al finalizar las capas propuestas se procede al montaje (Figura 5.7, parte 4).



Figura 5.7. Fotografías del procedimiento de reconstitución de probetas.

### 5.5.3 Montaje

Para el montaje se necesita asegurar que todas las líneas del permeámetro estén saturadas para que a la probeta no se le inyecte aire, también es necesario poner arosellos con grasa de silicón, tanto en la base de la cámara como en la tapa, para evitar fugas.

Cuando el equipo esté listo se prosigue a montar la probeta sobre el pedestal (Figura 5.8, parte 1), una vez montada se recubre con una membrana (Figura 5.8, parte 2), en el caso de las reconstituidas se fija el pedestal y se quita el molde partido (Figura 5.8, parte 3), para después colocar el cabezal y fijar la membrana en la parte superior e inferior por medio de arosellos, luego se conecta el cabezal a la tapa y enseguida se coloca la camisa junto con la tapa la cual debe estar conectada a la CPS (Figura 5.8, parte 4), por último se llena de agua la cámara para confinar la prueba.

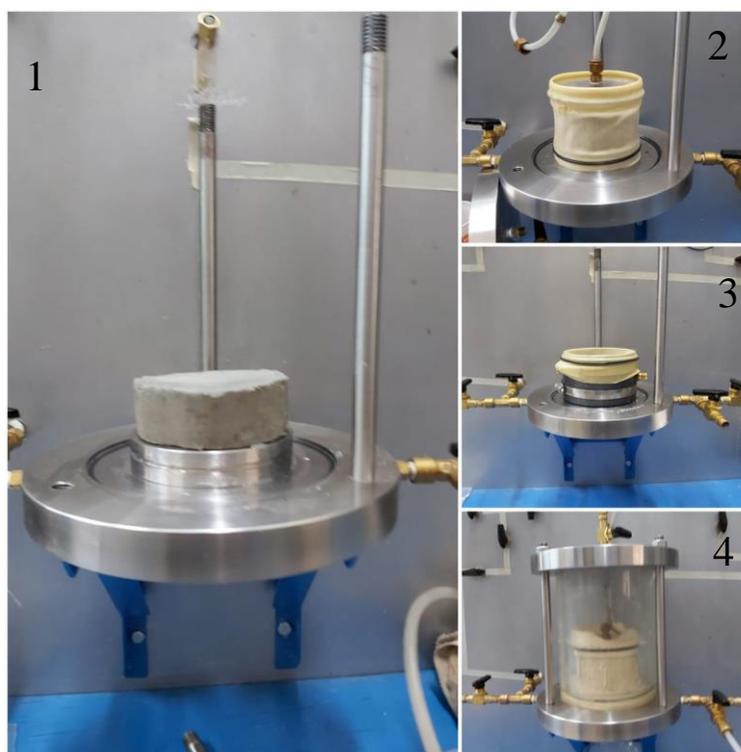


Figura 5.8. Fotografías del montaje.

### 5.5.4 Saturación

Para validar la Ley de Darcy el suelo tiene que estar completamente saturado, esto se consigue en dos pasos.

- 1) Se hace circular el equivalente a 3 veces el volumen de la probeta en agua para expulsar cualquier burbuja de aire que pudiera estar atrapada en el suelo.
- 2) Saturar a contrapresión, que consiste en aplicar un esfuerzo efectivo (diferencia entre confinamiento y CP) de  $0.1 \text{ kg/cm}^3$  en cada incremento, los incrementos irán subiendo de forma paulatina en  $0.5 \text{ kg/cm}^3$  y se dejan actuar por lapsos de 20 minutos.

Esto quiere decir que para el primer incremento se ajusta un confinamiento en la cámara de  $0.5 \text{ kg/cm}^3$  y las CPs serán de  $0.4 \text{ kg/cm}^3$ . El procedimiento se repite hasta llegar a un máximo acumulado de  $2.5 \text{ kg/cm}^3$ .

### 5.5.5 Medición de la B de Skempton

La medición de la B se hace al terminar la saturación por contrapresión para garantizar el grado de saturación de la probeta, el principio es aumentar  $1 \text{ kg/cm}^3$  (sin permitir el drenaje) la presión de confinamiento ( $\Delta\sigma_3$ ), esto en consecuencia debería aumentar la presión de poro ( $\Delta u$ ) en prácticamente lo mismo, ya que si la probeta está saturada la presión hidrostática debe ser la misma por ello el parámetro B se rige mediante la ecuación 5.1 y si este parámetro tiene valores iguales o mayores a 0.96 se puede considerar que la muestra está saturada, pero si por el contrario el resultado diera por debajo, se debe volver a saturar por contrapresión con incrementos más pequeños. Al término de la medición se debe regresar el confinamiento a su condición inicial de saturación.

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma_3} \quad (5.1)$$

### 5.5.6 Consolidación

La consolidación se hace aislando la probeta y aplicando un esfuerzo efectivo, entonces cuando se genere el aumento máximo en la presión de poro se abre un dren para disiparla, una vez que la presión de poro se estabilice se puede dar por concluida la consolidación, sin embargo, para asegurarlo se deja por 24 horas. Debido a que la prueba de permeabilidad es no destructiva, se puede reconsolidar la muestra las veces que el usuario crea conveniente.

Para fines específicos de esta tesis se usaron esfuerzos efectivos de consolidación de 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 2.5, y  $3.2 \text{ kg/cm}^3$  por probeta.

### 5.5.7 Ensaye

Para medir la conductividad hidráulica de forma experimental se genera un flujo ascendente de agua por la probeta y se mide el volumen del agua que entra, es posible hacer esto generando un gradiente hidráulico entre las contrapresiones.

Las probetas fueron ensayadas con un vector de tiempo de 1 hora por carga hidráulica y 100 puntos, las cargas usadas fueron de: 100, 200, 300 y 400 cm de columna de agua.

Al terminar el ensaye se vuelve a consolidar o se desmonta la probeta con cuidado para poner al horno en caso de que se busque reconstituirla.

## 5.6 Determinación del coeficiente permeabilidad.

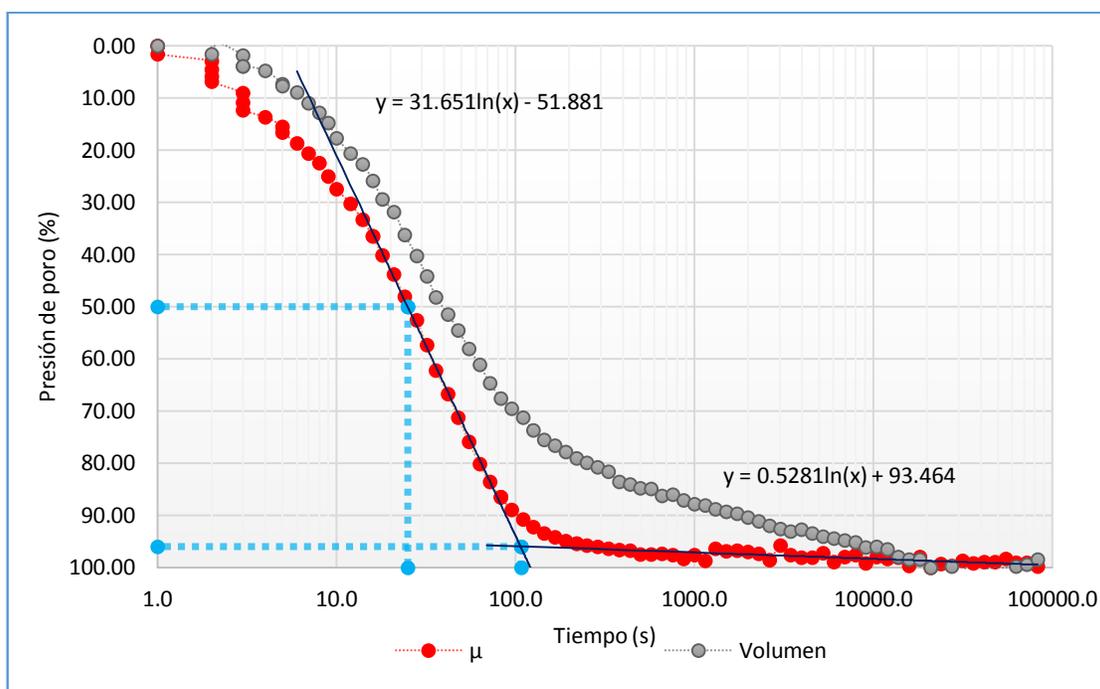
La determinación del coeficiente de permeabilidad se realizó mediante dos métodos; uno indirecto, utilizando la curva de disipación de presión de poro de la etapa de consolidación y otro directo, midiendo el gasto generado por una carga hidráulica constante en el permeámetro de carga constante.

### *5.6.1 Determinación del coeficiente de permeabilidad utilizando la curva de disipación de presión de poro.*

Como se mencionó en el capítulo 3, a través de las curvas de disipación de presión de poro, durante la consolidación, se puede determinar “k” usando la ecuación de consolidación unidimensional

Para ello es necesario calcular primero el coeficiente de compresibilidad (ec. 3.21) en donde  $e_0$  es la relación de vacíos antes de la consolidación y  $e_1$  al terminar la consolidación,  $e_1$  es la diferencia entre el volumen expulsado de agua durante la consolidación y al volumen de vacíos, con ello se calcula nuevamente la relación de vacíos (ec. 3.1). Por otro lado, la variación de esfuerzos efectivo ( $\Delta\sigma'$ ) corresponde al esfuerzo de consolidación de dicha prueba.

Luego entonces, conociendo el coeficiente de compresibilidad se calcula el coeficiente de compresibilidad volumétrica (ec.3.20) para finalmente estimar el coeficiente de consolidación (ec.3.24). Por tanto, para conocer el valor de  $t_{50}$  se normalizan las gráficas de consolidación con formato de Casagrande, en la gráfica se muestra un ejemplo de la estimación del  $t_{50}$ . Finalmente, se calculará la permeabilidad con la ec. 3.23.

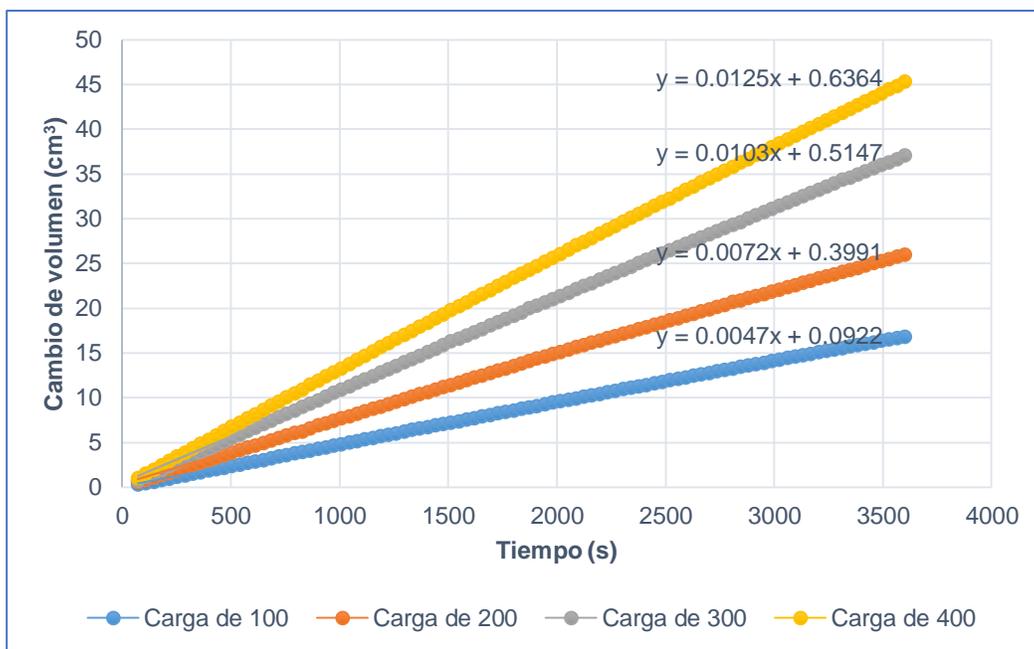


Gráfica 5.4. Estimación del  $t_{50}$  mediante el método de Casagrande aplicado en la curva de disipación de presión de poro.

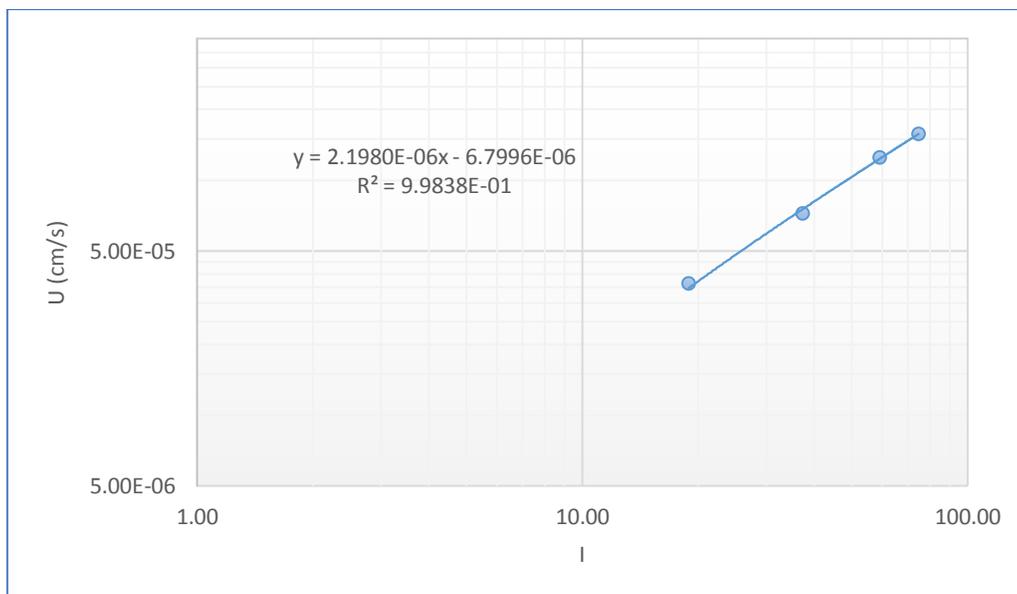
### 5.6.2 Medición del coeficiente de permeabilidad con la metodología de carga constante.

Empleando como base la Ley de Darcy (ec. 3.16) se usaron dos formas de obtener el coeficiente:

- 1) Calculando los coeficientes de conductividad hidráulica con la ec. 3.16. Para cada uno de los puntos que se tenía por carga hidráulica y después promediándolos para obtener un solo coeficiente de permeabilidad por esfuerzo de consolidación.
- 2) Gráficamente, obteniendo la pendiente de la regresión lineal entre las variables de velocidad de descarga ( $U=Q/A$ ), donde Q se obtiene mediante la pendiente del cambio de volumen con respecto al tiempo (grafica 5.5), y gradiente hidráulico (ambos en escala logarítmica) por carga hidráulica para cada esfuerzo de consolidación. La grafica 5.6 muestra un ejemplo de esto.



Gráfica 5.5. Cálculo de  $Q$ .



Gráfica 5.6. Determinación del coeficiente de conductividad hidráulico de manera gráfica en la muestra M3,  $\sigma' = 3.2$  kg/cm<sup>2</sup>.

## Capítulo 6 Presentación y análisis de resultados

Como se mencionó anteriormente, en esta tesis se pretende evaluar el coeficiente de conductividad hidráulico de los jales en condiciones saturadas, para ello se analizaron 4 probetas inalteradas y 3 reconstituidas. Cada muestra fue consolidada a esfuerzos efectivos de 0.2, 0.8, 1.6, 2.5 y 3.2 kg/cm<sup>2</sup>, con la finalidad de obtener la permeabilidad mediante dos metodologías: 1) curvas de disipación de presión de poro y 2) la metodología de carga constante a 4 cargas diferentes (100, 200, 300 y 400 cm de columna de agua).

En la tabla 6.1 se muestran un resumen de las condiciones iniciales de las probetas antes de ensayarlas, porque durante las pruebas cambian dichas condiciones.

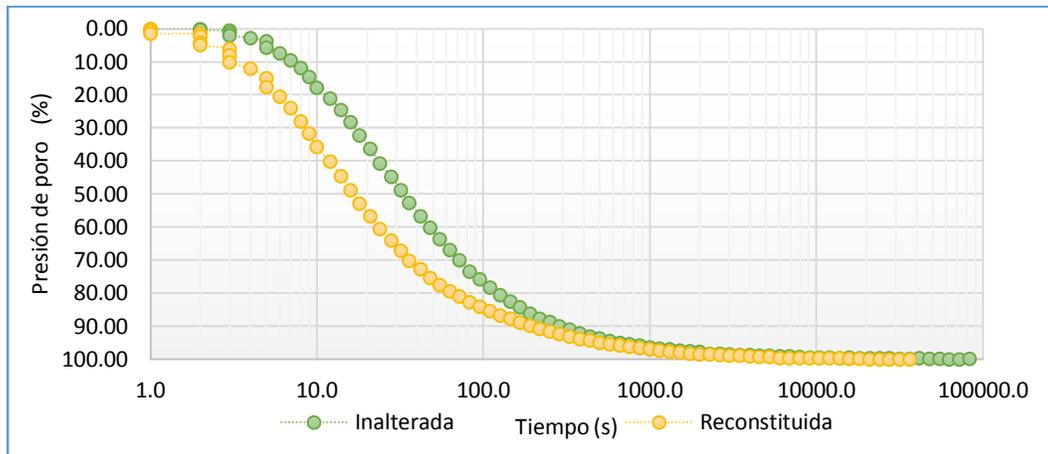
Tabla 6.1. Relaciones volumétricas iniciales.

Muestras		w %	Gs	Gw %	e	n %	Y <sub>d</sub> g/cm <sup>3</sup>
<i>Inalteradas</i>							
Zacatecas	M1. ss-3-1	23.27	3.22	99.75	0.75	42.88	1.84
	M2. ss-2-1	29.21	3.32	82.15	1.18	54.11	1.52
S. L. P.	M3. ss-4-1	24.53	3.05	86.38	0.87	46.42	1.63
	M4. ss-1-1	20.81	3.00	80.10	0.78	43.80	1.69
<i>Reconstituidas</i>							
Zacatecas	M1. ss-3-1	7	3.22	25.75	0.94	48.48	1.66
	M2. ss-2-1	5	3.32	13.99	1.19	54.24	1.52
S. L. P.	M3. ss-4-1	5	3.05	16.78	0.91	47.61	1.60

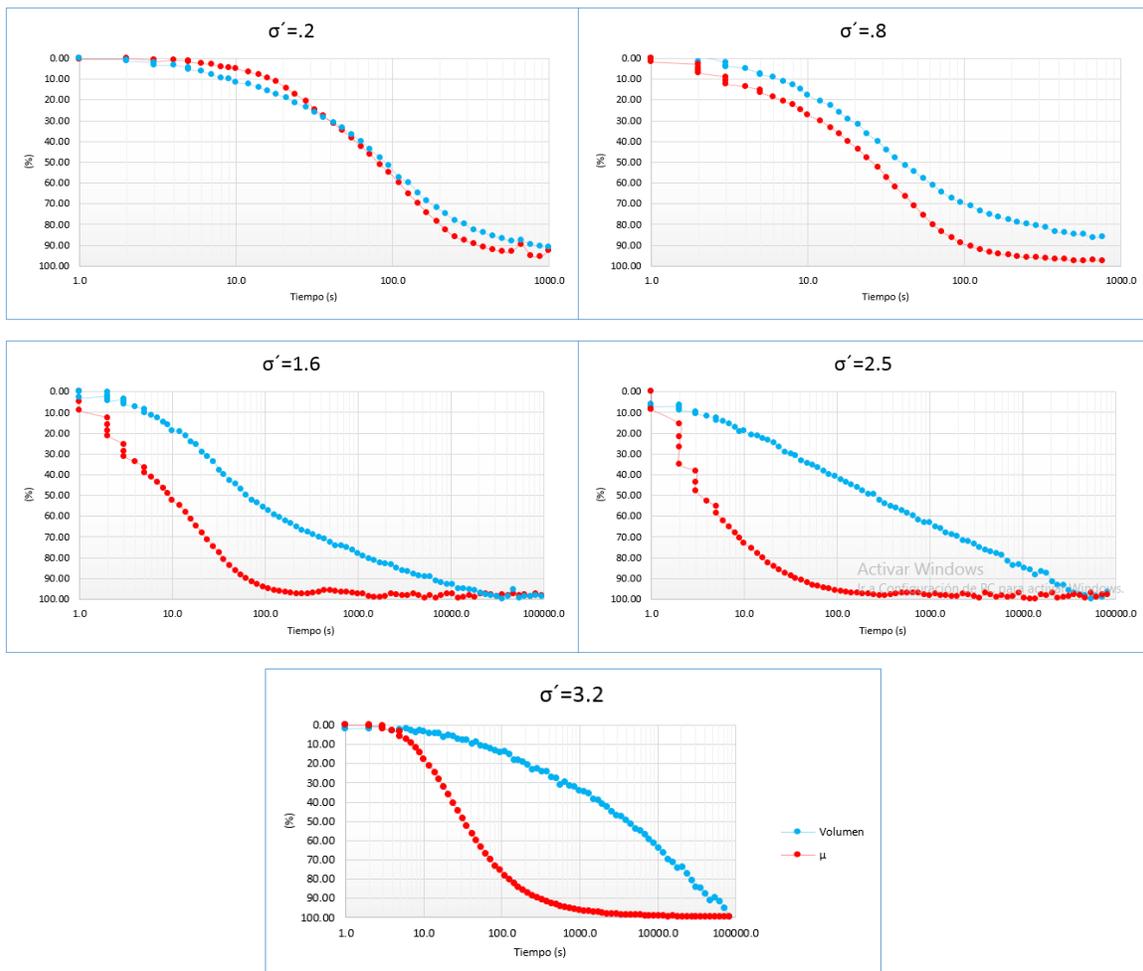
### Consolidación

En la gráfica 6.1 se observan las curvas de disipación de presión de poro de la muestra M2, inalterada y reconstituida, para los esfuerzos efectivos de 3.2 kg/cm<sup>2</sup> donde se puede apreciar la disipación de la presión comienza antes en la reconstituida.

En la gráfica 6.2 las curvas de disipación de presión de poro y volumen expulsado (normalizadas en porcentaje) acusan diferentes comportamientos, según la variación del esfuerzo efectivo de consolidación, en donde para los esfuerzos de 0.2 y 0.8 kg/cm<sup>2</sup> se puede observar cómo el comportamiento en ambas curvas es realmente similar, incluso el tiempo que demoran en estabilizarse rondan los 100 s, aunque para el esfuerzo de 0.8 kg/cm<sup>2</sup> se aprecia que la curva de cambio de volumen empieza a separarse de la de disipación de poro, lo que resulta más evidente cuando se llega al esfuerzo de 2.5 kg/cm<sup>2</sup> en donde inclusive la curva de cambio de volumen presenta un comportamiento más lineal. Y por último en la curva de 3.2 kg/cm<sup>2</sup> se ve claramente que ambas curvas se estabilizan a tiempos muy diferentes y que mientras la disipación de presión de poro tiende a parecer más a la curva típica de una “s” y la de volumen se torna cóncava.

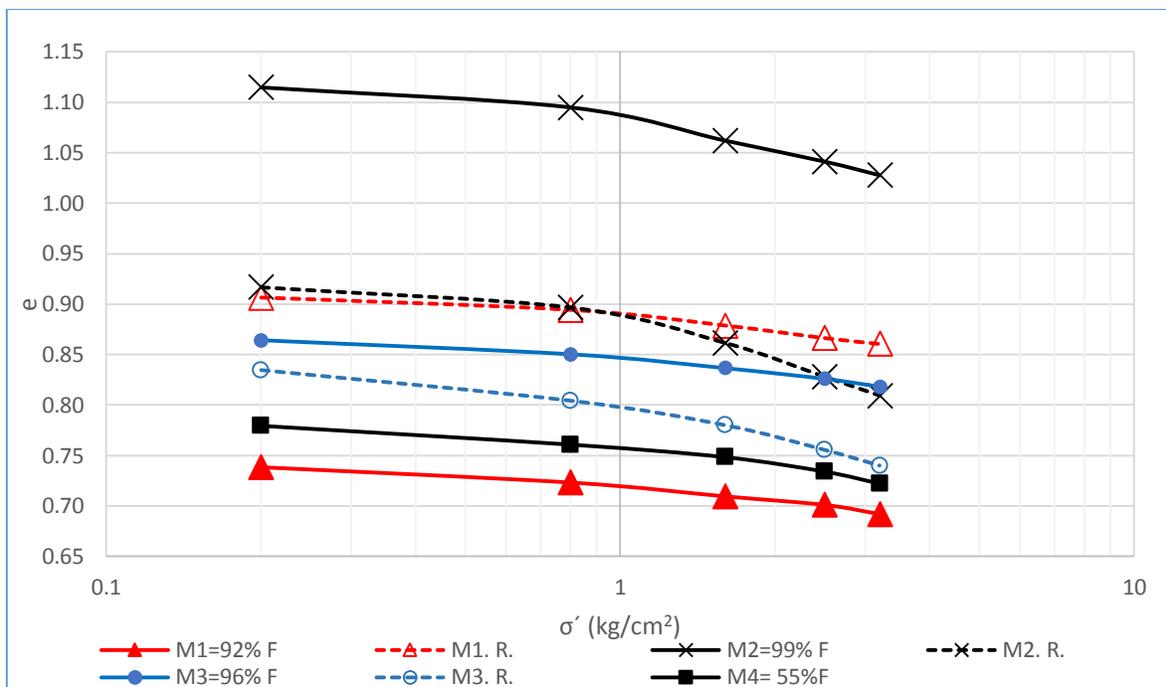


Gráfica 6.1. Curva de consolidación de la prueba M2 inalterada y reconstituida a un esfuerzo de 3.2 kg/cm2.



Gráfica 6.2. Variación de las curvas de disipación en la presión de poro y cambio de volumen durante la prueba M2 inalterada.

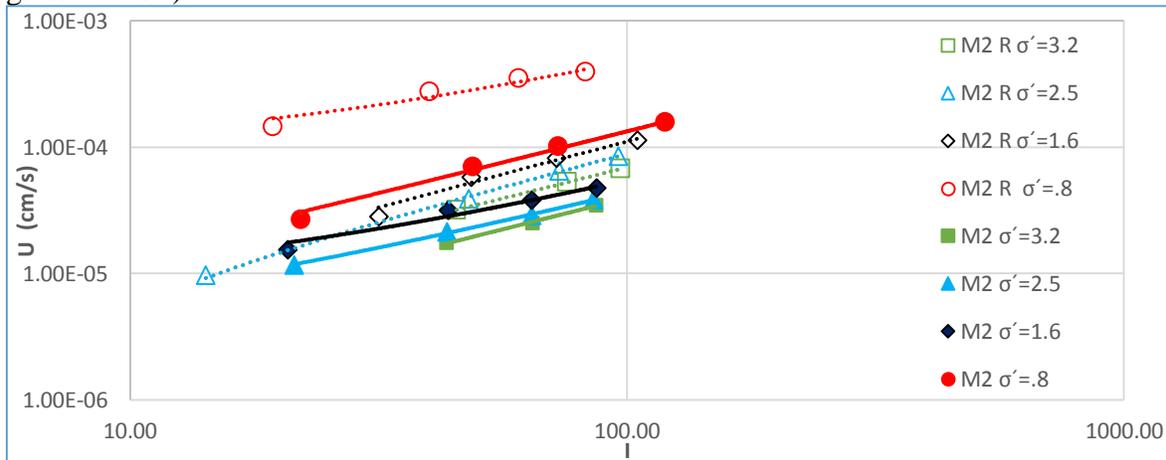
En la gráfica 6.3 se muestran las curvas de compresibilidad que relacionan el decremento la relación de vacíos debido al incremento de los esfuerzos efectivos y también demuestran que en las muestras reconstituidas presentan mayor disminución en los vacíos.



Gráfica 6.3. Curvas de compresibilidad, donde R representa a las reconstituidas y F la cantidad de finos.

## Resultados de los ensayos de permeabilidad

Una vez terminada la consolidación se realizaron los ensayos de permeabilidad obteniendo “k” por etapa gráficamente en donde se observó que la permeabilidad es mayor en las probetas reconstituidas (gráfica 6.4), también se calculó el coeficiente de permeabilidad (tabla 6.2) para; las curvas de disipación de presión de poro (“k” calculada), usando la ec. 3.16 para carga constante (“k” medida) y usando la pendiente de la gráfica 6.4 (“k” medida gráficamente).



## Capítulo 6 Presentación y análisis de resultados

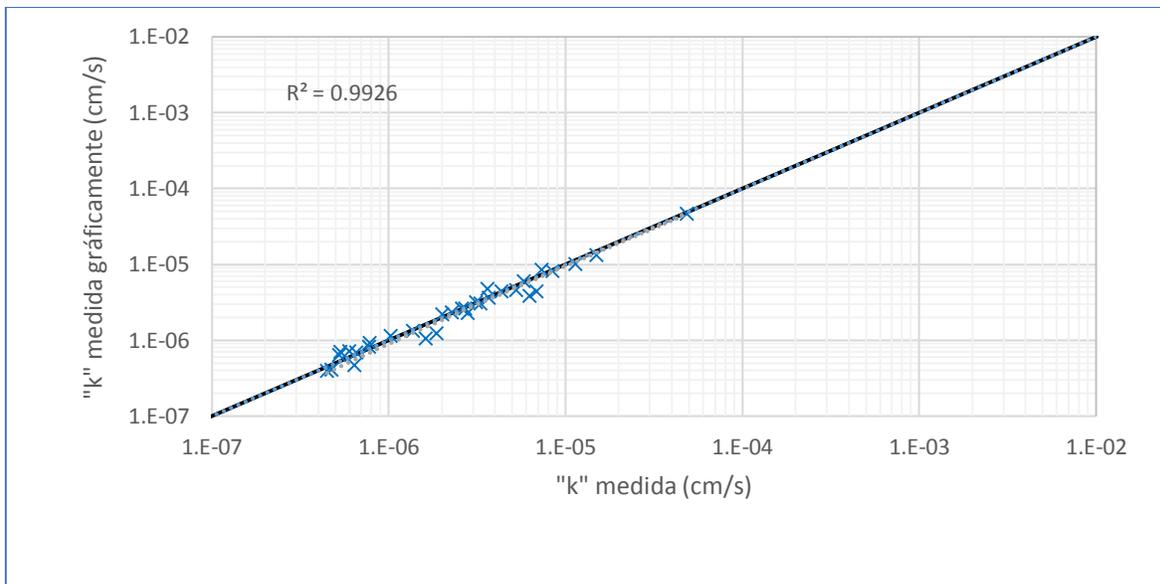
Gráfica 6.4. Medición gráfica del coeficiente de conductividad hidráulico en la muestra M2 y M2 R.

Tabla 6.2. Resultados.

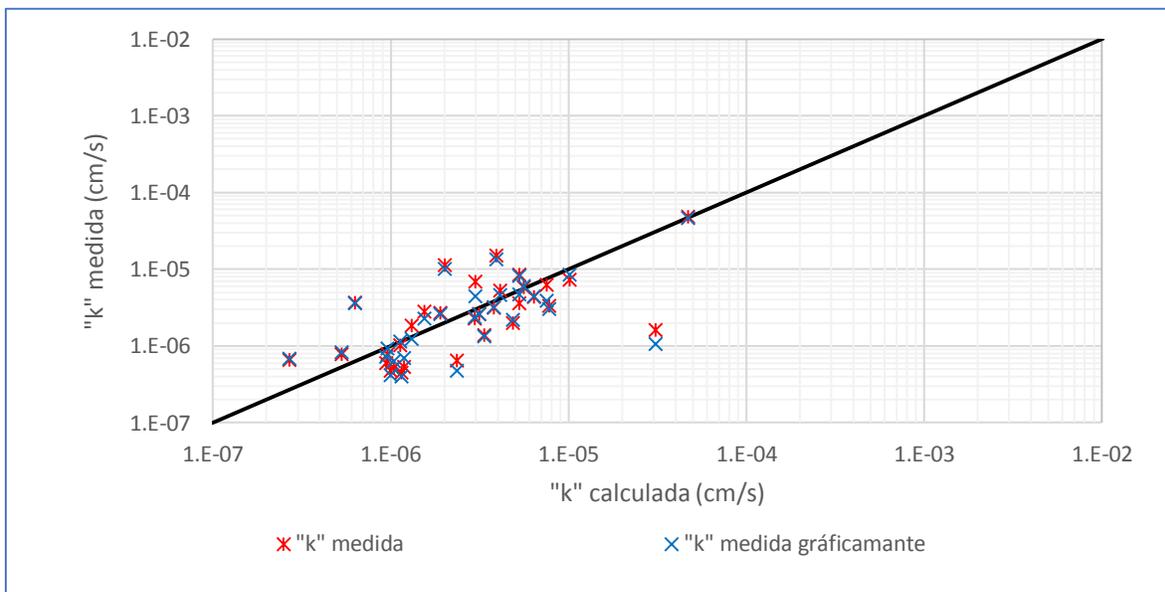
Muestras	$\sigma'$ (kg/cm <sup>2</sup> )	e	C %	"k" calculada (cm/s)	"k" medida (cm/s)	"k" medida gráficamente (cm/s)
M1.	0.2	0.74	0.58	1.538E-06	2.800E-06	2.265E-06
	0.8	0.72	0.58	-	3.697E-06	3.687E-06
	1.6	0.71	0.58	3.801E-06	3.113E-06	3.180E-06
	2.5	0.70	0.59	3.139E-06	2.591E-06	2.597E-06
	3.2	0.69	0.59	6.375E-06	4.330E-06	4.421E-06
				4.438E-06	3.345E-06	3.399E-06
M1 R.	0.2	0.91	0.52	3.898E-06	1.491E-05	1.338E-05
	0.8	0.89	0.53	2.010E-06	1.135E-05	1.009E-05
	1.6	0.88	0.53	5.254E-06	8.400E-06	8.190E-06
	2.5	0.87	0.54	1.012E-05	7.285E-06	8.494E-06
	3.2	0.86	0.54	5.567E-06	5.800E-06	6.021E-06
				5.369E-06	9.548E-06	9.235E-06
M2	0.2	1.11	0.47	3.065E-05	1.613E-06	1.054E-06
	0.8	1.09	0.48	3.344E-06	6.223E-06	1.321E-06
	1.6	1.06	0.48	1.125E-06	6.367E-07	1.137E-06
	2.5	1.04	0.49	9.569E-07	4.722E-07	9.279E-07
	3.2	1.03	0.49	2.688E-07	4.467E-07	6.866E-07
				7.269E-06	1.878E-06	1.025E-06
M2 R.	0.2	0.92	0.52	4.671E-05	4.840E-05	4.671E-05
	0.8	0.90	0.53	7.534E-06	1.370E-06	3.875E-06
	1.6	0.86	0.54	2.356E-06	1.022E-06	4.729E-07
	2.5	0.83	0.55	9.940E-07	7.784E-07	4.109E-07
	3.2	0.81	0.55	1.145E-06	6.549E-07	3.951E-07
				1.175E-05	1.045E-05	1.037E-05
M3	0.2	0.86	0.54	6.259E-07	3.661E-06	3.618E-06
	0.8	0.85	0.54	7.783E-06	3.295E-06	3.037E-06
	1.6	0.84	0.54	1.899E-06	2.705E-06	2.601E-06
	2.5	0.83	0.55	2.961E-06	2.263E-06	2.335E-06
	3.2	0.82	0.55	4.834E-06	1.998E-06	2.198E-06
				3.621E-06	2.784E-06	2.758E-06
M3 R.	0.2	0.83	0.55	2.969E-06	6.857E-06	4.422E-06
	0.8	0.80	0.55	5.249E-06	3.605E-06	4.726E-06
	1.6	0.78	0.56	2.355E-06	3.545E-06	3.696E-06
	2.5	0.76	0.57	4.014E-06	3.592E-06	3.564E-06
	3.2	0.74	0.57	6.299E-06	3.192E-06	3.183E-06
				4.177E-06	4.158E-06	3.918E-06
M4	0.2	0.76	0.57	1.306E-06	1.853E-06	1.234E-06
	0.8	0.75	0.57	5.263E-07	7.716E-07	8.195E-07
	1.6	0.73	0.58	9.371E-07	5.982E-07	7.228E-07
	2.5	0.72	0.58	1.187E-06	5.301E-07	6.972E-07
	3.2	0.72	0.58	1.036E-06	5.210E-07	6.333E-07
				9.985E-07	8.548E-07	8.214E-07

De la tabla anterior es notorio que el coeficiente de conductividad hidráulico medido gráficamente o por la ecuación para carga constante por etapa es muy similar, esto se reafirma mediante la gráfica 6.5. Sin embargo, la calculada por las curvas de presión de poro tiende a ser ligeramente mayor con respecto a las medidas, pero aún se encuentran en el mismo orden

de magnitud como se observa en la gráfica 6.6 y tienen una correlación lineal entre sí de 0.9926. Entonces se puede deducir que los resultados no tienen gran variación y por ende se consideran con una diferencia mínima la cual es tolerable.



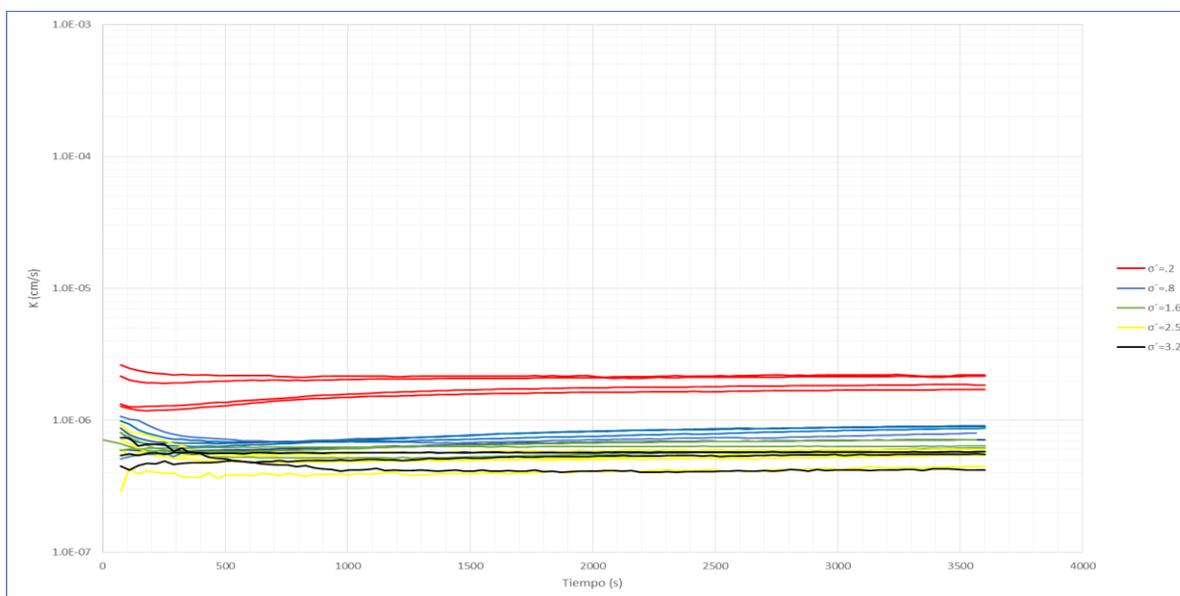
Gráfica 6.5 Relación de permeabilidades medidas de manera directa.



Gráfica 6.6. Relación de permeabilidad medida y calculada.

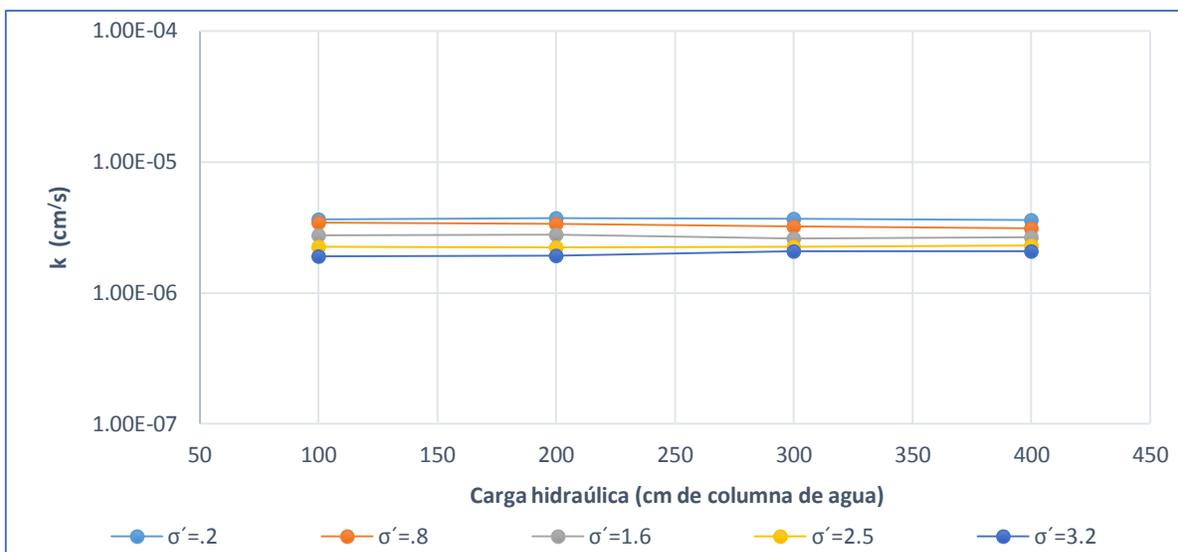
## Influencia de la carga hidráulica en el coeficiente de conductividad hidráulico.

Gracias a que el software permite el registro en tiempo real se puede analizar el comportamiento de la permeabilidad durante el desarrollo de la prueba. Con lo anterior fue posible analizar las gráficas de permeabilidad contra tiempo (gráfica 6.7) donde es visible un decremento de la permeabilidad, este efecto es debido a la pérdida de carga de columna en una de las buretas al introducir agua en la probeta, lo que reduce la carga hidráulica en hasta en 25 cm de columna de agua. No obstante, aun con este efecto se aprecia una tendencia lineal durante la prueba. Otro fenómeno que se detectó fue que para esfuerzos mayores a  $0.8 \text{ kg/cm}^2$  el coeficiente de permeabilidad tiende a ser más estable y no tener tantas variaciones con respecto al tiempo.



Gráfica 6.7. Medición de la permeabilidad con la metodología de carga constante muestra M4.

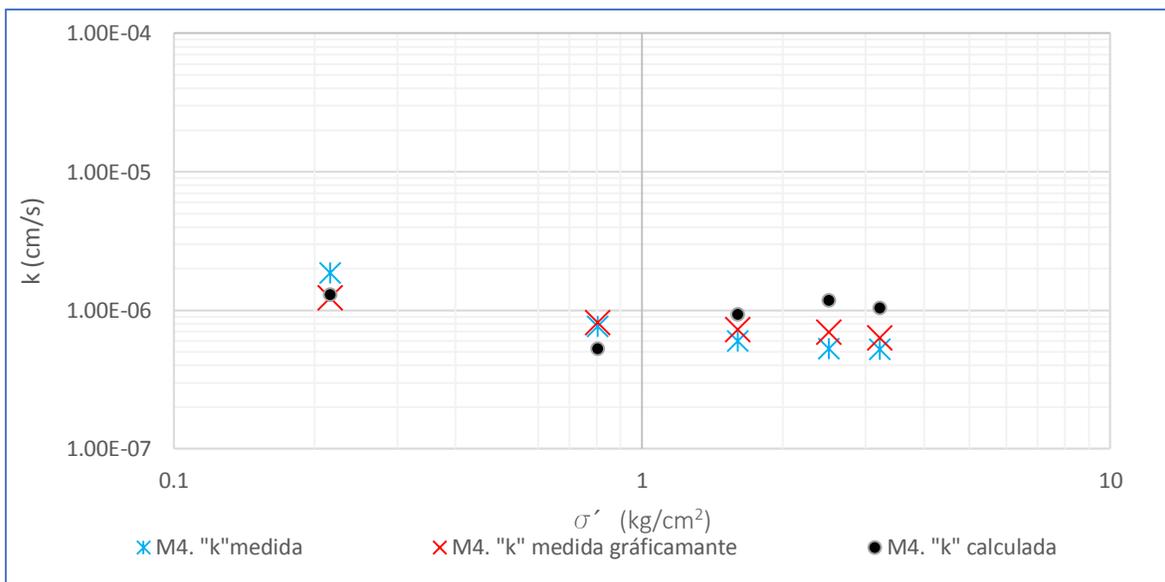
En la gráfica 6.8 se aprecia que la carga hidráulica influye de manera despreciable a la permeabilidad.



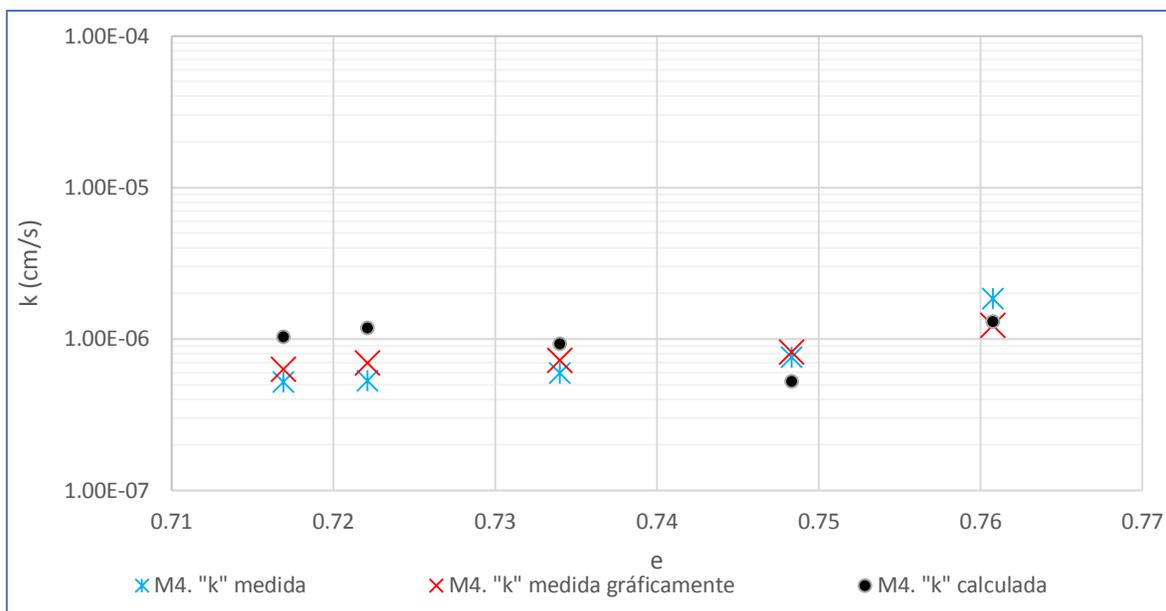
Gráfica 6.8. Efecto de la carga hidráulica por esfuerzo efectivo muestra M3.

## Influencia del esfuerzo efectivo y la relación de vacíos

Al variar el estado de esfuerzos de una muestra ésta se reacomoda disminuyendo los espacios vacíos por donde el agua puede fluir, en consecuencia la permeabilidad se ve directamente afectada siendo menor el coeficiente de conductividad hidráulico a esfuerzos mayores (gráfica 6.9) y aumentando cuando hay relación de vacíos mayores (gráfica 6.10).

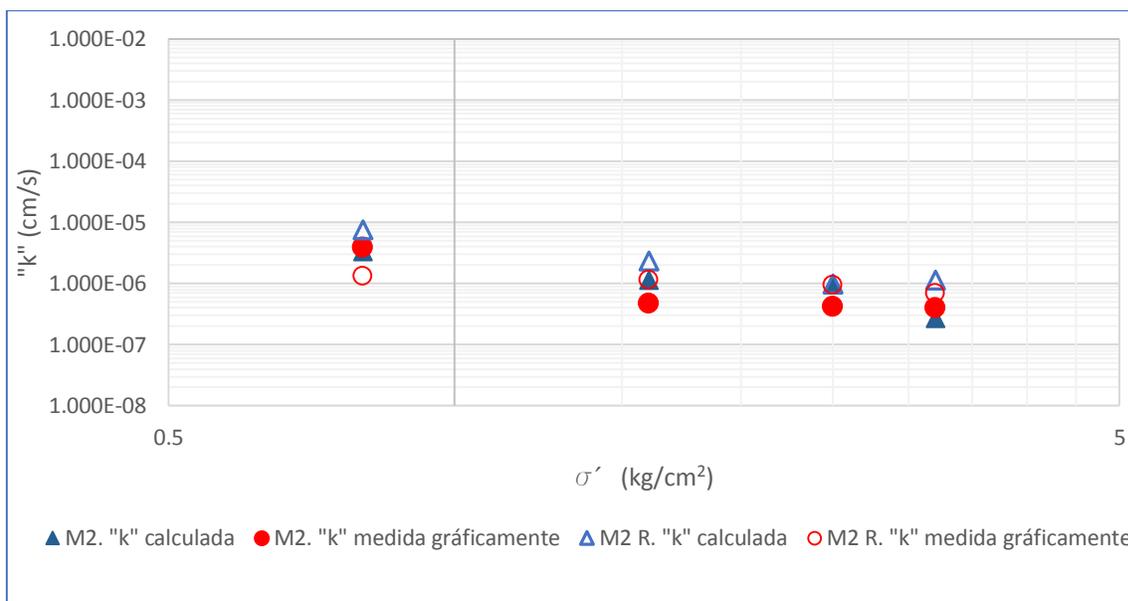


Gráfica 6.9. Influencia del esfuerzo efectivo para la muestra M4.



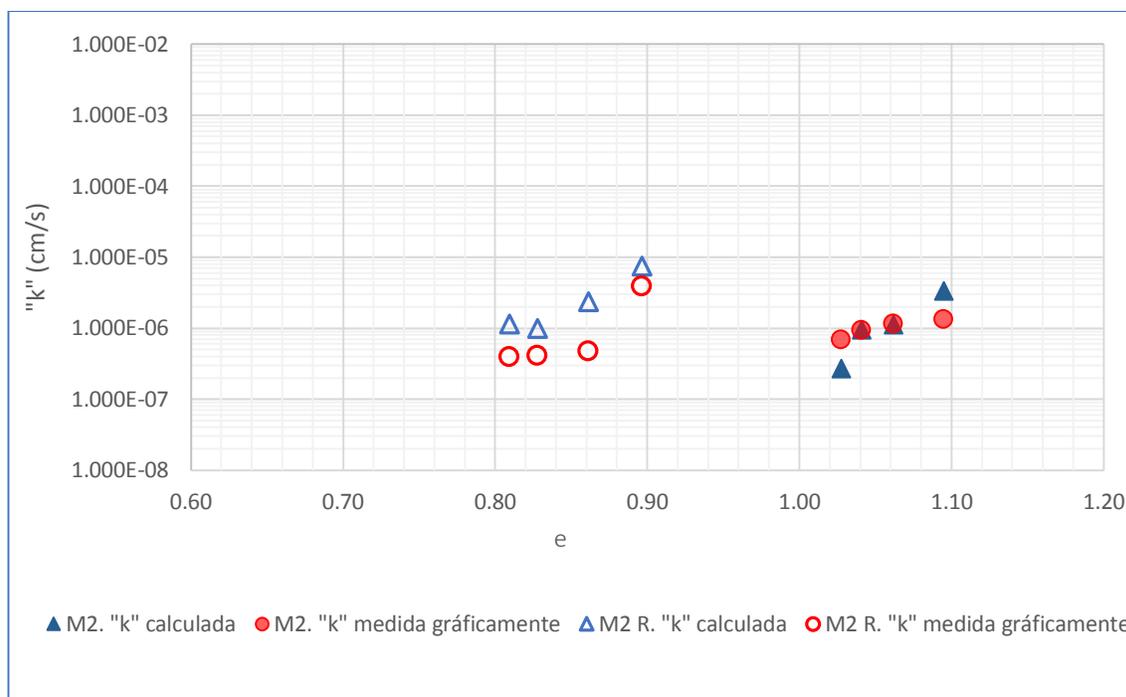
Gráfica 6.10. Influencia de la relación de vacíos para la muestra M4.

En la gráfica 6.11 y 6.12 se observa que los valores de “k” calculados y medidos resultan tener valores más altos en las probetas reconstituidas, esto resulta lógico pues al romper la estratificación del suelo no hay capas impermeables que impidan el flujo de agua. Por otra parte, se observó en la gráfica 6.11 las probetas reconstituidas tienen la misma tendencia de disminuir la permeabilidad de forma gradual conforme aumentan los esfuerzos efectivos y aumentarla cuando hay mayor relación de espacios vacíos.



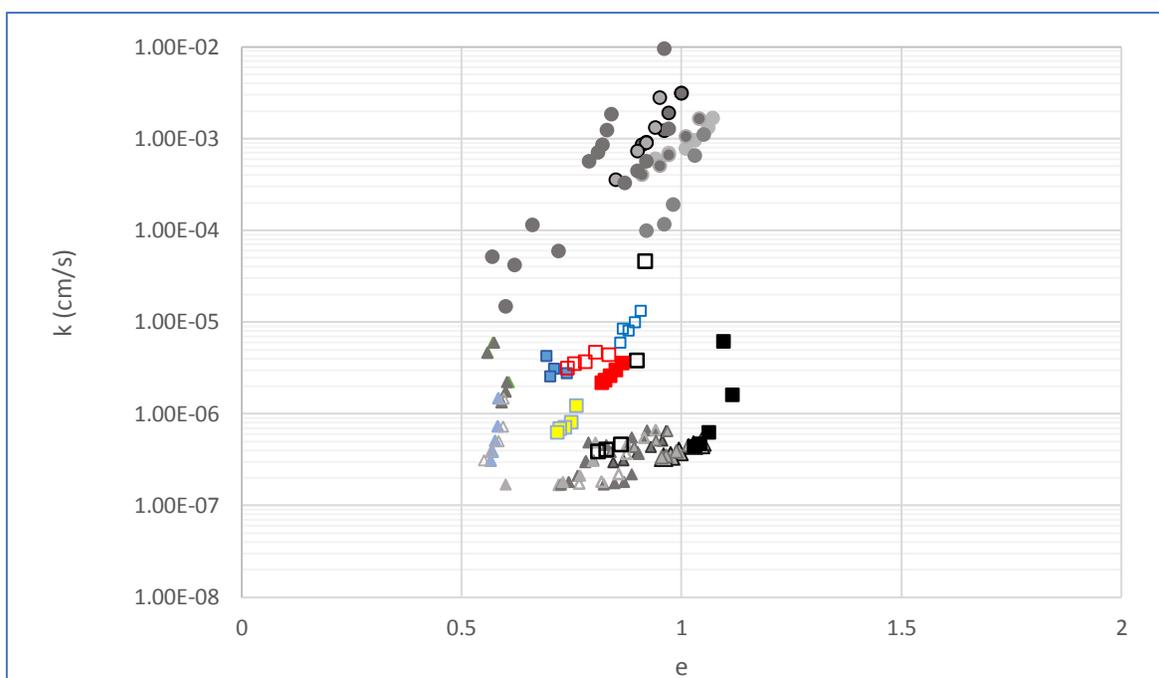
Gráfica 6.11. Permeabilidad en función de los esfuerzos efectivos en M2 y M2 R.

Qui y sego (2000) determinaron que la correlación entre la relación de vacíos y la permeabilidad de los jales tiene un comportamiento casi lineal como se muestra en la gráfica 6.12.



Gráfica 6.12. Permeabilidad en función de la relación de vacíos en M2 y M2 R.

En la gráfica 6.13 se presentan los resultados obtenidos por García (2019) y Acevedo (2017) comparándolos con el presente estudio. Las muestras ensayadas por García (2019) tienen un relación de vacíos entre 0.55 y 1, con porcentaje de finos de 60 a 90% y una variación de permeabilidad en un orden de magnitud que va de  $10^{-6}$  a  $10^{-7}$  cm/s. Mientras que Acevedo (2017) mantiene el contenido de finos en un 15% con una relación de vacíos que oscila entre 0.77 y 1.77; por otro lado, el coeficiente de permeabilidad varía en dos órdenes de magnitud  $10^{-3}$  a  $10^{-5}$  cm/s. En este trabajo las pruebas tienen una relación de vacíos que va de 0.7 a 1.1, con un porcentaje de finos del 55 al 99% y dos órdenes de magnitud  $10^{-5}$  a  $10^{-7}$  cm/s. Al comparar el trabajo con el de Acevedo (2017) se puede deducir que el factor que está influyendo en mayor medida es el contenido de finos, no así con las muestras analizadas por García (2019) que muestran un contenido de finos similar por lo que tal vez lo que modifique la permeabilidad sea la relación de vacíos o alguna otra de las características del jal.

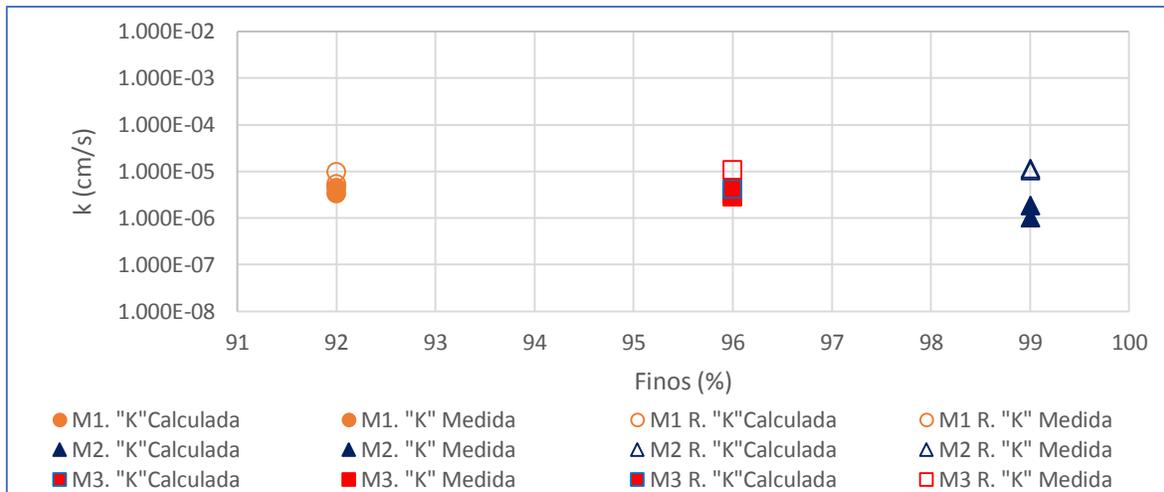


- ▲ M1 F=66%    ▲ M1 R. F=66%    ▲ M2 F=90%    ▲ M2 R. F=90%    ▲ M3 F=90%    ▲ M3 R. F=90%
- ▲ M4 F=92%    ▲ M4 R. F=92%    ▲ M5 F=69%    ▲ M5 R. F=69%    ▲ M6 F=73%    ▲ M6 R. F=73%
- ▲ M7 F=99%    ▲ M7 R. F=99%    ● M1 F=15%    ● M2 F=15%    ● M3 F=15%    ● M4 F=15%
- M5 F=15%    ● M6 F=15%    ● M7 F=15%    ● M8 F=35%    ■ M1.    □ M1 R.
- M2    □ M2 R.    ■ M3    □ M3 R.    ■ M4

Gráfica 6.13. Influencia de la relación de vacíos. (Triángulos para García 2017, Círculos para Acevedo y cuadrados en color para el presente trabajo).

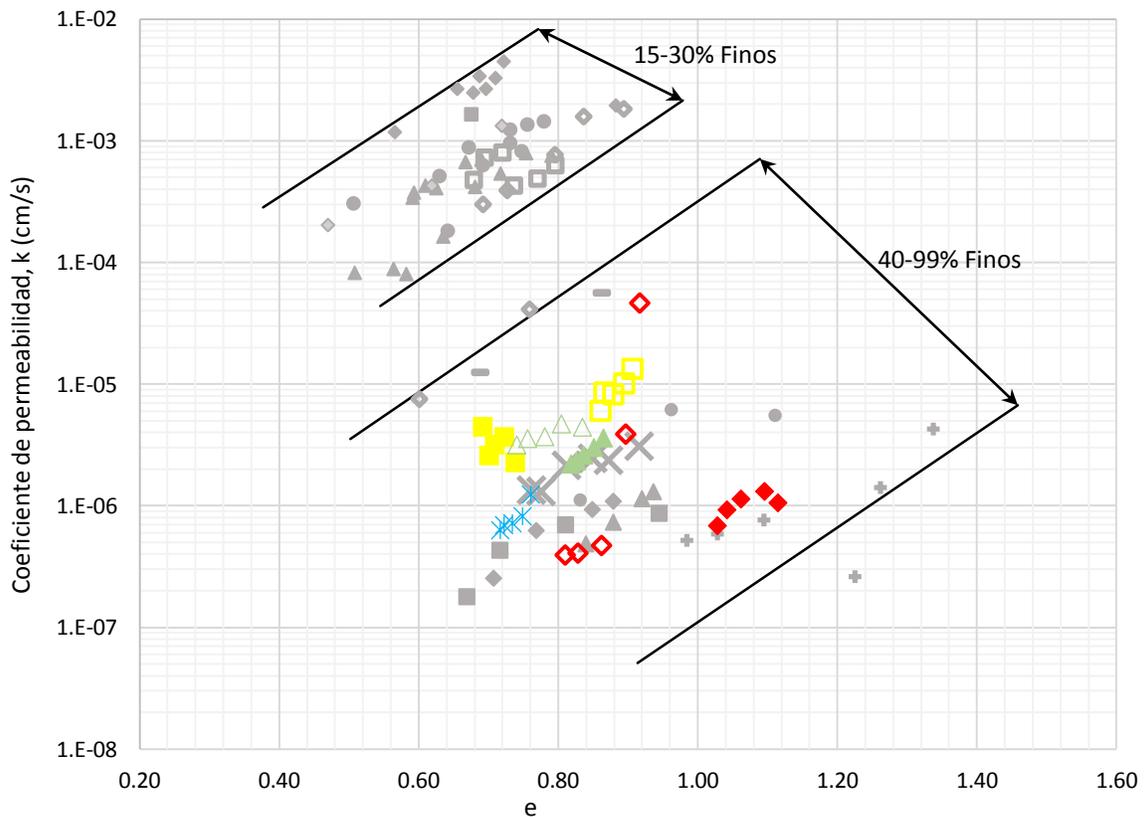
## Influencia de finos

Los parámetros de finos mostrados en la gráfica 6.14 van de 92 a 99% de finos y muestra una ligera tendencia de disminuir el coeficiente de permeabilidad al aumentar el contenido de finos. En contraste, es visible que los valores obtenidos para la permeabilidad de manera directa mediante el permeámetro y el cálculo de la permeabilidad a través de la curva de disipación de poro son muy similares.



Gráfica 6.14. Influencia de finos en la permeabilidad.

Los valores obtenidos en permeabilidad resultan congruentes al compararlos con los trabajos realizados por Valenzuela en (2015) como se puede observar en la gráfica 6.15, donde los valores de la permeabilidad corresponden a la cantidad de finos y relación de vacíos marcados por Valenzuela para jales entre 40 y 90% de fino.



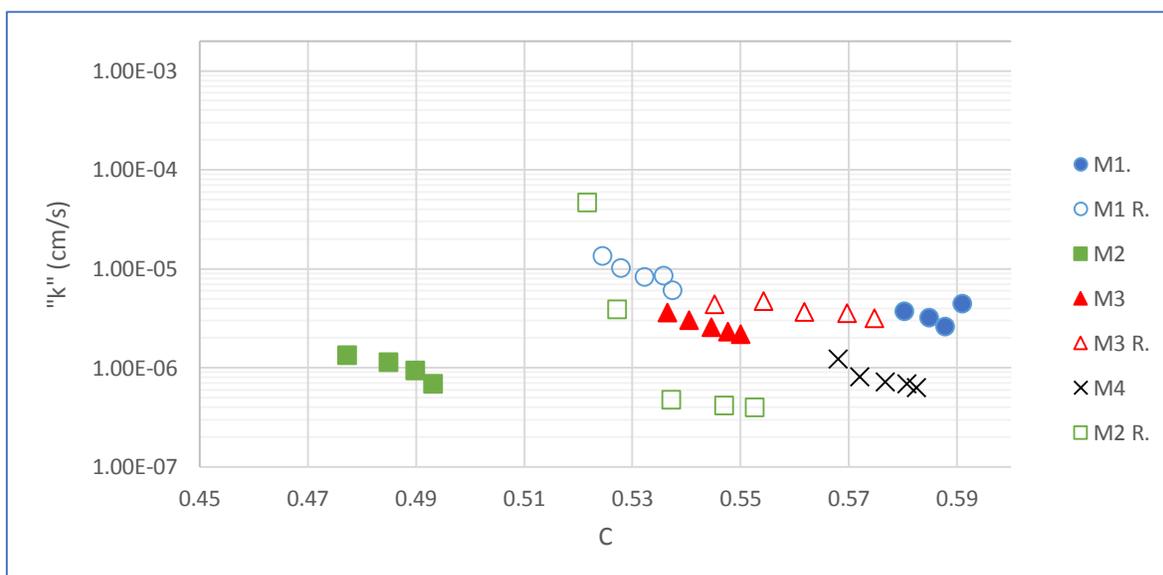


Gráfica 6.15. Permeabilidad influenciada por relación de vacíos y cantidad de finos comparados con Valenzuela 2015.

## Influencia de la compacidad

Orozco (1978) definió a la compacidad como la concentración de sólidos y el volumen total de suelos y se expresa como  $C = 1/(1 + e)$ .

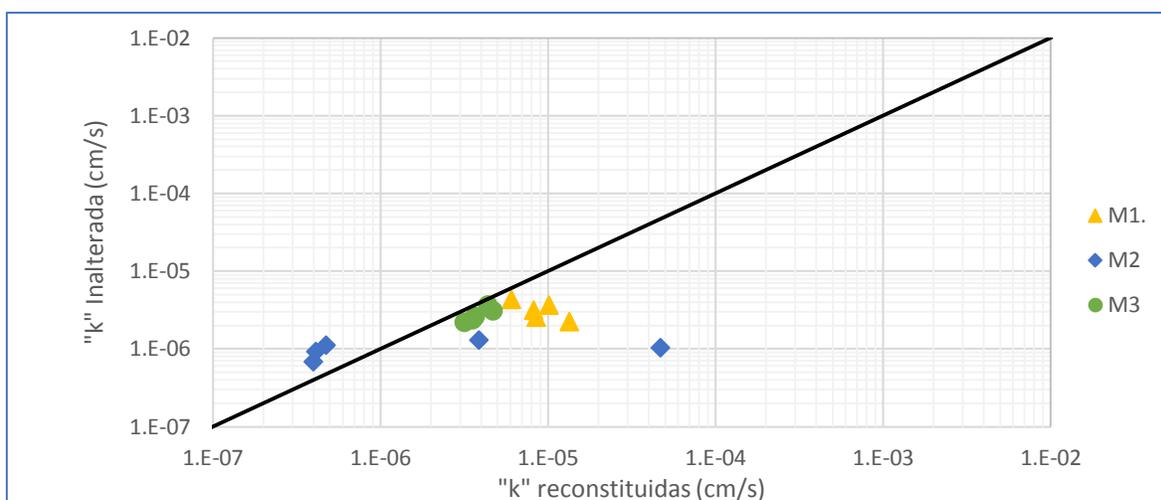
La muestra se densifica conforme aumentan los esfuerzos efectivos, por lo que aumenta la compacidad y en consecuencia hay una disminución considerable en la permeabilidad (gráfica 6.16).



Gráfica 6.16. Influencia de la compacidad en la permeabilidad.

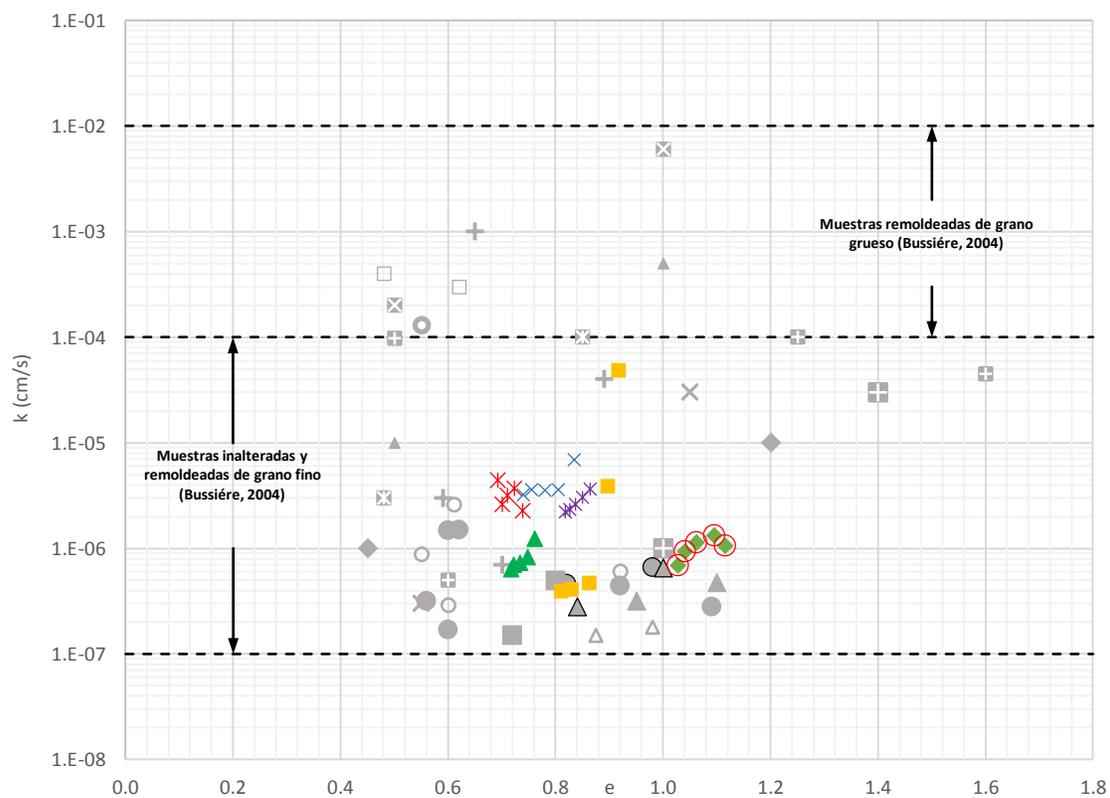
## Comparativa en muestras inalteradas y reconstituidas.

Las muestras reconstituidas tienen una mayor permeabilidad que las inalteradas puesto que al romper la estructura original del suelo el agua puede fluir con mayor facilidad, esto queda claro en la gráfica 6.17 en donde se muestra que la mayoría de los puntos quedan por debajo de la línea de 45°, indicando una mayor permeabilidad para las reconstituidas.



Gráfica 6.17. Relación entre muestras inalteradas y reconstituidas.

Por último, se comparó el trabajo realizado por Bussiére (2004) para probetas inalteradas y reconstituidas de jal, donde se demuestra que el presente estudio cumple con las relaciones de vacío y permeabilidad indicadas por Bussiére para jal de grano fino, esto se puede apreciar en la gráfica 6.18.



## Capítulo 6 Presentación y análisis de resultados

- e=0.62-0.48 (Mabes et al., 1977)
- × e=1.05-0.55 (Mabes et al., 1977)
- ▣ e=1.4-1.0 (Matyas et al., 2005)
- e=0.92-0.60 (García, 2019)
- ▲ e=1.0-0.84 (García, 2019)
- e=0.60-0.56 (García, 2019)
- ▣ e=1.25-0.60 (Mittal y Morgentern, 1976)
- ▣ e=0.85-0.48 (Bussiére, 1993)
- ▣ e= 1.0-0.50 (Nelson et al., 1977)
- ◆ e= 1.2-0.45 (Mabes et al., 1977)
- ▲ e=0.98-0.88 (García, 2019)
- ✕ Inalterada (presente trabajo) e=0.74-.69
- ✕ Inalterada (presente trabajo) e=0.86-0.82
- "Reconstituida (presente trabajo) e=0.92-.81
- ✕ Reconstituida (presente trabajo) e=0.83-0.74"
- ⊕ e=0.89-0.59 (Brisson et al., 2002)
- ⊕ e=1.65-0.70 (L'Ecuyer et al., 1992)
- e=0.62-0.55 (García, 2019)
- e=0.98-0.82 (García, 2019)
- ▲ e=0.98-0.82 (García, 2019)
- e=0.80-0.72 (García, 2019)
- ▲ e=1.0-0.50 (Aubertin et al., 1996)
- ▣ e= 1.6-0.50 (Qui y Segó, 2001)
- e= 0.55 (Guerra, 1973)
- e=0.61-0.55 (García, 2019)
- e=0.92-0.60 (García, 2019)
- ◆ Inalterada (presente trabajo) e=1.11-1.03
- ▲ Inalterada (presente trabajo) e=0.76-0.72
- Reconstituida (presente trabajo) e=0.91-.86'

Gráfica 6.18. Comparación de muestras inalteradas y reconstituidas de jal (modificado de Bussiére, 2004).

De todos los datos medidos experimentalmente se formó un resumen que se presenta en la tabla 6.4.

Tabla 6.3. Resumen de resultados.

Muestra	Finos %	e	C %	Clasificación SUCS	k cm/s
M1.	91.97	0.74-0.69	0.58-0.59	CL-ML Arcilla limo arenosa	$1.5 \times 10^{-6}$ a $6.3 \times 10^{-6}$
M2.	99.92	1.11-1.03	0.47-0.49	CL-Arcilla de baja plasticidad	$2 \times 10^{-6}$ a $1.5 \times 10^{-5}$
M3.	95.56	0.86-0.82	0.54-0.52	CL-ML Arcilla limo arenosa	$6.3 \times 10^{-7}$ a $7.8 \times 10^{-6}$
M4.	55.64	0.76-0.72	0.57-0.58	CL-ML Arcilla limo arenosa	$5.2 \times 10^{-7}$ a $1.8 \times 10^{-6}$
M1 R.	91.97	0.91-0.86	0.52-0.54	CL-ML Arcilla limo arenosa	$2.0 \times 10^{-6}$ a $1.5 \times 10^{-5}$
M2 R.	99.92	0.92-0.81	0.52-0.55	CL-Arcilla de baja plasticidad	$4.0 \times 10^{-7}$ a $4.8 \times 10^{-5}$
M3 R.	95.56	0.83-0.74	0.55-0.57	CL-ML Arcilla limo arenosa	$2.3 \times 10^{-6}$ a $6.9 \times 10^{-6}$

## Conclusiones

---

Para cumplir con los objetivos de este trabajo fue necesario operar un permeámetro de carga constante y calibrar sus sensores para poder ensayar las muestras de jal M1, M2, M3 y M4. En los sensores de presión se alcanzó una precisión de 0.001-0.009 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que para el sensor de cambio de volumen la precisión fue de 0.065 cm<sup>3</sup>; además, se calculó el error máximo del orden de  $1 \times 10^{-3}$ . Posteriormente, fue posible llevar a cabo el ensaye de las muestras.

Cada muestra de jal fue descrita con base en los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio, con lo cual se determinó su clasificación de acuerdo con el SUCS. Dicha clasificación sugiere que las muestras M1, M3 y M4 son *CL-ML-arcilla limo arenoso*, cuyo porcentaje de finos va de 55 a 92%, mientras que la muestra M2 fue clasificada como *CL-arcilla de baja plasticidad*, con un contenido de finos de 99%. En cualquier caso, todas las muestras analizadas tenían una densidad de sólidos cercana a los 3.

La reconstitución de las probetas se elaboró por el método de compactación estática, en el cual se utiliza un consolidómetro de palanca para densificar la probeta, esto debido a que era la única manera de replicar las condiciones volumétricas de campo. No obstante, aun con el consolidómetro de palanca no fue posible alcanzar las relaciones volumétricas óptimas de la probeta en algunas de las pruebas. Otra complicación está en que probetas con alturas menores a los 3 cm son difíciles de replicar y por lo tanto de montar ya que al reconstituir con el molde partido el diámetro de la probeta aumenta y por ende la altura disminuye las relaciones volumétricas de la probeta inalterada.

Respecto a la determinación del coeficiente de permeabilidad, tanto en probetas de jal inalteradas como reconstituidas, los resultados de las pruebas generadas en esta tesis fueron comparados con trabajos similares de otros autores. A partir de esto se llegó a la conclusión de que la información es congruente con los resultados de este estudio, en el cual se demuestra: 1) que las probetas reconstituidas tienen una mayor permeabilidad, no obstante, al no ser mayor de orden uno de magnitud se pueden considerar representativas; 2) que si bien la permeabilidad calculada mediante curvas de disipación de poro ésta es ligeramente mayor que la medida por el método de carga constante, la diferencia es mínima y se puede considerar aceptable; 3) se observó que tanto la relación de vacíos, cantidad de finos, compacidad y esfuerzos efectivos son principales factores que influyen en la permeabilidad.

Finalmente, se recomienda el uso de moldes de diferente diámetro para reconstituir probetas o bien, bases de diferentes tamaños para acoplar las muestras y adicionar sensores que monitoreen los cambios volumétricos de la probeta durante la consolidación. Otra recomendación sería elaborar un estudio variando la cantidad de partículas de finos por arriba o por debajo del 50% o hacer un estudio en probetas reconstituidas variando la relación de vacíos.

## Referencias

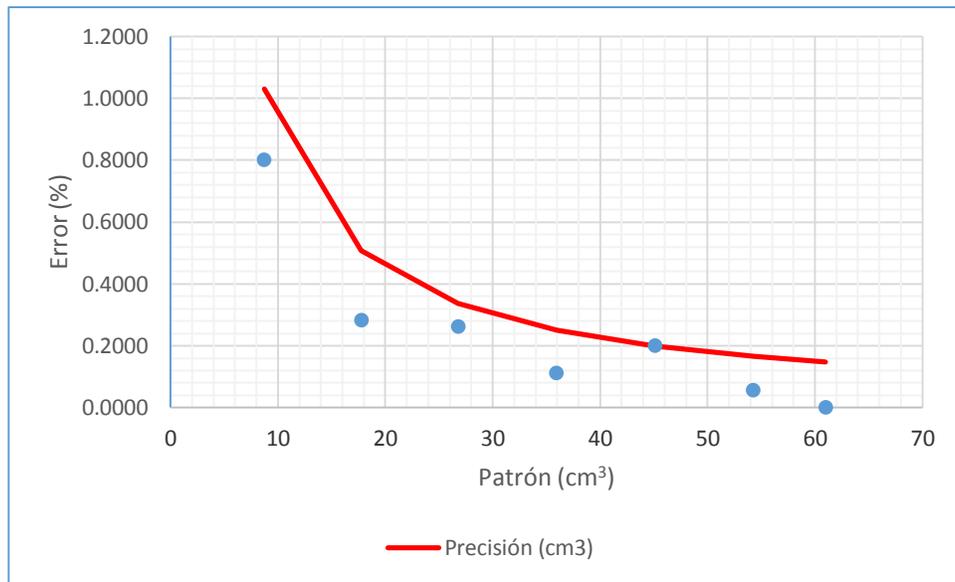
- Acevedo V., M. E. (2017). Influencia de la compacidad relativa en el coeficiente de permeabilidad de jales. *Tesis para optar por el grado de maestro en ingeniería*, UNAM.
- Ali, Y., Naderi, R., Jami, H., & Hosentalepur, M. (2013). A survey study on hydrogeotechnical properties of mines. *International Research Journal of Applied and basic Sciences*.
- Alvarez-Manilla Aceves, A., Valadéz Castro, J., Garnica Anguas , P., & Martínez Peña , G. (2002). *La permeabilidad de los suelos en los problemas de transporte de contaminantes. Aplicacion a infraestructura del transporte*. Sanfandilla, Queretaro.: Secretaria de comunicaciones y transportes. Instituto mexicano del transporte.
- ANCOLD. (1999). *Guidelines on tailings dam design, construction and operation*. Australia.
- Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, A. C. . (1993). *Manual de presas y depósitos de jales*. . México .
- ASTM D 2216-00 Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. (s.f.).
- ASTM D 2487-00 Standard practice for classification of soils of Engineering purposes (United soil classification system). (s.f.).
- ASTM D 422-63 Standard test method for particle size analysis of soils. (s.f.).
- ASTM D 4318-00 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density (Unit weight) of Soil specimens. (s.f.).
- ASTM D 4318-00 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. (s.f.).
- ASTM D 854-10 Standard Test Methods for Specific Gravity Soil Solids by Water Pycnometer. (s.f.).
- Bussiére, B. (2007). Colloquium 2004: Hydrogeotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenvironmental disposal approaches. *Canadian Geotechnical Journal*, 1019-1052.
- Cancela Rey, M. D. (1987). *Comportamiento geotécnico de presas de reasidos bajo acciones estáticas y dinámicas*. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid España.: Tesis Doctoral.
- Candelaria , J., Bernal , M., Flores, O., Guzmán, A., & Hernández, S. (2018). Determinación de los límites de consistencia en jales usando conos penetrantes. *XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*, (págs. 147-154). León.

- CFE; IINGEN, UNAM. (2007). *Pruebas de laboratorio para determinar propiedades de los suelos*. . Comisión Federal de Electricidad (CFE).
- Cytec. (2002). *Mining chemicals handbook* . Cytec industries.
- Das, B. M. (2015). *Fundamentos de la ingeniería geotécnica cuarta edición*. México: Cengage Learning.
- Escobedo R., B. (2011). Análisis de estabilidad de la presa de jales No. 5, Unidad Minera la Negra, Querétaro. *Tesis profesional para obtener el título de INGENIERA DE MINAS Y METALURGIA*, UNAM.
- Flores C., O., Romo O., M. P., De la Rosa, R. J., & Dorado S., C. (2008). Construcción y puesta en operación de un permeámetro de carga constante. . *XXIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, (págs. 435-442). Aguas Calientes.
- Fueyo, L. (1999). *Equipos de trituración, molienda y clasificación: tecnología, diseño y aplicación*. Rocas y minerales.
- Furstenau, M., & Han, K. (2001). *Principles of mineral processing*. Littleton, Colorado, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- García Alva, A. (2019). *Permeabilidad en muestras inalteradas y remoldeadas de jal*. UNAM: Tesis que para obtener el grado de maestro en ingeniería.
- Hernández, V., Solis, J., Flores , O., Guzmán , A., Bernal, M., & Hernández, S. (2018). Determinación del coeficiente de permeabilidad en jales a partir de la curva de disipación de presión de poro en un ensaye triaxial tipo CU. *XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*, (págs. 156-164). León, Guanajuato.
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2005). *Mecánica de suelos Tomo 1 Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. México: Limusa.
- Kelly, E., & Spottiswood, D. (1990). *Introducción al procesamiento de mineral*. México D.F: Limusa.
- Lucero Rivera, J. R. (2018). *Caracterización de la permeabilidad del subsuelo del ex Lago de Texcoco mediante pruebas de laboratorio*. UNAM : Tesina que para optar por el grado de especialista en geotecnia.
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos. Sexta edición*. México: Pearson Educación.
- NORMA Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003. (2004). *Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de las presas de jales*. México, D. F.: Diario Oficial .
- Orozco S., R. V. (2004). Proyecto, contrucción y operación de presas de jales mexicanas. *XXII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos* . Guadalajara.

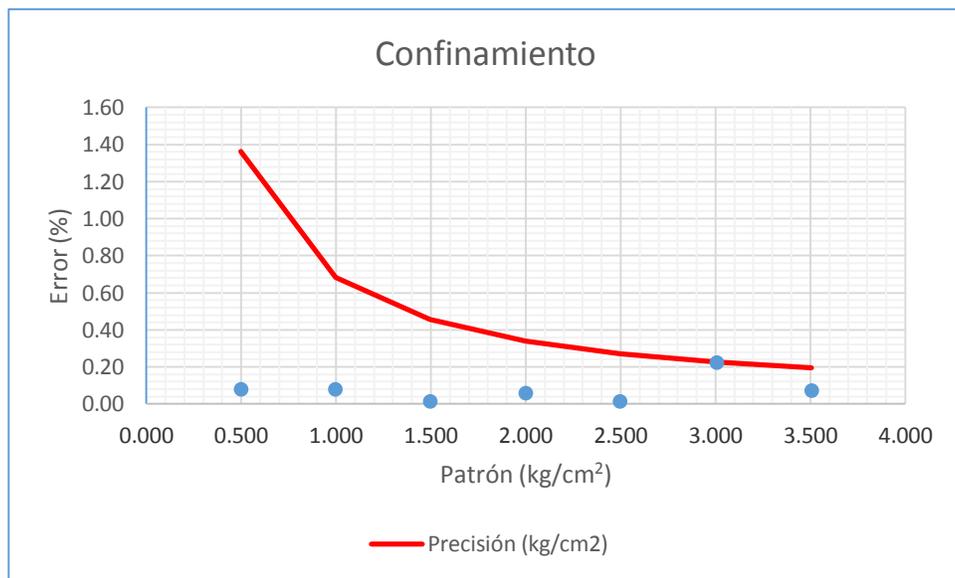
- Orozco S., R. V. (2010). La ingeniería geotécnica en las presas de jales mexicanas. *XXV Reunión Nacional de Mecánica de suelos e Ingeniería Geotécnica*, 1061-1068.
- Orozco Santoyo, R. V., & Flores Castrellón, O. (2005). Influencia de la geotecnia en la normatividad de presas de jales mexicanas. *Coloquio conmemorativo: La Ingeniería Geotécnica a 20 años de "El sismo"*, (págs. 164-177). México, D.F.
- Orozco, R. V., Quiñones, H., & Allende, L. (1978). *Manual para la aplicación de las cartas edafológicas de CETENAL Para fines de la ingeniería civil*. México : Comisión de estudios del territorio nacional.
- Padilla Velázquez, R. R. (2008). Expresiones universales para el peso específico sumergido, de suelos parcialmente saturados e inmersos en cualquier gas. *XV Reunión Nacioanal de Profesores de Mecánica de Suelos*, (págs. 71-77). Aguascalientes, Ags.
- Qiu, Y., & Sego, D. (2000). Laboratory properties of mine tailings. *Canadian Geotechnical Journal*.
- Rosenqvist, T. (1987). *Fundamentos de metalurgia extractiva*. México, D.F: Limusa.
- Sánchez, L. R. (2013). Residuos mineros y la generación de drenaje ácido: Pruebas de laboratorio y su aplicación en el diseño, construcción y operación de depósitos. *Tesis profesional para obtener el título de ingeniera de minas y metalurgista*, UNAM.
- Santos, J. (2012). Estudios ambientales como instrumentos para garantizar la seguridad de los depositos de residuos mineros. *XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, (págs. 1229-1235). Cancún, Quintana Roo.
- Servicio Geológico Mexicano. (2019). *Anuario Estadístico de la minería mexicana, 2018*. Obtenido de SGM : [http://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario\\_2018\\_Edicion\\_2019.pdf](http://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2018_Edicion_2019.pdf)
- Shamsai, A., Pak, A., Ayatollahi, H., & Bateni, S. (2007). Geotechnical Characteritics of Copper Mine Tailings: A Case Study. *Geotechnical and Geological Engineering*.
- Sowers, G. B., & Sowers, G. F. (1972). *Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones*. México: Limusa.
- SRK Consulting. (Apr-May de 2010). *Tailing Material Properties*. Obtenido de <http://www.infomine.com/library/publication/docs/SRKTailings2010e.pdf>
- Subsecretaría de Economía de Chile, Consejo Nacional de Producción Limpia, Consejo Minero de Chile, Subsecretaria de Minería, Ministerio de Minería. (s.f.). *Prácticas y Gestión Ambiental. Acuerdo Marco de Producción Limpia para la Gran Minería*. Chile .
- Taylor, D. (1961). *Principios fundamentales de Mecánica de Suelos*. México, D. F.: Continental.

- Terzaghi, K., & Peck , R. B. (1978). *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica*. España: El ateneo.
- Valenzuela , L. (2015). Tailing dams and hydraulic fills. *The 2015 Casagrande Lecture Geotechnical Synergy in Buenos Aires* , 5-49.
- Vick, S. G. (1990). *Planning, Design and Analysis of Tailing Dams, 1*. Bi Tech Publishers Ltd.
- Zea Constantino, C., & Rivera Constantino , R. (2004). *Notas sobre los fundamentos de la mecánica de suelos*. México: UNAM.

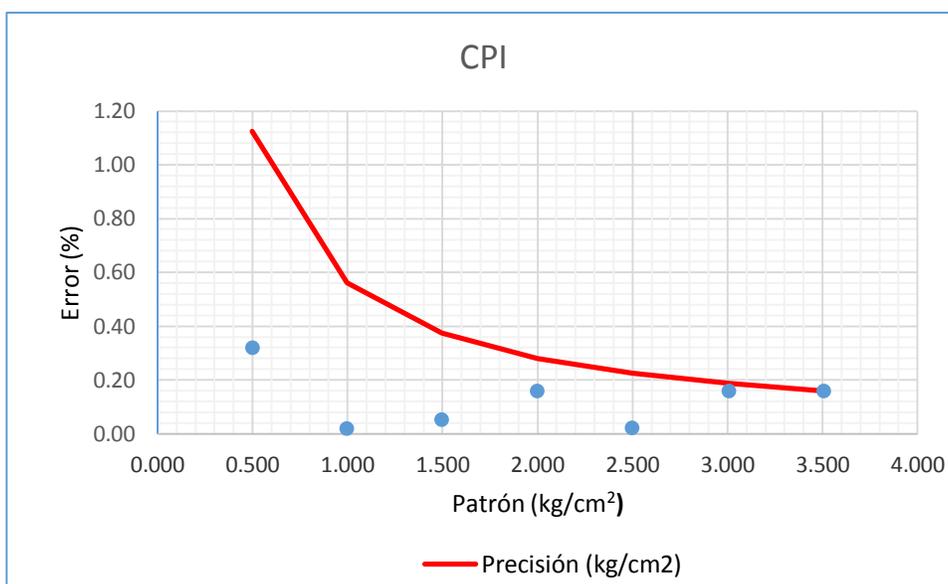
## Anexo A



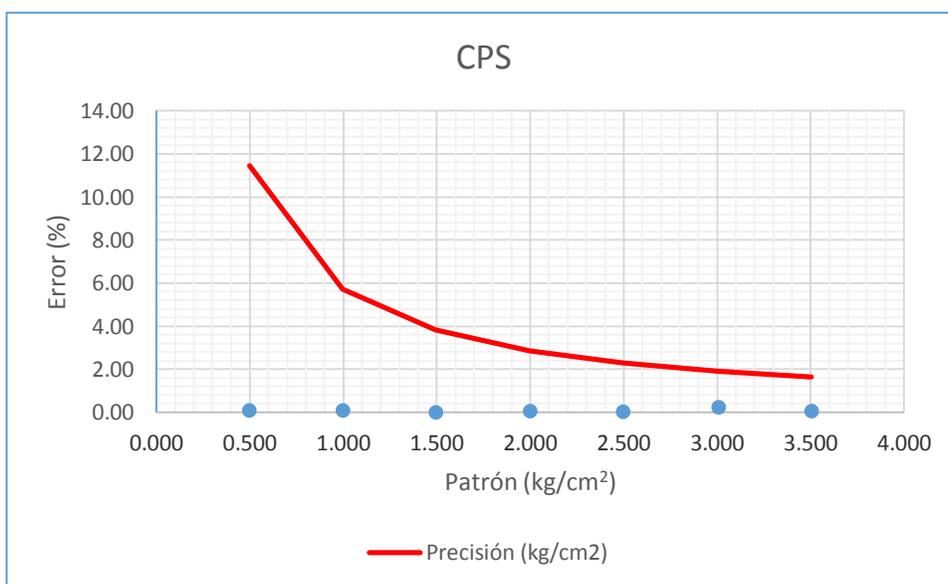
Gráfica 0.1. Verificación de la precisión en el sensor de cambio volumétrico.



Gráfica 0.2. Verificación de la precisión en el sensor de confinamiento.



Gráfica 0.3. . Verificación de la precisión en el sensor de cambio CPI.



Gráfica 0.4. . Verificación de la precisión en el sensor de cambio CPS.

Contenido de Agua						
No. de cápsula	Peso de cápsula	Wsw + cápsula	Wss + cápsula	Wsw	Wss	Contenido de Agua
	g	g	g	g	g	%
42	11.35	43.07	36.05	7.02	24.70	28.42%
36	11.58	41.38	34.94	6.44	23.36	27.57%
47	11.52	51.68	42.16	9.52	30.64	31.07%
37	11.78	54.27	44.52	9.75	32.74	29.78%
Promedio						29.21%

Tabla 0.1. Contenido de agua en la muestra ss-2-1, San Martín, Zac., profundidad 18-18.8 m.

Contenido de Agua						
No. de cápsula	Peso de cápsula	Wsw + cápsula	Wss + cápsula	Wsw	Wss	Contenido de Agua
	g	g	g	g	g	%
A	11.34	24.52	22.19	2.33	10.85	21.47%
B	11.58	22.66	20.18	2.48	8.60	28.84%
C	11.52	28.25	25.09	3.16	13.57	23.29%
Promedio						24.53%

Tabla 0.2 Contenido de agua en la muestra ss-4-1, Charcas, S.L.P., profundidad 17-17.5 m.

Contenido de Agua						
No. de cápsula	Peso de cápsula	Wsw + cápsula	Wss + cápsula	Wsw	Wss	Contenido de Agua
	g	g	g	g	g	%
A	11.34	15.82	15.03	0.79	3.69	21.41%
B	11.58	20.70	19.18	1.52	7.60	20.00%
C	11.52	21.91	20.14	1.77	8.62	20.53%
D	11.60	19.32	18.00	1.32	6.20	21.29%
Promedio						20.81%

Tabla 0.3 Contenido de agua en la muestra ss-1-1, Charcas, S.L.P., profundidad 20-21 m.

Densidad de sólidos											
No. De ensaye	Matraz	Peso de matraz + agua + suelo	T	Tara No.	Peso matraz + agua a T °C	Peso de cápsula	Peso del suelo + cápsula	Ws	Vs	Densidad de sólidos Gs	% de error
		g	°C		g	g	g	g	cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	
1	2	787.8	23.8	8	659	163.8	348.4	184.6	55.8	3.308	0.46%
2	5	806.1	23.6	33	663.2	156.8	361.2	204.4	61.5	3.324	
Promedio										3.32	

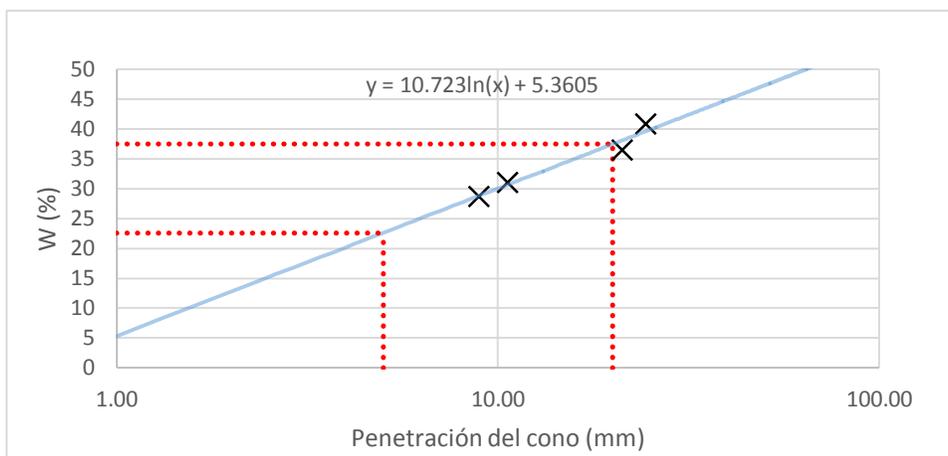
Tabla 0.4. Densidad de sólidos en la muestra ss-2-1, San Martín, Zac., profundidad 18-18.8 m.

Densidad de sólidos											
No. De ensaye	Matraz	Peso de matraz + agua + suelo	T	Tara No.	Peso matraz + agua a T °C	Peso de cápsula	Peso del suelo + cápsula	Ws	Vs	Densidad de sólidos Gs	% de error
		g	°C		g	g	g	g	cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	
9	9	781.9	23.0	5	662	163.6	343	179.4	59.5	3.015	2.31%
11	11	776.2	23.0	36	658	211.3	386.2	174.9	56.7	3.085	
Promedio										3.05	

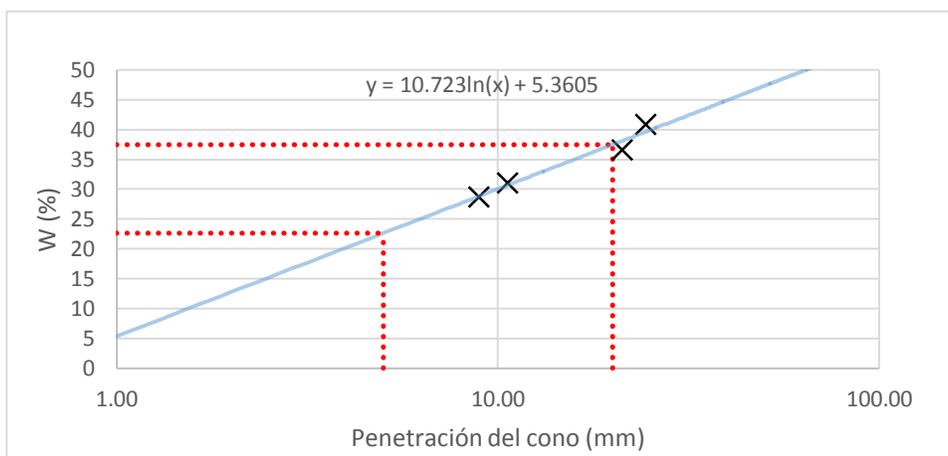
Tabla 0.5 Densidad de sólidos en la muestra ss-4-1, Charcas, S.L.P., profundidad 17-17.5 m.

Densidad de sólidos											
No. De ensaye	Matraz	Peso de matraz + agua + suelo	T	Tara No.	Peso matraz + agua a T °C	Peso de cápsula	Peso del suelo + cápsula	Ws	Vs	Densidad de sólidos Gs	% de error
		g	°C		g	g	g	g	cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	
1	5	792.4	21.2	5	663.6	163.6	356.7	193.1	64.3	3.003	0.20%
2	9	794.2	21.3	36	660.6	211.3	411.8	200.5	66.9	2.997	
Promedio										3.00	

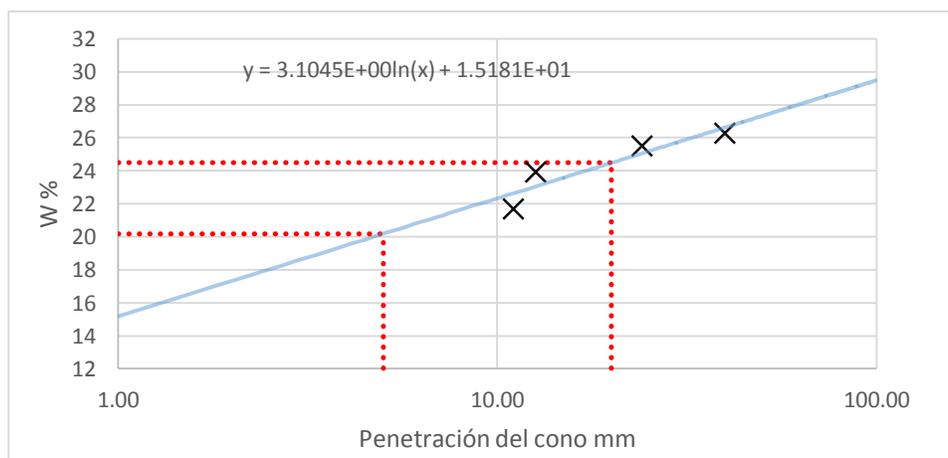
Tabla 0.6 Densidad de sólidos en la muestra ss-1-1, Charcas, S.L.P., profundidad 20-21 m.



Gráfica 0.5. Curva de fluidez de la muestra ss-2-1, San Martín, Zac., profundidad 18-18.8 m.

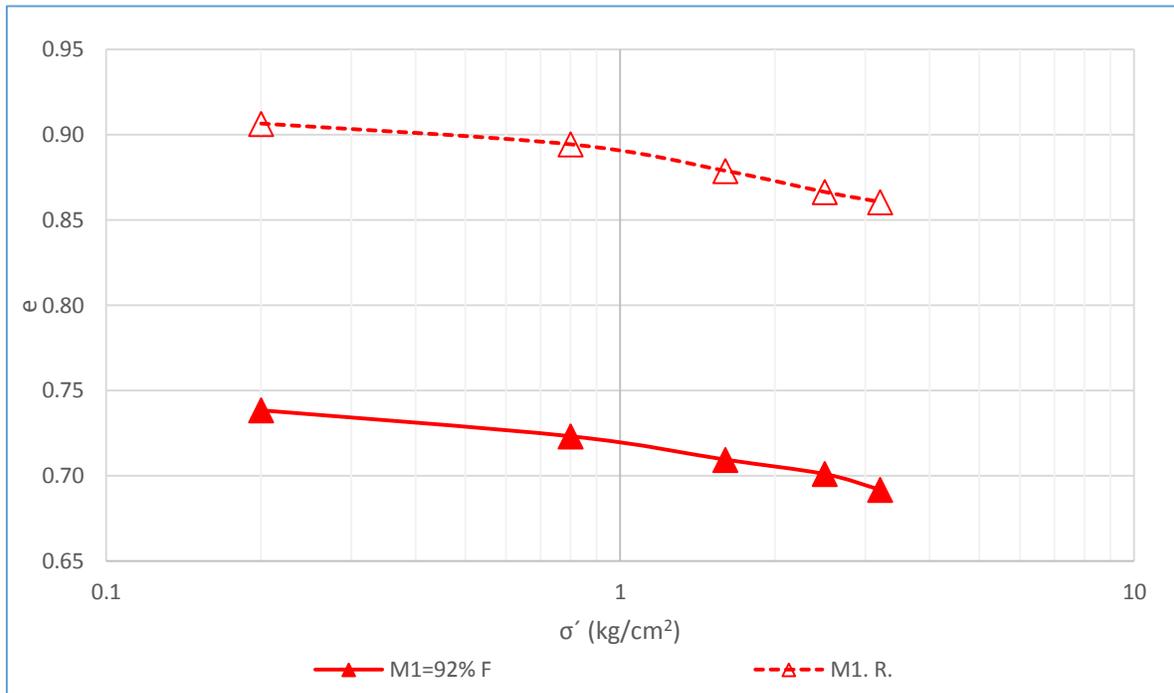


Gráfica 0.6. Curva de fluidez de la muestra ss-4-1, Charcas, S.L.P., profundidad 17-17.5 m

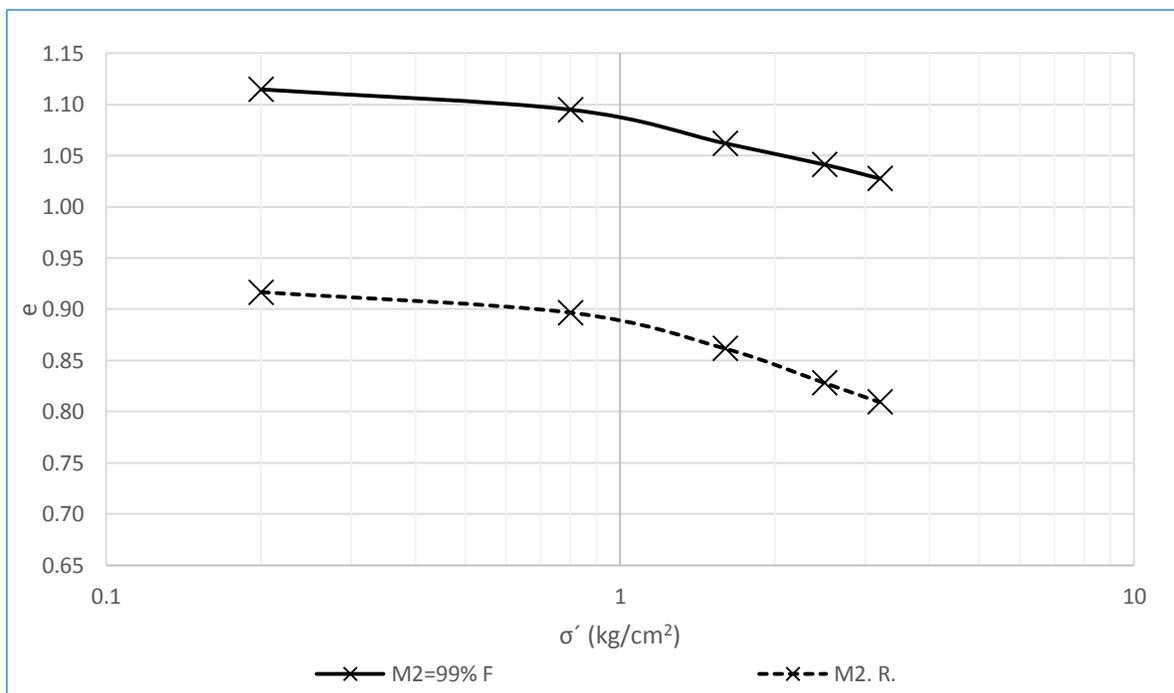


Gráfica 0.7 Curva de fluidez de la muestra ss-1-1, Charcas, S.L.P., profundidad 20-21 m.

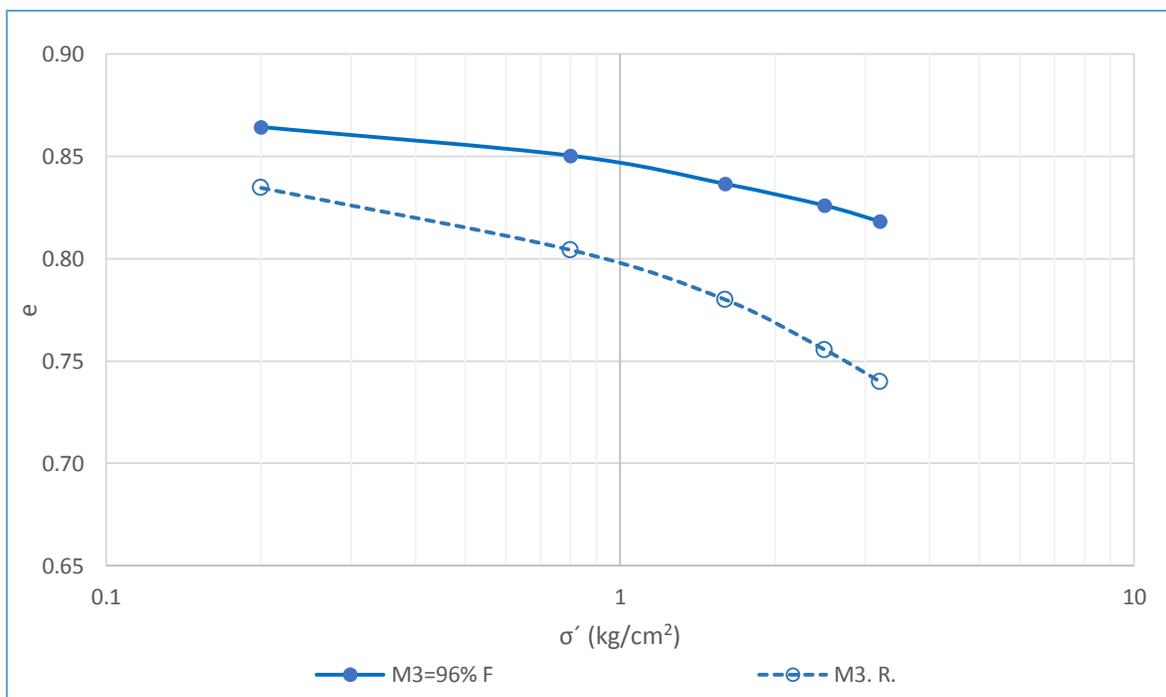
## Anexo B



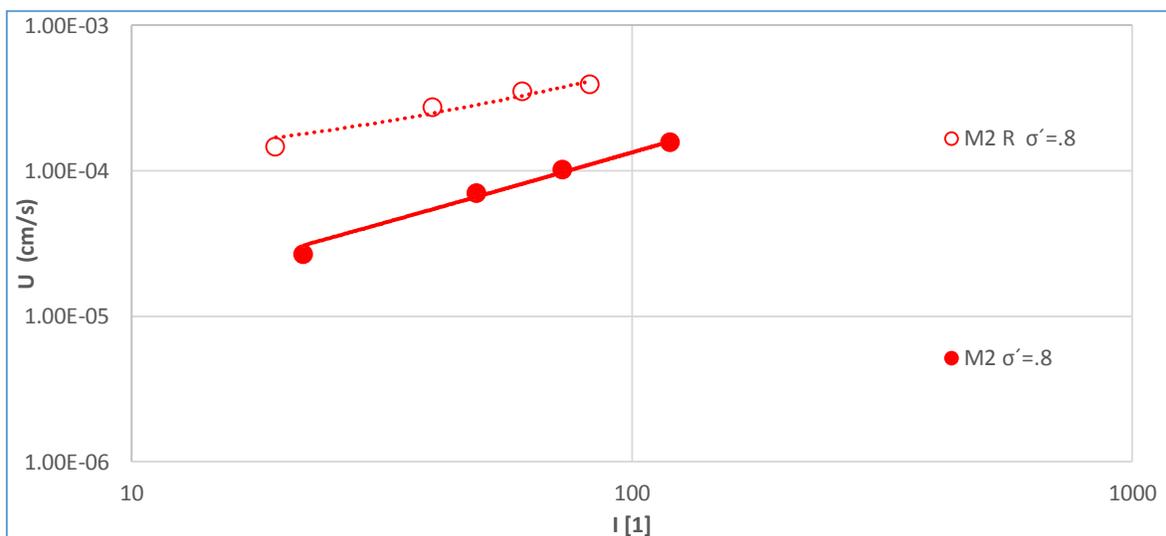
Gráfica 0.8. Curva de compresibilidad para la muestra M1.



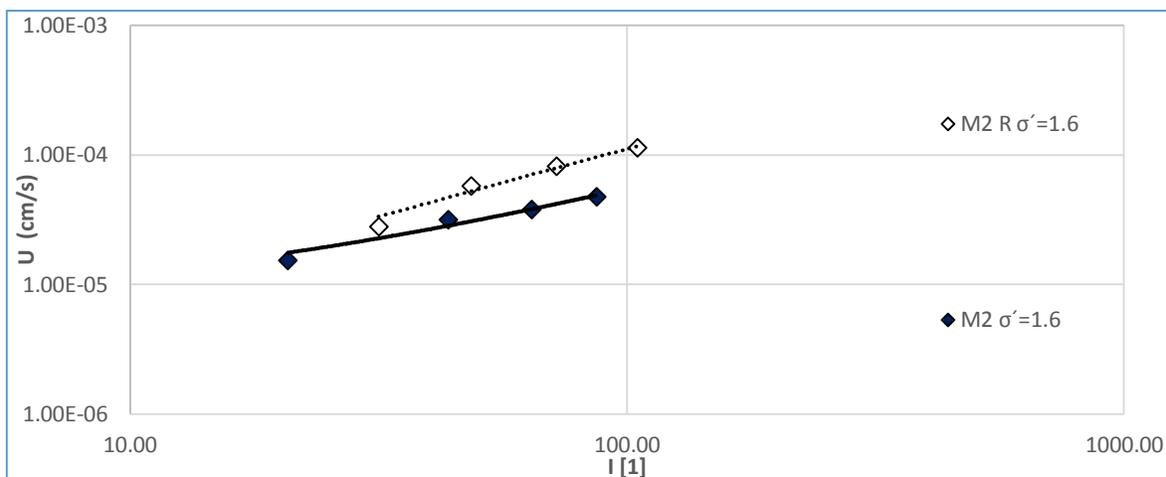
Gráfica 0.9. Curva de compresibilidad para la muestra M2.



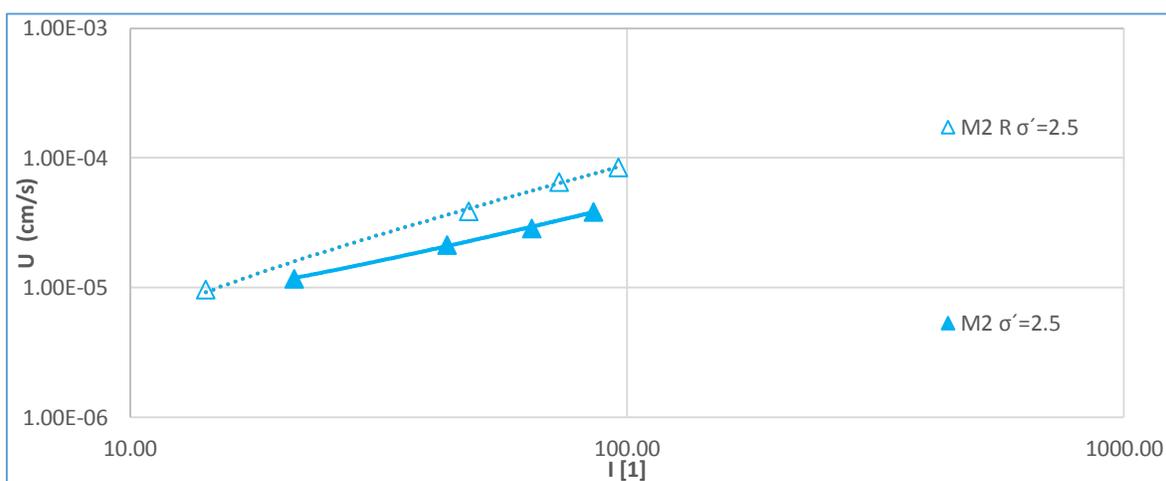
Gráfica 0.10. Curva de compresibilidad para M3.



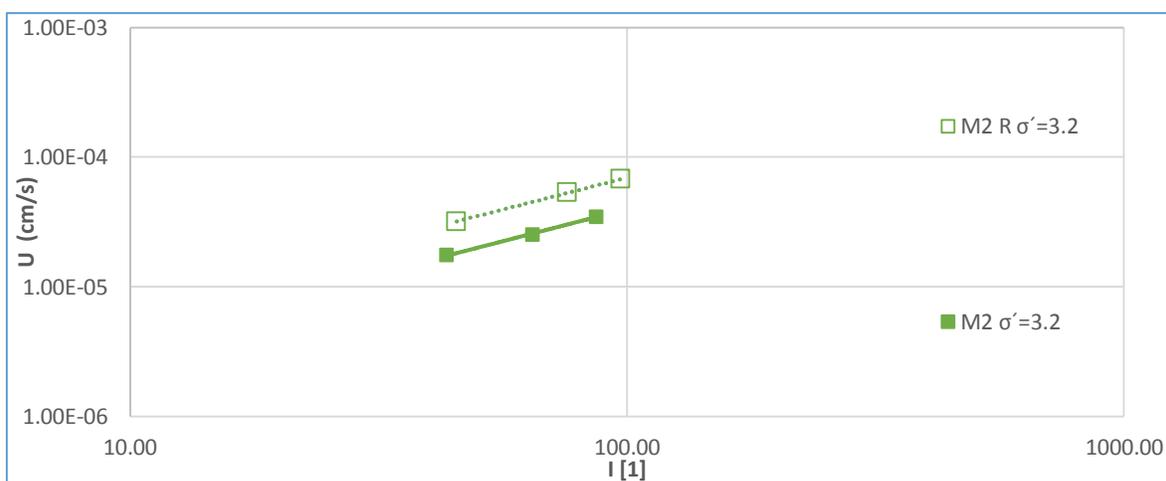
Gráfica 0.11. "k" Medida gráficamente para  $\sigma'=0.8$  kg/cm<sup>2</sup> M2.



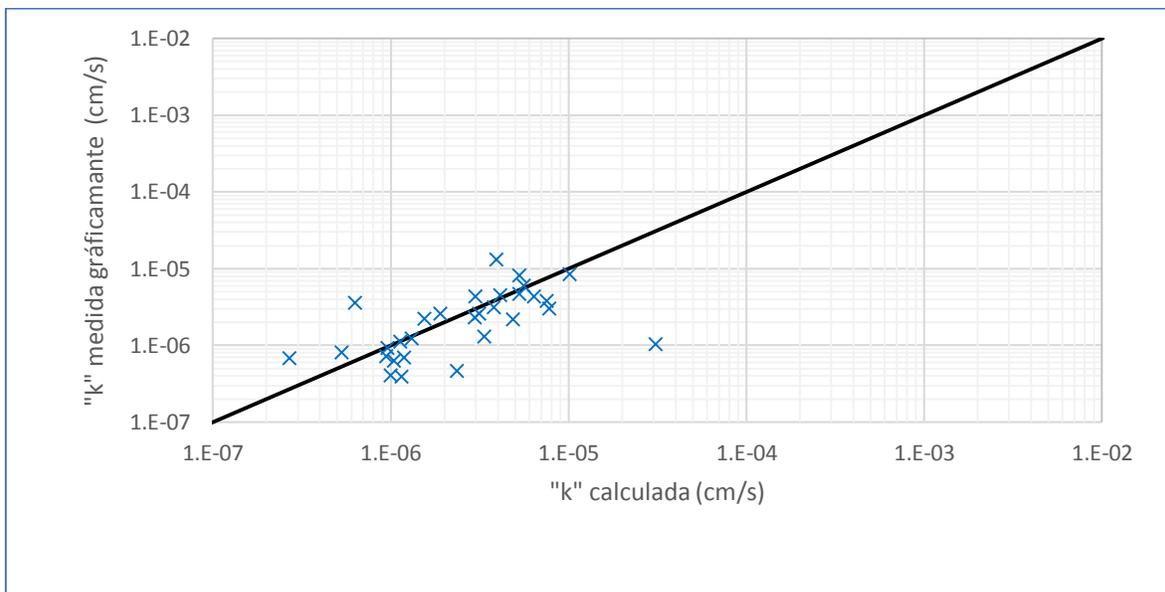
Gráfica 0.12. "k" Medida gráficamente para  $\sigma' = 1.6 \text{ kg/cm}^2 \text{ M2}$ .



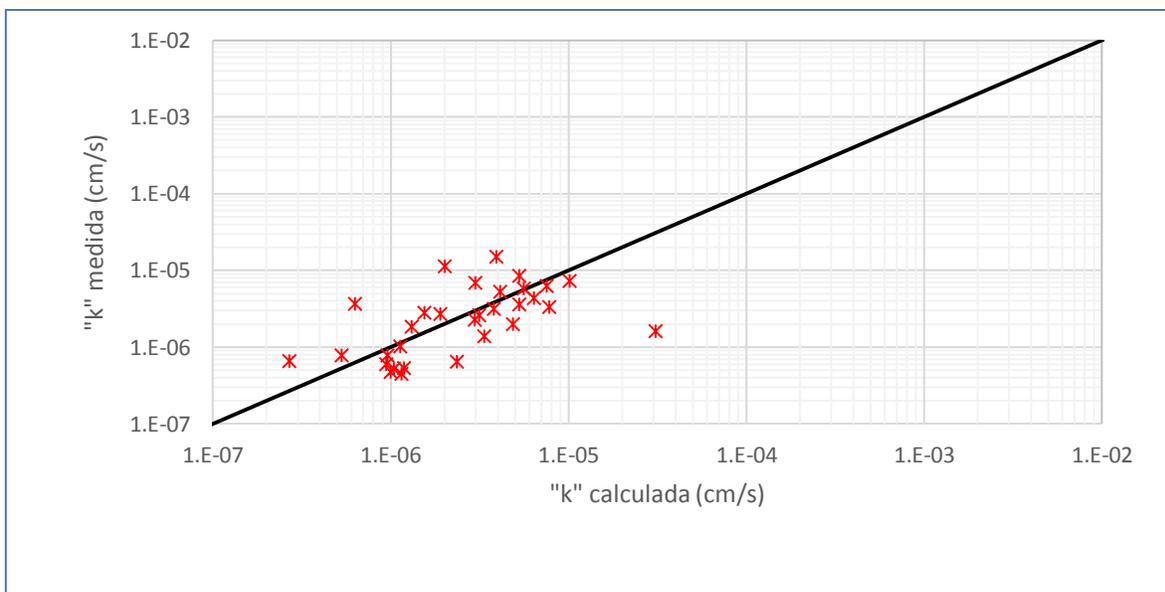
Gráfica 0.13. "k" Medida gráficamente para  $\sigma' = 2.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ M2}$ .



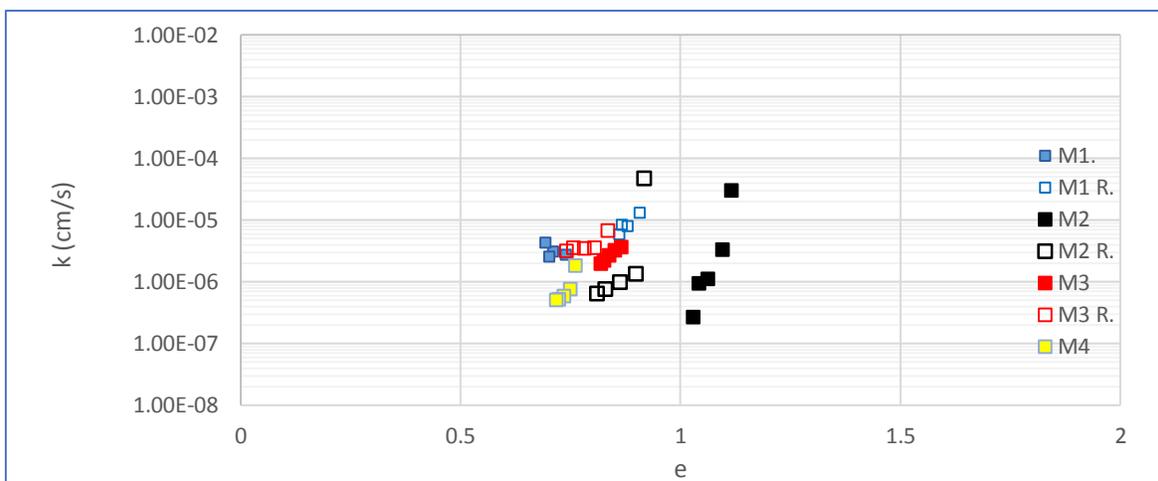
Gráfica 0.14. "k" Medida gráficamente para  $\sigma' = 3.2 \text{ kg/cm}^2 \text{ M2}$ .



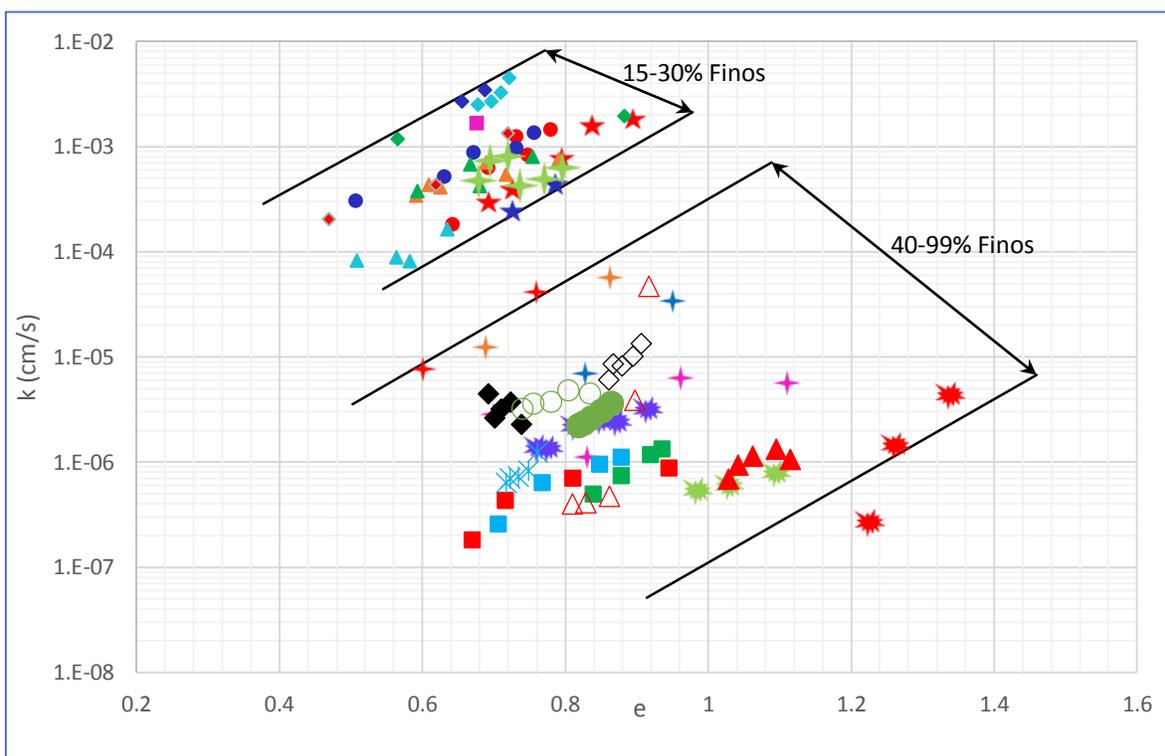
Gráfica 0.15. Relación de "k" medida gráficamente contra calculada.



Gráfica 0.16. Relación de "k" medida contra calculada.

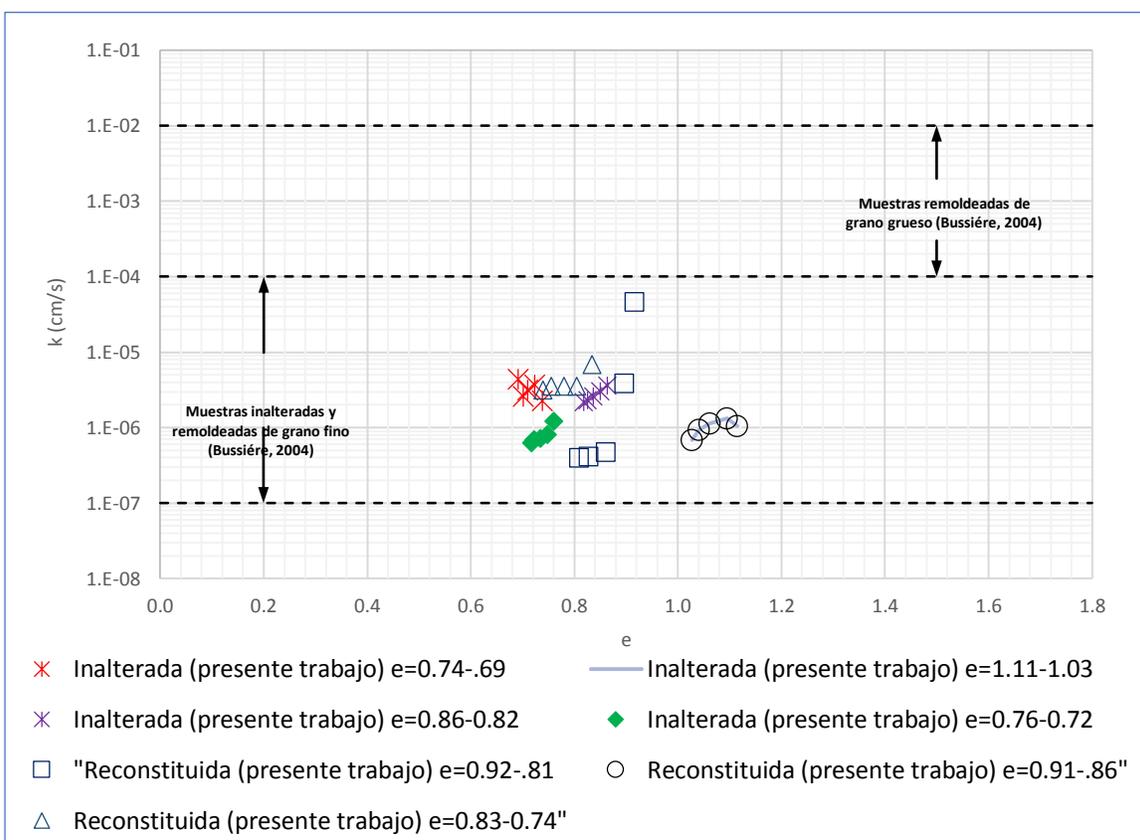


Gráfica 0.17. Influencia de la relación de vacíos.



- |                               |                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| ● M 1- 15% FC                 | ● M 1- 21% FC                 | ● M 2- 15% FC                 |
| ★ M 2- 21% FC                 | ▲ M 5- 21% FC                 | ◆ M 4- 32% FC                 |
| ◆ M 4- 30% FC                 | ◆ M 4- 30% FC                 | ◆ M 4- 20% FC                 |
| ▲ M 5- 20% FC                 | ▲ M 5- 26% FC                 | ◆ M 6- 18% FC                 |
| ▲ M 5- 20% FC                 | ◆ M 9- 18% FC                 | ◆ M 7- 50% FC                 |
| ▲ M 9- 23% FC                 | ◆ M 7- 63% FC                 | ◆ M 7- 99% FC                 |
| ◆ M 7- 55% FC                 | ◆ M 8- 51% FC                 | ◆ M 8- 55% FC                 |
| ◆ M 8- 50% FC                 | ◆ M 9- 70% FC                 | ◆ M1=92% F (Presente estudio) |
| ◆ M 9- 58% FC                 | ◆ M2=99% F (Presente estudio) | ◆ M2. R. (Presente estudio)   |
| ◆ M1. R. (Presente estudio)   | ◆ M3. R. (Presente estudio)   | ◆ M4= 55%F (Presente estudio) |
| ◆ M3=96% F (Presente estudio) |                               |                               |

Gráfica 0.18. Influencia de la relación de vacíos y contenido de finos.



Gráfica 0.19. Relación de vacíos y finos para muestras inalteradas y reconstituidas.