

2018

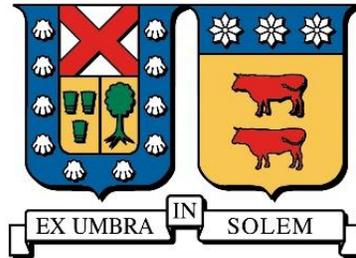
DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE RETENCIÓN DE AGUA PARA RELAVES MULTIMETÁLICOS DE LA INDUSTRIA MINERA DE CHILE

MUSSO HOTT, JAIME ANDRES

<http://hdl.handle.net/11673/42510>

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO-CHILE



**DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE RETENCIÓN DE AGUA
PARA RELAVES MULTIMETÁLICOS DE LA INDUSTRIA
MINERA DE CHILE**

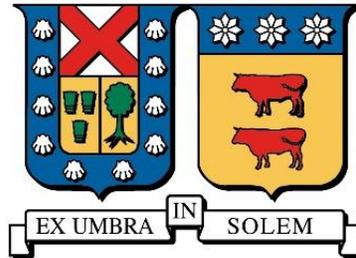
JAIME ANDRÉS MUSSO HOTT

Memoria para optar al Título de
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía
GONZALO HERNÁN SUAZO FUENTEALBA

SEPTIEMBRE 2018

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO-CHILE



**DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE RETENCIÓN DE AGUA
PARA RELAVES MULTIMETÁLICOS DE LA INDUSTRIA
MINERA DE CHILE**

Memoria de titulación presentada por
JAIME ANDRÉS MUSSO HOTT

Como requisito parcial para optar al título de
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía
GONZALO HERNÁN SUAZO FUENTEALBA

SEPTIEMBRE 2018

AGRADECIMIENTOS

A la segunda compañía “bomba germania” de Valparaíso por haberme aceptado entre sus filas durante mis años de estudios. A mis amigos universitarios especialmente al caezón, pastaman, basujairo, nore, King y la bestia curicana besochó. A mi profesor guía Gonzalo Suazo, por su constante apoyo durante el desarrollo de esta memoria de titulación. A mi polola por su constante apoyo, motivación y retos (la mayoría merecidos) para continuar con la carrera. Y por sobre todo a mis padres que sin su sacrificio nada de esto sería posible.

RESUMEN

En la actualidad, gran parte del desarrollo de la ingeniería geotécnica está relacionado con los suelos saturados o en estado seco, i.e. estados límites del suelo, de modo de facilitar su comprensión y comparación de fenómenos geomecánicos particulares, e.g. respuesta sísmica, infiltraciones. Sin embargo, hoy en día, y a partir del desarrollo de nuevas tecnologías y metodologías experimentales, es posible lograr un estudio acabado de los suelos parcialmente saturados (i.e. suelos con un grado de saturación menor a la unidad). En este sentido, se ha demostrado que es posible relacionar las propiedades fundamentales de este tipo de suelos, como lo es el hinchamiento, la permeabilidad y la resistencia corte, mediante la curva de retención de agua, conocida como SWRC debido a su nombre en inglés (soil-water retention curve). Esta curva relaciona el contenido de agua del suelo con su presión intersticial (i.e. succión).

La determinación de la SWRC ha sido clave en el desarrollo de la geotecnia en suelos no saturados, impactando a diversas áreas de la ingeniería geotécnica, e.g. fundaciones profundas, estabilidad de taludes naturales, minería. En esta última área, el entendimiento del comportamiento no saturado permite entender fenómenos como el flujo de agua no saturado en depósitos de relaves y pilas de lixiviación, así como procesos de evaporación y balance de aguas.

En este contexto, el presente estudio busca caracterizar las principales propiedades índices de relaves mineros (e.g. G_s , C_u , C_c , K , ρ_{min} , ρ_{max} , e), así como determinar su SWRC. Los resultados se compararán con estimaciones de modelos matemáticos tradicionales. Del mismo modo, se propondrá una nueva estimación que considere las principales características de los relaves nacionales. Lo anterior, a partir de una extensa campaña de laboratorio en más de 13 tipos de relaves.

ABSTRACT

At present, a large part of the development of geotechnical engineering is related to saturated or dry soil, i.e. soil limit states, so as to facilitate their understanding and comparison of particular geomechanical phenomena, e.g. Seismic response, infiltrations. However, nowadays, and from the development of new technologies and experimental methodologies, it is possible to achieve a finished study of partially saturated soils (i.e. soils with a degree of saturation less than unit). In this sense, it has been shown that it is possible to relate the fundamental properties of this type of soil, such as swelling, permeability and shear resistance, through the soil water retention curve, known as SWRC. This curve relates the water content of the soil with its interstitial pressure (i.e. suction).

The determination of the SWRC has been key to the development of geotechnics in unsaturated soils, impacting various areas of geotechnical engineering, e.g. deep foundations, stability of natural slopes, mining. In this last area, the understanding of the unsaturated behavior allows to understand phenomena such as the flow of unsaturated water in tailings deposits and leach piles, as well as evaporation processes and water balance.

In this context, the present study seeks to characterize the main index properties of mining tailings (e.g. G_s , C_u , C_c , K , ρ_{min} , ρ_{max} , e), as well as to determine the SWRC. The results will be compared with estimates of traditional mathematical models. In the same way, a new estimate will be proposed that considers the main characteristics of the national tailings. The above, from an extensive laboratory campaign in more than 13 types of tailings.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Suelos no Saturados	1
1.2.	Estado de la Práctica	4
2.	OBJETIVOS	7
2.1.	Objetivos Generales	7
2.2.	Objetivos Específicos	7
2.3.	Alcances	8
3.	SUELOS NO SATURADOS, SWRC Y MODELOS DE AJUSTE	9
3.1.	Introducción a los suelos no saturados	9
3.2.	Succión en suelos	12
3.2.1.	Succión total en suelos	12
3.2.2.	Succión matricial	12
3.2.3.	Succión osmótica	13
3.3.	Curva de retención de agua o Soil-water retention curve (SWRC)	13
3.3.1.	Forma y caracterización	14
3.3.2.	Relaciones Masa – Volumen para el contenido de agua	15
3.3.3.	Modelos de estimación y ajuste de la SWRC	17
3.3.3.1.	Modelo de van Genuchten (1980)	17
3.3.3.2.	Modelo de Vereecken et al. (1989)	19
3.3.3.3.	Modelo de Fredlund & Xing (1994)	19
3.3.3.4.	M.D. Fredlund, G. Wilson & D.G. Fredlund (2002)	20
3.3.3.5.	Modelo MK (2003)	22
3.3.3.6.	Modelo de Pham & Fredlund (2005)	25
3.3.3.7.	Modelo de Fredlund & Pham (2006)	26
3.3.3.8.	Otros modelos	27
3.3.4.	Generalidades de los modelos matemáticos de estimación y ajuste	29
3.3.1.	Entrada de aire (AEV)	30
3.3.2.	Succión residual	32

3.3.3.	Resistencia al corte _____	33
3.3.4.	Limitaciones de la SWRC _____	35
3.3.4.1.	Perturbación de muestras _____	35
3.3.4.2.	Efecto de la histéresis _____	35
3.3.4.3.	Preparación de probetas _____	38
4.	TÉCNICAS DE MEDICION DE SWRC EN LABORATORIO _____	40
4.1.	General _____	40
4.2.	Técnica de Traslación de Ejes en Cámara de Presión para Múltiples Muestras _____	43
4.3.	Método papel filtro _____	44
5.	DEPOSITOS DE RELAVES Y COMPORTAMIENTO NO SATURADO _____	45
5.1.	Introducción _____	45
5.2.	Depósitos de Relaves _____	45
5.2.1.	Tranques de relaves _____	45
5.2.1.1.	Construcción aguas arriba _____	46
5.2.1.2.	Construcción aguas abajo _____	47
5.2.1.3.	Construcción por el método de eje central o mixto _____	47
5.2.2.	Embalses de relaves _____	47
5.2.3.	Depósitos de relaves espesados _____	48
5.2.4.	Depósitos de relaves filtrados _____	48
5.2.5.	Depósitos de relaves en pasta _____	49
5.2.6.	Otros tipos de depósitos _____	49
5.2.7.	Depósitos en Chile _____	49
5.3.	Comportamiento no saturado _____	50
5.3.1.	Influencia del agua capilar en la interacción con la atmósfera _____	51
5.3.2.	Efectos del contenido de agua _____	52
5.3.3.	Conductividad hidráulica _____	52
5.3.4.	Estabilidad Física _____	54
5.3.5.	Drenaje Ácido _____	57
5.3.5.1.	Medidas de control _____	58
5.3.5.2.	SWRC y el drenaje ácido _____	58
5.4.	Discusión y Comentarios _____	60
6.	DESARROLLO DE CAMARA DE PRESIÓN Y PAPEL FILTRO EN UTFSM _____	61

6.1.	Método de Cámara de presión con plato poroso _____	61
6.2.	Método Papel filtro (Gardner, 1937) _____	66
7.	ANÁLISIS DE RELAVES Y LA SWRC _____	69
7.1.	Caracterización Geotécnica _____	70
7.1.1.	Granulometrías, Límites de Atterberg y Clasificación USCS _____	70
7.1.1.1.	Relaves 1-7 clasificación USCS SM (Arenas Limosas) _____	71
7.1.1.2.	Relaves 6-10 clasificación USCS ML-CL (Limos con baja plasticidad) _____	72
7.1.1.3.	Relaves 11-13 clasificación USCS CL _____	72
7.1.2.	Densidad mínima y Proctor Estándar _____	73
7.1.3.	Conductividad hidráulica _____	74
7.1.4.	Límite de saturación _____	74
7.1.5.	Resumen caracterización de relaves _____	76
7.2.	Análisis de las SWRC Obtenidas Mediante Técnica de Traslación de Ejes _____	77
7.2.1.	SWRC de relaves con clasificación USCS, SM _____	77
7.2.2.	SWRC de relaves con clasificación USCS, ML-CL _____	78
7.2.3.	SWRC de relaves con clasificación USCS, CL _____	79
7.2.4.	Comentarios del método _____	80
7.3.	Análisis de la SWRC Obtenidas Mediante Técnica de Papel Filtro _____	81
7.3.1.	SWRC mediante papel filtro _____	81
7.3.2.	Comentarios del método _____	82
7.4.	Comparación de los Métodos de Ajuste _____	83
7.5.	Air-Entry Value _____	84
7.6.	Permeabilidad Parcialmente Saturada _____	86
7.7.	Efectos de la variación del contenido de sólidos inicial _____	87
7.8.	Estimación de la SWRC _____	89
7.8.1.	Estimación mediante modelos propuestos anteriormente _____	89
7.8.2.	Propuesta modelos alternativos de estimación de la SWRC _____	91
7.8.2.1.	Estimación mediante contenido de humedad de saturación y contenido de finos _____	92
7.8.2.2.	Estimación completa mediante gravedad específica (Gs) y contenido de finos _____	95
7.8.3.	Estimación mediante modelos propuestos para valores experimentales de otros autores _____	97
8.	CONCLUSIONES _____	100

9.	BIBLIOGRAFÍA _____	102
10.	ANEXOS _____	106
10.1.	Depósitos de Relave _____	106
10.2.	Informe Cámara de Presión _____	108
10.3.	Informe Método Papel Filtro _____	109
10.4.	Arduino _____	110
10.4.1.	Sensores _____	110
10.4.2.	Pantalla de cristal líquido (LCD) _____	111
10.4.3.	Potenciómetro _____	112
10.4.4.	Módulo microSD _____	112
10.4.5.	Proto Board _____	113
10.4.6.	Implementación del sistema Arduino _____	113
10.4.7.	Pseudo código arduino _____	115
10.4.8.	Código _____	116
10.4.9.	Calibración _____	118
10.5.	Caracterización Relaves _____	119
10.6.	Permeabilidad no Saturada _____	121
10.7.	Cámara de Presión _____	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Fases de un suelo no saturado.....	2
Figura 1-2: Comportamiento del corte ante la variación de la succión en suelos no saturados.	2
Figura 1-3: Relación bi-lineal del corte v/s del esfuerzo normal en suelos no saturados.....	2
Figura 1-4: Distribución de depósitos de relaves según región y estado.....	4
Figura 1-5: Mapa distribución de depósitos de relave en la comuna de Copiapó, III región.	5
Figura 1-6: Comparación de ajustes y estimaciones con datos experimentales.	6
Figura 3-1: Clasificación de las zonas de un perfil de suelo no saturado.....	9
Figura 3-2: Categorización general de la mecánica de suelos basada en el estado de esfuerzos en los poros de agua.	10
Figura 3-3: Fuerzas intermoleculares en la interfaz.	10
Figura 3-4: Modelo físico de capilaridad.	11
Figura 3-5: Relación de la succión matricial con respecto al tamaño de las partículas de suelo.	13
Figura 3-6: Curva de retención de agua con puntos y zonas típicas.....	14
Figura 3-7: Comparación de formas de la curva de retención de agua para distintos tipos suelos.	15
Figura 3-8: Superficies constitutivas para limos (a) y arenas (b).	17
Figura 3-9: Curva de retención de agua típica obtenida mediante el modelo de van Genuchten.....	18
Figura 3-10: Curva de retención de agua ajustada mediante modelo de van Genuchten y comparación de la conductividad hidráulica medida y estimada.	18
Figura 3-11: Determinación gráfica del punto de inflexión y succión residual.	20
Figura 3-12: Variación del parámetro mf obtenido mediante regresión del modelo de Fredlund & Xing (1994) en función del diámetro efectivo.	22
Figura 3-13: Variación del parámetro nf obtenido mediante regresión del modelo de Fredlund & Xing (1994) en función del diámetro efectivo.	22
Figura 3-14: Curva de retención de agua obtenida mediante el método Kóvacs modificado para un relave limoso.	24
Figura 3-15: Esquema de la SWRC en un proceso inicial de desaturación con poros colapsables interconectados.....	26
Figura 3-16: Zonificación del modelo de Fredlund y Pham.....	26
Figura 3-17: Categorización de los modelos de curvas de retención de agua, SWRC.....	29
Figura 3-18: Determinación del valor de entrada de aire mediante el método de Brooks & Corey.....	30
Figura 3-19: Valores de la entrada de aire según los distintos métodos.....	31
Figura 3-20: Contenido volumétrico de agua según las presiones de poro en la matriz de suelo.	32
Figura 3-21: Relación entre el parámetro de regresión, K , y el índice de plasticidad, I_p	33

Figura 3-22: Comportamiento de la resistencia al corte en suelos no saturados relacionados con la SWRC.	34
Figura 3-23: Efecto del tipo de preparación de la muestra en la SWRC.	35
Figura 3-24: Representación gráfica del efecto de la histéresis.	36
Figura 3-25: Efecto de la histéresis en arenas.	36
Figura 3-26: Efecto de la histéresis en limos.	37
Figura 3-27: Cambio en la succión según el porcentaje lateral desplazado.	37
Figura 3-28: Efecto en el punto de entrada de aire (AEV) al variar el índice de vacíos inicial.	39
Figura 3-29: Efecto en el valor residual de la SWRC al variar en punto de entrada de aire (AEV).	39
Figura 3-30: Efecto en el valor de la entrada de agua de la curva de humectación al variar el índice de vacíos.	39
Figura 4-1: Categorización de las mediciones de la curva de retención de agua.	40
Figura 4-2: Tensiómetros modelo Irrometer.	41
Figura 4-3: Sensores de succión de suelos a) Sensor Watermark 200SS, y b) Sensor siccómetro de suelo.	42
Figura 4-4: Rango de validez de algunos métodos de medición de la curva de retención de agua, asociados a una curva de retención de agua tipo.	42
Figura 4-5: Técnica de traslación de ejes, cámara de presión con plato poroso para múltiples muestras.	43
Figura 4-6: Disposición de papeles filtro para succión total y succión matricial.	44
Figura 4-7: Curva de calibración de papel filtro para Whatman n° 42 y Schleicher n° 589.	44
Figura 5-1: Muro perimetral tranque de relaves, levantado con fracción gruesa obtenida mediante proceso de cliclonaje.	46
Figura 5-2: Esquema de construcción mediante el procedimiento aguas arriba, aguas abajo y eje central.	46
Figura 5-3: Embalse de relaves de Syncrude, Canadá.	47
Figura 5-4: Esquema de depositación relaves espesados.	48
Figura 5-5: Depósito de relaves filtrados.	48
Figura 5-6: Relaves en pasta.	49
Figura 5-7: Cantidad de relaves según tecnología de depositación.	50
Figura 5-8: Distribución de depósitos activos según el recurso de extracción.	50
Figura 5-9: Conductividad hidráulica para suelos parcialmente saturados.	53
Figura 5-10: Vistas en elevación esquemáticas de depósitos de relaves en función de la posición y tamaño de la laguna de decantación.	54
Figura 5-11: Resistencia al corte de relaves con diferente contenido de humedad.	55
Figura 5-12: Estratificación diagonal y paleocanales en un perfil artificial de un depósito de relaves convencional segregable.	56
Figura 5-13: Tensión de fluencia según el contenido de sólidos del relave.	56
Figura 5-14: Drenaje ácido en relaves.	57
Figura 5-15: Esquema de drenaje ácido de relaves.	58

Figura 5-16: Perfil en elevación del contenido de humedades.....	59
Figura 5-17: Curva de retención de agua para drenaje ácido.....	60
Figura 6-1: Cámara de presión con plato cerámico poroso.....	62
Figura 6-2: Contenedores de muestras para método de cámara de presión con plato cerámico poroso.....	62
Figura 6-3: Regulador de presión de aire comprimido HARRIS.....	63
Figura 6-4: Estabilidad de presión entregada por regulador de presión HARRIS para distintas presiones.....	64
Figura 6-5: Sistema electrónico de medición de presión y válvula de liberadora de presión.....	64
Figura 6-6: Esquema implementación método de traslación de ejes en cámara de presión para múltiples muestras.....	65
Figura 6-7: Papel filtro sin cenizas equivalente a Whatman 42 y contenedores para método indirecto de papel filtro.....	67
Figura 6-8: Cámara de equilibrio térmico utilizada para el método de papel filtro.....	67
Figura 6-9: Regularidad de la temperatura dentro de la cámara de equilibrio térmico.....	68
Figura 6-10: Proceso de colocación de papel filtro.....	68
Figura 7-1: Relaves utilizados en el presente estudio geotécnico.....	70
Figura 7-2: Granulometría relaves con clasificación USCS SM.....	71
Figura 7-3: Granulometría relaves con clasificación USCS ML-CL.....	72
Figura 7-4: Granulometría relaves con clasificación USCS CL.....	73
Figura 7-5: Muestras de relaves en cámara de presión con plato poroso.....	77
Figura 7-6: Dispersión de valores experimentales asociados a relaves clasificados como SM.....	78
Figura 7-7: Curvas de retención de agua de los relaves tipo SM, ajustadas mediante el modelo de Fredlund & Xing (1994).....	78
Figura 7-8: Dispersión de valores experimentales asociados a relaves clasificados como ML-CL.....	79
Figura 7-9: Curvas de retención de agua de los relaves tipo ML-CL, ajustadas mediante el modelo de Fredlund & Xing (1994).....	79
Figura 7-10: Dispersión de valores experimentales asociados a relaves clasificados como CL.....	80
Figura 7-11: Curvas de retención de agua de los relaves tipo CL, ajustadas mediante el modelo de Fredlund & Xing (1994).....	80
Figura 7-12: Comparación de SWRC para relave 10 obtenidas en mediciones independientes.....	81
Figura 7-13: Regresión de las mediciones para los relaves 8, 9 y 12, para calibración del método papel filtro.....	81
Figura 7-14: Comparación de SWRC obtenidas mediante el método del papel filtro y cámara de presión.....	82
Figura 7-15: Comparación modelos de ajuste van Genuchten (1980), Fredlund & Xing (1994) y Pham & Fredlund (2011) para relave 7.....	83
Figura 7-16: Comparación modelos de ajuste van Genuchten (1980), Fredlund & Xing (1994) y Pham & Fredlund (2011) para relave 10.....	83
Figura 7-17: Comparación modelos de ajuste van Genuchten (1980), Fredlund & Xing (1994) y Pham & Fredlund (2011) para relave 12.....	84

Figura 7-18: Ubicación de los AEV en tres relaves de tipo SM, ML-CL y CL de la industria nacional.	84
Figura 7-19: Variación del valor del AEV de los distintos autores en relaves de la industria nacional.....	85
Figura 7-20: Conductividad hidráulica no saturada para relave 1.....	86
Figura 7-21: Conductividad hidráulica no saturada para relave 10.....	86
Figura 7-22: Conductividad hidráulica no saturada para relave 12.....	87
Figura 7-23: Dispersión de valores experimentales asociados al relave 10 bajo una preparación a distintos contenidos de sólidos.....	87
Figura 7-24: Curvas de retención de agua para el relave 10, con muestras preparadas a distintos contenidos de sólidos, ajustadas mediante el modelo de van Genuchten (1980).	88
Figura 7-25: Estimación de la SWRC para el relave 7 mediante los modelos de Vereecken et al. (1989), Aubertin et al. (2003), Pham et al. (2011).....	90
Figura 7-26: Estimación de la SWRC para el relave 10 mediante los modelos de Vereecken et al. (1989), Aubertin et al. (2003), Pham et al. (2011).....	90
Figura 7-27: Estimación de la SWRC para el relave 13 mediante los modelos de Vereecken et al. (1989), Aubertin et al. (2003), Pham et al. (2011).....	90
Figura 7-28: Granulometrías sintéticas relave 6 para calibración de modelos de estimación propuestos.....	91
Figura 7-29: SWRC provenientes del relave 6 con granulometrías sintéticas.	92
Figura 7-30: Calibración parámetro αVG modelo van Genuchten.....	92
Figura 7-31: Calibración parámetro mVG modelo van Genuchten.....	93
Figura 7-32: Calibración parámetro nVG modelo van Genuchten.....	93
Figura 7-33: Estimación SWRC para relave 7 mediante modelo 1 comparada con datos experimentales.	94
Figura 7-34: Estimación SWRC para relave 8 mediante modelo 1 comparada con datos experimentales.	94
Figura 7-35: Estimación SWRC para relave 12 mediante modelo 1 comparada con datos experimentales.	94
Figura 7-36: Relación experimental entre el contenido de finos (CF), gravedad específica (G_s) y humedad de saturación (w_s).....	95
Figura 7-37: Comparación entre los valores experimentales y los valores estimados propuestos mediante el modelo de regresión.	96
Figura 7-38: Estimación SWRC para relave 7 mediante modelo 2 comparada con datos experimentales.	96
Figura 7-39: Estimación SWRC para relave 8 mediante modelo 2 comparada con datos experimentales.	97
Figura 7-40: Estimación SWRC para relave 12 mediante modelo 2 comparada con datos experimentales.	97
Figura 7-41: Valores experimentales para 5 relaves de cobre.....	98
Figura 7-42: Estimación mediante modelo 1 propuesto, para relave 4 de Riquelme et al. (2016).....	98
Figura 7-43: Estimación mediante modelo 2 propuesto, para relave 4 de Riquelme et al. (2016).....	98
Figura 10-1: Partes Arduino Uno.	110
Figura 10-2: Sensor de presión Arduino.	111
Figura 10-3: Pantalla de cristal líquido (LCD) modelo 1602.....	111
Figura 10-4: Potenciómetro Arduino para pantalla LCD.	112

Figura 10-5: Módulo microSD para Arduino.....	113
Figura 10-6: Proto board para Arduino.	113
Figura 10-7: Implementación Proto Board de 400 hoyos para Arduino.	114
Figura 10-8: Modelo de implementación pantalla cristal líquido (LCD) a placa Arduino mediante Proto Board y potenciómetro.....	115
Figura 10-9: Curva de calibración sensor de presión Arduino mediante el uso de manómetro de glicerina en serie.	118
Figura 10-10: Ensayo límite líquido con cuchara de Casagrande.	119
Figura 10-11: Ensayo límite plástico.....	119
Figura 10-12: Ensayo Proctor estándar.	120
Figura 10-13: Ensayo granulometría por sedimentación, método del hidrómetro.	120
Figura 10-14: Ensayo densidad de partículas sólidas para la obtención de la gravedad específica.	121
Figura 10-15: Ensayo para la obtención del límite de saturación.....	121
Figura 10-16: Conductividad hidráulica no saturada para relave 2.....	121
Figura 10-17: Conductividad hidráulica no saturada para relave 6.....	122
Figura 10-18: Conductividad hidráulica no saturada para relave 8.....	122
Figura 10-19: Conductividad hidráulica no saturada para relave 12.....	122
Figura 10-20: Conductividad hidráulica relativa no saturada para relave 3.....	123
Figura 10-21: Conductividad hidráulica relativa no saturada para relave 4.....	123
Figura 10-22: Conductividad hidráulica relativa no saturada para relave 5.....	123
Figura 10-23: Conductividad hidráulica relativa no saturada para relave 7.....	124
Figura 10-24: Conductividad hidráulica relativa no saturada para relave 9.....	124
Figura 10-25: Conductividad hidráulica relativa no saturada para relave 11.....	124

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Parámetros de calibración de los parámetros del modelo de D.W. Fredlund et al. (2002).....	21
Tabla 5-1: Variación de la pendiente límite con la concentración de sólidos en una pulpa de relaves.....	52
Tabla 6-1: Dimensiones contenedores muestras para método de cámara de presión con plato poroso.	63
Tabla 6-2: Dimensiones contenedor muestras método papel filtro (Gardner, 1937). Fuente: Elaboración propia.	66
Tabla 7-1: Información básica de los relaves en estudio.....	69
Tabla 7-2: Límites de Atterberg arena relave 2.....	71
Tabla 7-3: Límites de Atterberg para relaves clasificados como ML-CL.....	72
Tabla 7-4: Límites de Atterberg relaves clasificados como CL.....	73
Tabla 7-5: Densidad mínima y Proctor estándar relaves con clarificación USCS SM.....	73
Tabla 7-6: Densidad mínima y Proctor estándar relaves con clasificación USCS ML.....	74
Tabla 7-7: Densidad mínima y Proctor estándar relaves con clasificación USCS CL.....	74
Tabla 7-8: Conductividad hidráulica de relaves multimetálicos para distintas clasificaciones USCS.....	74
Tabla 7-9: Límite de saturación, índice de vacíos y porosidad al límite de saturación.....	75
Tabla 7-10: Tabla resumen de caracterización de relaves.....	76
Tabla 7-11: Valores del AEV mediante los enfoques teóricos de van Genuchten (1991), Fredlund & Xing (1993) y Ψ_{90}	85
Tabla 7-12: Contenido gravimétrico de agua al límite de saturación según el contenido de sólidos de preparación de la muestra.....	88
Tabla 7-13: Variación del parámetro α_{VG} del modelo de van Genuchten.....	88
Tabla 7-14: Variación del parámetro m_{VG} del modelo de van Genuchten.....	89
Tabla 7-15: Variación del parámetro α_{VG} del modelo de van Genuchten.....	89
Tabla 7-16: Parámetros de regresión para la estimación de la humedad de saturación.....	95
Tabla 8-1: Resumen para los rangos de valores obtenidos en la caracterización de relaves.....	101
Tabla 10-1: Distribución de depósitos de relaves por región, según estado.....	106
Tabla 10-2: Depósitos de relaves según su recurso de extracción y volumen.....	106
Tabla 10-3: Depósitos de relave de la gran minería, por región, y cantidad de producción de relave por día aproximada.....	107
Tabla 10-4: Planilla de ingreso mediciones cámara de retención de agua.....	108
Tabla 10-5: Ficha para la obtención de la curva de retención de agua con el método del papel filtro.....	109
Tabla 10-6: Pins de conexión de pantalla cristal líquido (LCD).....	112

Tabla 10-7: Conexión de pantalla LCD modelo 1602 a Placa Arduino Uno mediante Proto Board y potenciómetro.....114

Tabla 10-8: Conexión de módulo microSD a placa de Arduino.115

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1.Suelos no Saturados

El inicio de la ingeniería civil se establece en el siglo XVIII, donde se acuña este término, “ingeniería civil”, a modo de separar ésta de la ingeniería militar, que involucraba la construcción de defensas, balística, artillería, etc. Luego, en la segunda mitad del siglo XVIII, se crea la escuela de ingeniería civil más antigua del mundo en París, Francia. Sin embargo, los inicios de la ingeniería geotécnica se presentan recién en el siglo XVII, con las primeras contribuciones literarias de Coulomb. No obstante, no es hasta inicios del siglo XX donde Karl Terzaghi, científico de la ciudad de Praga, presenta en Viena el tratado de “Erdbaumechanik”, en donde se establece la ingeniería geotécnica como una rama autónoma de la ingeniería. Por lo anterior, es que Karl Terzaghi es considerado el padre de la ingeniería geotécnica. Estos hechos, dan inicio a numerosos estudios, con autores que han logrado mover la ingeniería geotécnica desde una base empírica, a una base científica reconocida.

El estudio de los distintos tipos de suelos, ya sea en estado saturado o no saturado, es de vital importancia en el diseño de estructuras como aeródromos, caminos, embalses, estructuras de relleno hidráulico, entre otras obras de infraestructura con las que la sociedad convive día a día. La práctica de la geotecnia tiende a simplificar el análisis de respuesta de suelos asumiendo condiciones extremas: i) respuesta saturada, ii) respuesta seca. Pese a lo anterior, suelos naturales, y en particular suelos finos, se presentan en una condición intermedia, denominada condición parcialmente saturada. Las arcillas, los suelos colapsables y los suelos sedimentarios son ejemplos de suelos que presentan un comportamiento complejo en condición no saturada, los cuales se encuentran habitualmente en la ingeniería civil. Este tipo de suelos, denominados usualmente “suelos problemáticos”, poseen la característica común de presentar presiones de poro negativas (succión) en los espacios vacíos.

A diferencia de los suelos saturados y suelos secos, que presentan únicamente dos fases, los suelos no saturados, o más bien parcialmente saturados, presentan una composición que involucra tres fases (Figura 1-1); la fase sólida, líquida y gaseosa, es decir, que los vacíos se encuentran comúnmente cubiertos por agua y aire. Según D.G. Fredlund (1999) un suelo no saturado se define como “aquel en la que las presiones intersticiales son negativas; tal condición es considerada como un continuo desde el estado seco teórico, inexistente en la naturaleza, hasta el estado saturado”. La existencia de tres fases en los suelos no saturados, a diferencia de las dos presentes en los suelos saturados, implica que el estudio de estos suelos se efectúe con nuevas teorías que conlleven nuevos estudios a los ya efectuados en la ingeniería geotécnica tradicional. Estos estudios se han visto mermados debido a la complejidad que estos presentan versus los suelos secos y saturados, ya que por su condición de estado límite del suelo, facilita su compresión y comparación de fenómenos particulares e.g. respuesta sísmica. Por lo anterior, la diferencia en el desarrollo del estudio e investigación de los suelos secos y saturados es mucho más avanzada que el nivel de desarrollo de los suelos no saturados.

Con el desarrollo de la tecnología, la limitación de cálculo que antiguamente se ejerció sobre los suelos no saturados ha decaído, comenzando a realizarse una serie de estudios que abarca el perfil no saturados de los suelos. El estudio de las propiedades de este tipo de suelos se lleva comúnmente mediante la curva característica suelo-agua, que según K.R. Mahmood y A.H. Abdul Kareem (2010), se define como una representación gráfica

de la relación matemática entre la succión matricial dentro de un suelo, con el contenido de humedad o grado de saturación del material. Esta curva ayuda a una mejor comprensión del suelo con sus propiedades básicas como los son la permeabilidad, los esfuerzos de corte y la variación de volumen ante la presencia de agua en un suelo.

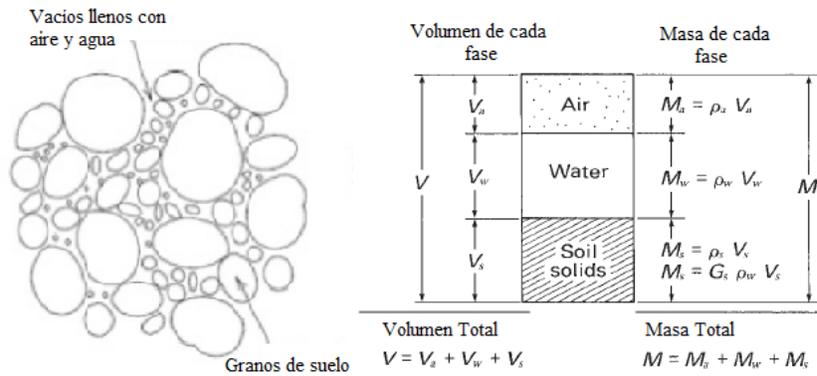


Figura 1-1: Fases de un suelo no saturado.
Fuente: Modificado de Fredlund & Rahardjo, 1993.

Las aplicaciones del uso de suelos no saturados son múltiples, como lo es el caso de la estabilidad de taludes, infiltración en vertederos, cambios de volumen en fundaciones, estabilidad de excavaciones temporales y permanentes, como así también en la respuesta de estructuras de retención hidráulicas (embalses, presas, etc.). Los estudios de los suelos no saturados comprenden varios tópicos, e.g. respuesta al corte, infiltraciones, consolidación, etc. J.K.-M. Gan, D.G. Fredlund y H. Rahardjo en 1988 estudiaron la respuesta no saturada al corte en arcillas, en donde se realizó una revisión bibliográfica de estudios de la época que abarquen temas afines a los resultados de mediciones de corte directo en arcillas compactadas de suelos no saturados, proponiendo procedimientos para el manejo de este tipo de suelos, concluyendo que la relación del corte en función de la succión matricial posee características no lineales, es decir, que la magnitud de corte varía en función de la succión matricial con pendiente (ϕ) variable (Figura 1-2), las cuales, se pueden estimar bajo una envolvente de forma bi-lineal en la gráfica de corte en función de del esfuerzo normal (Figura 1-3). La diferencia en la resistencia al corte, en comparación a suelos saturados, es significativa en la práctica de la ingeniería geotécnica.

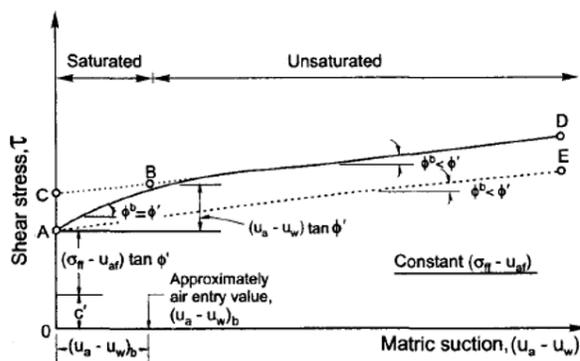


Figura 1-2: Comportamiento del corte ante la variación de la succión en suelos no saturados.
Fuente: Gan et al., 1988.

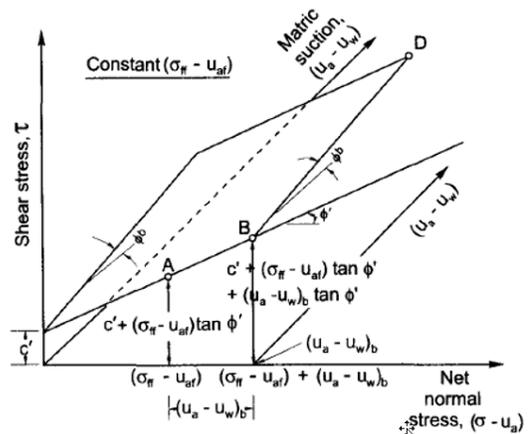


Figura 1-3: Relación bi-lineal del corte v/s del esfuerzo normal en suelos no saturados.
Fuente: Fredlund, 1989.

Por otro lado, E.C. Leong y H. Rahardjo en 1997 estudió modelos empíricos, macroscópicos y estadísticos para la determinación de la permeabilidad en suelos no saturados, determinando que esta última está fuertemente influenciada por la succión matricial del suelo o por la cantidad de agua del mismo. En general, se ha encontrado que la permeabilidad y el corte, así como otras propiedades de suelos no saturados, dependen directamente de la relación entre el agua y la succión matricial que se genera en el espacio entre partículas sólidas. Como se mencionó anteriormente, la relación entre estas dos variables (succión-grado de saturación) se suele representar mediante la curva de retención de agua (SWRC, por su sigla en inglés, soil wáter retention curve). Esta curva, es considerada por muchos, como la base de la ingeniería de los suelos no saturados, y una componente significativa en el desarrollo de la ingeniería de geotecnia.

La determinación de la curva de retención de agua se suele realizar mediante la utilización de varios métodos experimentales. El gran número de metodologías se debe a que no hay un solo método que logre determinar la curva para un amplio rango de saturaciones. Por ejemplo, el método de columna suspendida y el método centrifugo, son aplicables para bajas succiones, es decir hasta 80 [kPa]. La cámara de presión con medición gravimétrica y la misma con medición volumétrica son utilizables para succiones intermedias, es decir, para presiones entre 0 y 1500 [kPa]. Finalmente, para altas succiones se utiliza el método del higrómetro de espejo refrigerado, siendo este método un método altamente sofisticado y normalmente utilizado para presiones entre 500 [kPa] y 100000 [kPa]. Sin embargo, en la actualidad existen variados métodos para la determinación de la curva de retención de agua, ya sea de manera directa como así también indirectamente, como lo es el caso de la técnica de traslación de ejes propuesta por Hilf (1956) con ciertas adaptaciones realizadas en la actualidad y normalizadas en la ASTM D 2325 o el método del papel filtro descrito formalmente por Gardner (1937), actualizada y normalizada en la ASTM D 5298.

No obstante, en la actualidad existen modelos de estimación y de ajuste para la curva de retención de agua, aplicable para la gran mayoría de los métodos experimentales existentes, los primeros modelos de estimación corresponden a H. Vereecken, J. Maes, J. Feyen, P Darius (1989), quienes utilizan un modelo de regresión que determina la curva a través del porcentaje de arena y de arcilla, la densidad y el contenido de carbón del material. Un segundo modelo predictivo, ampliamente utilizado, es el de M. Aubertin, J.F. Ricard, R. Chapuis (1998), que utiliza el método de Kovacs modificado. Finalmente, el modelo de M.D. Fredlund y G.W. Wilson (2002), el cual utiliza las propiedades granulométricas y relaciones volumen-masa para la obtención de la curva de retención de agua. Para la realización del ajuste de métodos experimentales, los modelos más utilizados son principalmente el de van Genuchten (1980) y el de M.D. Fredlund y XIng (1994), sin embargo, en la literatura se encuentra una gran cantidad de modelos como lo es el caso del modelo de W.R. Gardner (1958) y el J.C. Zamora y F. Cristancho (2008). Estos modelos suelen adoptar una forma general común, similar a la propuesta por van Genuchten.

$$\text{van Genuchten (1980)} \quad w(\psi) = w_r + (w_s - w_r) \left[\frac{1}{[1 + (a_{vg} * \psi)^{n_{vg}}]^{m_{vg}}} \right]$$

Donde:

$w(\psi)$	Humedad en función de la succión,
ψ	Succión, capilaridad o presión de poros negativa,
w_s	Humedad para el estado de saturación,
w_r	Humedad residual, y
a_{vg}, n_{vg}, m_{vg}	Parámetros de ajuste del modelo.

Sin embargo, pese a que existen modelos de estimación y ajuste, la mejor forma de determinar la curva de retención de agua es mediante el uso de métodos experimentales, siendo el más utilizado en la actualidad el método de traslación de ejes propuesta por Hilf (1956). Este método obtiene la succión matricial como la

sobrepresión de aire respecto la presión de agua, por lo que esta técnica considera que, al aplicar aumentos sucesivos de presión sobre la fase gaseosa, se presentan incrementos idénticos en la fase acuosa, lo que permite medir las presiones negativas del agua (M.D. Fredlund y Rahardjo, 1993). No obstante, este método suele ser muy caro y lento, por lo que naturalmente con el desarrollo de la tecnología, se han publicado innumerables métodos que logran medir esta característica esencial de los suelos no saturados, como lo es el caso del método del papel filtro. Este método, consiste en medir la succión matricial o total de forma indirecta, mediante la utilización de una relación matemática previamente calibrada y sugerida por varios autores, e.g. R.J. Chandler, C.I. Gutiérrez (1986) y E.C. Loeng, L. He, H. Rahardjo (2002). Este método a diferencia del anterior resulta ser mucho más atractivo ya que es mucho más económico y rápido, sin embargo, la fiabilidad de los resultados no es del todo óptima.

1.2. Estado de la Práctica

A nivel nacional, el estudio del comportamiento de suelos no saturados en geotecnia no ha alcanzado gran desarrollo, ya sea en suelos naturales, como en suelos de origen antrópico. En este último grupo, el comportamiento no saturado podría ser crucial para depósitos de gran envergadura como tranques, estructuras de retención, sellos de vertederos y particularmente depósitos de residuos mineros dado que son las estructuras geotécnicas de mayor envergadura en Chile. Estas son las estructuras de interés de la presente memoria de titulación.

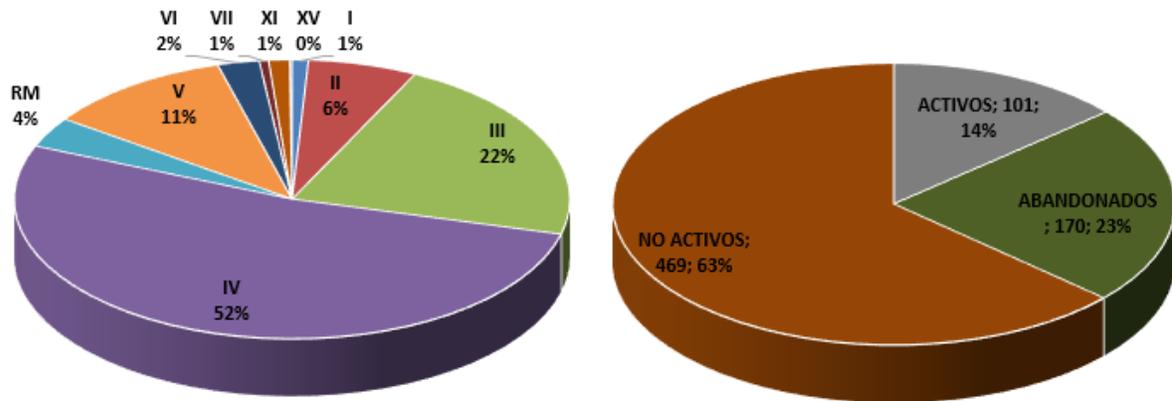


Figura 1-4: Distribución de depósitos de relaves según región y estado.

Fuente: Modificado de Análisis del Catastro de Depósitos de Relaves en Chile y guía de estructura de datos, 2018.

El Ministerio de Minería define a los depósitos de relaves como “residuo, mezcla de mineral molido con agua y otros compuestos, que queda como resultado de haber extraído los minerales sulfurados en el proceso de flotación. Este residuo, también conocido como cola, es transportado mediante canaletas o cañerías hasta lugares especialmente habilitados o tranques, donde el agua es recuperada o evaporada para quedar dispuesto finalmente como un depósito estratificado de materiales finos (arenas y limos)”, estos últimos se encuentran presentes en gran parte de nuestro país. El catastro del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) de 2018, registró un total de 740 depósitos, de los cuales 101 se encuentran activos, 469 inactivos y 170 abandonados (Figura 1-4). De manera interesante, 99,3% de la masa de relaves producida anualmente en Chile se depositan en 22 depósitos de la gran minería. Esto se traduce en depósitos que pueden alcanzar alturas por sobre los 350 m y longitudes de varios kilómetros.

Como se mencionó anteriormente, la gran cantidad de depósitos de relaves presentes en Chile, mayormente concentrados en la zona norte de nuestro país (Figura 1-4), conlleva a que convivamos regularmente con estas obras de ingeniería, como lo es el caso de la provincia de Copiapó donde existen un total 120 depósitos de relaves (Figura 1-5), por lo que su buen entendimiento y estudio acabado de estas estructuras es de vital importancia, en la ingeniería civil geotécnica.

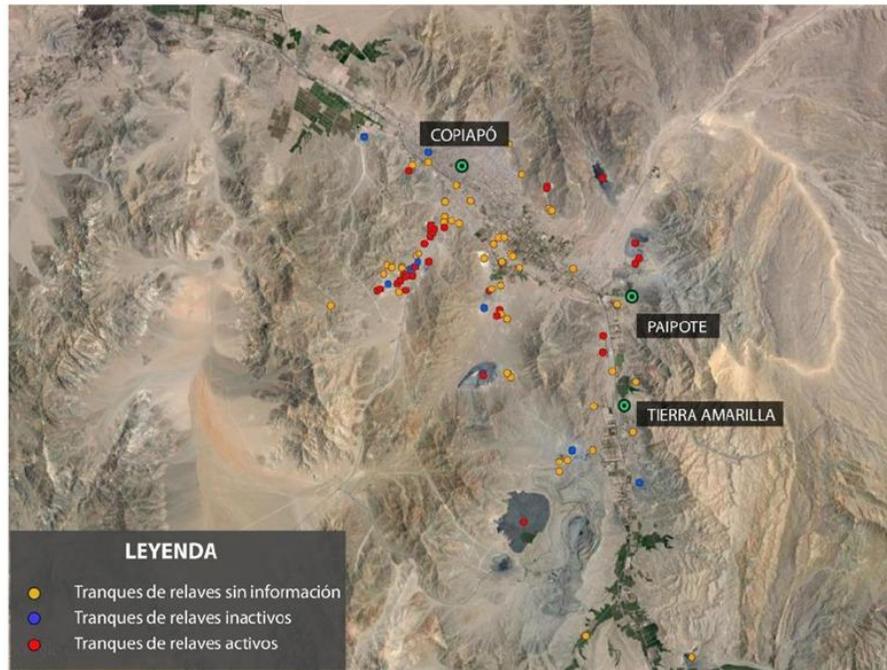


Figura 1-5: Mapa distribución de depósitos de relave en la comuna de Copiapó, III región.
Fuente: SERNAGEOMIN, 2016.

Las estructuras para el almacenamiento de relaves al estar en constante exposición a la atmósfera experimentan fenómenos de evaporación de la fase líquida que los componen, lo que les permite transitar desde una fase saturada a una parcialmente saturada. Es por ello que un estudio acabado de las propiedades de los relaves a medida que este pierde contenido de agua es de vital importancia, lo que es posible a través de la curva de retención de agua.

Estudios para determinar la SWRC en relaves nacionales son escasos, no obstante, José Riquelme y Cristián Godoy (2016), estudiaron la curva de retención de agua de relaves y rípios de lixiviación, realizando una comparación entre curvas experimentales ajustadas con los modelos paramétricos de van Genuchten (1980) y el de Fredlund y Xing (1994), y con los modelos estimativos de Vereecken (1989), Aubertin (2003) y Fredlund y Wilson (2002). En el estudio realizado, se concluyó que ninguno de los modelos de estimación representa de forma satisfactoria el comportamiento para todos los casos estudiados, sin embargo, la estimación de Fredlund y Wilson se mostró superior a sus similares (Figura 1-6). Además, se recomienda la obtención experimental realizando un ajuste con 3 puntos característicos propuestos. Este estudio ha sido el único esfuerzo efectuado en esta dirección a nivel nacional. No obstante, Riquelme et al. obtuvo la SWRC a partir del método de traslación de ejes y además estimándola a través de algunos modelos predictivos presentes en la literatura, sólo utilizó cinco muestras de relaves de cobre, por lo que dicho estudio es insuficiente para generalizar comportamientos que permitan la aplicación de correlaciones en la práctica. Lo anterior, debido a que los relaves presentan una gran variabilidad dependiendo de su origen mineralógico, procesos de molienda y chancado, entre otros.

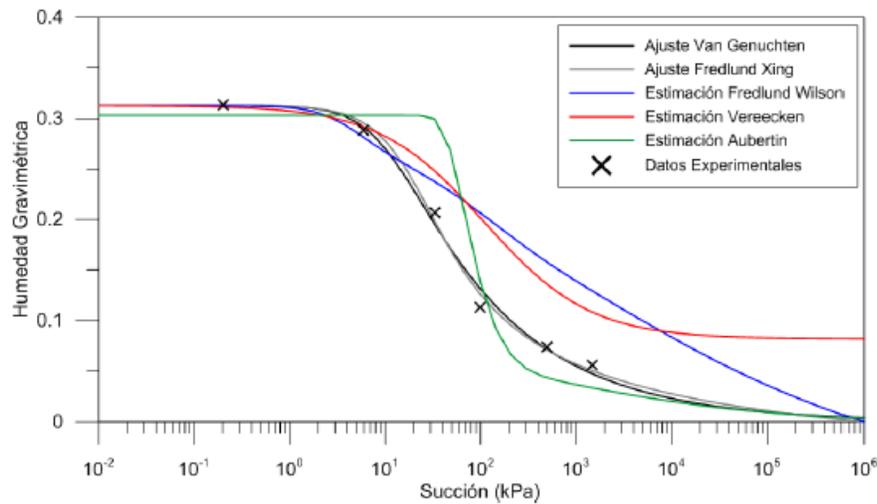


Figura 1-6: Comparación de ajustes y estimaciones con datos experimentales.

Fuente: José Riquelme y Cristian Godoy, 2016.

Considerando lo anterior, el presente trabajo busca avanzar en una mejor caracterización del comportamiento no saturado de relaves, a partir de la SWRC. Para ello, en este estudio se considera: i) desarrollar implementos para la obtención de la curva de retención de agua en UTFSM aplicable a depósitos de relaves provenientes de la industria minera multimetálica nacional, ii) contribuir a la comprensión del comportamiento de la curva de retención de agua en suelos de origen antrópico y iii) el estudio de la aplicabilidad de relaciones matemáticas propuestas en el pasado y su modificación o ajuste a los materiales estudiados.

CAPITULO II

OBJETIVOS

2.1.Objetivos Generales

- Desarrollar herramientas para la obtención de la curva de retención de agua aplicable a depósitos de relaves provenientes de la industria minera en dependencias de la Universidad Técnica Federico Santa María.
- Caracterizar la SWRC en relaves multimetálicos de la industria minera nacional a partir de uno o más procedimientos experimentales.

2.2.Objetivos Específicos

- Describir los suelos no saturados con énfasis en la curva de retención de agua y los modelos matemáticos de ajuste.
- Establecer una metodología para la obtención de la curva de retención de agua mediante el método de traslación de ejes.
- Establecer una metodología para la obtención de la curva de retención de agua mediante el método del papel filtro.
- Presentar las principales características de los relaves mineros, con énfasis en el comportamiento no saturado.
- Analizar y caracterizar las propiedades de los suelos provenientes de los relaves de la industria nacional, para la posterior obtención de la curva de retención de agua.
- Analizar la curva de retención de agua de los relaves de la industria nacional.

2.3. Alcances

- Debido a la disponibilidad de muestras de relave y la confidencialidad de esta, sólo se dispondrá información acerca del tipo de depósito (característica estructural) y el mineral de extracción correspondiente. En este estudio se tendrá en cuenta muestras provenientes de tranques de relaves y relaves en pasta provenientes de la extracción de hierro, así como relaves provenientes de tranques de relaves, embalses de relaves, relaves en pasta y relaves filtrados resultantes de la extracción del cobre-oro-molibdeno.
- Los resultados de la investigación se limitan a los depósitos de relaves presentados en el punto anterior, por ende, estos valores sólo serán válidos en esta área de estudio, por lo que su extrapolación sólo será posible mediante un buen criterio hacia depósitos de características similares.
- Las curvas de retención de agua que se presentan en este estudio, corresponden a curvas de secado o de desaturación, para muestras de relaves en estado “slurry” y normalmente consolidadas.
- Para la obtención de la curva de retención de agua se utilizará una cámara de presión fabricada en una maestranza nacional, con platos cerámicos porosos normalizados y distribuidos por la empresa norteamericana *Soilmoisture*. Además, se obtendrá la SWRC por medio de un método alternativo, como lo es el método del papel filtro, mediante un papel filtro equivalente a un papel tipo Whatmann n° 42.

CAPITULO III

SUELOS NO SATURADOS, SWRC Y MODELOS DE AJUSTE

3.1.Introducción a los suelos no saturados

En el presente capítulo se dará el pie para dar inicio al estudio de los suelos no saturado, comenzando por definir los fundamentos básicos para generar un entendimiento acabado del presente estudio. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede decir que una de las principales definiciones es la composición de los suelos no saturados, es la que se desprende de la composición del suelo, la cual es una mezcla en la que se pueden distinguir tres fases, como lo son: i) el agua, ii) el aire, y por último iii) el suelo.

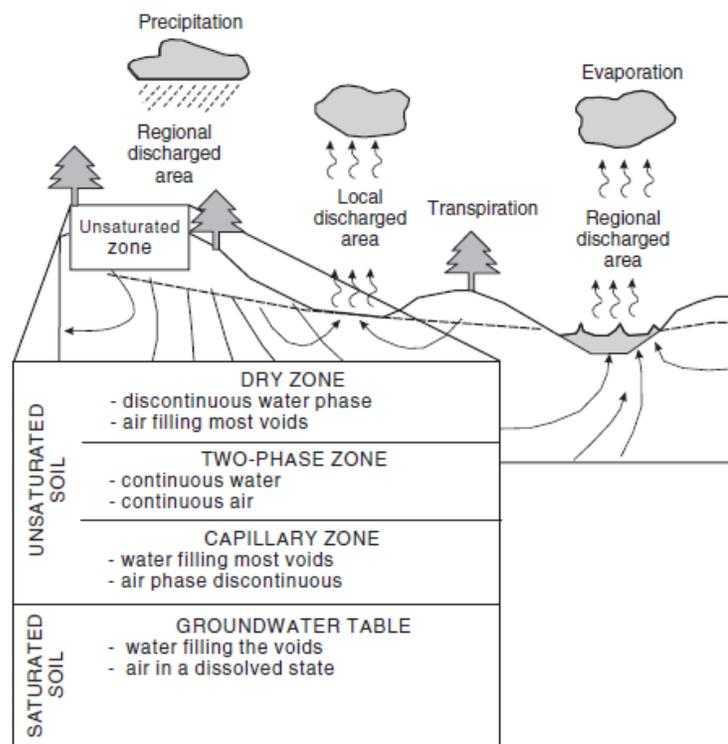


Figura 3-1: Clasificación de las zonas de un perfil de suelo no saturado.

Fuente: Fredlund & Rahardjo, 1993.

Adicionalmente, Fredlund y Morgenstern en su estudio “Stress State Variables for Unsaturated Soils” (1977), mencionan una cuarta fase que componen los suelos no saturados, esta es la interfaz agua-aire, denominada como “contractile skin”. Luego, cuando la fase de aire es continua, ésta interactúa con las partículas de suelo, influenciando su comportamiento mecánico. De esta manera, la interfaz posee un espesor

del orden de un reducido número de moléculas, por lo que, no es relevante en la masa o volumen del suelo. Debido a lo anterior, en muchos casos es considerada como parte de la fase acuosa una vez que ya se establecen relaciones de masa-volumen.

Teniendo en cuenta las fases que componen los suelos no saturados, es posible comprender que la principal diferencia entre los suelos saturados y los no saturados, es la presencia de presiones de poro negativas en los en estos últimos, arrojando la primera división entre estos suelos (Figura 3-2).

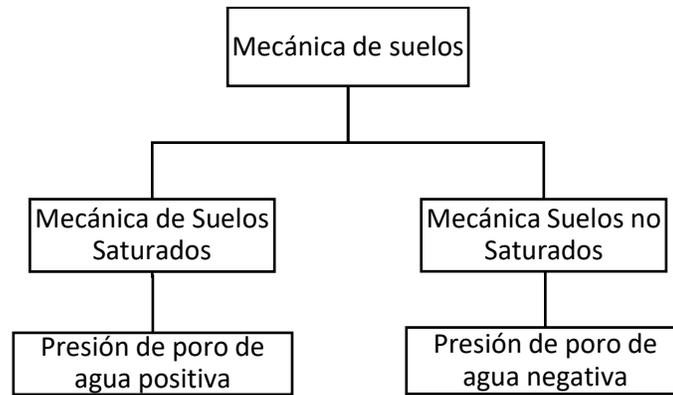


Figura 3-2: Categorización general de la mecánica de suelos basada en el estado de esfuerzos en los poros de agua.
Fuente: Modificado de Fredlund & Rahardjo, 1993.

Teniendo en cuenta el concepto del “contractile skin” o interfaz agua-aire es posible definir el concepto ampliamente estudiado de tensión superficial, donde las fuerzas intermoleculares que actúan al interior de la contractile skin causan un efecto de tensión superficial. Es así donde las moléculas que se encuentran inmersas dentro del agua experimentan fuerzas de igual magnitud en todas sus direcciones, mientras que las moléculas que se encuentran en la superficie están sometidas a un desbalance de fuerzas hacia el interior (Figura 3-3).

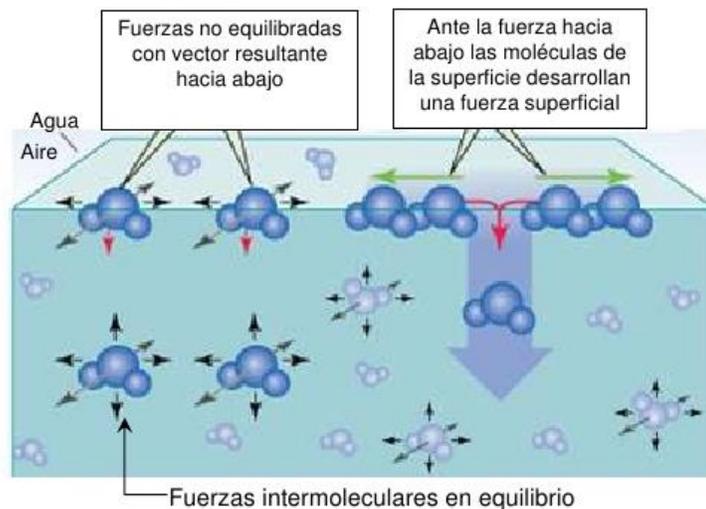


Figura 3-3: Fuerzas intermoleculares en la interfaz.
Fuente: Carvajal, 2011.

Otro, concepto básico para comprender los suelos no saturados es el fenómeno de la capilaridad, fenómeno asociado a la componente matricial, donde la altura de agua y el radio de curvatura tienen un efecto directo en la relación del contenido de agua con la succión (presión negativa). Este fenómeno, es posible verlo

en la práctica colocando un pequeño tubo de vidrio sumergido parcialmente en agua bajo condiciones atmosféricas (Figura 3-4).

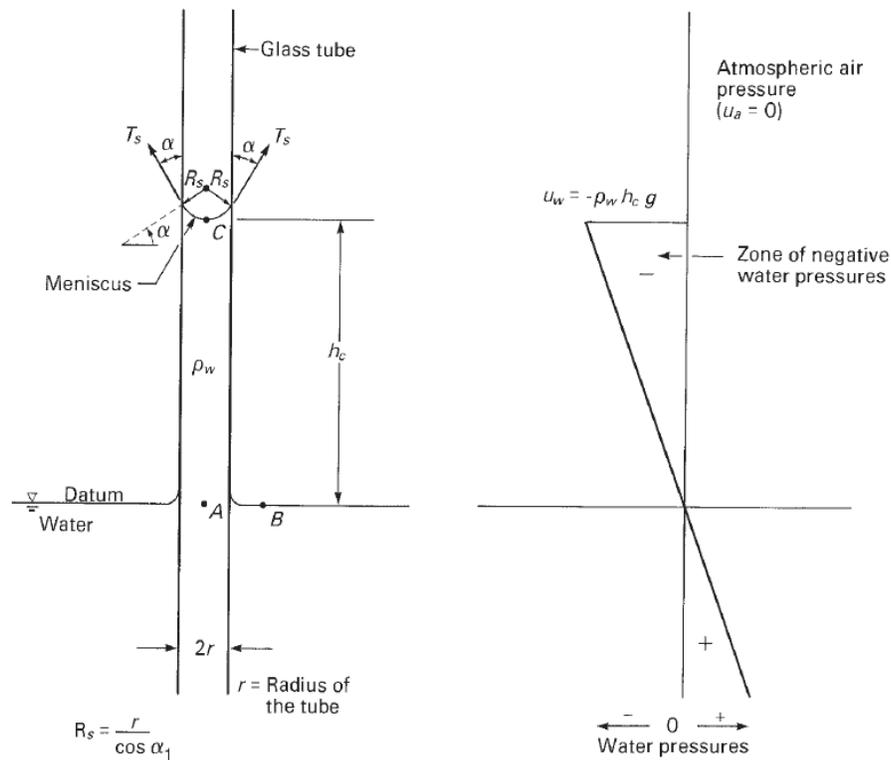


Figura 3-4: Modelo físico de capilaridad.

Fuente: Fredlund Rahardjo, 1993.

El ascenso del agua en el tubo es la consecuencia de la tensión superficial, T_s , en la contractile skin, actuando alrededor de la circunferencia del menisco en un ángulo “ α ” y de las propiedades higroscópicas del tubo (Holtz & Kovacs, 1981).

Aunque en los suelos las partículas están distribuidas aleatoriamente, se puede utilizar una analogía para explicar el fenómeno de capilaridad. En un principio, la presión y altura capilar siguen una tendencia similar en suelos y en tubos capilares, donde el radio del tubo es análogo al radio de los poros, donde su disminución se traduce en una mayor altura de ascenso (Fredlund and Rahardjo, 1993). Luego de haber efectuado una breve introducción a las nociones básicas de los suelos no saturados, se comenzará a definir los principales conceptos que ayudarán a la posterior comprensión acabada de la curva de retención de agua, que es el tema principal de este estudio.

3.2. Succión en suelos

3.2.1. Succión total en suelos

La succión total en los suelos, ψ_t , representa la energía asociada a la capacidad del suelo para retener agua (Lee y Wray, 1995), y se expresa como la suma entre la componente osmótica de la succión, ψ_o , y la componente matricial de la succión, ψ .

$$\psi_t = \psi + \psi_o = (u_a - u_w) + \psi_o$$

Donde:

$\psi = (u_a - u_w)$	Succión matricial [kPa],
u_g	Presión de poro de aire [kPa],
u_w	Presión de poro de agua [kPa], y
ψ_o	Presión osmótica [kPa].

3.2.2. Succión matricial

La componente matricial de la succión total, ψ , es asociada comúnmente al fenómeno de la capilaridad, que a su vez es producto de la tensión superficial, definidas anteriormente, donde análogamente en los suelos, los poros de pequeño diámetro actúan como los pequeños tubos mostrados en la Figura 3-4, causando que el agua ascienda por sobre el nivel freático. En estos pequeños espacios inter-partículas se forma una presión negativa con respecto a la presión atmosférica presente en la superficie. Sin embargo, a lo anterior no es aplicable el modelo de capilaridad, ya que este no permite justificar los altos valores de succión observados en terreno (Holtz & Kovacs, 1981).

La succión matricial se representa como la diferencia entre la presión de poro de agua y la presión del aire en los poros.

$$\psi = (u_a - u_w)$$

El valor de la succión matricial está directamente influenciado por el tamaño y distribución de las partículas, tamaño de los poros y del grado de saturación (Dineen, 1997). Esta dependencia entre el tamaño de las partículas de suelo y la succión matricial posee relación inversamente proporcional (Fredlund & Rahardjo, 1993), bajo la siguiente expresión.

$$\psi = u_a - u_w = \frac{2T_s}{R_s}$$

Donde:

T_s	Tensión superficial del agua, y
R_s	Radio de curvatura asociado a las partículas de suelo.

Esta asociación inversa lineal se aprecia con mayor claridad en la Figura 3-5, donde la succión matricial decrece linealmente con el aumento del tamaño del grano.

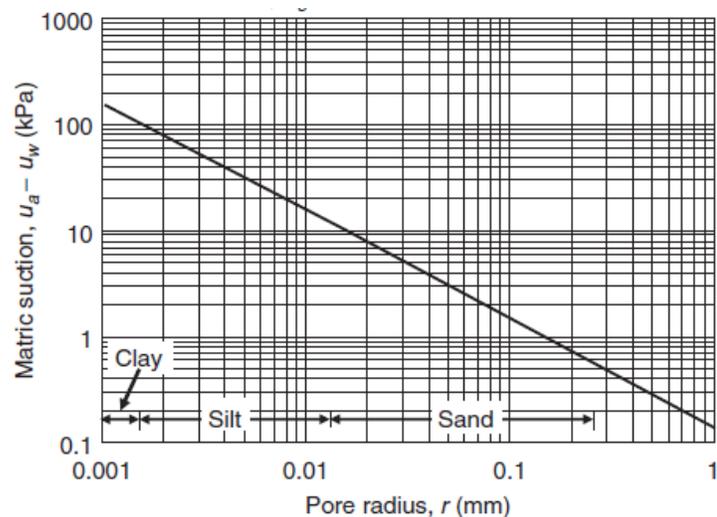


Figura 3-5: Relación de la succión matricial con respecto al tamaño de las partículas de suelo.
 Fuente: Fredlund & Rahardjo, 1993.

3.2.3. Succión osmótica

La componente osmótica de la succión total se asocia a la presencia de sales disueltas en la fase acuosa del suelo. Esta succión se explica al analizar agua en contacto con una solución a través de una membrana semipermeable. Esta membrana le permite fluir al agua a través de ella, y a la vez, limita el flujo de la solución. La diferencia de concentración entre los solubles crea el potencial para que el agua fluya desde la membrana semipermeable a la solución. Si se restringe el flujo surge una diferencia de presión denominada succión osmótica (Fredlund & Rahardjo, 1993).

Habitualmente en los problemas geotécnicos que son asociados a la succión, generalmente son causados por problemas ambientales, los cuales alteran la succión matricial del suelo y seguidamente su equilibrio, es por ello que en los estudios efectuados por Fredlund y Rahardjo (1993), presentan una serie estudios concluyendo que en la practica la succión osmótica es despreciable en comparación con la succión matricial, es por ello que la mayor parte de los estudios contemporáneos se enfocan en la componente matricial de la succión.

Definidos los puntos anteriores ya es posible definir más claramente el principal tema de este trabajo que es la curva característica de retención de agua.

3.3. Curva de retención de agua o Soil-water retention curve (SWRC)

Luego de la breve introducción antes presentada, en la cual se definieron algunos conceptos necesarios, se puede comenzar a tratar el tema principal de este estudio, que es la curva de retención de agua o SWRC por sus siglas en inglés. Esta curva proporciona una relación entre el contenido volumétrico o gravimétrico de agua y la succión (presión negativa), razón por la cual la SWRC es considerada como la llave para entender el comportamiento de los suelos no saturados. A pesar de la simpleza que representa dicha curva, ha tenido un rol trascendental en la implementación de la mecánica de suelos no saturados (Fredlund, 2000).

En sus inicios la curva de retención de agua sólo se utilizó como una medida para determinar la succión in situ, midiendo el contenido de agua presente en un suelo. Posteriormente, se logró comprender que su uso se podía extender más allá del uso que se le daba en ese entonces, permitiendo estimar, de manera indirecta, algunas propiedades fundamentales de los suelos no saturados (Fredlund, 2000), como es el caso de la conductividad hidráulica, las variaciones volumétricas y la resistencia al corte.

Debido a lo anterior se comenzaron a realizar una serie de métodos para lograr obtener dicha curva, pero se vio con los obstáculos en la implementación, ya que posee una alta demanda de ensayos de laboratorios, lo que conlleva altos costos. Es por ello que numerosos investigadores han sugerido diversas formas para la obtención de dicha curva, ya sea de forma empírica o ajustando a resultados experimentales. El trabajo de estos investigadores, se ha usado en numerosos estudios para determinar la curva de retención de agua que mejor refleje las propiedades no saturadas de los suelos.

3.3.1. Forma y caracterización

La curva de retención de agua se suele representar, en la ingeniería de geotecnia, en términos de la succión matricial, ya que la mayoría de los problemas de ingeniería son como resultado de cambios ambientales, mientras que la alteración en la succión osmótica son solo relevantes en el comportamiento del suelo en casos donde se presenta una modificación en el contenido de sales por efecto de la contaminación química o similares (Fredlund & Rahardjo, 1993).

La curva de retención de agua (Figura 3-6), posee zonas y puntos que han sido definidos por innumerables autores, no obstante, gran parte divide la curva en tres zonas delimitadas por 2 puntos pertenecientes a dicha curva, estas zonas son la zona de efecto de borde, la zona de transición y la zona residual. Estas zonas están delimitadas por dos puntos llamados valor de entrada de aire y valor de la succión residual respectivamente.

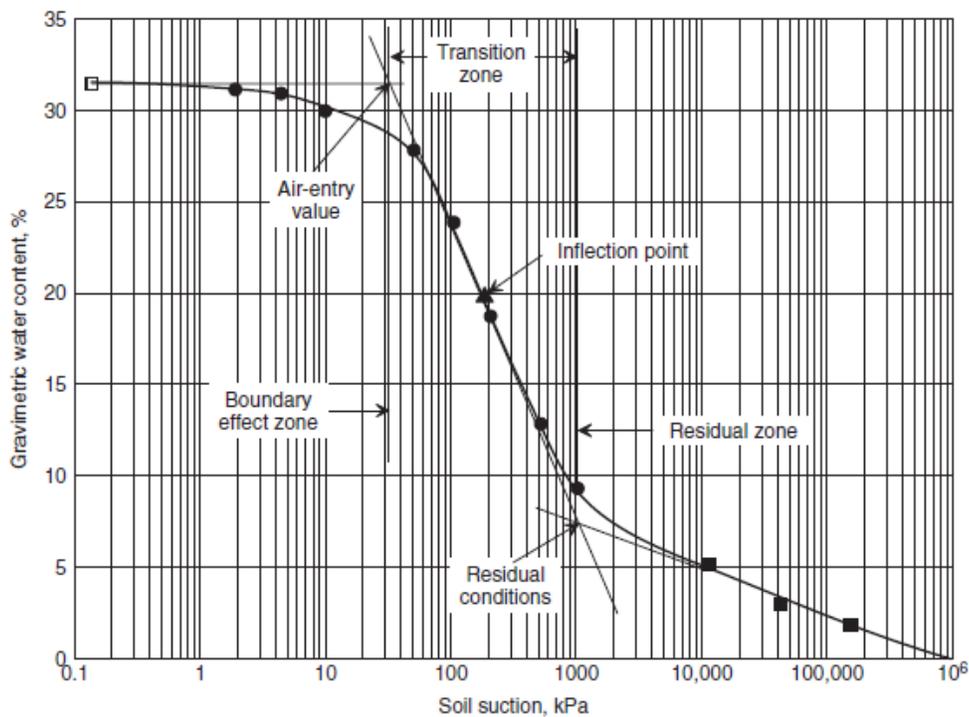


Figura 3-6: Curva de retención de agua con puntos y zonas típicas.
 Fuente: Fredlund & Rahardjo, 1993.

La zona de efecto de borde, que es el tramo de la curva en la que posee una menor succión y una mayor cantidad de agua, donde la curva se comporta más horizontal que el tramo siguiente y delimitado por el punto de entrada de aire, que es el valor de la succión requerida para que el aire ingrese a los poros más grandes del suelo y se inicie de esta manera el proceso de desaturación del suelo. Luego de este punto, comienza la zona de transición en la cual existe una interfase entre el aire y el agua continua, con lo que conlleva todas las

características mencionadas en los puntos anteriores. Finalmente, y conjuntamente a la disminución de la cantidad de agua, se logra sobrepasar el punto de succión residual o de saturación residual, correspondiente al contenido de agua para el cual, la fase líquida deja de ser continua y los poros se encuentran ocupados principalmente de aire, por lo que esta zona de la curva es la parte más seca de la SWRC.

Luego de haber ya definido las tres zonas de la curva de retención de agua, además se puede analizar la forma de dicha curva. Donde la forma de la SWRC, según Ning y Likos (2004), se ve influenciada por la distribución del tamaño de los poros, la distribución del tamaño de las partículas, la densidad, el contenido de arcilla y la mineralogía del suelo. En la Figura 3-7 muestra tres tipos de curvas, con formas características de las arenas, limos y arcillas. Lo anterior, asocia la forma de la curva principalmente al tamaño de las partículas y el tamaño de los poros. De la misma figura se puede observar que el valor de la entrada de aire de los suelos con granulometría más gruesa es menor que para suelos más finos, debido a la presencia de los poros de mayor tamaño, donde el predominio de la capilaridad presente en la succión matricial provoca un menor requerimiento de la succión para iniciar el proceso de desaturación del suelo.

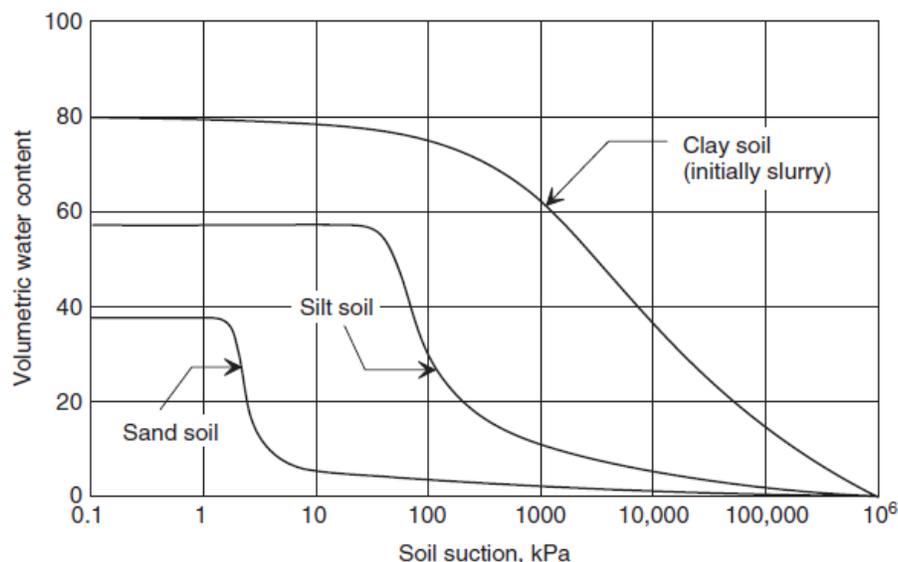


Figura 3-7: Comparación de formas de la curva de retención de agua para distintos tipos suelos.
Fuente: Fredlund & Rahardjo, 1993.

3.3.2. Relaciones Masa – Volumen para el contenido de agua

Para las relaciones masa – volumen, primeramente es necesario definir el contenido volumétrico de agua, θ , como la razón entre el volumen de agua con respecto al volumen total del suelo. De la misma manera, el contenido de agua se puede expresar en términos de la humedad gravimétrica, ω , o el grado de saturación, S .

S.K. Vanapali, D.G. Fredlund y A.W. Clifton (1996), sugirieron una relación entre el grado de saturación y el contenido volumétrico de agua:

$$\theta = \frac{S_e}{1+e} = S n$$

Donde:

- e Contenido volumétrico de agua,
- S Grado de saturación,

e	Índice de vacíos, y
n	Porosidad.

Además, es posible expresar el contenido volumétrico de agua en términos de la humedad gravimétrica:

$$\theta = w \frac{\rho_d}{\rho_w}$$

Donde:

w	Humedad gravimétrica,
ρ_d	Densidad seca del suelo [kg/m^3], y
ρ_w	Densidad del agua [kg/m^3].

Adicionalmente, es posible relacionar la humedad volumétrica y gravimétrica a través de la gravedad específica, G_s :

$$\theta = \frac{w}{w + \frac{1}{G_s}}$$

Debido a que las relaciones masa-volumen de los suelos no saturados son consideradas sustancialmente más complejas que las de los suelos saturados, debido a que los suelos saturados están compuestos por un sistema de dos fases, por lo que requiere un único tensor de esfuerzos correspondiente al tensor de esfuerzos efectivos para definir el estado del suelo (Terzaghi, 1943). Sin embargo, los suelos no saturados requieren dos tensores de esfuerzos independientes para poder definir el estado del suelo (Fredlund & Morgenstern, 1976; Fredlund & Pham, 2006), el primero, el determinado por tensor normal neto y, el segundo, determinado por la succión matricial.

Adicionalmente, un sinnúmero de autores han planteado que las propiedades masa-volumen deben ser relacionadas con las variables de estados de esfuerzo (e.g. Averjanov, 1950; Kunze et al., 1968; Fredlund et al., 1994, 1996; Vanapalli et al., 1996; Barbour, 1998; Ruan et al., 1999; Assouline, 2001), por lo que Pham (2005) y Pham et al. (2011), realizaron un estudio de las distintas relaciones constitutivas masa-volumen, representándolas como superficies tridimensionales. Estas superficies consisten en relacionar varios pares de relaciones de estado con variables de estado de esfuerzos, similar a lo planteado por Fredlund & Morgenstern (1996). Un tipo de estas superficies de relaciones de estado son las presentadas en la (Figura 3-8), donde se relacionan las variables succión, contenido gravimétrico de agua y el esfuerzo neto para limos y arenas, Figura 3-8 a y b respectivamente, donde se puede observar que en la medida que aumenta el esfuerzo neto, la relación succión-contenido gravimétrico, se modifica reduciendo su intercepto en el plano del contenido gravimétrico-esfuerzo neto, intercepto correspondiente a la humedad de saturación en la curva de retención de agua. Dicha disminución en la humedad de saturación de la curva de retención de agua se acentúa para los limos más que para las arenas.

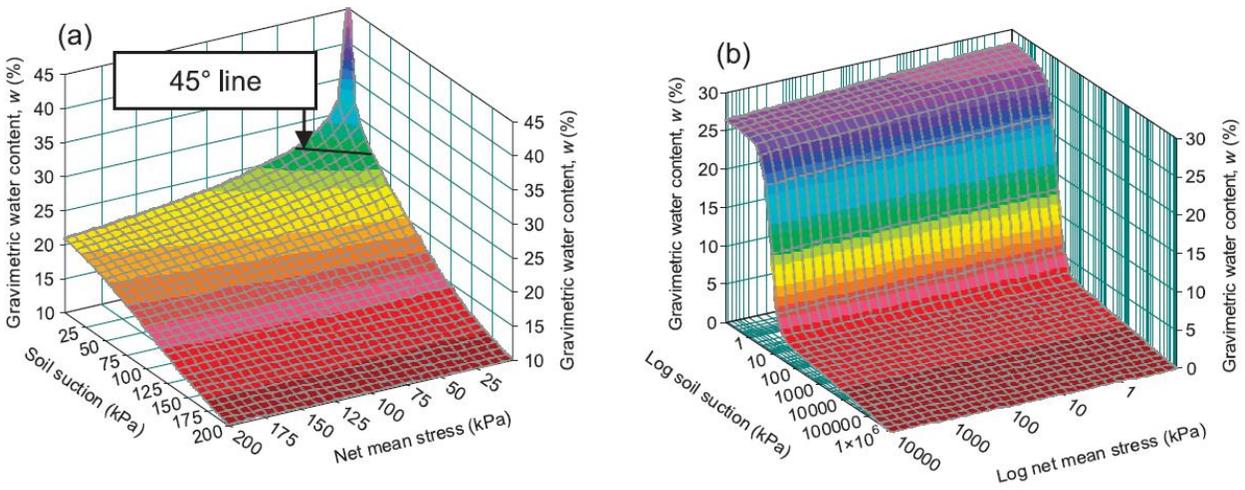


Figura 3-8: Superficies constitutivas para limos (a) y arenas (b).
Fuente: Pham et al., 2011.

3.3.3. Modelos de estimación y ajuste de la SWRC

En el presente acápite, se presentan los modelos matemáticos más utilizados en la literatura, propuestos para describir o estimar de forma alternativa la curva de retención de agua de los suelos no saturados.

3.3.3.1. Modelo de van Genuchten (1980)

El modelo de van Genuchten, debido a su simpleza y resultados relativamente buenos, es uno de los modelos más utilizados en la literatura para el ajuste de curvas de retención de agua. Adicionalmente, van Genuchten estudió la aplicabilidad de la ecuación para ser utilizada como una manera alternativa para estimar la función de permeabilidad.

$$w(\psi) = w_r + \frac{w_s - w_r}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m}$$

Donde:

a, n, m	Parámetros de ajuste,
w_s	Humedad gravimétrica de saturación,
w_r	Humedad gravimétrica residual, y
ψ	Succión del suelo.

Este modelo descriptivo consta de tres parámetros ajustables mediante el método estadístico de mínimos cuadrados y su uso está limitado al rango entre el punto de la entrada de aire y la succión residual, debido a la naturaleza asintótica de la curva resultante (Figura 3-9).

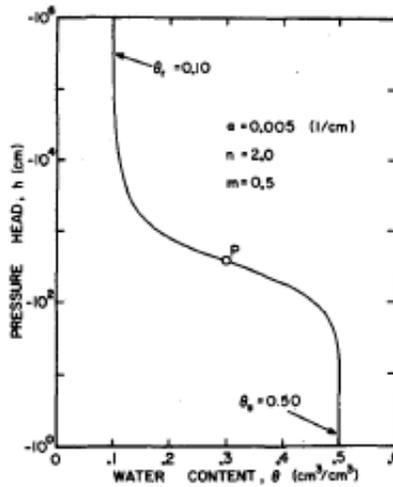


Figura 3-9: Curva de retención de agua típica obtenida mediante el modelo de van Genuchten.
 Fuente: van Genuchten, 1980.

En cuanto a la estimación de la permeabilidad no saturada de los suelos, van Genuchten establece una relación en base a los parámetros de ajuste del modelo, asociándolos con el valor máximo de la permeabilidad, es decir la permeabilidad saturada.

$$\frac{K_{\psi}}{K_s} = \frac{\{1 - (\alpha\psi)^{n-1}[1 + (\alpha\psi)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{m/2}}$$

Donde:

- K_{ψ} Conductividad hidráulica para una succión matricial ψ ,
- K_s Conductividad hidráulica saturada,
- α, n, m Parámetros de ajuste de van Genuchten

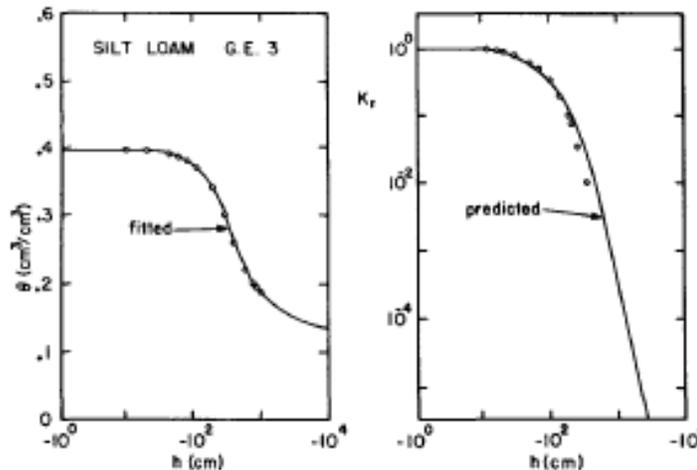


Figura 3-10: Curva de retención de agua ajustada mediante modelo de van Genuchten y comparación de la conductividad hidráulica medida y estimada.
 Fuente: van Genuchten, 1980.

Van Genuchten realizó una comparación de los valores de la conductividad hidráulica obtenidos mediante la estimación y la conductividad hidráulica no saturada medida (Figura 3-10).

3.3.3.2. Modelo de Vereecken et al. (1989)

Vereecken et al. realizaron un estudio de regresión del modelo de van Genuchten en el cual realiza cinco modelos a partir del modelo inicial de van Genuchten, para el cual determina un modelo de dos parámetros, con lo que obtiene el siguiente modelo simplificado de van Genuchten.

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha\psi)^n]}$$

Los valores de regresión presentados en dicho estudio poseen la desventaja que no determina un valor único para cada parámetro de ajuste, sino que establece una matriz asociada a la clasificación de cada tipo de suelo.

3.3.3.3. Modelo de Fredlund & Xing (1994)

Fredlund & Xing en 1994, propusieron un modelo que permite estimar el contenido volumétrico de agua para todas las posibles presiones negativas entre 0 y 1.000.000 [kPa]. Para ello, utilizaron la siguiente relación constitutiva:

$$\theta(\psi, a, n, m) = \frac{C(\psi) * \theta_s}{\left(\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right)^m}$$

Donde a, n y m determinan con las siguientes expresiones:

$$a = \psi_i$$

$$m = 3.67 * \ln \left(\frac{\theta_s}{\theta_i} \right)$$

$$n = \frac{1.31^{m+1}}{m * \theta_s} 3.72 * s * \psi_i$$

Donde:

θ_s	Contenido de agua volumétrico saturado.
θ_i	Contenido de agua volumétrico en el punto de inflexión (Figura 3-11).
ψ_i	Succión del contenido de agua donde ocurre el punto de inflexión en la curva.
s	Pendiente de la línea tangente a la función que cruza el punto de inflexión (Figura 3-11).

$$s = \frac{\theta_i}{\ln \left(\frac{\psi_\rho}{\psi_i} \right)}$$

El punto de inflexión se determina de forma gráfica, tal como se muestra en la Figura 3-11.

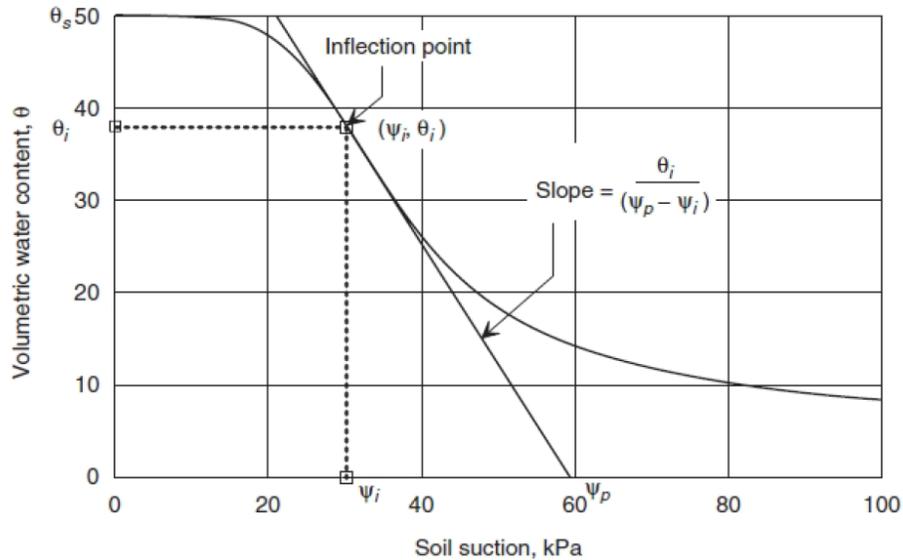


Figura 3-11: Determinación gráfica del punto de inflexión y succión residual.
Fuente: Fredlund & Xing, 1994.

Adicionalmente se define el factor de corrección, $C(\psi)$, mediante:

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{1.000.000}{\psi_r}\right)}$$

Este factor, fuerza que la condición seca a un valor de 1.000.000 [kPa] (Fredlund & Rahardjo, 1993).

En este modelo, tanto los parámetros de ajuste como la ecuación están definidos empíricamente. Finalmente, se puede mencionar que este modelo, es uno de los más empleados por los investigadores en la actualidad, debido a los buenos resultados observados que este ha obtenido.

3.3.3.4. M.D. Fredlund, G. Wilson & D.G. Fredlund (2002)

Una continuación del estudio de Fredlund & Xing (1994), realizaron M.D. Fredlund, Wilson y D.G. Fredlund, donde se efectuó un estudio de regresión del modelo anterior de forma de poder estimar la curva de retención de agua a partir del modelo de Fredlund & Xing utilizando para ello la curva granulométrica de cada suelo.

Para ello desarrollaron el concepto de las PTF, Pedo-Transfer Functions, las cuales son funciones que poseen argumentos básicos de los suelos como lo son la granulometría y porosidad, para obtener alguna propiedad del suelo (Bouma, 1989). Luego, se plantea que el valor de la entrada de aire de la curva de retención de agua (AEV), está directamente asociado al parámetro α_f en la modelo de Fredlund et al. (1994), y es posible obtenerlo a partir de la siguiente expresión.

$$\psi = 2T_s \frac{\cos \alpha}{\rho_w g r}$$

Donde:

T_s	Tensión superficial del agua [mL/T ²],
α	Ángulo de contacto,
ρ_w	Densidad del agua [m/L ³],
g	Aceleración de gravedad [L/T ²],
r	Radio de poro [L], y
ψ	Succión del suelo [m/LT ²].

Además, se plantea que los parámetros, n_f y m_f , del modelo de Fredlund et al. (1993) son posibles obtenerlos a partir una PTF calibrada para cada parámetro. La PTF asociada a ambos parámetros, n_f y m_f , se presenta a continuación.

$$p(\emptyset) = p_1 \left[\frac{1}{\ln \left[e^1 + \left[\frac{10^{-\log(d_e)-1}}{p_2} \right]^{p_3} \right]} \right]^{p_4} + p_5$$

Donde:

p_1, p_2, p_3, p_4, p_5	Parámetros de regresión de M.D. Fredlund et al. (2002),
d_e	Diámetro efectivo de las partículas, y
$p(\emptyset)$	Valor de n_f o m_f según los valores de los parámetros de regresión.

Para la PTF antes presentada, los valores de los parámetros de calibración propuestos por M.D. Fredlund (2002), para cada parámetro del modelo (i.e. n_f , m_f), son los presentados en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Parámetros de calibración de los parámetros del modelo de D.W. Fredlund et al. (2002).

Fuente: Modificado de M.D. Fredlund, G. Wilson & D.G. Fredlund, 2002.

Parámetro del modelo (SWRC)	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5
n_f	19	50	30	1	1
m_f	1,5	100	10	1	0,5

Además, el modelo utiliza una variable dependiente de la granulometría del material analizado, definida como diámetro efectivo y calculada mediante la siguiente expresión.

$$\frac{1}{d_e} = \frac{3 \Delta g_1}{2 d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta g_i}{d_i}$$

Donde:

d_e	Diámetro efectivo,
d_1	Mayor diámetro de la sección más gruesa del material, y
Δg_1	El peso del material de la última fracción en términos de peso total.

De esta manera, es posible obtener los valores de los parámetros del modelo en función del diámetro específico, los cuales fueron obtenidos mediante regresión del modelo y se presentan a continuación en la Figura 3-12 y Figura 3-13.

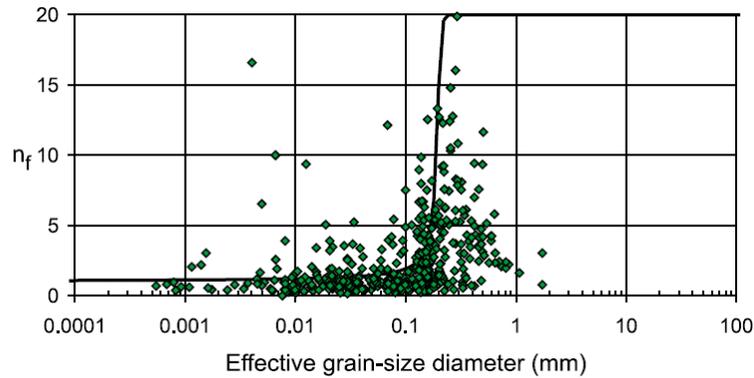


Figura 3-12: Variación del parámetro m_f obtenido mediante regresión del modelo de Fredlund & Xing (1994) en función del diámetro efectivo.

Fuente: M.D. Fredlund, G. Wilson & D.G. Fredlund, 2002.

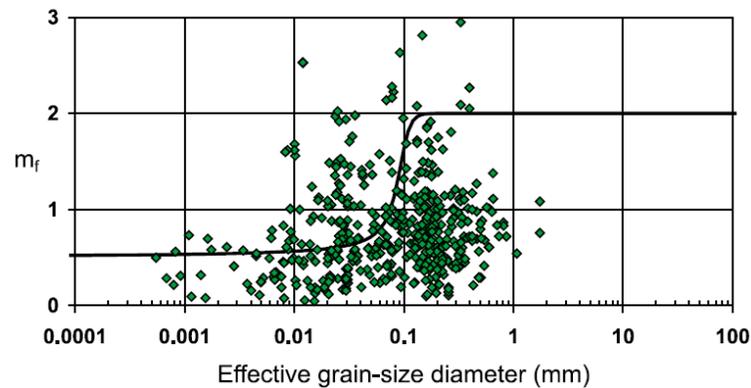


Figura 3-13: Variación del parámetro n_f obtenido mediante regresión del modelo de Fredlund & Xing (1994) en función del diámetro efectivo.

Fuente: M.D. Fredlund, G. Wilson & D.G. Fredlund, 2002.

3.3.3.5. Modelo MK (2003)

En el 2003, Aubertin, Mbonimpa, Bussière y Chapuis publicaron una modificación al modelo de Kov acs, que pasó a llamarse modelo de Kov acs modificado o modelo MK, ya que este modelo se basa en el propuesto por Kov acs en 1981, donde en dicho investigador efectúa una distinción entre las fuerzas de capilaridad y adhesión, logrando de esta manera, resultados más cercanos a los reales. No obstante, su alcance es limitado ya que no se definen con claridad los parámetros clave de este modelo. Debido a lo anterior M. Aubertin et al. proponen un modelo físico que permite determinar estos parámetros a través de las propiedades geotécnicas clásicas de los suelos. Estas modificaciones al modelo sirven para generalizar las funciones estadísticas utilizadas para describir la distribución granulométrica y su relación con las componentes capilares.

De esta manera es posible definir el parámetro clave del modelo llamado altura capilar equivalente, h_{co} :

$$h_{co} = \frac{b}{e * D_{10}}$$

Con:

$$b = \frac{0.75}{1.17 * \log(C_u) + 1}$$

Donde:

C_u	Coeficiente de uniformidad, $C_u = D_{60}/D_{10}$
D_{60}	Tamaño de la abertura del tamiz correspondiente al 60% del material que pasa.
D_{10}	Tamaño de la abertura del tamiz correspondiente al 10% del material que pasa.
e	Índice de vacíos inicial.

Además, es posible determinar la succión residual para suelos granulares:

$$\psi_r = \frac{0.42}{(e * D_H)^{1.26}}$$

Con:

$$D_H = [1 + 1.17 * \log(C_u)] * D_{10}$$

Luego, para cada nivel de succión de la curva es posible calcular las componentes de retención por capilaridad, S_c , y retención por adhesión, S_a .

$$S_c = 1 - \left[\left(\frac{h_{co}}{\psi} \right)^2 + 1 \right]^m * e \left[-m * \left(\frac{h_{co}}{\psi} \right)^2 \right]$$

$$S_a = a_c C_\psi * \frac{\left(\frac{h_c}{\psi_n} \right)^{\frac{2}{3}}}{e^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{\psi}{\psi_n} \right)^{\frac{1}{6}}}$$

Donde a_c y m son parámetros “libres”, es decir, están sujetos a modificaciones de forma tal que la curva teórica se ajuste de la mejor manera posible a los datos experimentales. En el caso de no contar con datos medidos, Aubertin et al. (2003) recomienda los siguientes valores:

$$m = 1/C_u$$

$$a_c = 0,01$$

Con:

$$C_\psi = 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{\psi_0}{\psi_r}\right)}$$

Donde:

ψ_0 Succión correspondiente al estado seco, normalmente del orden de 10^7 [cm] de agua.

ψ_n Parámetro de normalización, $\psi_n = 1$ [cm].

Finalmente, se calcula el contenido de agua, que en este método corresponde a la variable dependiente para cada magnitud de la succión, variable independiente, como sigue a continuación.

$$S_r = \frac{\theta}{n} = S_c + S_a^*(1 - S_c)$$

Con:

$$S_a^* = 1 - \langle 1 - S_a \rangle$$

Donde:

$\langle - \rangle$ Representa los paréntesis de Macauley, $\langle y \rangle = 0,5 * (y + |y|)$.

θ Humedad volumétrica.

n Porosidad.

Finalmente, sumando las contribuciones antes mencionadas, se logra obtener la curva de retención de agua (Figura 3-14).

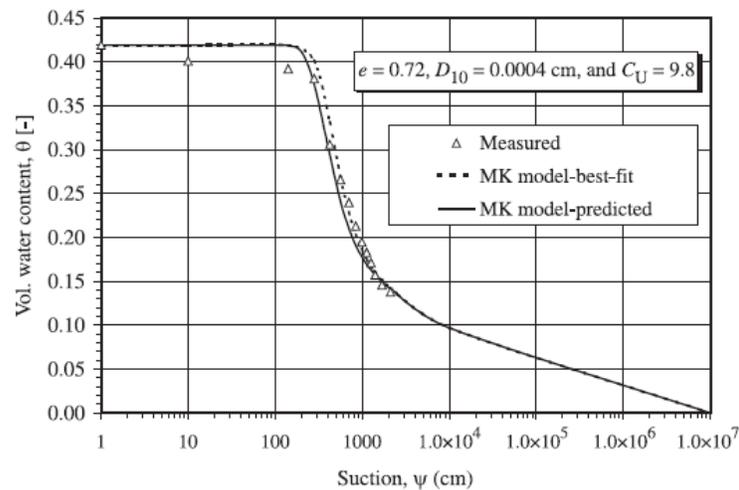


Figura 3-14: Curva de retención de agua obtenida mediante el método Kóvacs modificado para un relave limoso.

Fuente: M. Aubertin et al., 2003.

3.3.3.6. Modelo de Pham & Fredlund (2005)

Este modelo, busca la representación de la curva de retención de agua en base a pruebas de laboratorio relativamente simples para su calibración y a partir de él es posible obtener los cambios de volumen y contenido de humedad de forma independiente. Este modelo de la SWRC es resultado de la combinación de numerosos estudios anteriores (e.g. van Genuchten, 1980, Fredlund & Xing, 1994).

Para la determinación del presente modelo se establecieron una serie de suposiciones.

- I. En un suelo no saturado, un poro particular puede presentar 2 estados, i) el poro está lleno con agua, o ii) el poro está vacío.
- II. La succión del suelo afecta solo a los poros llenos de agua y no afecta los poros vacíos, mientras que la tensión media neta tiene un efecto en todos los poros del suelo.
- III. Cada poro lleno de agua en el suelo posee dos índices, i) índice de compresión virgen (C_c), y ii) índice de compresión descarga-recarga (C_s).
- IV. Existen dos tipos de poros, i) Poros colapsables, y ii) poros no colapsables, donde los poros colapsables son poros relativamente grandes y los poros no colapsables son poros relativamente pequeños interconectados, suponiendo además que los poros interconectados son incompresibles.
- V. Tanto el índice de compresión virgen como el índice de compresión de descarga-recarga para un poro de suelo, es proporcional a su volumen en el estado tensional de referencia (i.e. 1 [kPa] de tensión media neta y a succión nula del suelo).
- VI. Los poros son deformados y el agua se absorbe y se drena a través de mecanismos independientes.
- VII. El índice de descarga-recarga de un poro lleno es esencialmente igual a cero.

Teniendo en cuenta las suposiciones antes presentadas Pham et al. (2005), proponen la siguiente representación matemática de la SWRC para la estimación de la SWRC.

$$w(\psi) = \left\{ \left[w_{sat} - \frac{C_c}{G_s} \log(\psi) - w_r \right] * \frac{a}{\psi^b + a} + w_r \right\} * \left\{ 1 - \frac{\ln \left[1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right]}{\ln \left[1 + \frac{10^6}{\psi_r} \right]} \right\}$$

Donde:

w_{sat}	Contenido gravimétrico de humedad de saturación,
C_c	Índice de compresión virgen,
G_s	Gravedad específica de las partículas,
w_r	Contenido gravimétrico de humedad residual,
ψ_r	Succión residual, [kPa], y
a, b	Parámetros de regresión.

El modelo consta de sólo de 2 parámetros de regresión a diferencia de modelos más antiguos, sin embargo, logra predecir de forma consistente el comportamiento observado y ratificado en estudios posteriores (e.g. Pham, 2008; Pham, 2011). Además, el modelo es capaz de tener en cuenta la naturaleza histerética de la SWRC y las deformaciones tanto elásticas como plásticas del suelo ante variaciones del contenido de humedad realizando una clasificación entre los poros colapsables y poros no colapsables.

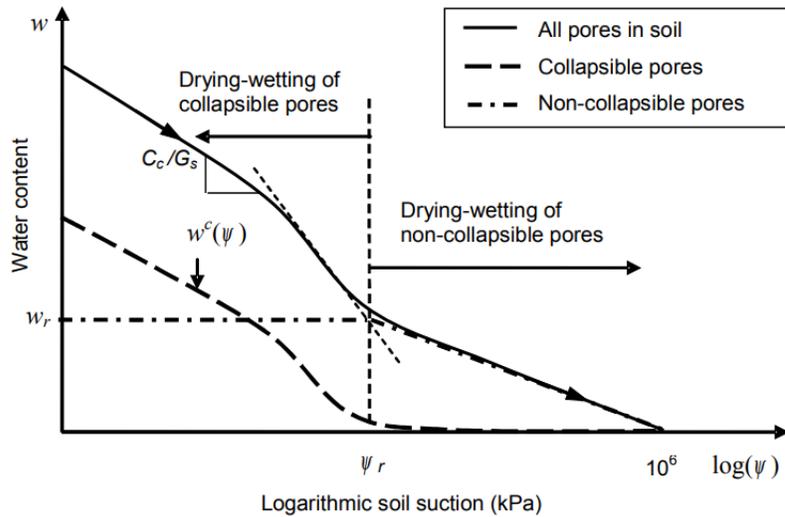


Figura 3-15: Esquema de la SWRC en un proceso inicial de desaturación con poros colapsables interconectados.
Fuente: Pham, 2011.

3.3.3.7. Modelo de Fredlund & Pham (2006)

Fredlund y Pham propusieron en el 2006 un método que segmenta la SWRC en tres zonas (Figura 3-16), definidas a continuación:

- I. Zona de baja succión: Entre 1 [kPa] y la succión asociada a la entrada de aire.
- II. Zona intermedia: Entre la succión asociada a la entrada de aire y la succión residual.
- III. Zona de alta succión: Entre la succión residual, ψ_r , y 1.000.000 [kPa], valor asociado para un contenido de agua nulo.

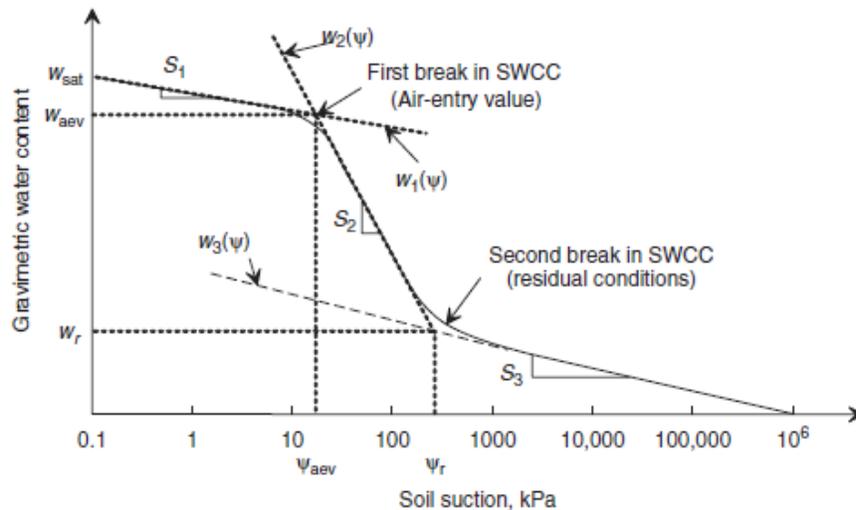


Figura 3-16: Zonificación del modelo de Fredlund y Pham.
Fuente: Fredlund, Sheng y Zhao, 2011.

Los tramos son determinados por w_1 , w_2 y w_3 respectivamente, que a su vez están determinados por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} w_1(\psi) &= w_u - S_1 * \log(\psi) \quad , \quad 1 \leq \psi \leq \psi_a \\ w_2(\psi) &= w_{ae} - S_2 * \log\left(\frac{\psi}{\psi_{ae}}\right) \quad , \quad \psi_a \leq \psi \leq \psi_r \\ w_3(\psi) &= S_3 * \log\left(\frac{10^6}{\psi}\right) \quad , \quad \psi_r \leq \psi \leq 10^6 \text{ [kPa]} \end{aligned}$$

Donde los sub-índices asocian el punto de la entrada de aire. Luego la succión para cada zona respectiva está determinada mediante las siguientes expresiones.

$$\begin{aligned} \psi &= 10^{(w_u - w)/S_1} \quad , \quad 1 \leq \psi \leq \psi_a \\ \psi &= \psi_{ae} 10^{(w_{ae} - w)/S_2} \quad , \quad \psi_a \leq \psi \leq \psi_r \\ \psi &= 10^{6 - w/S_3} \quad , \quad \psi_r \leq \psi \leq 10^6 \text{ [kPa]} \end{aligned}$$

Estas tres ecuaciones propuestas por Fredlund y Pham (2006), cubren el rango para succiones bajas hasta succiones de 1.000.000 [kPa], es decir, succiones bajo el valor de la entrada de aire y succiones sobre el valor de la succión residual (Pham 2005).

Para este método, tanto los parámetros, como así también, las pendientes se determinan en base a datos obtenidos en laboratorio, por lo que sugiere una desventaja ante bases de datos pequeñas o nulas. Adicionalmente, otro inconveniente del modelo es que el ajuste queda supeditado en su totalidad a los datos experimentales, conllevando los errores que éstos puedan poseer.

3.3.3.8. Otros modelos

Los modelos anteriores son los más nombrados en la literatura, sin embargo, existen una gran gama de modelos adicionales, algunos de estos modelos son los siguientes:

- Brooks & Corey (1964)

$$\begin{aligned} w(\psi) &= w_s \quad , \quad \psi < w_a \\ w(\psi) &= w_s * \left(\frac{\psi}{a}\right)^{-n} \quad , \quad \psi \geq w_a \end{aligned}$$

Donde:

- a Intersección de la línea recta en donde $w(\psi) = 0$.
- n Índice de distribución del tamaño de poros.

- Brutsaert (1966)

$$w(\psi) = \frac{w_s}{1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n}$$

Donde:

- n Variable relacionada con la distribución de tamaño de poros.
 A Valor de succión para el cual el suelo se encuentra al 50% del grado de saturación.

- Campbell (1974)

$$\psi = \psi_b * \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^{-b}$$

Donde:

- ψ_b Valor de entrada de aire.
 b Parámetro de ajuste.
 θ Contenido volumétrico de agua.
 θ_s Contenido volumétrico de agua cuando el suelo está saturado.

- Mckee & Bumb (1985)

$$w(\psi) = w_s * e^{\frac{a-\psi}{n}}$$

Donde:

- w_s Contenido volumétrico de agua cuando el suelo está saturado.
 a, n Parámetros de ajuste.

- Mckee & Bumb (1987)

$$w(\psi) = \frac{w_s}{1 + e^{\frac{\psi-a}{n}}}$$

Donde:

- w_s Contenido volumétrico de agua cuando el suelo está saturado.
 a, n Parámetros de ajuste.

- Pereira & Fredlund (2000)

$$w(\psi) = w_r + \frac{w_s - w_r}{\left(1 + \left(\frac{\psi}{c}\right)^b\right)^a}$$

Donde:

w_s Contenido volumétrico de agua cuando el suelo está saturado.

w_r Contenido volumétrico de agua residual.

a, b, c Parámetros de ajuste.

3.3.4. Generalidades de los modelos matemáticos de estimación y ajuste

En la Figura 3-17, se presenta una clasificación de algunos modelos realizada por Fredlund, Sheng and Zhao en el año 2011, donde se categoriza los distintos modelos más conocidos, basados en el rango de succión para el cual son válidos, y adicionalmente, la cantidad de parámetros que definen al modelo en cuestión.

Como se apreció anteriormente, dada la enorme cantidad de modelos de predicción y ajuste que se han propuesto durante los últimos cincuenta años, se induce que ninguno de los modelos presentados anteriormente, predicen de una manera satisfactoria tal que no se requieran más estudios acerca de los modelos predictivos de la SWRC, sin embargo, en el capítulo 7 se analizarán las principales curvas arrojadas por los modelos de predicción y ajuste de la SWRC.

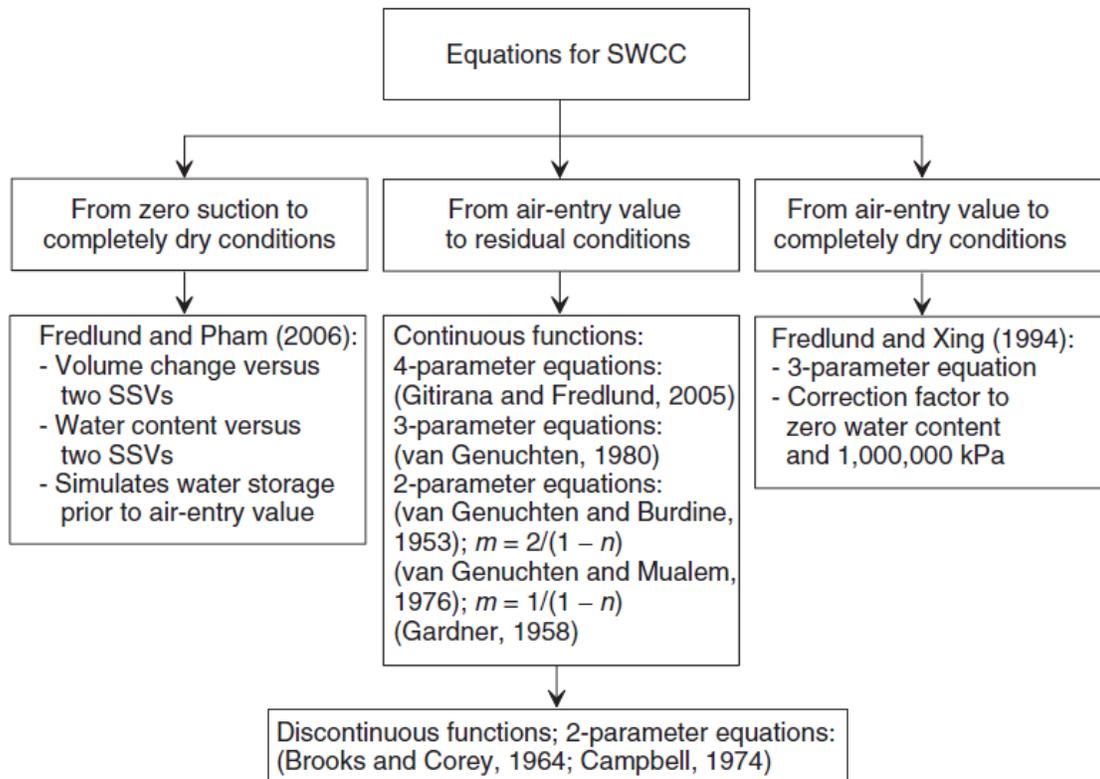


Figura 3-17: Categorización de los modelos de curvas de retención de agua, SWRC.

Fuente: Sheng, Fredlund & Zhou, 2011.

3.3.1. Entrada de aire (AEV)

Uno de los principales parámetros, si no el más importante, que se pueden obtener de la curva de retención de agua es el denominado valor de la entrada de aire o Air-Entry Value (AEV o ψ_a), que representa la succión matricial (i.e. $\psi = u_a - u_w$) en la que los poros más grandes del material comienzan a drenar (Aubertin et al., 1998).

En la actualidad existen varios enfoques para la determinación del valor del AEV a partir de la relación de la curva de retención de agua. Para este estudio se presentarán tres modelos de estimación del AEV.

El primer método se basa en ajustar los datos experimentales ($\alpha_{VG}, m_{VG}, n_{VG}$) de la ecuación de van Genuchten (1980), utilizando el método RETC (van Genuchten, 1991). Este método lo plantea por medio de la siguiente ecuación:

$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + |\alpha_{VG}\psi|^{n_{VG}}]^{m_{VG}}$$

Donde:

- θ_e Contenido volumétrico de agua efectivo,
- θ_s Contenido volumétrico de agua saturado (habitualmente considerado igual a la porosidad),
- θ_r Contenido volumétrico de agua residual, y
- $\alpha_{VG}, m_{VG}, n_{VG}$ Parámetros de ajuste de van Genuchten.

Luego, al ajustar los parámetros del modelo a los datos experimentales, el código TETC calcula un valor para el parámetro α , que se toma como el inverso aditivo del AEV (i.e. $\alpha = \psi_a - 1$).

Adicionalmente, un segundo método, y probablemente el método más común utilizado para la determinación del AEV, es el método propuesto por Brooks & Corey (1964). Este método se basa en la suposición de una simplificación idealizada de la curva de retención de agua en una gráfica semilogarítmica en dos líneas rectas, una horizontal y otra inclinada. La intersección de estas dos líneas da como resultado el valor de la succión para el AEV, que da el inicio a la desaturación (Figura 3-18).

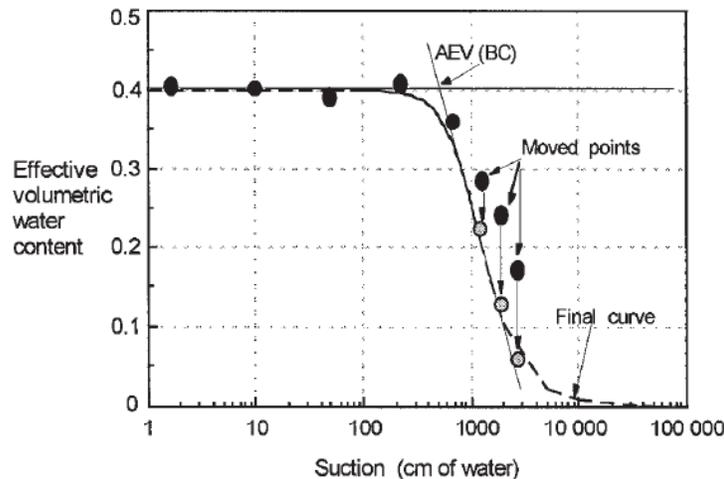


Figura 3-18: Determinación del valor de entrada de aire mediante el método de Brooks & Corey.

Fuente: Aubertin et al., 1998.

Un tercer método, se basa en el hecho de que en las cercanías del AEV, se crean algunos canales de aire continuo dentro del material (Kovács, 1981). Esto usualmente ocurre para una relación del grado de saturación aproximado del 90% (Corey, 1957). Por ello distintos autores han definido arbitrariamente el valor del AEV como la succión correspondiente a un contenido de humedad del 90 % de la humedad de saturación (i.e. $0.9\theta_s$).

Los tres métodos presentados anteriormente difieren en sus resultados (Figura 3-19), siendo el valor entregado por el método planteado por van Genuchten (1991), un método que sobreestima su magnitud. Los valores entregados por el método de Brooks & Corey (1964), usualmente son los menores, sin embargo, para obtener su magnitud se pueden requerir algunos ajustes para el valor de θ_r para garantizar que los resultados obedezcan a esta representación idealizada de la curva de retención de agua. Finalmente, el tercer método (denominado arbitrariamente ψ_{90}), proporciona un valor intermedio que por lo general se acerca más al valor proporcionado por Brooks & Corey (1964). Este método posee la ventaja de que es un método simple, ya que no requiere ningún cálculo o ajuste de los resultados (Aubertin et al., 1998).

Adicionalmente, Aubertin et al. (1998), estableció un método usando una generalización de la ecuación de Polubarinova-Kochina, que representa el valor de la entrada de aire en base a propiedades básicas del suelo.

$$\psi_a = \frac{b}{eD_{10}}$$

Donde:

- e Relación de vacíos,
- D_{10} Diámetro del tamiz por el cual pasa el 10% en peso en [mm], y
- b Constante de regresión que varía de acuerdo con el método utilizado para determinarlo (e.g. para el método de Brooks & Corey el valor promedio es 2,5 [mm²] y para ψ_{90} es valor promedio es de 4 [mm²]).

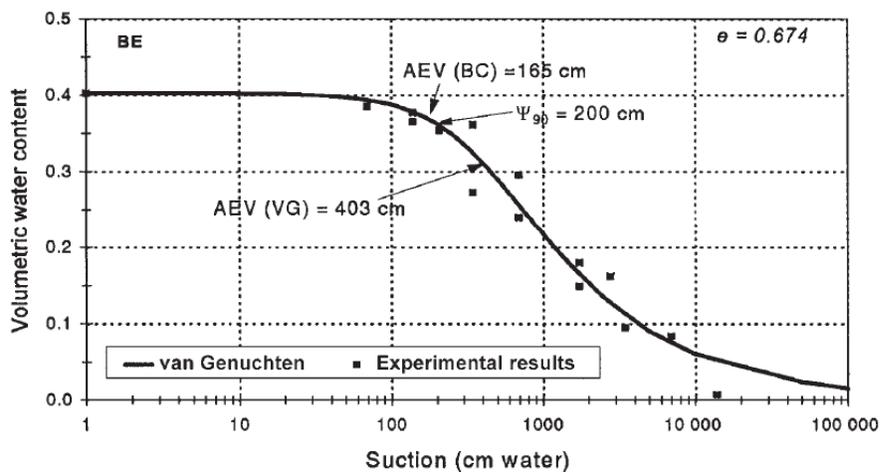


Figura 3-19: Valores de la entrada de aire según los distintos métodos.

Fuente: Aubertin et al., 1998.

A modo complementario, se puede mencionar que en general, se espera que el valor del AEV se encuentre en el rango de 0,2 a 1 [kPa] para arenas gruesas, 1 a 3,5 [kPa] para arenas medianas, 3,5 a 7 [kPa] para arenas finas, 7 a 25 [kPa] para limos y más de 25 [kPa] para arcillas (Kovács, 1981).

3.3.2. Succión residual

Otro de los principales parámetros de la SWRC es el punto de succión residual, conocido en la agronomía como punto de marchitez permanente. Este punto corresponde al contenido de agua para el cual, la fase líquida deja de ser continua y los poros se encuentran ocupados principalmente por aire. En la práctica, este valor representa la succión o el contenido de agua asociado presente en la matriz de suelo donde un aumento adicional de presión negativa o succión no produce cambios significativos en el contenido de agua. Sin embargo, es posible eliminar el agua residual a un estado inferior de contenido de humedad, pero este proceso se controla principalmente mediante evaporación y/o fuerzas osmóticas.

No obstante, muchos investigadores han propuesto obtener la succión residual mediante un parámetro más de regresión (e.g. modelo de van Genuchten, 1980; Vereecken, 1989). Una de las estimaciones matemáticas propuestas por los investigadores es la propuesta por Kovács (1981), que se presenta a continuación.

$$\psi_r = \frac{0,42}{(e * D_H)^{1,2}}$$

$$D_H = [1 + 1,17 * \log(C_u)] * D_{10}$$

Donde:

- D_H Diámetro efectivo de la partícula de Kozeny,
- C_u Coeficiente de uniformidad, y
- D_{10} Diámetro del tamiz por el que pasa el 10% del material.

En general, se espera que el valor de la humedad residual se encuentre cercano al 5% para arenas limosas, cercano al 10% para limos y un 15% para arcillas

De esta forma las presiones dentro de una matriz de suelo a partir de un contenido de humedad por sobre el límite de saturación varían según la Figura 3-20, en la cual, al desplazarse según el dominio desde derecha a izquierda, es decir, en la dirección de la desaturación del suelo, comienza por una zona de presiones positivas lineales gobernada principalmente por las presiones de poro de agua. Luego, la succión se reduce linealmente traspasando el del punto del límite de saturación hasta alcanzar al punto de la entrada de aire, donde cambia su pendiente en la zona llamada zona capilar o zona de transición, hasta llegar la zona residual recientemente definida.

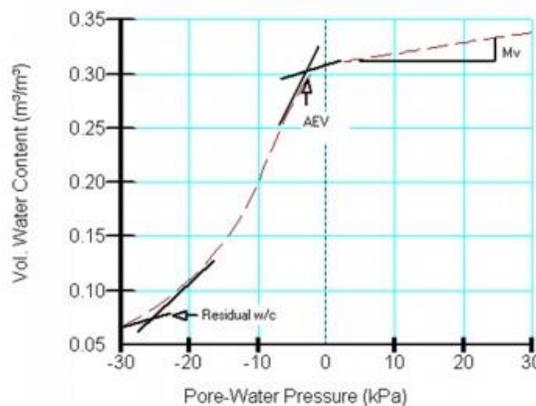


Figura 3-20: Contenido volumétrico de agua según las presiones de poro en la matriz de suelo.
Fuente: Manual Seep/w, 2012.

3.3.3. Resistencia al corte

Adicionalmente, es posible estimar la resistencia al corte de los suelos no saturados, donde se ha propuesto (e.g. Vanapalli, 1996; Fredlund, 1996) que la resistencia al corte para cualquier succión es posible determinarla mediante la siguiente expresión.

$$\tau = [c' + (\sigma_n - u_a) \tan \Phi'] + (u_a - u_w)(\theta^K \tan \Phi')$$

Donde:

c', Φ'	Constantes de suelos saturados,
σ_n	Esfuerzo normal,
u_a	Presión de poro de aire,
u_w	Presión de poro de agua,
θ	Contenido volumétrico de agua efectivo, y
K	Parámetro de regresión.

De la ecuación antes presentada, la primera parte corresponde a la resistencia de corte en estado saturado (i.e. cuando la presión de poro de aire, u_a , es igual a la presión de poro de agua, u_w), y es expresada como una función de esfuerzo normal. La segunda parte de la ecuación corresponde a la contribución de la succión, la cual puede ser estimada mediante la curva de retención de agua.

El parámetro K , se obtiene mediante regresión para obtener una mejor correlación entre los valores experimentales y los estimados de la resistencia al corte. Fredlund y Vanapalli (2000), realizaron una comparación entre la resistencia de corte estimada y la medida de suelos saturados encontrando una relación en función del índice de plasticidad (Figura 3-21) para un gran rango de valores de succión (i.e. 0-10.000 [kPa]).

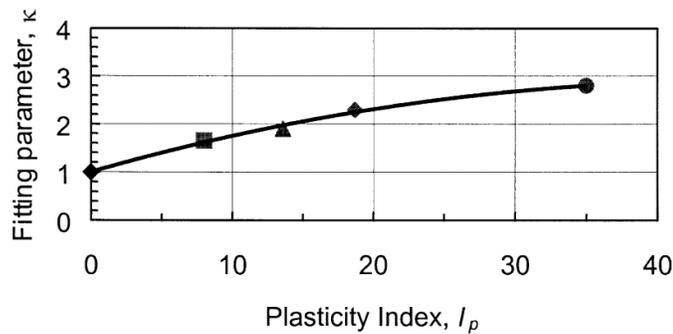


Figura 3-21: Relación entre el parámetro de regresión, K , y el índice de plasticidad, I_p .
Fuente: Vanapalli & Fredlund, 2000.

Sin embargo, Vanapalli et al. (1996), propuso una relación para estimar la resistencia al corte para suelos no saturados, sin el uso del factor de regresión K .

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \Phi' + (u_a - u_w) \tan \Phi' \left[\frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \right]$$

Donde:

θ_r Contenido volumétrico de agua residual, y

θ_s Contenido volumétrico de agua saturado.

Estas expresiones son consistentes con los valores experimentales obtenidos, siendo la segunda expresión, una buena aproximación para suelos de baja plasticidad (e.g. relaves).

Un ejemplo del comportamiento de la resistencia de corte asociada a la curva de retención de agua se presenta en la Figura 3-22, donde existe un incremento lineal de la resistencia al corte hasta el valor de la entrada de aire. En este rango, el suelo permanece esencialmente saturado, sin embargo, luego del valor de la entrada de aire, la cantidad de agua en los contactos de las partículas del suelo se reduce a medida que continúa la desaturación, es decir, el área de contacto con las partículas no es continua y comienza a reducirse, y con ello, hay un aumento no lineal en la resistencia al corte en esta zona.

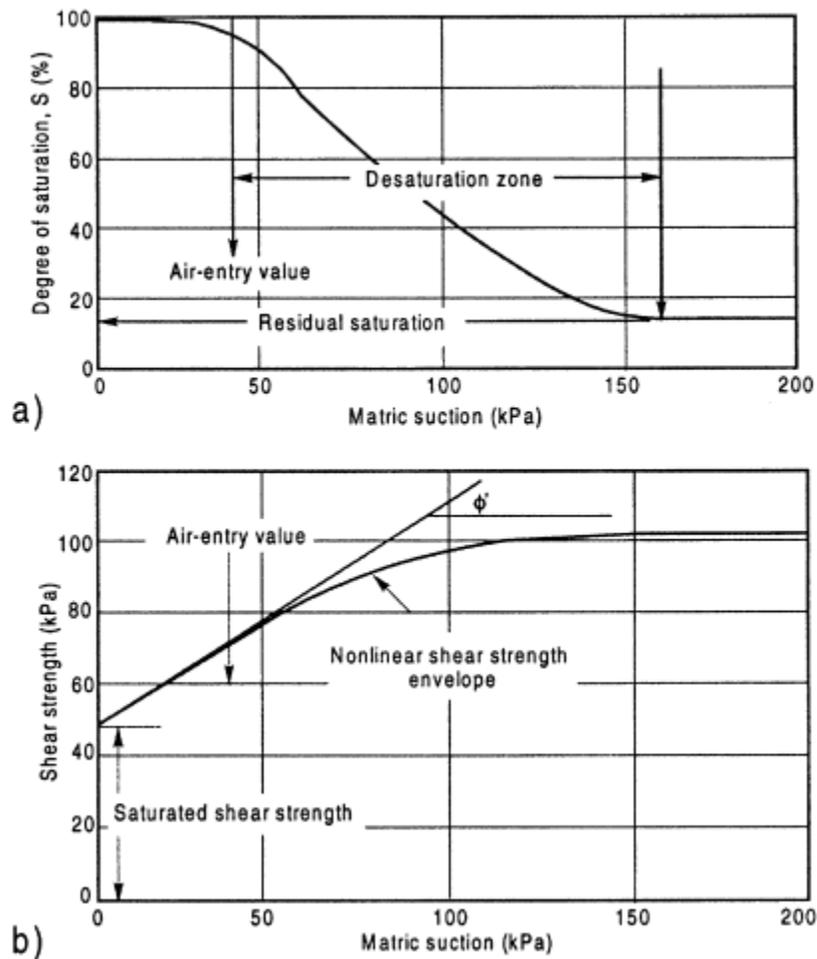


Figura 3-22: Comportamiento de la resistencia al corte en suelos no saturados relacionados con la SWRC.

Fuente: Vanapalli et al. 1996.

3.3.4. Limitaciones de la SWRC

3.3.4.1. Perturbación de muestras

Fredlund y Rahardjo, en su libro “Unsaturated soils Mechanics in Engineering Practice” se discute sobre la variabilidad de la SWRC en función del tipo de muestra a ensayar. Es así, como de esta forma, se clasifica la preparación de muestras en tres tipos:

- I. Muestra perturbada (compactada).
- II. Muestra no perturbada.
- III. “Slurry”.

En la Figura 3-23, es posible observar la existencia de una diferencia importante entre las muestras debido a su preparación. Éstas, poseen diferencias tanto en la humedad de saturación, como así también, en la pendiente de la curva en la zona de transición.

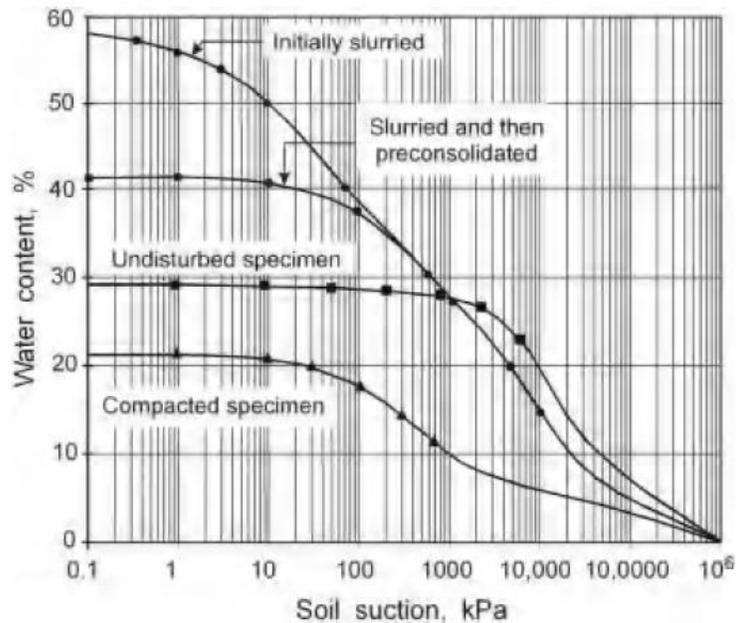


Figura 3-23: Efecto del tipo de preparación de la muestra en la SWRC.

Fuente: Fredlund & Rahardjo, 1993.

Por lo anterior, se debe tener especial cuidado a la hora de analizar y comparar resultados experimentales de la curva de retención de agua, pues los ensayos se realizan con muestras perturbadas, por lo que poseen diferencias sustanciales de las condiciones in situ.

3.3.4.2. Efecto de la histéresis

El fenómeno de la histéresis, asociado de a la SWRC, es la variación que experimenta la curva dependiendo si se encuentra en un proceso de humectación (wetting) o de secado (drying), es decir, depende de la dirección de la obtención de la curva. Con el humedecimiento, se entiende que los cambios en la succión se deben al aumento en el contenido de agua, mientras que el proceso de secado representa el proceso inverso.

Fredlund & Rahardjo (1993), estudiaron experimentalmente el ciclo de histéresis, identificando ambos tramos de curva (Figura 3-24).

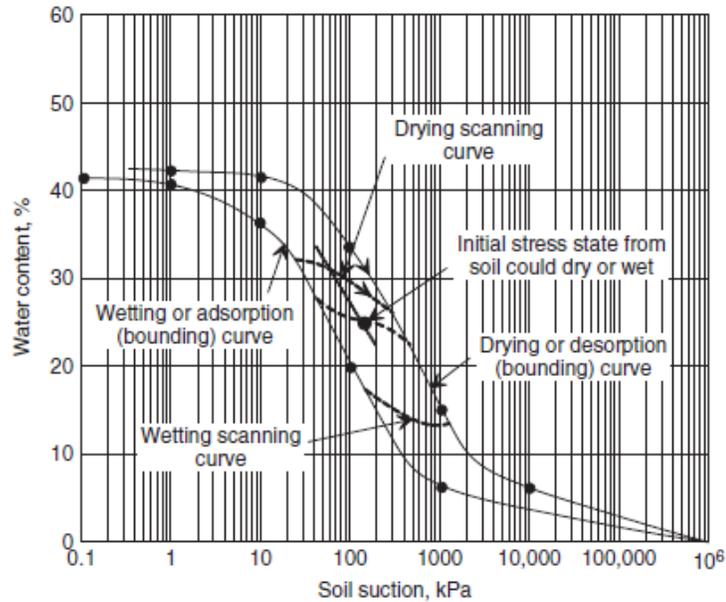


Figura 3-24: Representación gráfica del efecto de la histéresis.
 Fuente: Fredlund & Rahardjo, 1993.

Del mismo modo, Pham (2001), evaluó en laboratorio las curvas de humectación y de secado para dos muestras de suelo, el primero de propiedades limosas y el segundo de propiedades arenosas. Donde, la histéresis entre las curvas de humectación y secado fueron obtenidas a través de tres ciclos (Figura 3-25 y Figura 3-26), un proceso de secado desde un estado completamente saturado, humectación desde una succión por sobre la succión residual y finalmente una curva de secado luego que el suelo ha sido humectado hasta una succión casi nula.

En dicho estudio se concluyó que ambas curvas, de humectación y secado, poseen pendientes semejantes, es decir que las curvas se encuentran desplazadas una cierta distancia horizontal entre ellas. Además, cada una de las curvas tiene un punto de inflexión de máxima pendiente en escala logarítmica, desde donde se define la distancia desplazada.

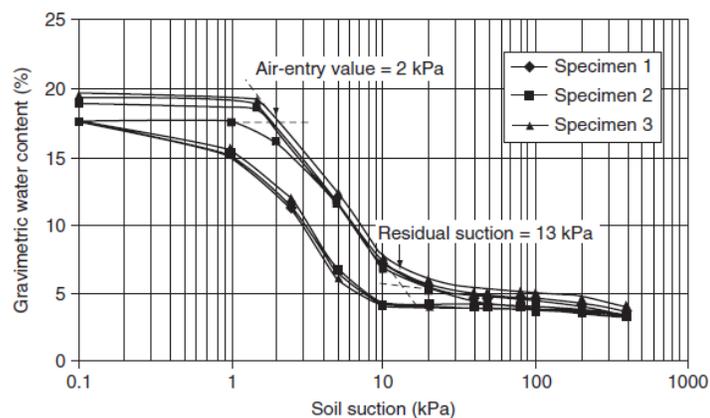


Figura 3-25: Efecto de la histéresis en arenas.
 Fuente: Pham et al., 2001.

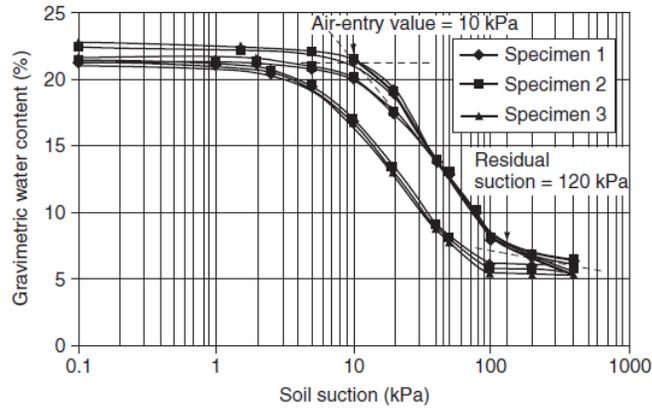


Figura 3-26: Efecto de la histéresis en limos.
Fuente: Pham et al., 2001.

El 2011, Fredlund et al. asumió que las curvas son paralelas en el punto de inflexión, con ello estudió los efectos del desplazamiento para distintos tipos de suelos y cuantificó el porcentaje de cambio de succión en función del porcentaje lateral desplazado.

Para realizar este análisis, Fredlund et al. (2011), utilizaron el modelo de tres parámetros de Fredlund y Xing (1994), concluyendo que el desfase puede ser representado mediante el parámetro de ajuste “a”, bajo la siguiente expresión:

$$\xi = 100 * [\log(\psi_d) - \log(\psi_w)]$$

Donde:

- ξ Porcentaje lateral desplazado.
- ψ_d Succión correspondiente al punto de inflexión, a_d , de la curva de secado.
- ψ_w Succión correspondiente al punto de inflexión, a_w , de la curva de humectación.

Donde los parámetros m y n del modelo de Fredlund y Xing permanecieron constantes.

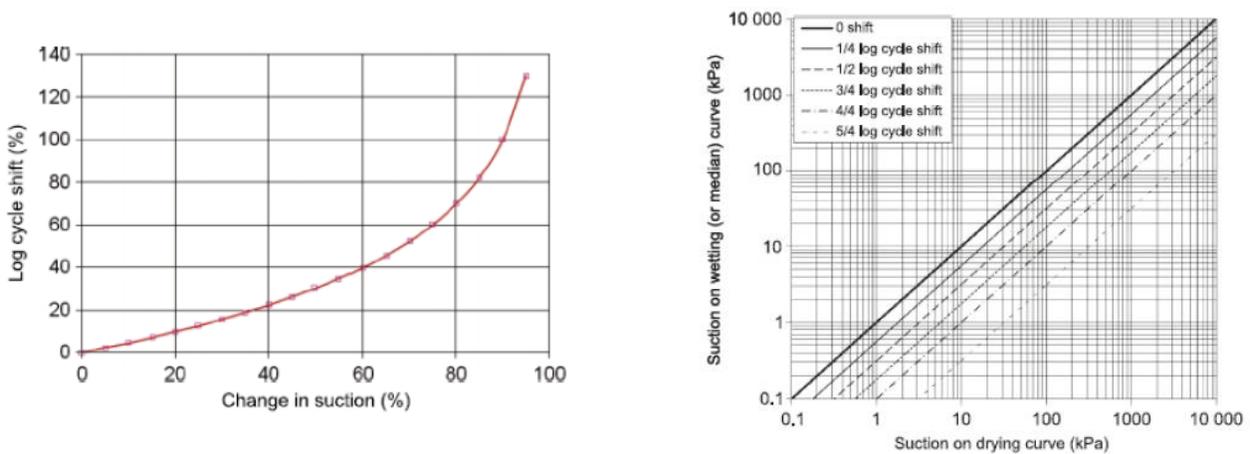


Figura 3-27: Cambio en la succión según el porcentaje lateral desplazado.
Fuente: Fredlund et al., 2011.

En los ensayos de laboratorio habituales se suelen medir la curva de secado, por lo que se puede utilizar esta ecuación, en conjunto con el porcentaje lateral desplazado, para obtener la curva de humectación y el ciclo de histéresis correspondiente.

Diversos autores, han determinado que, al aumentar el contenido de finos, aumenta igualmente el desplazamiento entre las curvas, y con ello, el error de estimación de la succión. Debido a lo anterior se han propuesto los siguientes valores para el porcentaje lateral desplazado en función del tipo de suelo.

- Arenas : 25%
- Limos : 50%
- Arcillas: 100%

La histéresis, es uno de los mayores inconvenientes que presenta la SWRC, ya que no hay una única relación cuantitativa, al contrario, hay una alta variabilidad, por lo que el estudio de la SWRC requiere de una alta demanda de ensayos de laboratorio, lo que conlleva elevados costos, y con ello, una dificultad al momento de implementar la mecánica de suelos no saturados en la práctica. No obstante, un gran número de investigadores ha reconocido el progreso paulatino de esta disciplina, acotando cada vez más las brechas entre la teoría y la práctica.

3.3.4.3. Preparación de probetas

Kawai et al. (2000), en la publicación “The Model of Water Retention Curve Considering Effects of Void Ratio”, se estudió los efectos del índice de vacíos inicial de la curva de retención de agua para suelos limosos de baja plasticidad (Figura 3-28, Figura 3-29 y Figura 3-30).

Kuwai, concluye que existe una relación exponencial entre el índice de vacíos y la succión asociada a la entrada del aire (Figura 3-28), es decir, que el valor de la entrada de aire se ve disminuida a medida que el índice de vacíos aumenta, o dicho de otra forma, el valor de la entrada de aire aumenta exponencialmente en la medida que la compactación aumenta. Del mismo modo, al aumentar el valor de la entrada de aire, disminuye el valor del contenido de agua residual, por lo que un mismo material, puede poseer distintas curvas de retención de agua, en función de la humedad inicial y de la densidad de la confección (Figura 3-29).

De la misma forma esto ocurre para la curva de humectación, en la cual varía el valor de la entrada de agua (Figura 3-30), homólogo al valor de la entrada de aire de la curva de secado, al variar el valor de la entrada de aire (AEV). Este valor de la entrada de agua se inicia desde un valor nulo, para una muestra que posea una relación de vacíos con ausencia de poros de aire, para luego comportarse de forma logarítmica en la medida que aumenta la relación de vacíos o disminuye la compactación.

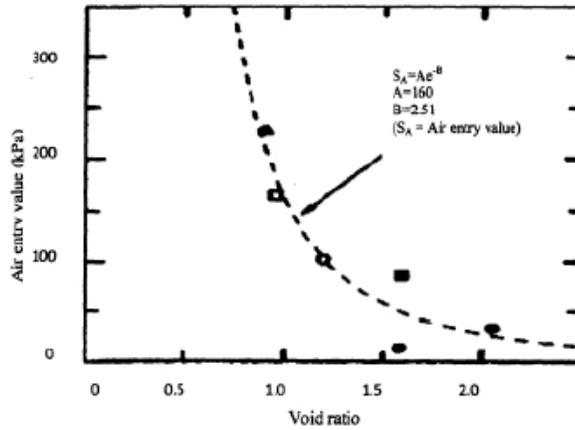


Figura 3-28: Efecto en el punto de entrada de aire (AEV) al variar el índice de vacíos inicial.
Fuente: Kuwai et al., 2000.

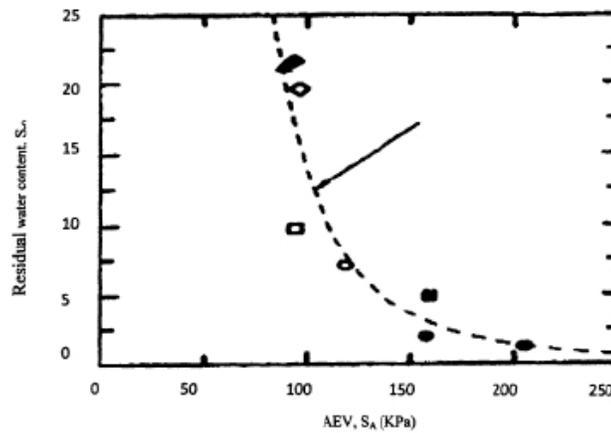


Figura 3-29: Efecto en el valor residual de la SWRC al variar en punto de entrada de aire (AEV).
Fuente: Kawai et al., 2000.

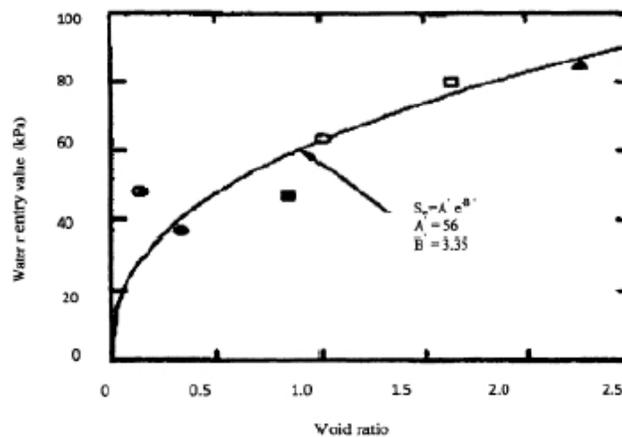


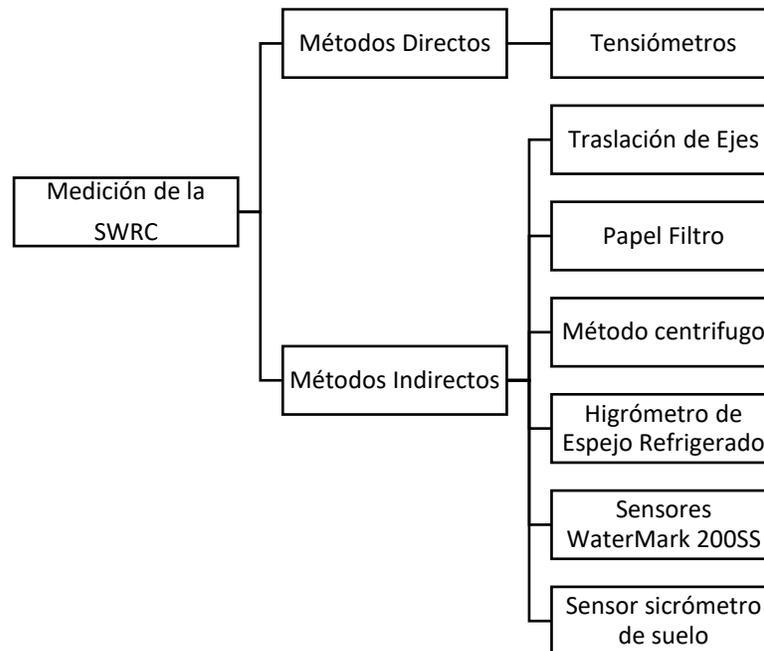
Figura 3-30: Efecto en el valor de la entrada de agua de la curva de humectación al variar el índice de vacíos.
Fuente: Kuwai et al., 2000.

CAPITULO IV

TÉCNICAS DE MEDICION DE SWRC EN LABORATORIO

4.1. General

Las técnicas de medición de la curva de retención de agua son variadas, y es posible realizar, entre toda la gama de métodos, un sin número de categorizaciones. Sin embargo, es posible realizar una categorización según la naturaleza de los métodos, específicamente, los métodos en los cuales la curva se obtiene de forma directa y los métodos en los cuales la curva se obtiene de forma indirecta (Figura 4-1).



*Figura 4-1: Categorización de las mediciones de la curva de retención de agua.
Fuente: Elaboración propia.*

El único método directo para la medición de la succión en suelos es mediante el uso de tensiómetros (Figura 4-2), donde el uso de estos artefactos está limitado al uso en la agronomía, debido a que su capacidad de medición de la succión está limitada, debido a la cavitación prematura de estos instrumentos (0-100 [kPa]).

En cuanto a los métodos indirectos, existe una gran variedad, entre ellos encontramos los métodos enunciados en la norma ASTM 6836 – 02, denominada “Métodos de prueba estándar para la determinación de la curva característica de agua en un suelo en desorción, utilizando columna colgante, extracción de presión, higrómetro de espejo refrigerado y/o centrifugado”. Donde, el método de la columna colgante (Método A),

posee un limitado campo de aplicación, ya que al igual que los tensiómetros, su rango de uso es pequeño y sólo entrega valores de la parte inicial de la curva de desaturación, es decir, sólo es capaz de obtener valores de succión influenciados por la humedad proveniente del agua gravimétrica (0-80 [kPa]). Los denominados métodos de extractores por presión, que utilizan el método de traslación de ejes poseen rangos de medición entre los 0 a 1500 [kPa], donde se especifica el método B para la medición directa del contenido volumétrico y el método C para el contenido gravimétrico de humedad de la curva de retención de agua. El método del higrómetro de espejo refrigerado (Método D), al ser un método altamente sofisticado, posee un campo de aplicación mucho mayor, determinando la parte seca de la curva, es decir, succiones entre 500 [kPa] hasta los 100 [MPa], succiones que corresponden a la parte final de la curva de desaturación, por lo tanto, es capaz de retirar el agua higroscópica de la muestra. Finalmente, el método centrífugo (Método E), logra obtener valores bajos de succión, con un rango comprendido entre 0 y 120 [kPa]. Cabe destacar que ninguno de los métodos anteriores logra entregar la curva de forma íntegra (Figura 4-4), sin embargo, utilizando una combinación de estos métodos es posible obtener la curva experimental de forma íntegra.



Figura 4-2: Tensiómetros modelo Irrrometer.

Fuente: Manual de referencia para el indicador de humedad, Irrrometer 2015.

No obstante, el método indirecto del papel filtro, especificado en la norma norteamericana ASTM D5298, logra obtener la curva de retención de agua en su totalidad, con mediciones de relativa sencillez, por lo que su uso es de mucha utilidad al ser también un método económico y aplicable a la obtención de la succión en terreno, ya que este método percibe el estado energético (succión) al que se encuentra un suelo en un determinado instante, a diferencia del método de traslación de ejes, por ejemplo, que induce externamente el estado energético al aplicarle una presión positiva equivalente a la succión del suelo.

Adicionalmente a los métodos convencionales antes mencionados, existen métodos modernos para la medición de la succión, como lo son el sensor digital tipo Watermark 200SS o el sicrómetro de suelo. El sensor Watermark está compuesto por dos electrodos incrustados en un material de referencia, el cual está rodeado por una membrana sintética porosa y por una malla protectora de acero inoxidable. El proceso de medición lo realiza mediante cambios en la resistencia eléctrica entre los electrodos, producto del movimiento del agua, donde esta resistencia es asociada a una succión del suelo. El rango de medición del sensor tipo Watermark es entre 2 y 200 [kPa], con mediciones más precisas para succiones mayores a 8 [kPa] (Aubertin et al., 2001). En cuanto al sicrómetro de suelo, fue presentado por primera vez por Spanner (1951) y desde entonces ha sido ampliamente utilizado para medir succión total (e.g. Gee & Ward, 2000; Agus & Schanz, 2005). Esta técnica se basa en los equilibrios térmicos y de vapor entre el suelo y el espacio de vapor, donde en condiciones de equilibrio de vapor, el potencial de agua de un ambiente poroso está directamente relacionado con su presión

de vapor de aire. Por ello, es posible determinar la succión matricial del suelo midiendo la humedad relativa de un espacio dentro de una celda porosa, la cual está en equilibrio con la solución del suelo (Campbell & Gardner, 1971). Un sicrómetro está compuesto de una cámara de aire hecha de cerámica o un tamiz donde se instala un termopar. La humedad relativa en la cámara de aire se calcula de la diferencia de temperatura entre el bulbo del termopar húmedo y seco, obteniendo un rango de mediciones de succión entre 50 y 3000 [kPa] (Guía para el diseño de coberturas de depósitos de residuos mineros, 2007).

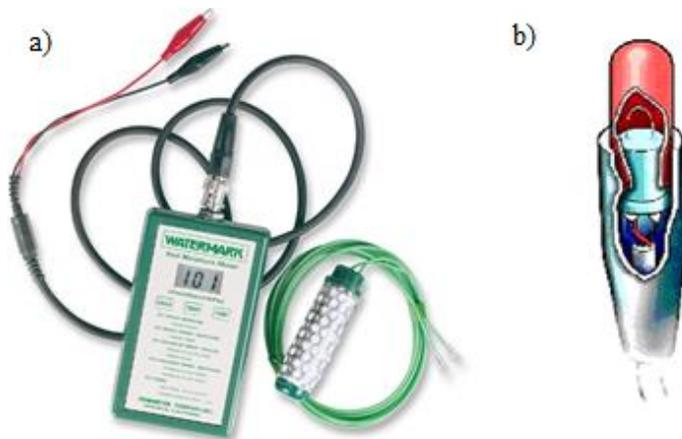


Figura 4-3: Sensores de succión de suelos a) Sensor WaterMark 200SS, y b) Sensor sicrómetro de suelo.
Fuente: Guía para el diseño de coberturas de depósitos de residuos mineros, 2007.

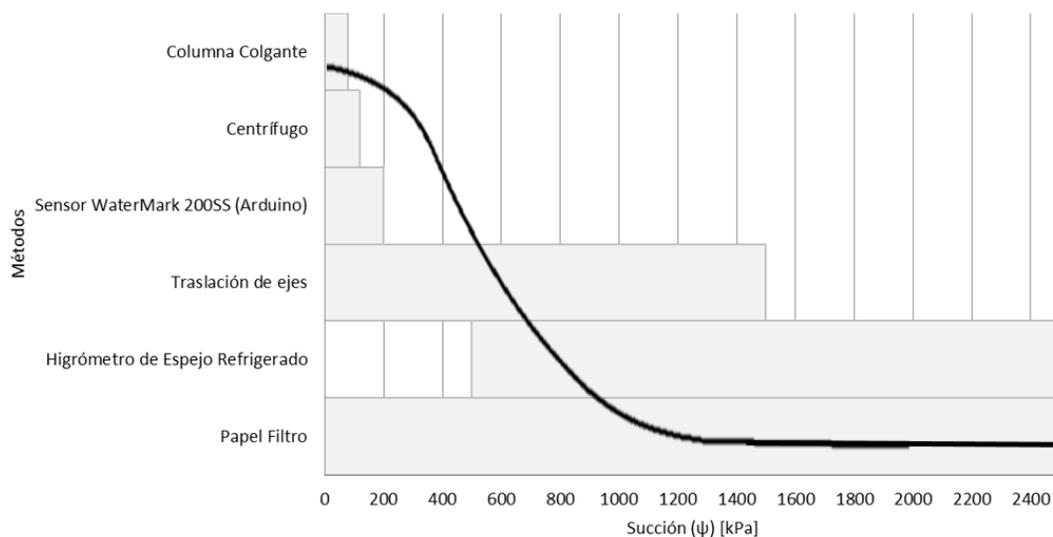


Figura 4-4: Rango de validez de algunos métodos de medición de la curva de retención de agua, asociados a una curva de retención de agua tipo.
Fuente: Elaboración propia.

4.2. Técnica de Traslación de Ejes en Cámara de Presión para Múltiples Muestras

Este método ideado por Hilf (1956), es aplicable a suelos de textura fina, en la cual, es posible determinar las propiedades producto del contenido de humedad y las relaciones de succión matricial usando para ello la cámara de presión con plato poroso. El rango de validez del método consta desde 10 [kPa] aproximadamente, hasta 1500 [kPa], punto asociado comúnmente a una succión residual.

El método consta de la desaturación de muestras de suelo, inicialmente saturadas, que se colocan sobre una placa porosa, igualmente saturada, que a su vez se colocan dentro de una cámara de presión, a la cual, se le somete a incrementos sucesivos de presión para de esta manera obtener la curva de retención de agua en su totalidad. La parte inferior del plato poroso está cubierto por una membrana de goma que posibilita la recolección de agua que pasa a través del plato poroso, donde la parte inferior de cada plato se mantiene a presión atmosférica, esto es posible ya que se encuentra unido con un pequeño tubo de drenaje, que a su vez, se encuentra unido a un costado de la cámara para la extracción definitiva del agua. La presión de aire deseada es posible aplicarla mediante el uso de un regulador de presión que provoca una sobre-presión en la parte superior del plato poroso, que en consecuencia, crea un gradiente de presión en el plato poroso. Las muestras de suelo inicialmente saturado, establecen un equilibrio con el agua del plato, donde el agua mantenida a una tensión menor que el gradiente del plato poroso, se moverá fuera del suelo, a través de la placa y hacia afuera de la cámara a través del tubo de drenaje. Finalmente, cuando el agua deje de fluir al exterior de la cámara, se tendrá el equilibrio para esa tensión en particular, y con ello, se determina el contenido de humedad de la muestra, obteniendo de esta manera, el par ordenado succión – humedad que determinan un punto en la curva de retención de agua. Es por ello, que es necesario una serie de estas pruebas a varias presiones para conseguir una curva en su totalidad de un tipo de suelo en particular.

Dentro de los principales componentes del método se encuentra el suministro de aire comprimido, regulador de presión, la cámara de presión y el o los platos porosos (Figura 4-5).

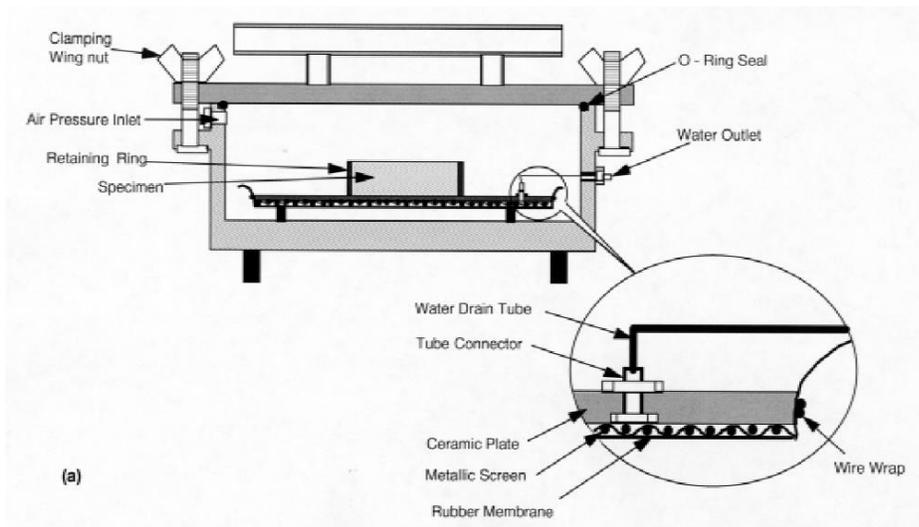


Figura 4-5: Técnica de traslación de ejes, cámara de presión con plato poroso para múltiples muestras.

Fuente: ASTM D6836 – 02.

4.3. Método papel filtro

Este método de ensayo utiliza los papeles filtrantes de laboratorio como sensores pasivos para evaluar la succión matricial y la succión total de un suelo. Donde, para la medición de la succión matricial es necesario que el papel se encuentre en contacto directo con el suelo, mientras que para la succión total, el papel se debe encontrar en equilibrio con la presión parcial de vapor de agua en el aire (Figura 4-6).

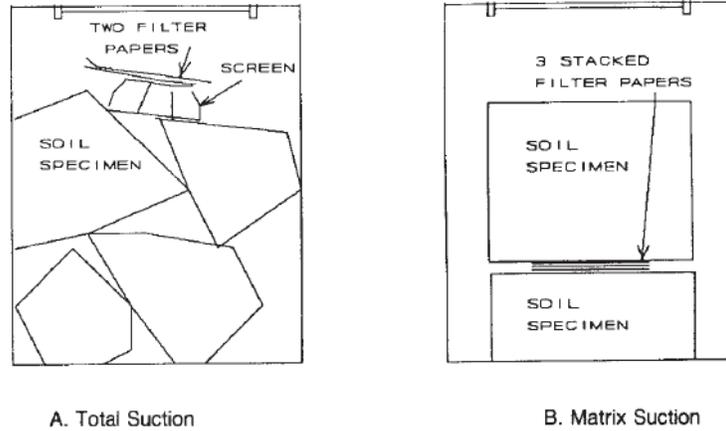
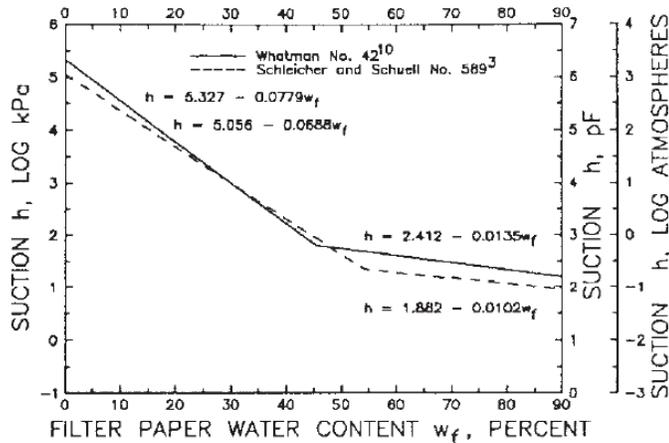


Figura 4-6: Disposición de papeles filtro para succión total y succión matricial.
Fuente: ASTM D5298.

Las mediciones deben ser dentro de un contenedor hermético donde el papel filtro se adhiere con la muestra de suelo hasta que se establezca el equilibrio de humedad, es decir, que la presión parcial de vapor de agua en el aire está en equilibrio con la presión de vapor de agua porosa en la muestra de suelo. Este periodo oscila dependiendo el contenido de humedad de la muestra a analizar, pero con un límite superior de 7 días. La masa de los papeles filtros se determinan posteriormente, donde la succión de la muestra se obtiene mediante una relación matemática de calibración en función del contenido de agua del papel filtro (Figura 4-7).



NOTE 1—Coefficient of determination $r > 0.99$.

Figura 4-7: Curva de calibración de papel filtro para Whatman n° 42 y Schleicher n° 589.
Fuente: ASTM D5298.

CAPITULO V

DEPOSITOS DE RELAVES Y EL COMPORTAMIENTO NO SATURADO

5.1.Introducción

Los residuos sólidos producto de la extracción de minerales en las plantas mineras son denominados relaves, constituidos principalmente por una suspensión fina de sólidos provenientes del yacimiento minero en agua. Esta mezcla de sólidos en agua, se le denomina pulpa, la cual puede estar a una razón agua/sólidos del orden de 1:1 a 2:1. Donde el comportamiento y sus propiedades dependerá de la razón agua/sólidos, como así también, de las características de las partículas sólidas (Ramirez, 2007).

Para determinar que alternativa a utilizar en la depositación de los relaves es necesario estimar las características de los relaves que produce la planta, del costo de los recursos hídricos y de las características del lugar de emplazamiento del depósito de relaves.

No obstante a lo anterior, para conseguir estructuras estables es necesario determinar las propiedades básicas de estos materiales como lo es la granulometría, densidades, índice de vacíos, entre otras. Estas características permiten entre otras cosas, evaluar el cumplimiento de las disposiciones legales nacionales contenidas en el Decreto Supremo N° 248 “Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de depósitos de relaves”, del Ministerio de Minería.

5.2.Depósitos de Relaves

Para comprender la desaturación de relaves, primeramente, es necesario precisar que tipos de relaves existen, por lo que a continuación se establece una breve reseña de los tipos de relaves que existen hoy en día en la realidad nacional, y cuáles son sus principales características. Los distintos tipos de depósitos de relaves que son considerados en la actualidad en Chile son los indicados en el Decreto Supremo N° 248, “Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de depósitos de relaves”, son los que se detalla a continuación.

5.2.1. *Tranques de relaves*

Corresponden a estructuras que disponen de muros perimetrales compuestos por la fracción más gruesa de los relaves, obtenida mediante clasificadores denominados hidroclones. El proceso de ciclonaje, separa la fracción de más gruesa del relave integral para ser utilizada en la construcción del muro, mientras que la fracción más fina llamada lamas, es depositada en la cubeta del depósito a un contenido de sólidos del 40-50%, las que al ser depositadas sobre el borde interno del talud del muro, ayudan a la impermeabilización del mismo.



Figura 5-1: Muro perimetral tranque de relaves, levantado con fracción gruesa obtenida mediante proceso de ciclonaje.

Fuente: Portal minería chilena.

La construcción de los muros de los depósitos de relaves se realiza en la medida que los relaves son depositados en la cubeta, en el caso particular de los tranques de relaves, el muro es posible realizarlo de tres formas, dependiendo de la ubicación del vertido de la fracción gruesa ciclonada.

5.2.1.1. Construcción aguas arriba

Este método consiste en la construcción de un muro inicial de empréstito compactado, desde el que se depositan las arenas ciclonadas hacia el talud aguas arriba, mientras que la fracción fina o lamas son depositadas en la cubeta del depósito. Una vez que el depósito está próximo a llenarse se procede a un levantamiento del muro, desplazando los aspersores de la fracción gruesa a una mayor elevación en la dirección aguas arriba, iniciando un nuevo ciclo de descarga (Figura 5-2).

Este procedimiento es bien llamativo, debido a la poca cantidad de material necesario para la construcción del muro, produce muros menos resistentes ante sollicitaciones sísmicas. Debido a lo anterior, es que la normativa vigente en el país prohíbe la construcción de este tipo de tranques de relaves.

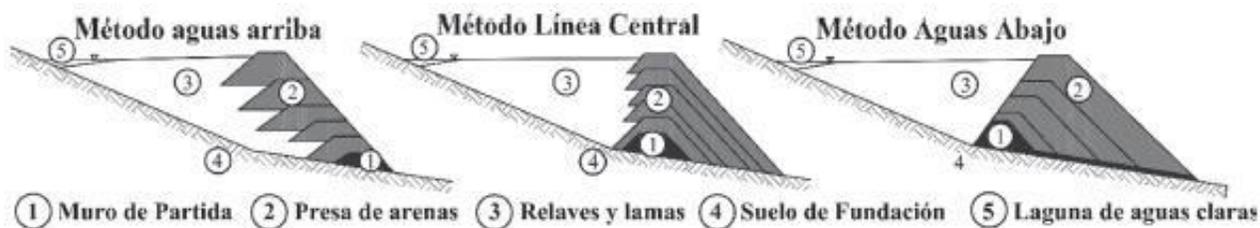


Figura 5-2: Esquema de construcción mediante el procedimiento aguas arriba, aguas abajo y eje central.

Fuente: Ramírez, 2007.

5.2.1.2. Construcción aguas abajo

Al igual que el proceso de construcción aguas arriba, se construye un muro inicial de empréstito compactado, sin embargo, la arena ciclónica o fracción gruesa se deposita sobre el talud aguas abajo del muro y las lamas o fracción fina en la cubeta. Una vez que el muro se ha peraltado lo suficiente, se procede a su levantamiento, para lo cual, los aspersores de la fracción gruesa ciclónica se desplazan a una mayor elevación en dirección aguas abajo (Figura 5-2), comenzando un nuevo ciclo de descarga.

Este proceso requiere un gran volumen de arenas para su construcción, pero permite la construcción de muros más estables desde el punto de vista de resistencia sísmica.

5.2.1.3. Construcción por el método de eje central o mixto

De la misma manera que los procesos de construcción anteriores, se inicia la construcción del muro mediante un muro de empréstito compactado, sobre el cual se depositan las arenas cicloneadas hacia el talud aguas abajo mientras que las lamas o fracción fina hacia el talud aguas arriba. A diferencia de los métodos anteriores, el proceso de construcción de eje central, en el momento próximo al llenado, se eleva la línea de alimentación siguiendo el mismo plano vertical inicial de la berma de coronamiento del muro de partida (Figura 5-2), es decir, sobre la proyección vertical del muro de empréstito.

Este proceso requiere un volumen de arenas intermedio respecto de los dos métodos anteriores, permitiendo lograr muros suficientemente estables (Ramírez, 2007).

5.2.2. Embalses de relaves

A diferencia de los tranques de relaves, los muros de los embalses de relaves son construidos íntegramente con material de empréstito compactado, impermeabilizando adicionalmente el talud del borde interior del muro y también parte o todo su coronamiento. En cuanto a la depositación de los residuos mineros o relaves se depositan directamente en la cubeta, sin necesidad de clasificación, a un contenido de sólidos cercano a 40% (i.e. similar a los tranques de relaves), adicionando un sistema de evacuación de las aguas claras en la laguna. Este tipo de construcción de depósitos de relave no se diferencian en gran medida a las presas de embalses de aguas, por lo que su conocimiento es ampliamente conocido en todo el mundo.

Cabe destacar, que este tipo de construcción de depósitos de relave es más resistente, desde el punto de vista sísmico, que cualquiera de los métodos presentados anteriormente.



Figura 5-3: Embalse de relaves de Syncrude, Canadá.
Fuente: Mining Journal.

5.2.3. Depósitos de relaves espesados

Este tipo de relaves se basa en un procedimiento en la mayor viscosidad que alcanza la pulpa de relaves al aumentar la concentración de sólidos (valores usuales entre 65 al 75%), los cuales son depositados en forma cónica. Si bien, este tipo de relaves no requiere la construcción de muro, como los anteriores presentados, ya que es considerado un sistema autosoportante, con mayor estabilidad estática y sísmica que los anteriores, se recomienda la construcción de un pequeño terraplén algo alejado del borde exterior del depósito, el cual sirve de contención del agua remanente liberada por el relave, la cual es captada para ser bombeada y recirculada.

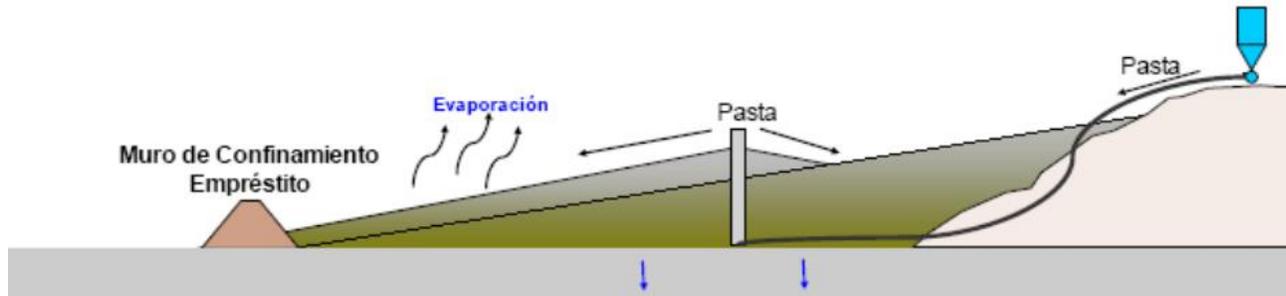


Figura 5-4: Esquema de depositación relaves espesados.

Fuente: Galaz, 2011.

5.2.4. Depósitos de relaves filtrados

Para este tipo de relaves, cuya depositación es similar a los depósitos de relaves espesados, sólo difiriendo a los anteriores debido a que estos poseen aún menos contenido de humedad, debido al proceso de filtrado similar al proceso de filtrados de concentrados, como los filtros de prensa o de vacío. Es importante señalar que si bien el contenido de humedad se logra entorno al 20-30% (i.e. contenido de sólidos entre 75 a 85%) y permite su manejo con equipos de movimiento de tierras, su humedad es suficientemente alta para tener un relleno prácticamente saturado, por lo que es posible que se produzcan infiltraciones importantes de las aguas contenidas en estos relaves si el suelo de la fundación es relativamente permeable (Ramírez, 2007).



Figura 5-5: Depósito de relaves filtrados.

Fuente: Ramírez, 2007.

5.2.5. *Depósitos de relaves en pasta*

Finalmente, los relaves en pasta corresponden a una mezcla de agua con sólidos, compuestos por una gran fracción fina y con un bajo contenido de agua (contenido de sólidos entre un 70 y 80%), de modo que esta mezcla contenga una consistencia espesa, similar a una pulpa de alta densidad. Una buena pasta de relaves requiere tener al menos un 15% de concentración en peso de partículas de tamaño menor a 20 micrones (Ramírez, 2007).



Figura 5-6: Relaves en pasta.

Fuente: Mining Journal.

5.2.6. *Otros tipos de depósitos*

Además de las tecnologías de depositación de relaves antes mencionadas, existen otros tipos de relaves que en otros países son factibles de desarrollar, sin embargo, en Chile actualmente existen grandes restricciones de las autoridades, desde el punto de vista legal, la seguridad de las personas y el medio ambiente, para otorgar permisos a los proyectos que pudiesen presentarse, de tal modo que no se contempla en la legislación chilena, no obstante se debe reconocer que en el pasado se realizaron proyectos en el país que utilizaron otras técnicas (Ramírez, 2007), tales como:

- Depósitos en minas subterráneas en explotación,
- Depósitos en minas subterráneas abandonadas,
- Depósitos en minas explotadas a cielo abierto,
- Depósitos de relaves radioactivos,
- Depósitos costeros, y
- Depósitos submarinos.

5.2.7. *Depósitos en Chile*

En la actualidad los depósitos de relaves en Chile, presentan una distribución por tipo de relaves centrada básicamente en los tranques y embalses de relaves (Figura 5-7), sin embargo, debido a las ventajas tanto físicas como químicas, de los relaves con composición más seca es de esperar que el futuro de los relaves, tanto a nivel nacional como internacional, se centre en los depósitos con un vertido a contenido de sólidos mayor.

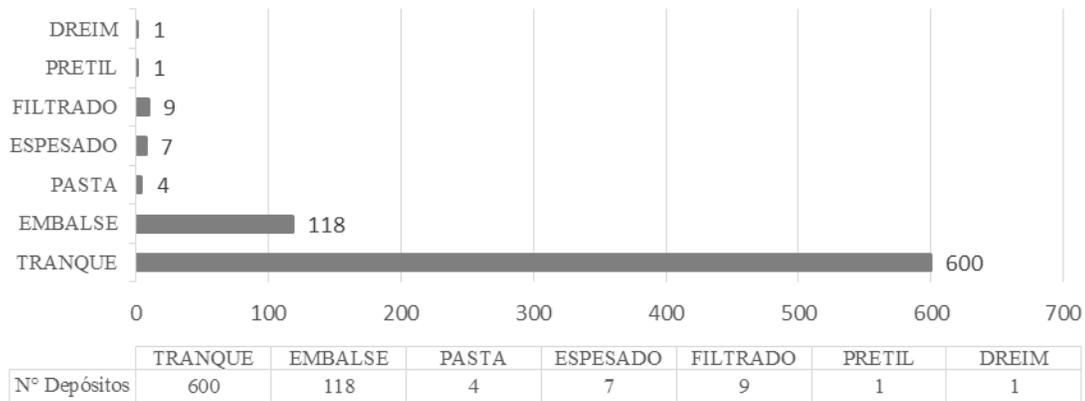


Figura 5-7: Cantidad de relaves según tecnología de depositación.

Fuente: Modificado de Análisis del Catastro de Depósitos de Relaves en Chile y guía de estructura de datos, 2018.

Adicionalmente, se puede mencionar que la gran mayoría de los depósitos de relaves presentes en el territorio nacional son constituidos como pulpa de relaves producto de la obtención de cobre-oro-plata-molibdeno (Figura 5-8).

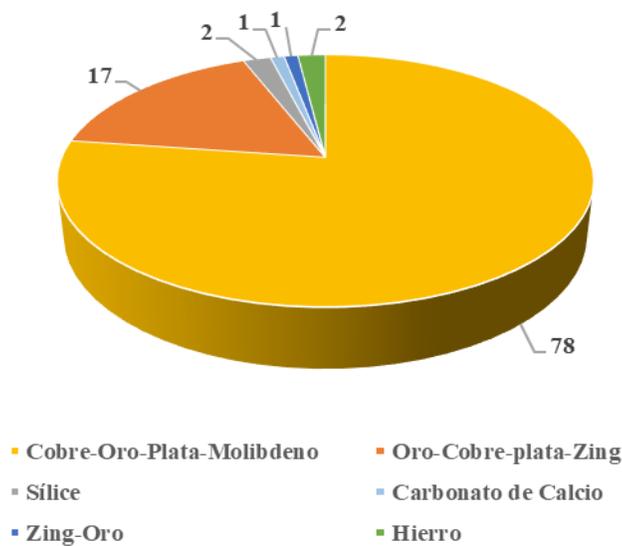


Figura 5-8: Distribución de depósitos activos según el recurso de extracción.

Fuente: Modificado del Análisis del Catastro de Depósitos de Relaves en Chile y guía de estructura de datos, 2018.

5.3. Comportamiento no saturado

La mayor parte de los relaves, indistintamente su tipo, se han construido mediante un sistema de relleno hidráulico, es decir, los residuos de la extracción de los minerales de interés constituidos por roca finamente molida y mezclada con agua tomando una consistencia de lodo para facilitar su transporte a través de tuberías o canales hasta el o los depósitos de relaves. Habitualmente la proporción respecto del contenido de sólidos ronda entre los 30 a 40 % para el caso de embalses de relaves y 40 a 50 % para el caso de tranques de relave (Rodríguez y Oldecop, 2011), los cuales corresponden aproximadamente al 97 % de los depósitos de relaves existentes en el país (Catastro de Depósitos de Relaves en Chile y guía de estructura de datos, 2018). En estos

tipos de depósitos de relaves, debido a su condición de fluido semisólido, ocurre un proceso de segregación en la medida que la pulpa de relaves fluye sobre la superficie hasta la laguna de decantación (o laguna de aguas claras).

5.3.1. *Influencia del agua capilar en la interacción con la atmósfera*

Grandes volúmenes de agua se presentan por sobre el nivel freático en un depósito de relaves, la cual se encuentra en una condición parcialmente saturada o no saturada. Esto es debido a la capacidad de los suelos finos (e.g. relaves), para provocar el ascenso capilar por sobre el nivel freático. Dicha característica se puede apreciar en una zona varios metros por sobre el nivel freático, en donde el grado de saturación puede permanecer muy cercano a la unidad por causa de este fenómeno (Oldecop y Rodríguez, 2006). Luego, una complicación que puede constituir este tipo de fenómenos es que el agua capilar no puede ser drenada por gravedad, y además, su presencia no es posible detectarla mediante el uso de piezómetros (Rodríguez y Oldecop, 2011).

El vertido de relaves se suele realizar durante muchos años, por lo que en conjunto de los fenómenos meteorológicos, provocan que exista un flujo de agua permanente dentro de la estructura, causando un constante cambio de condiciones saturadas a no saturadas y en un régimen transitorio durante toda la vida de los depósitos de relaves. El proceso de vertido de relaves al depósito constituye un aporte de agua relevante, los cuales al momento de escurrir por la superficie de la estructura hasta la laguna de aguas claras, se someten a un proceso de segregación de sus partículas por tamaño (para el caso de los relaves segregables), desde el más grueso al más fino (Blight, 1994). Lo anterior, causa que las estructuras de relaves posean una mayor permeabilidad cerca de los bordes que en el centro o en la zona de ubicación de la laguna de decantación. Esto provoca, que al alejarse de la zona de vertido de relaves, varíe su granulometría, y con ello también variarán las propiedades capilares, que son expresadas específicamente en la curva de retención de agua (SWRC).

En general, los relaves son constituidos por una granulometría muy fina, y debido a ello, poseen una gran capacidad de producir un ascenso de agua capilar, desde el orden de unos cuantos centímetros, hasta una decena de metros sobre el nivel freático, lo cual está mayormente controlado por la superficie específica y la capacidad de absorción (Rodríguez, 2009). La interacción con la atmósfera se produce en la zona más superficial, donde, si el nivel freático se encuentra lo suficientemente superficial, provoca que el ascenso capilar interactúe con la atmósfera y de esta manera se inicia la evaporación y el secado de la zona no saturada, que a su vez es recargada con el continuo ascenso capilar del agua desde el nivel freático.

La forma y posición de la laguna de decantación a través de la infiltración de esta hacia la fundación condicionan la forma y posición de la superficie freática dentro del depósito de relave. Esta forma o posición de la laguna de decantación puede variar durante episodios de lluvia o deshielos, donde parte del agua que llega a al depósito de relaves se infiltra, cambiando transitoriamente la condición de parcialmente saturado a saturado, y el resto se deposita finalmente en la laguna de decantación, donde si un evento meteorológico causa que una cantidad relevante de agua llegue al depósito de relaves, lo cual puede favorecer al cambio del nivel freático (Rodríguez y Oldecop, 2011).

Un particular efecto tiene el comportamiento de los depósitos de relaves en caso de lluvia, ya que el agua infiltrada satura rápidamente los poros ya parcialmente llenos con agua capilar, causando un ascenso del nivel freático. Luego, al examinar el comportamiento del depósito de relaves después de pasada la tormenta, se descubre que el proceso de descenso de la superficie freática, una vez detenido el aporte externo de agua, se desarrolla en un periodo de tiempo más extenso que el de ascenso (Rodríguez y Oldecop, 2011). Dicho efecto, se debe a la baja conductividad hidráulica de los relaves, que hace que el proceso de drenaje sea más lento. Lo anterior, puede desencadenar en fallas del depósito ante eventos repetitivos en un corto periodo de tiempo, debido a los efectos acumulativos que se puede presentar (Rodríguez y Oldecop, 2011).

5.3.2. Efectos del contenido de agua

Una solución de relaves o pulpa de relaves con una cantidad suficiente de agua se comportará como un fluido viscoso, y en la medida que disminuye el contenido de agua en la solución o pulpa de relaves, aumentará su viscosidad, y eventualmente para contenidos de agua suficientemente bajos, se comportará como un suelo húmedo.

Experimentalmente y de manera general es posible señalar que para razones suelo/agua menores que un 50%, la pulpa de relaves se comporta como una suspensión acuosa, que escurrirá a pendientes menores a un 2%, produciéndose una segregación de las partículas por tamaño en la medida que aumente la distancia al punto de descarga. Para razones suelo/agua mayores que un 55%, la pulpa de relaves comienza a adquirir una mayor viscosidad y a adquirir mayores propiedades resistentes disminuyendo, además, la segregación de las partículas necesitando pendientes mayores al 2% para su escurrimiento (Ramírez, 2007).

Generalizando para la pendiente límite y tipos de relaves, es posible establecer que la pendiente límite que admite una pulpa de relaves para distintas concentraciones de sólidos en peso (Tabla 5-1), en la cual es posible apreciar que en la medida que aumenta la cantidad de sólidos en la pulpa de relaves (i.e. disminuye la cantidad de agua en la mezcla), aumenta la pendiente límite (i.e. pendientes mayores a la pendiente límite producirá escurrimiento).

Tabla 5-1: Variación de la pendiente límite con la concentración de sólidos en una pulpa de relaves.

Fuente: Modificada de Ramírez, 2007.

Pendiente Límite [%]	Porcentaje de Sólidos en Peso [%]
<2	<50
2-3	55-60
3-5	60-63
4-6	63-65
>6	>65

5.3.3. Conductividad hidráulica

La permeabilidad de un suelo está directamente relacionada con el contenido huecos continuos e interconectados presentes en un cierto perfil de suelos (Figura 1-1), de forma tal que el agua pueda fluir a través de ellos. Al movimiento del agua a través de un suelo o relave se le denomina comúnmente infiltración o filtración y se mide a través de la permeabilidad.

El flujo de agua a través de un suelo se debe principalmente debido a la diferencia de presiones entre dos puntos, sin embargo, también puede verse afectado por flujos capilares producto de la succión del suelo.

De manera general, es posible decir que para estratos de suelos saturados, se cumple que la velocidad de descarga, v , del suelo se tiene lo siguiente:

$$v = k * i$$

Donde:

v Velocidad de descarga [cm/s],

i Gradiente hidráulico [cm/cm], y

k Conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad [cm/s].

Luego la determinación de la conductividad hidráulica es esencial al momento de determinar la infiltración, la cual depende principalmente de la granulometría de las partículas que componen el suelo y de la densidad de la misma. Por lo que la conductividad hidráulica que los relaves poseen está determinada por un rango de valores amplios, sin embargo pequeño en cuanto a los suelos naturales, debido a su origen antrópico de granulometría fina y relativamente más uniforme que los suelos de origen natural. Los suelos de origen natural poseen un rango de valores desde 10^{-2} [cm/s], para arenas permeables, hasta 10^{-9} [cm/s], para arcillas compactas, sin embargo, este rango sólo está comprendido desde 10^{-4} [cm/s], para relaves gruesos poco consolidados, hasta 10^{-8} [cm/s], para relaves finos consolidados.

No obstante, la conductividad hidráulica es influenciada por el grado de saturación del suelo o relave, disminuyendo en la medida que el grado de saturación disminuye. En la Figura 5-9 se presenta la variación de la conductividad hidráulica en función de la succión del mismo, en la cual cada curva definida es un suelo tipo caracterizado según la USCS. Cabe destacar que generalmente los relaves poseen una clasificación de tipo ML, CL y SM, es decir, limos inorgánicos con poca o nula plasticidad, arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media y arenas limosas respectivamente. Según Khire et al. (2000), las clasificaciones anteriores tienen un rango de conductividad hidráulica saturada desde 10^{-4} [cm/s], para los relaves más gruesos, hasta 10^{-9} [cm/s], para relaves más finos, las cuales disminuyen con el aumento de la succión del suelo, es decir, en la medida que el grado de saturación disminuye.

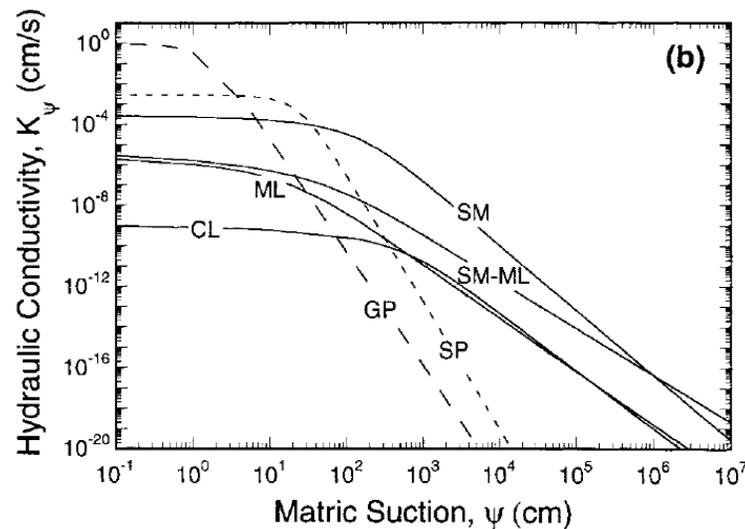


Figura 5-9: Conductividad hidráulica para suelos parcialmente saturados.
Fuente: Khire et al., 2000.

Ya habiendo mencionado la influencia de la granulometría en la conductividad hidráulica o permeabilidad, se debe mencionar que el grado de compactación, reflejada como la densidad relativa, posee una notoria influencia en la permeabilidad, ya que al disminuir la razón de vacíos se disminuyen la disponibilidad de huecos interconectados que permitan el paso del agua a través de ellos.

Una práctica común en el manejo de los relaves es compactar el relave a una densidad relativa suficiente de tal manera de disminuir el riesgo de licuefacción provocando, además, la reducción de la permeabilidad del material, sin embargo, al disminuir la relación de vacíos y con ello el tamaño de los micro conductos, se aumenta la capilaridad del material y como consecuencia el aumento del ascenso de agua capilar en el material.

5.3.4. Estabilidad Física

El funcionamiento hidráulico de los relaves está condicionado por una serie de factores que provienen tanto del entorno, como también del interior del proceso minero, ya que el mismo proceso de vertido de nuevos relaves involucra un importante aporte de agua al depósito. Los factores provenientes del entorno provienen de numerosas fuentes, algunas procedentes de la atmósfera y otras inducidas por la operación de los depósitos, como lo son, la lluvia, los deshielos, evaporación, extracción de agua excedente de la laguna de decantación por bombeo, ingreso de agua subterránea, drenaje de agua desde la fundación o a través del muro, por mencionar algunas. Otro tipo de factores que condicionan el funcionamiento hidráulico de los depósitos de relaves, son los derivados de las propiedades físicas de los relaves como lo es la consolidación, infiltración, escurrimiento superficial y el ascenso capilar, que son propios de un material de granulometría fina. Además, la variable que depende el régimen hidráulico de un depósito de relave, es el posicionamiento de la laguna de decantación (o laguna de aguas claras), la cual provoca gran influencia del nivel freático en el interior del depósito, el cual a su vez, tiene una influencia directa en la estabilidad del depósito de relaves (Rodríguez y Oldecop, 2011). En general, la operación de relaves busca mantener el nivel freático lo más deprimido posible y alejado de los taludes, ya que, el incremento de contenido de humedad del material disminuye sus propiedades de resistencia, acentuando la caída de los mismos para grados de saturación superior a 75 y 80% (Rodríguez, 2002, 2006).

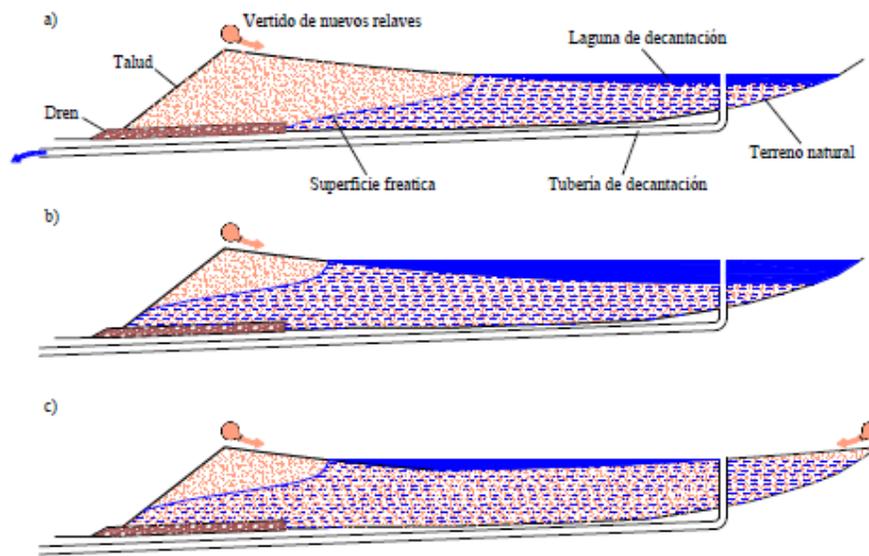


Figura 5-10: Vistas en elevación esquemáticas de depósitos de relaves en función de la posición y tamaño de la laguna de decantación.

Fuente: Rodríguez y Oldecop, 2011.

Una operación del depósito de relaves deseable es mantener el posicionamiento de la laguna de decantación lo más alejada de los bordes, específicamente del muro y con un tamaño razonablemente pequeño, i.e. mientras más alejada se encuentre la laguna de decantación del muro, mayor será la estabilidad del depósito de relaves (Rodríguez y Oldecop, 2011). Esto se puede apreciar en la Figura 5-10, en la cual dependiendo el tamaño de la laguna de decantación (b) o el posicionamiento de la laguna (c), puede causar influencia en el nivel freático, el cual, a su vez puede disminuir las propiedades de resistencia del muro del depósito de relaves.

El decaimiento de la resistencia con el aumento de la humedad es muy conocido en la ingeniería geotécnica, donde numerosos estudios han estimado la resistencia de las estructuras variando su contenido de humedad. Blight (1997) por ejemplo, evaluó la resistencia al corte de relaves saturados con diferente contenido de humedad (Figura 5-11), donde a bajas humedades se midió mediante el ensayo de veleta de corte y para

contenidos de humedad relativamente altos se utilizó un viscosímetro, debido al comportamiento como un líquido viscoso de los relaves. En la Figura 5-11, se aprecia la gráfica semi-logarítmica donde la resistencia decae abruptamente con el aumento de la humedad.

Considerando los factores antes mencionados, como lo son el grado de saturación, el tipo de depósito, la segregación por flujo, el nivel de compactación, relación de vacíos, granulometría, por mencionar algunos, características que definen el comportamiento de los relaves, como lo es la resistencia al corte y la permeabilidad.

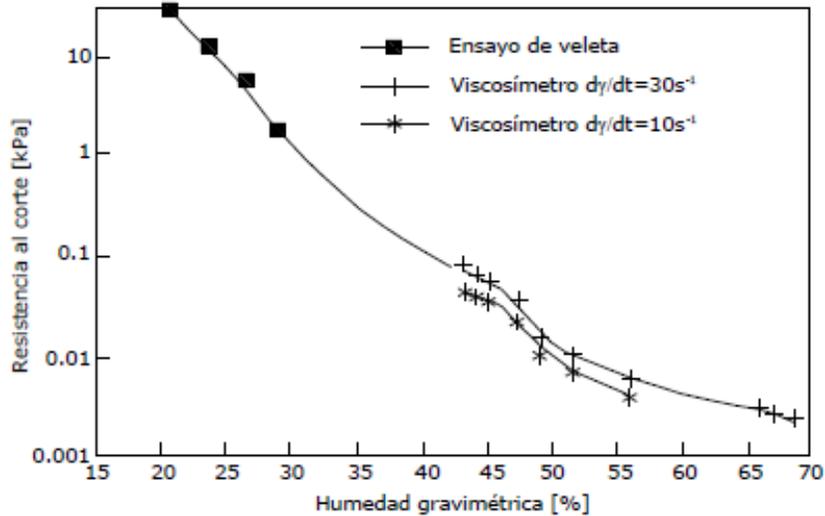


Figura 5-11: Resistencia al corte de relaves con diferente contenido de humedad.

Fuente: Blight, 1997.

Sin embargo, otro factor influyente en el comportamiento de los relaves, específicamente en la permeabilidad y la estabilidad física, es la estratificación que se produce en las zonas que se detiene el vertido debido a intermitencia del suministro de relaves causando capas de relaves con propiedades distintas a las capas aledañas (Figura 5-12). Es usual que el procedimiento de vertido de relaves implique un cambio periódico del punto de vertido, de manera que se posibilite el secado de los relaves y eventualmente agrietarse, donde al reanudarse el vertido son llenados apareciendo procesos erosivos que dan lugar a la generación de paleocanales. Estas grietas, que crean discontinuidades y heterogeneidades, dan pie a la formación de capas con características texturales muy diferentes. Por otro lado, el proceso de secado hace que entre capas de vertidos sucesivos se generen una superficie de discontinuidad que conduce finalmente a que el depósito presente una estratificación sub-horizontal (Rodríguez y Oldecop, 2011). Para el caso de los depósitos de relaves no segregables, es una práctica común que la intermitencia del vertido de relaves esté restringida hasta que la desaturación de cada capa alcance el límite de contracción del relave, es decir luego de la entrada de aire a la matriz de suelo (AEV), lo cual permite que los relaves solidifiquen, y de esta manera, se reduzca la infiltración a suelos basales, y además, aumentar la estabilidad física del depósito de relave, disminuyendo además su susceptibilidad a fallas por licuefacción.

Siguiendo esta línea de estudio, es posible caracterizar de mejor manera los relaves a través de la tensión de fluencia (yield stress), la cual tiene una relación directa con el contenido de humedad presente en el relave. De esta manera, la tensión de fluencia a través del comportamiento esfuerzo-deformación, permite estimar el comportamiento que tendrá el relave según su contenido de sólidos. Es así, como a través de la relación de tensión de fluencia-contenido de sólidos, es posible identificar las propiedades que contendrá un relave a cierto contenido de sólidos, pudiéndose establecer ciertas propiedades a partir de ella como se muestra en la curva cualitativa de la Figura 5-13, donde es posible observar las distintas clasificaciones como lo es el caso de los relaves tipo slurry, pastas y relaves filtrados, definiendo además una categorización por el grado de

espesamiento (Jewell, 2002), en slurrys de baja, media, alta y muy alta densidad, o el caso de la tipificación de los relaves como segregables y no segregables, (e.g. los relaves en pasta que se caracterizan igualmente por no presentar segregación en el proceso de depositación).



Figura 5-12: Estratificación diagonal y paleocanales en un perfil artificial de un depósito de relaves convencional segregable.

Fuente: Rodríguez y Oldecop, 2011.

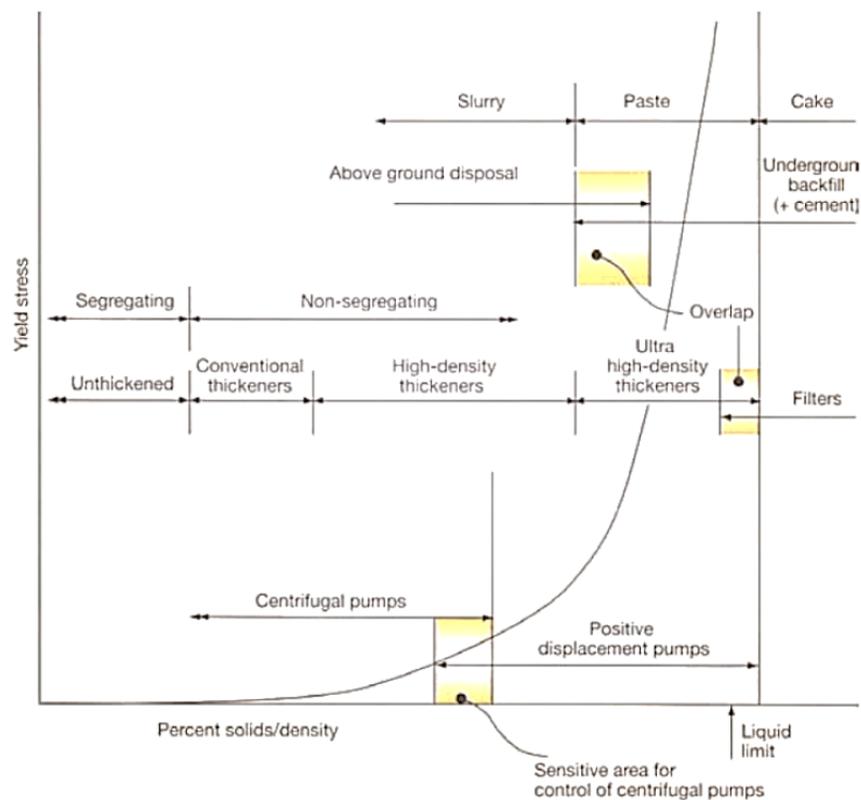


Figura 5-13: Tensión de fluencia según el contenido de sólidos del relave.

Fuente: Jewell & Fourie, 2006.

En general, esta clasificación es cualitativa debido a que no existen rangos cuantitativos claros debido a que estos dependen de la mineralogía y otras variables asociadas al tipo de arena de relave en análisis (Santos, 2011).

Por lo antes expuesto es que la importancia de un debido control de la humedad en conjunto de un buen manejo operativo de los depósitos de relave es esencial durante toda la vida de los relaves, inclusive en su etapa de cierre y/o abandono.

5.3.5. Drenaje Ácido

El drenaje ácido minero (DAM) o Acid mine drainage (AMD), es un fenómeno ampliamente conocido, que ha sido observado desde la antigüedad, donde el mineralogista alemán, Georgius Agricola (1556), se percató que al ser lavados los minerales, el agua utilizada envenenaba los arroyos y quebradas, destruyendo los peces o alejándolos, siendo probablemente esta, la primera referencia registrada sobre el impacto ambiental del drenaje ácido.

El fenómeno de drenaje ácido minero es producido como consecuencia de la oxidación de minerales sulfurados que han sido expuestos a humedad y condiciones oxidantes, generando una reducción del pH del agua de infiltración, y de esta manera favorece la formación de aguas ácidas, ricas en sulfatos y metales pesados, debido a la lixiviación de sulfuros metálicos (Aduvire, 2006), provocados por procesos de oxidación abiótica y oxidación biótica.

La importancia del estudio del DAM es debido a los efectos adversos que provoca en el medio ambiente (Aduvire, 2006), siendo los más importantes los siguientes:

- Afecta a ecosistemas acuáticos,
- Deteriora la calidad de las aguas, tanto superficiales como también subterráneas, afectando a comunidades,
- Impide el crecimiento de especies vegetales por la acumulación de hierros y de sulfuros que dificulta la penetración de raíces, y
- Dificulta la estabilización de los residuos mineros.

Por lo que la importancia de establecer medidas prevención y control es esencial en el manejo y operación de los depósitos de relaves.



Figura 5-14: Drenaje ácido en relaves.
Fuente: Portal SOCHIGE, 2015.

Los factores ambientales, ya sea naturales o de origen antrópico, regulan la generación de drenaje minero siendo los factores principales el agua y el aire. Donde, el clima o el grado de saturación al que se vea sometido el material, tendrá un impacto directo en la generación de drenaje ácido minero (DAM), tanto en la magnitud de la acidez generada, como en el tiempo de reacción (García, 2013).

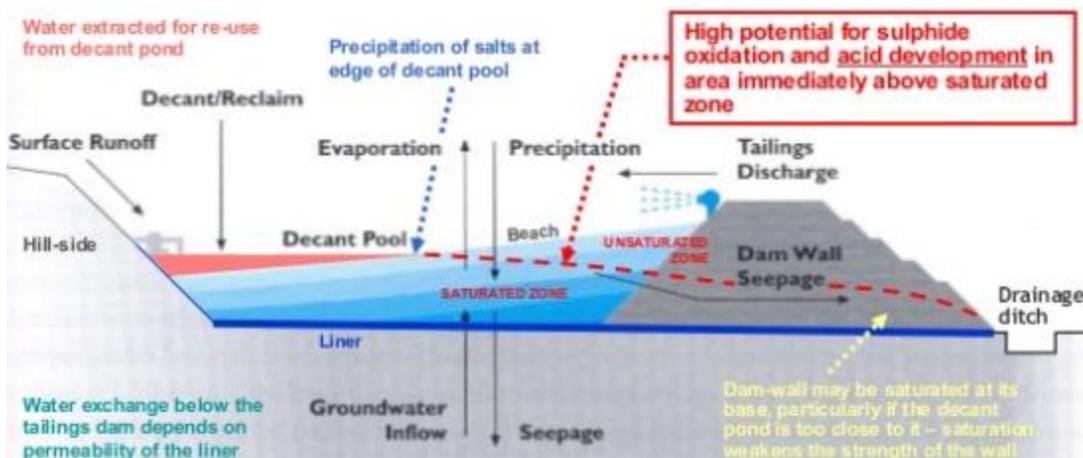


Figura 5-15: Esquema de drenaje ácido de relaves.
Fuente: Muller, 2015.

5.3.5.1. Medidas de control

Las medidas de control del DAM se pueden clasificar en activas y pasivas, donde se prefieren las segundas debido al bajo costo implicado en comparación con las medidas de control activas. Las medidas de control más conocidas en la actualidad (Aduvire, 2006), son las siguientes:

- Inocular con bacterias sulfato reductoras,
- Maximizar la calidad de minerales con ácidos neutralizándolos,
- Encapsular permanentemente los materiales ácidos,
- Precipitar mediante el uso de una base,
- Reducir la infiltración, y
- Minimizar el oxígeno y el agua infiltrada.

Las dos últimas medidas de control del drenaje ácido, son realizables mediante un buen drenaje de los relaves logrando disminuir el contenido total de agua en los depósitos, previniendo o controlando la formación del drenaje una vez generado, creando zonas no saturadas, que a su vez, en la medida que aumenta la desaturación, aumenta la estabilidad físicas del relave (Catastro de Medidas y Tecnologías para la Prevención, Control y Tratamiento del Drenaje Minero, 2015).

5.3.5.2. SWRC y el drenaje ácido

En la Figura 5-16 se aprecia el perfil en elevación del contenido de humedades de un relave y las elevaciones del nivel freático, donde se muestra la estratificación de la densidad de la depositación alternante en invierno y verano, causando que la saturación total se presente como un rango entre 22 a 27 % de contenido gravimétrico de agua. Además, es posible apreciar un nivel ascendente del nivel freático, y por consiguiente, una franja no saturada que responde a ese incremento. Esta franja no saturada se extiende por encima del nivel freático ubicado aproximadamente a los 4 metros de profundidad y alcanza un nivel de 1 metro, sin embargo, el grosor de esta franja no siempre tiene las mismas dimensiones, es decir, cuando el nivel freático desciende, la franja no saturada se alarga y cuando el nivel freático asciende, la franja no saturada se contrae. Además,

debido a la tensión superficial producida en los poros de las partículas provoca que la parte superior de la franja no saturada fluctúe su nivel en menor medida que el nivel freático (Woysner, 1994).

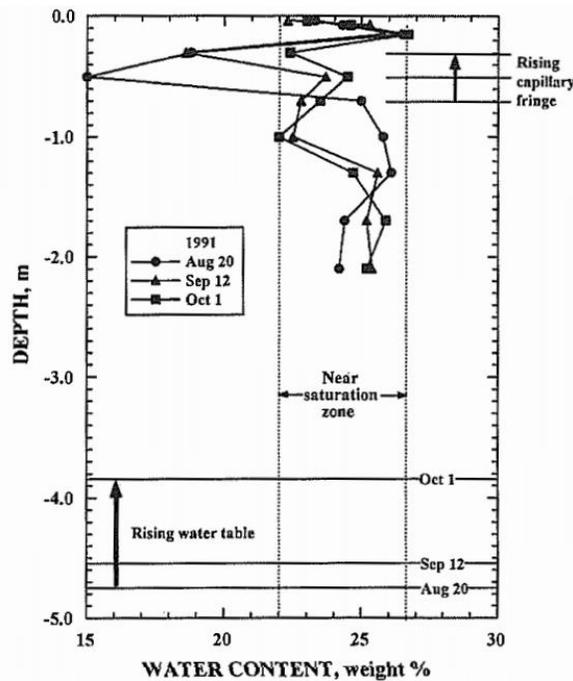


Figura 5-16: Perfil en elevación del contenido de humedades.
Fuente: Woysner, 1994.

Adicionalmente a lo antes mencionado, es posible realizar un análisis mediante la curva de retención de agua, donde en la Figura 5-17, es posible apreciar que hasta una succión de 6 metros (i.e. 60 kPa), no se produce un drenaje significativo de agua, luego, como esta succión es la ejercida en la parte superior de la franja no saturada, 6 metros es el espesor máximo previsto de la franja no saturada. Si el nivel freático cae bajo este nivel, los vacíos de mayor tamaño en la parte superior de la franja no saturada comienzan a drenar, y con ello fracturan la columna continua de agua. Sin embargo, la recarga de agua proveniente del vertido de agua o de eventos meteorológicos provocan que el espesor de la franja no saturada disminuya. Los vacíos más grandes en la parte superior de la franja no saturada requieren cantidades de recarga significativamente mayores para llenarse completamente, lo que limita la capacidad de la parte superior de la franja no saturada para elevarse, y por ello, el grosor de la franja capilar fluctúa, lo que se acompaña de la fluctuación del nivel freático (Woysner, 1994).

En suelos con un alto grado de saturación de agua, el coeficiente de difusión de oxígeno es el principal control sobre la tasa de entrada de oxígeno en el suelo. Ensayos, permiten obtener que el coeficiente de difusión de oxígeno no aumenta significativamente hasta que el grado de saturación de agua cae por debajo del 70 % (Yanful, 1993). La aplicación del coeficiente de difusión de oxígeno a la SWRC del relave de la Figura 5-17, no aumentaría hasta que la succión matricial sea de aproximadamente 16 metros de agua (160 kPa). En otras palabras, si se permitía que los relaves drenaran por gravedad (y no se evaporaran), la posición del nivel freático tendría que estar 16 metros por debajo de la superficie del relave antes de que la tasa de entrada de oxígeno en los relaves aumentara significativamente. Los resultados de ensayos de difusión ayudan a confirmar que la difusión de oxígeno se acentúa para niveles de saturación menores que el 70 % para el relave de la Figura 5-17 (Woysner, 1994).

De esta forma es posible decir que para que comience a interactuar en mayor medida el oxígeno presente en el ambiente, es necesario que el nivel freático presente en un depósito de relaves de características

similares a las del relave de la Figura 5-17, descienda por bajo los 16 metros desde la superficie, lo cual, provocaría una potencial generación de drenaje ácido minero (DAM).

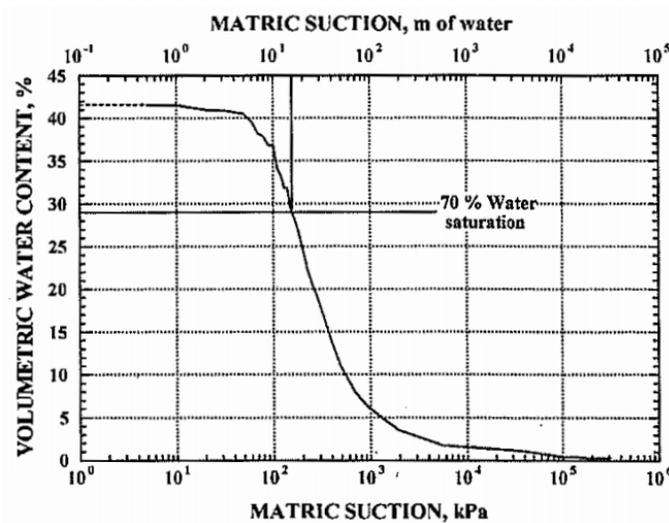


Figura 5-17: Curva de retención de agua para drenaje ácido.
Fuente: Yang et al, 1992.

5.4. Discusión y Comentarios

Teniendo en cuenta que Chile es un país altamente minero, que cuenta con una tasa de producción de relaves al 2015 de 1.400.000 toneladas diarias (Portal Sernageomin, 2015), por lo que es necesario tener una especial atención en lo que consta el almacenamiento permanente de estos residuos mineros. Luego, debido a lo complejo del almacenamiento de estos residuos es necesario tener especial preocupación con la operación de los relaves mineros, como así también con su monitoreo.

Es necesario considerar que tanto en tranques relaves como en relaves espesados, especialmente en estos últimos, la estabilidad física y química de los relaves depende de la desaturación de los mismos como resultado del drenaje y la interacción con la atmósfera, lo que conlleva a trabajar constantemente con el comportamiento no saturados de relaves, cuya base es la SWRC. Es por ello que el estudio del comportamiento no saturado, específicamente la SWRC es esencial en este tipo de estructuras geotécnicas, la cual, en la actualidad con la ayuda de la tecnología se ha desarrollado fuertemente.

CAPITULO VI

DESARROLLO DE CAMARA DE PRESIÓN Y PAPEL FILTRO EN UTFSM

6.1.Método de Cámara de presión con plato poroso

El desarrollo de la cámara de presión con plato cerámico poroso para múltiples muestras, fue fabricada de modo de cumplir con lo enunciado en la norma ASTM D6836 y ASTM D2325, donde dentro de sus elementos podemos encontrar los siguientes componentes:

- Cámara de presión.
- O-ring sello tapa.
- Conexión entrada de aire.
- Platos cerámicos porosos de distintos valores de entrada de aire (hasta 15 [bar]).
- Tubo flexible para evacuación de agua del plato cerámico poroso.
- Conexión salida de agua.
- Anillos contenedores de muestras.
- Manómetro con rango de medición de 0 a 15 [bar].
- Regulador de presión.
- Espátula de hoja ancha.
- Contenedores de muestras de humedad.
- Bandeja de saturación.
- Balanza con capacidad de 200 [g] y 0,01 [g] de precisión.
- Horno de secado con control termostático (110 \pm 5 °C).
- Batidora de mesa.
- Papel filtro rápido whatman 41 o equivalente.
- Agua destilada.
- Llaves de paso de aire.
- Aire comprimido.
- Jeringa.

La cámara de presión de acero inoxidable, de dimensiones que se presentan en el anexo 10.7, permite crear una atmosfera a presiones elevadas según sea suministrado, lo cual, por medio del principio de traslación de ejes (Hilf, 1956), logra evacuar el agua contenida en el suelo analizado por medio de un plato cerámico poroso, que debido a los micro poros que lo componen, se utilizan para presiones inferiores a las nominalmente entregadas por el fabricante, es decir, la empresa norteamericana *Soilmoisture*. Para este caso de estudio, se utilizan dos platos porosos, el primero para presiones inferiores a 500 [kPa] y el segundo para presiones entre 500-1500 [kPa]. Los contenedores (Figura 6-2), de acero inoxidable, con dimensiones que se presentan en la Tabla 6-1, dan confinamiento a las muestras de suelo que son sometidas a análisis, estos serán ubicados sobre el plato cerámico poroso (Figura 4-5), para posteriormente poder retirar las muestras y realizar las mediciones gravimétricas correspondientes.

Adicionalmente a lo que se muestra en la Figura 4-5, a la tapa de la cámara de presión se le agregó un manómetro convencional de glicerina, con un rango de presiones de 0 a 20 [bar], lo anterior, para tener una presión más representativa de la presión a la cual están sometidas las muestras (Figura 6-1).



Figura 6-1: Cámara de presión con plato cerámico poroso.

Fuente: Elaboración propia.

La conexión de entrada de aire corresponde a una entrada acerada de $\frac{1}{4}$ de pulgada, mientras que la conexión de salida de agua es una conexión de bronce, tipo rápida, para tubo de $\frac{5}{32}$ de pulgada ambas adheridas a las paredes de la cámara, como se presenta en la Figura 6-1.



Figura 6-2: Contenedores de muestras para método de cámara de presión con plato cerámico poroso.

Fuente: Elaboración propia.

El suministro de aire que proveen los compresores convencionales no superan los 1000 [kPa], por lo que para obtener puntos de la curva de retención de agua mayores a la presión antes mencionada. La solución ideada para dicha limitación es la implementación de un suministro de aire comprimido de 8,5 [m³] de capacidad a presión atmosférica y una presión máxima de 200 [bar]. De esta manera es posible obtener todo el rango de validez a los que el método de traslación de ejes logra adquirir.

Tabla 6-1: Dimensiones contenedores muestras para método de cámara de presión con plato poroso.

Fuente: Elaboración propia.

Dimensiones	
Alto	25 [mm]
Diámetro externo	76,2 [mm]
Diámetro interno	73 [mm]

La operación de la cámara de presión con plato poroso implica la variación de presión de aire, para lo cual, es necesario la utilización de un regulador de presión de gases, que como se mencionó anteriormente sólo se trabajará con aire comprimido. Las características del regulador de aire (Figura 6-3), consiste en la capacidad de regular aire de forma constante, independientemente de la presión de entrada de aire, desde los 0 a los 1500 [kPa] (0-15 [bar]). Este regulador de presión, se compone de 2 manómetros, el primero mide la presión de entrada (alta presión), cuya función es entregar la cantidad de aire medida en presión del cilindro de suministro de aire comprimido y el segundo mide la presión de salida del regulador, cuya función es entregar el valor de la presión a la que estará sometida la red de aire, y finalmente, una llave reguladora de presión de salida, la cual, como su nombre lo dice, permite regular en la medida que al girar la manivela, varía la presión arrojada por el manómetro de salida, la cual corresponde a la presión de aire a la que se está suministrando.

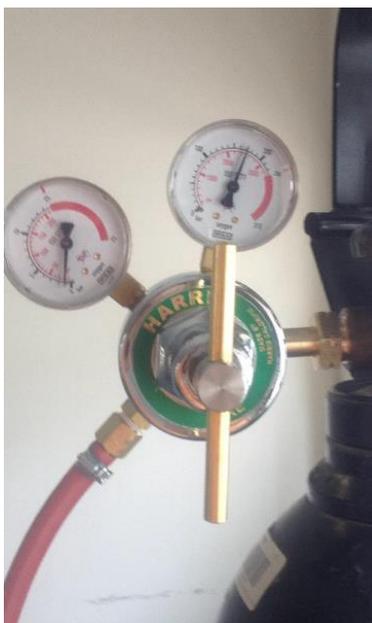


Figura 6-3: Regulador de presión de aire comprimido HARRIS.

Fuente: Elaboración propia.

La estabilidad de la presión entregada por este regulador de presión se presenta en la Figura 6-4 para distintos niveles de presión.

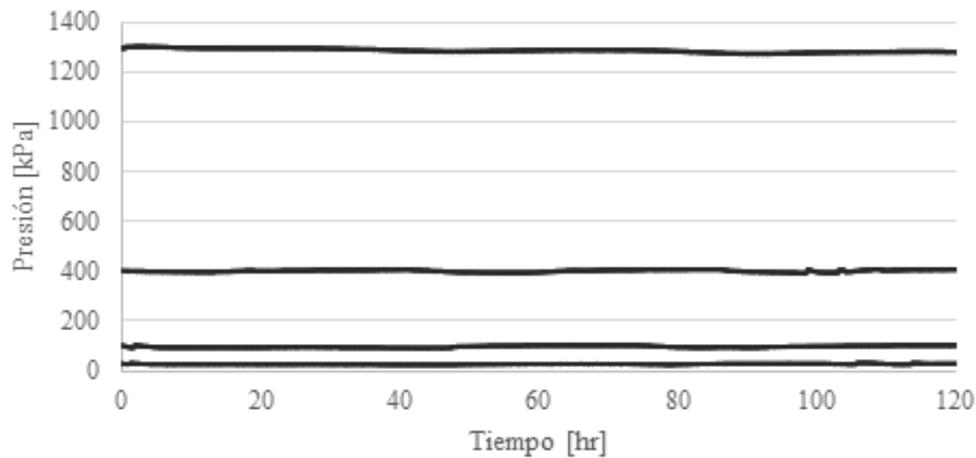


Figura 6-4: Estabilidad de presión entregada por regulador de presión HARRIS para distintas presiones.
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la red de presión de aire consta de dos mangueras que conectan el regulador de presión con un sistema electrónico medidor de presión, una válvula liberadora de presión de la cámara y la cámara de presión propiamente tal (Figura 6-1). La válvula liberadora de presión (Figura 6-5), consta de una llave de paso que permite redimir la presión en la red antes de la cámara, y de esta forma prevenir entregar erróneamente presiones a la cámara de presión, como así también permite, como su nombre lo dice, liberar la presión en la cámara, permitiendo de esta manera, desacoplar la tapa de la cámara.

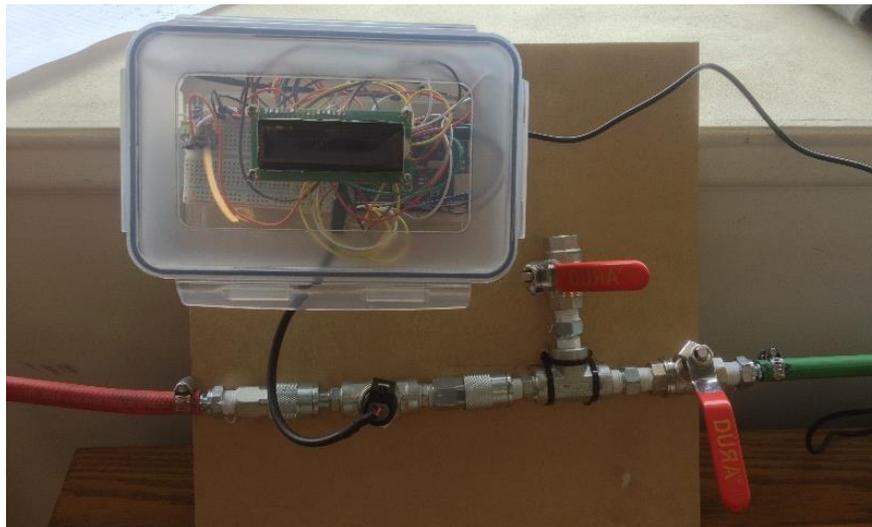


Figura 6-5: Sistema electrónico de medición de presión y válvula de liberadora de presión.
Fuente: Elaboración propia.

El sistema electrónico medidor de presión, tiene por función principal medir de forma digital y de forma más exacta, la presión a la cual se verá sometida la cámara de presión, requerimiento necesario sobre todo a presiones bajas, ya que los manómetros antes mencionados, ya sea el manómetro de salida del regulador de presión, como así también, el manómetro de la tapa de la cámara de presión, no poseen ni la exactitud, ni la precisión necesaria a presiones menores, es decir, a presiones inferiores a 100 [kPa], las cuales son necesarias para la obtención del valor de la entrada de aire en la curva de retención de agua. El control de la presión

realizado con el sistema electrónico de medición de presión, es mediante un sensor Arduino, que permite mostrar mediante una pantalla de cristal líquido la presión de aire a la cual está sometido la red, además, de guardar los valores de presión mediante un módulo microSD en un archivo de formato .txt. Este sistema de Arduino se implementa según lo enunciado en el anexo 10.4.

En la Figura 6-6, se presenta un esquema de los componentes del funcionamiento del método de traslación de ejes recién presentado, con sus componentes principales como lo son el cilindro de aire comprimido (a), el regulador de presión (b), las mangueras de aire (c), las llaves de paso (d), el sensor de presión implementado mediante el sistema Arduino (e), el manómetro de cámara (f) y la cámara de presión propiamente tal (g).

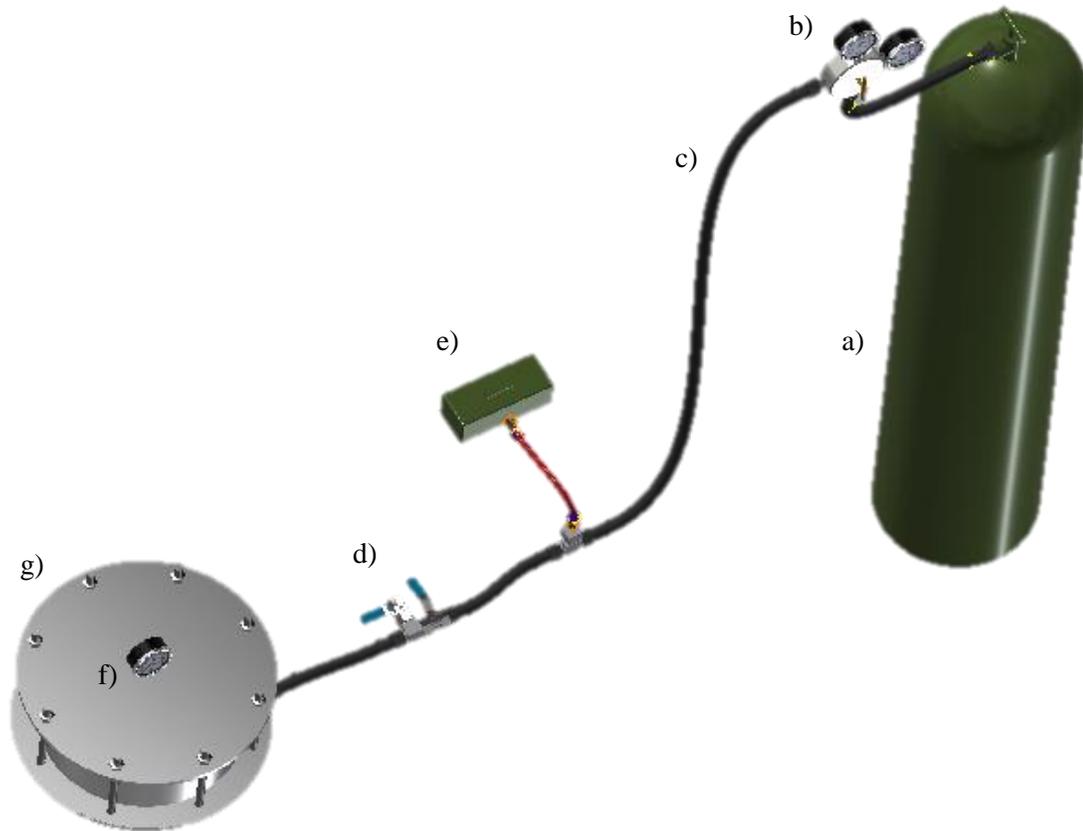


Figura 6-6: Esquema implementación método de traslación de ejes en cámara de presión para múltiples muestras.
Fuente: Elaboración propia.

6.2.Método Papel filtro (Gardner, 1937)

El desarrollo de la técnica para la obtención de la curva de retención de agua mediante el uso del método indirecto de papel filtro, fue realizado para cumplir los requerimientos detallados en la norma ASTM D 5298 – 03, donde los componentes a utilizar son los siguientes:

- Cápsulas contenedoras inoxidables de 5,5 [cm] de diámetro y entre 110-220 [cm³].
- Papel filtro cuantitativo de tipo II sin cenizas, whatman n°42 o equivalente.
- Film de alusa plástica.
- Film de alusa de aluminio.
- Balanza de alta precisión (0,0001 [g]).
- Pinzas.
- Guantes de látex.
- Cámara equilibrio térmico de poliestireno.
- Horno de secado con control termostáticamente (110 ±5 °C).
- Termómetro de precisión 1 [°C].
- Desecador de gel de sílice o sulfato de calcio anhidro.
- Contenedor metálico para medición de humedad de papeles filtro con tapa.

El método del papel filtro, determina mediante la medición de la cantidad de agua presente en un papel filtro previamente calibrado para ciertos puntos de la curva de retención de agua, observados en el proceso de desaturación de una muestra de suelo. Este método propuesto inicialmente por Gardner en 1937, y actualizado en varias ocasiones, fue finalmente estandarizado por la norma ASTM D 5298 – 03.

Los cilindros contenedores de la muestra de suelos de duraluminio, material altamente resistente a la oxidación, fueron fabricados mediante el uso de un torno, con lo cual se les dio dimensiones propuestas por la ASTM D5298 y ratificadas por el estudio efectuado por Eurileny Lucas de Almeida et al., en la publicación “Filter Paper Method for the Determination of the Soil Water Retention Curve” (2014), donde se propone un diámetro de 5,5 [cm] y con un volumen tal que el contenido volumétrico de suelo se encuentre entre 110 y 220 [cm³], por lo cual, las dimensiones utilizadas en el presente estudio se presentan a continuación:

Tabla 6-2: Dimensiones contenedor muestras método papel filtro (Gardner, 1937).

Fuente: Elaboración propia.

Dimensiones	
Altura externa	54 [mm]
Altura interna	52 [mm]
Diámetro Externo	60 [mm]
Diámetro interno	55 [mm]

De esta manera se obtiene un volumen de 123,5 [cm³], volumen que cumple con los requerimientos de ambas publicaciones.

En cuanto al papel filtro a utilizar, deberá ser del tipo Whatman 42 o equivalente, ya que son propuestas por las principales publicaciones, incluidas las publicaciones de Eurileny de Almeida et al. (2015) y la norma ASTM D5298, por lo que se utiliza el papel filtro marca “Advantec 5c”, el cual es un modelo equivalente al Whatman 42.

Las dimensiones de los papeles filtro deberán ser tales que su diámetro se encuentre entre el diámetro externo del contenedor (60 [mm]) y el diámetro interno de este mismo (55 [mm]) especificados en la **Tabla 6-2**. Cabe destacar que se deben utilizar dos diámetros distintos, ya que dicha diferencia ayudará a la extracción de estos más rápidamente minimizando de esta manera los errores de medición que pueda arrojar la evaporación

de la humedad captada por el papel filtro, dicha demora puede llegar a arrojar errores de hasta el 5 % (ASTM D5298). Por lo anterior fundamentado, es necesario papeles filtro de un diámetro mayor a 55[mm], que para este caso se utilizará un papel filtro de 110 [mm] del cual se obtendrán los dos papeles filtro de distinto diámetro antes descritos (Figura 6-7).



Figura 6-7: Papel filtro sin cenizas equivalente a Whatman 42 y contenedores para método indirecto de papel filtro.
Fuente: Elaboración propia.

Los films de alusa, serán necesarios para el correcto equilibrio de humedad entre la muestra de suelo y el papel filtro como aparato de medición, donde la función de la alusa plástica tendrá la función de evitar la evaporación de la humedad del suelo a través de los días que dure la medición, mientras que el film de aluminio evitará las variaciones de temperatura en la muestra, evitando de esta manera que se produzca un flujo de humedad producto de la condensación de vapor de agua. Adicionalmente a la alusa de aluminio, se utilizará una cámara termica para crear una atmósfera a temperatura constante, que ayudará al igual que la alusa de aluminio antes mencionada a evitar la condensación de vapor de agua. Esta camara de equilibrio térmico, propuesta por Eurileny de Almeida et al. (2015) consta de una caja de poliestireno, material altamente aislante utilizado normalmente en cámaras de refrigeración (Figura 6-8). En la Figura 6-9, se aprecia como varía la temperatura en función del tiempo medido cada 20 segundos durante un día de altas variaciones de temperatura ambiente, donde se aprecia que dentro de la cámara de equilibrio térmico no se obtuvieron grandes variaciones de la temperatura dentro de la cámara. Dicha curva fue realizada mediante un sensor de Arduino calibrado para temperaturas ambientales.



Figura 6-8: Cámara de equilibrio térmico utilizada para el método de papel filtro.
Fuente: Elaboración propia.

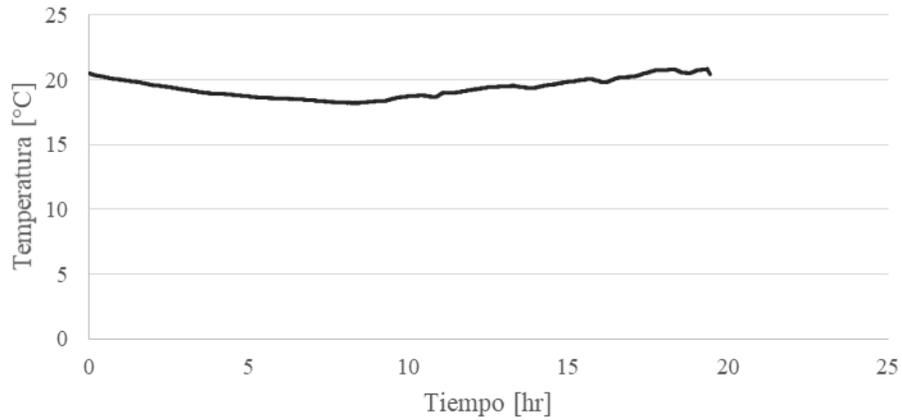


Figura 6-9: Regularidad de la temperatura dentro de la cámara de equilibrio térmico.
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se implementan contenedores metálicos para el secado del papel filtro, los cuales facilitarían el secado de este último mediante un horno termostático de secado de muestras que logre temperaturas de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, comúnmente utilizado en laboratorios de mecánica de suelos. Este contenedor, posee un diámetro mayor al papel filtro utilizado (60 [mm]), y un material resistente a las altas temperaturas.



Figura 6-10: Proceso de colocación de papel filtro.
Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO VII

ANÁLISIS DE RELAVES Y LA SWRC

La curva de retención de agua (SWRC), como representación gráfica de la relación matemática entre la succión del suelo y el contenido de humedad que presenta el mismo, representa el estado energético del suelo para una determinada humedad o grado de saturación. Esta curva, constituye la capacidad de conservación de agua de un suelo ante distintos estados de succión, presenta tres zonas claramente identificables y divididas por los puntos denominados punto de entrada de aire o air-entry value (AEV), y el punto de succión residual ya mencionados en el acápite 3.3.

El presente apartado, se estudiarán las curvas de retención de agua para 13 relaves de la industria minera nacional. Éstas curvas fueron obtenidas con el método enunciado en la ASTM D 6836, comúnmente llamado técnica de traslación de ejes, mediante el uso de la cámara de presión y platos porosos. Además, se estudiará el método del papel filtro para algunos relaves obteniéndose modelo de regresión aplicable para relaves multimetálicos en general.

Para efectuar un análisis más acabado, y poder llegar a estimar la curva de retención de agua se realizó una caracterización geotécnica de los relaves, además se agrega ciertos ensayos particulares de caracterización a modo complementario aplicables a estudios posteriores.

Los relaves a analizar (Figura 7-1) son provenientes de tranques de relaves y relaves en pasta provenientes de la extracción de hierro, además de relaves provenientes de tranques de relaves, embalses de relaves, relaves en pasta y relaves filtrados resultantes de la extracción de cobre-oro-molibdeno. La información básica de estos depósitos de relaves se presenta en la Tabla 7-1, que se presenta a continuación.

Tabla 7-1: Información básica de los relaves en estudio.

Fuente: Elaboración propia.

	Origen Mineralógico	Tipo depósito	Tipo Muestra
Relave 1	Cobre	Tranque	Arena Ciclonada
Relave 2	Cobre	Tranque	Integral
Relave 3	Cobre	Tranque	Arena Ciclonada
Relave 4	Cobre	Tranque	Arena Ciclonada
Relave 5	Cobre	Tranque	Arena Ciclonada
Relave 6	Cobre-Molibdeno	Embalse	Arena Ciclonada
Relave 7	Cobre	Tranque	Arena Ciclonada
Relave 8	Cobre	En pasta	Integral
Relave 9	Cobre	Tranque	Integral
Relave 10	Cobre	Tranque	Integral
Relave 11	Cobre	Tranque	Lama Ciclonada
Relave 12	Hierro	En pasta	Integral
Relave 13	Cobre-Oro	Tranque	Lama Ciclonada



Figura 7-1: Relaves utilizados en el presente estudio geotécnico.
Fuente: Elaboración propia.

7.1. Caracterización Geotécnica

Para la caracterización de los distintos relaves, se realizaron diferentes ensayos especificados tanto en las normas ASTM, como también en las normas chilenas. Estas propiedades fueron determinadas mediante ensayos correspondientes presentados a continuación.

- Gravedad específica (ASTM D 854 – Nch 1532 of. 1980)
- Densidad Mínima (ASTM D 4254 – Nch 1726)
- Proctor Estándar (ASTM D 698 – Nch 1534-1 Of. 79)
- Granulometría por tamizado y sedimentación (ASTM D 422)
- Clasificación de Suelos (ASTM D 2487 – Nch 1886)
- Límites de Atterberg (ASTM D 4318 – Nch 1517/1 Of. 79 – Nch 1517/2 Of. 79)
- Permeabilidad (ASTM D 2434)

7.1.1. Granulometrías, Límites de Atterberg y Clasificación USCS

Para la obtención de la granulometría (ASTM D 422), se realizó mediante granulometría por tamizado hasta la malla #200 y para la parte fina (i.e. bajo la malla #200) se realizó mediante granulometría por sedimentación, mediante el método del hidrómetro.

Las curvas granulométricas que se exponen a continuación, se presentan para una mayor claridad según la clasificación USCS.

En cuanto a los límites de Atterberg, específicamente el límite líquido se realizó para todas las muestras analizadas, sin embargo, no fue posible obtenerlo en ciertas muestras clasificadas como arenas no plásticas.

7.1.1.1. Relaves 1-7 clasificación USCS SM (Arenas Limosas)

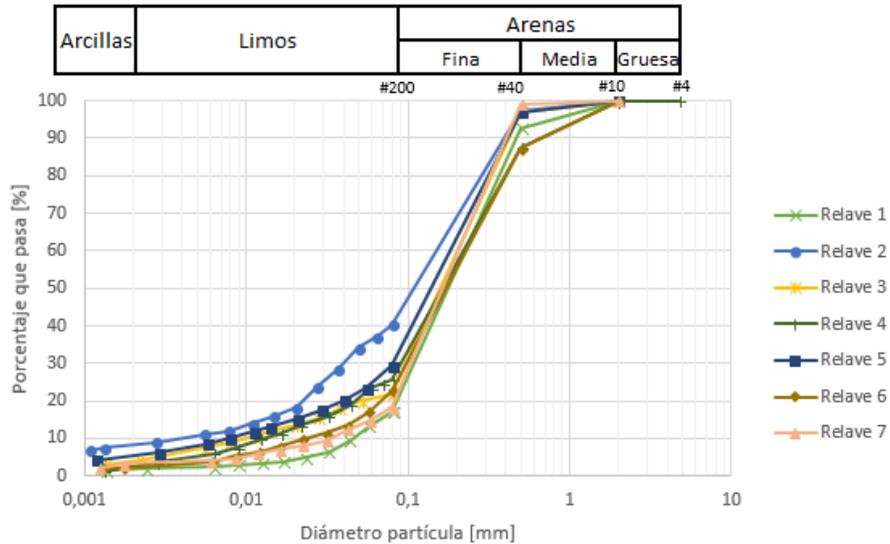


Figura 7-2: Granulometría relaves con clasificación USCS SM.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 7-2, en las que se presentan las arenas limosas, se aprecia que en todas las muestras analizadas no ostentan gran contenido de arenas de tamaño medio, si no que, de mayor contenido de arenas finas, seguido de un contenido de limos y un porcentaje marginal de contenido de arcillas. Además, es posible apreciar que la banda generada por todas las muestras de esta clasificación es angosta, por lo que algunas de sus propiedades analizadas más adelante son similares.

En cuanto a la los límites de plasticidad de los suelos analizados con clasificación SM, realizados según la norma ASTM D 4318, arrojaron un rechazo de la evaluación tanto del límite líquido como del límite plástico (LL y LP respectivamente), determinándose un índice de plasticidad (IP) como no plástico (NP), salvo el relave 2, que al contrario de las arenas ciclónicas, presenta poca cantidad de material bajo la malla #200, debido a que este es un relave tipo integral, por lo que la cantidad de material fino (i.e. que pasa a través de la malla #200) es mayor, determinándose los valores presentados en la Tabla 7-2.

Tabla 7-2: Límites de Atterberg arena relave 2.

Fuente: Elaboración propia.

Relave	2
LL [%]	18,51
LP [%]	16,48
IP [%]	2,03

7.1.1.2. Relaves 6-10 clasificación USCS ML-CL (Limos con baja plasticidad)

En la Figura 7-3, se presentan los relaves clasificados como limos con baja plasticidad, se aprecia que las muestras poseen un contenido de arenas cercano al 35%, y con un gran contenido de limos (cercano al 55%) y un contenido marginal de arcillas, nuevamente la banda generada por todas las muestras analizadas es angosta, por lo que algunas de sus propiedades, estudiadas más adelante, son similares.

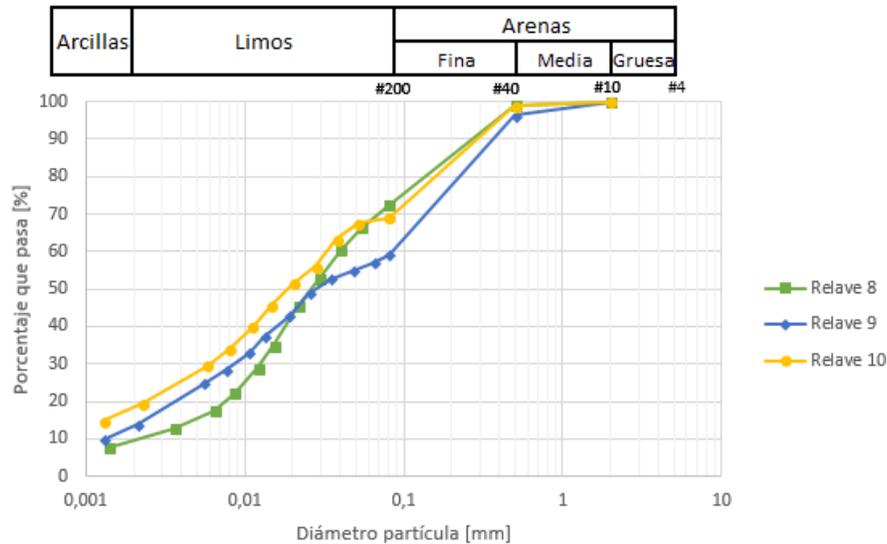


Figura 7-3: Granulometría relaves con clasificación USCS ML-CL.

Fuente: Elaboración propia.

Los límites de Atterberg correspondientes a los suelos de clasificación USCS ML-CL, se presentan en la Tabla 7-3.

Tabla 7-3: Límites de Atterberg para relaves clasificados como ML-CL.

Fuente: Elaboración propia.

Relave	8	9	10
LL [%]	17,18	19,46	19,6
LP [%]	12,82	14,52	12,7
IP [%]	4,36	4,94	6,9

7.1.1.3. Relaves 11-13 clasificación USCS CL

En cuanto a los relaves clasificados como arcillas de baja a media plasticidad, se aprecia que su contenido tanto de arenas, como así también de arcillas, es marginal, sin embargo, poseen un gran contenido de limos (cercano al 75%), nuevamente la banda generada por todas las muestras analizadas es angosta, sin embargo, el relave 12, posee una mayor cantidad de arenas finas presentes en su granulometría. No obstante, las propiedades que se presentan más adelante de estos relaves son similares.

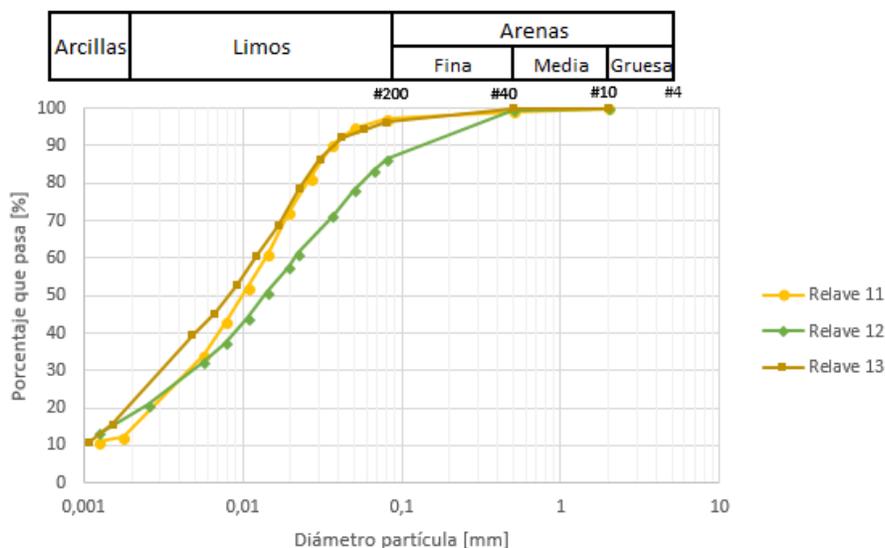


Figura 7-4: Granulometría relaves con clasificación USCS CL.
Fuente: Elaboración propia.

Los límites de Atterberg correspondientes a los suelos de clasificación USCS ML, se presentan en la Tabla 7-4, en los que se aprecia que índice de plasticidad aumenta en comparación a los relaves previos, lo cual se traduce a un mayor contenido de finos como se puede apreciar en las curvas granulométricas antes presentadas.

Tabla 7-4: Límites de Atterberg relaves clasificados como CL.
Fuente: Elaboración propia.

Relave	11	12	13
LL [%]	25,2	23,2	28,5
LP [%]	14,64	10,69	14,39
IP [%]	10,56	12,51	14,11

7.1.2. Densidad mínima y Proctor Estándar

En cuanto a la densidad mínima (ASTM D 4254) y la densidad máxima mediante Proctor estándar (contenido de finos >12%), se realizó para todos los relaves en los que se contaba con una cantidad de muestra suficiente para llevar a cabo dicho ensayo.

Tabla 7-5: Densidad mínima y Proctor estándar relaves con clarificación USCS SM.
Fuente: Elaboración propia.

Relave	1	2	3	4	5	6	7
ρ_{min} [T/m ³]	1,46	1,33	1,29	1,34	1,59	1,38	1,41
Proctor Estándar [T/m ³]	1,79	1,84	1,62	-	1,97	1,73	1,83
w proctr [%]	13,40	16,30	14,30	-	15,60	15,36	13,82

Tabla 7-6: Densidad mínima y Proctor estándar relaves con clasificación USCS ML.

Fuente: Elaboración propia.

Relave	8	9	10
ρ_{\min} [T/m ³]	1,30	1,13	0,99
Proctor Estándar [T/m ³]	1,79	1,84	1,79
w proctotr [%]	15,55	15,51	17,12

Tabla 7-7: Densidad mínima y Proctor estándar relaves con clasificación USCS CL.

Fuente: Elaboración propia.

Relave	11	12	13
ρ_{\min} [T/m ³]	1,04	1,28	0,98
Proctor Estándar [T/m ³]	1,83	2,03	1,80
w proctotr [%]	15,47	15,38	15,53

Las densidades antes presentadas (Tabla 7-5, Tabla 7-6 y Tabla 7-7), tienen cierta variabilidad en tanto en los mismo valores de la densidad como así también en la humedad Proctor, ya que estos valores dependen de parámetros de los mismo materiales como lo es el caso de la gravedad específica y la misma granulometría. Además, pueden estar sujeto a tener errores debido a que el método Proctor tiene un análisis discreto por lo que la humedad y la densidad pueden cambiar levemente.

7.1.3. Conductividad hidráulica

Se realizaron siete ensayos de conductividad hidráulica (permeabilidad) saturada de pared rígida a carga variable (ASTM D 2434), con relaves compactados a una densidad del 90% de la obtenida mediante el método Proctor estándar. Estas permeabilidades (Tabla 7-8) se obtuvieron para tener un orden de magnitud de las permeabilidades que poseen este tipo de relaves según su clasificación. Esta permeabilidad, al ser en estado saturado, posee un valor umbral de los valores de permeabilidad para cada tipo de relave. Más adelante en este capítulo se comentan los valores de permeabilidad (orden de magnitud) que se manejan para cada tipo de suelos según su clasificación y cómo este varía según su grado de saturación (relaves parcialmente saturados).

Tabla 7-8: Conductividad hidráulica de relaves multimetálicos para distintas clasificaciones USCS.

Fuente: Elaboración propia.

Relave	1	2	6	8	10	12	13
Clasificación USCS	SM	SM	SM	ML-CL	ML-CL	CL	CL
Permeabilidad [cm/s]	3,40E-04	1,83E-05	4,02E-04	1,20E-06	1,83E-06	4,56E-07	2,79E-07
e (índice de vacíos)	0,549	0,621	0,508	0,456	0,501	0,431	0,692
n (porosidad)	0,354	0,383	0,337	0,313	0,334	0,301	0,409

Los valores obtenidos son los esperados según su clasificación, teniendo la consideración que dentro de los relaves clasificados como arenas limosas (SM), el relave 2 es el que posee un mayor contenido de finos al ser un relave del tipo integral, de esta última variable proviene su valor de permeabilidad más reducido en comparación al resto de los relaves con la misma clasificación.

7.1.4. Límite de saturación

En el presente acápite se presentan los contenidos gravimétricos de agua al límite de saturación para los distintos relaves en estudio (Tabla 7-9), las cuales, se obtuvieron a partir de muestras en estado slurry y normalmente consolidadas. Para los relaves 1-10 fueron obtenido a partir de mezclas a un 70% de contenido

de sólidos y para los relaves 11-13 fueron obtenidos a partir de mezclas a un 65% de contenido de sólidos. Los valores obtenidos son utilizados posteriormente para determinar el punto inicial de la SWRC de desaturación. Adicionalmente se presenta el índice de vacíos y la porosidad asociada al contenido gravimétrico de agua al límite de saturación de cada relave.

Tabla 7-9: Límite de saturación, índice de vacíos y porosidad al límite de saturación.

Fuente: Elaboración propia.

Relave	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ws [%]	18,3	30,7	29,7	20,3	19,7	19,1	23,0	25,6	32,5	25,1	37,9	32,0	38,1
e (Lím. De saturación)	0,52	0,96	0,85	0,55	0,61	0,52	0,67	0,69	0,91	0,71	1,10	0,97	1,21
n (Lím. De saturación)	0,34	0,49	0,46	0,36	0,38	0,34	0,40	0,41	0,48	0,42	0,52	0,49	0,55

Finalmente, en el punto 7.1.5 se presenta una tabla resumen con los valores obtenidos anteriormente y algunos valores adicionales asociados a los obtenidos previamente.

7.1.5. Resumen caracterización de relaves

Tabla 7-10: Resumen de caracterización de relaves.

Fuente: Elaboración propia.

Relave	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Gs	2,83	3,12	2,86	2,73	3,07	2,70	2,90	2,71	2,79	2,83	2,90	3,02	3,17
rho min [T/m ³]	1,46	1,33	1,29	1,34	1,59	1,38	1,41	1,30	1,13	0,99	1,04	1,28	0,98
Proctor [T/m ³]	1,79	1,84	1,62	-	1,97	1,73	1,83	1,79	1,84	1,79	1,83	2,03	1,80
w proctor [%]	13,40	16,30	14,30	-	15,60	15,36	13,82	15,55	15,51	17,12	15,47	15,38	15,53
LL [%]	N/D	18,51	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	17,18	19,46	19,60	25,20	23,20	28,50
LP [%]	-	16,48	-	-	-	-	-	12,82	14,52	12,70	14,64	10,69	14,39
IP [%]	-	2,03	-	-	-	-	-	4,36	4,94	6,90	10,56	12,51	14,11
Clasificación	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	ML-CL	ML-CL	ML-CL	CL	CL	CL
Permeabilidad [cm/s]	3,40E-04	1,83E-05	S/I	S/I	S/I	4,02E-04	S/I	1,20E-06	S/I	1,83E-06	S/I	4,56E-07	2,79E-07
e (dens. Mínima)	0,94	1,34	1,21	1,04	0,93	0,96	1,06	1,09	1,47	1,86	1,79	1,36	2,22
e (Lím. De saturación)	0,52	0,96	0,85	0,55	0,61	0,52	0,67	0,69	0,91	0,71	1,10	0,97	1,21
n (Lím. De saturación)	0,34	0,49	0,46	0,36	0,38	0,34	0,40	0,41	0,48	0,42	0,52	0,49	0,55
ws [%]	18,3	30,7	29,7	20,3	19,7	19,1	23,0	25,6	32,5	25,1	37,9	32,0	38,1
Dmax (mm)	0,42	0,42	0,42	2,00	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,07	0,42	0,07
% Grava	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% Arena	83,68	59,70	78,29	74,98	71,32	78,32	83,37	26,67	41,57	30,74	3,20	13,46	4,15
% Limos	14,47	31,09	18,00	22,40	23,25	19,28	13,29	63,61	44,97	50,95	82,21	68,14	74,36
% Arcilla	1,85	8,34	3,70	2,62	5,43	2,39	3,33	9,72	13,46	18,31	14,58	18,39	21,49
D10	16,32	39,43	21,71	25,02	28,68	21,68	16,63	73,33	58,43	69,26	96,80	86,54	95,85
D30	0,0449	0,0038	0,0098	0,0128	0,0077	0,0226	0,0330	0,0021	0,0013	0,0007	0,0012	0,0007	0,0011
D60	0,0995	0,0398	0,0969	0,0833	0,0758	0,0900	0,0952	0,0130	0,0085	0,0060	0,0023	0,0048	0,0030
D90	0,1984	0,1347	0,2074	0,1934	0,1871	0,2017	0,1814	0,0389	0,0829	0,0329	0,0116	0,0022	0,0119
Cu	0,3954	0,3359	0,3604	0,4490	0,3604	0,5884	0,3458	0,2304	0,3133	0,2496	0,0375	0,1172	0,0372
Cc	4,42	35,80	21,08	15,09	24,45	8,91	5,50	18,47	63,94	50,13	9,34	2,90	10,98

Los valores antes presentados, serán utilizados en la calibración del modelo de regresión para la estimación de la curva de retención de agua propuesta por este autor en el punto 7.8.2.

7.2. Análisis de las SWRC Obtenidas Mediante Técnica de Traslación de Ejes

Las SWRC que se presentan a continuación corresponden a muestras de relave obtenidas en las distintas campañas de terreno realizadas por el laboratorio de la UTFSM (Laboratorio de Geotecnia) y las obtenidas por la PUCV (Departamento de Geotecnia y Ambiental). Las curvas de retención de agua fueron obtenidas mediante la medición de cuatro puntos característicos de forma aproximadamente equidistante para una gráfica logarítmica, estas presiones son aproximadamente 30, 100, 400 y 1500 [kPa]. Adicionalmente se contará con un quinto punto asociado al contenido gravimétrico de humedad al límite de saturación, presentado en el punto 7.1.4, este punto corresponde al punto de inicio de la SWRC de secado, asociada a una succión nula. Para el ajuste de los puntos obtenidos en una curva única, se utilizará el modelo de Fredlund & Xing (1994), presentado en el punto 3.3.3.3.



*Figura 7-5: Muestras de relaves en cámara de presión con plato poroso.
Fuente: Elaboración propia.*

En la Figura 7-5, se muestran seis muestras de relave en la cámara de presión con plato poroso de 5 [Bar] (500 [kPa]), tras un equilibrio a una presión de 100 [kPa].

Las curvas obtenidas mediante este método se presentan a continuación en grupos según su el sistema de clasificación USCS, para de esta manera expresar y guiar a un análisis más particular de las SWRC obtenidas.

7.2.1. SWRC de relaves con clasificación USCS, SM

En la Figura 7-6, se presentan los puntos de la SWRC medidos para las siete muestras de relaves clasificados como arenas limosas. El equilibrio de presiones en las matrices de suelos arenosos se logra en un corto periodo de tiempo en comparación a sus similares (4-5 días por incremento de presión).

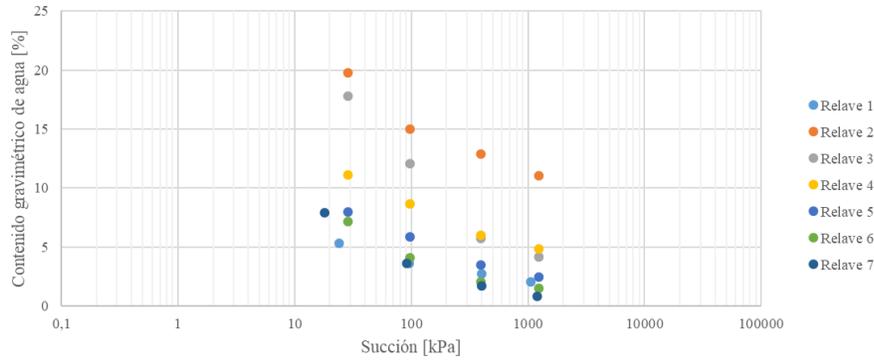


Figura 7-6: Dispersión de valores experimentales asociados a relaves clasificados como SM.
Fuente: Elaboración propia.

El ajuste de los valores experimentales (Figura 7-6), presentados en la Figura 7-7, se aprecia una repentina caída de la curva, esto se asocia la existencia de poros de mayor tamaño grandes en comparación a sus similares de granulometría más fina, lo cual provoca que las fuerzas capilares posean una magnitud poco relevante en comparación a sus similares de granulometrías ML o CL. En la práctica, lo anterior se traduce en un ascenso de agua capilar por sobre el nivel freático de menor magnitud que en los relaves finos.

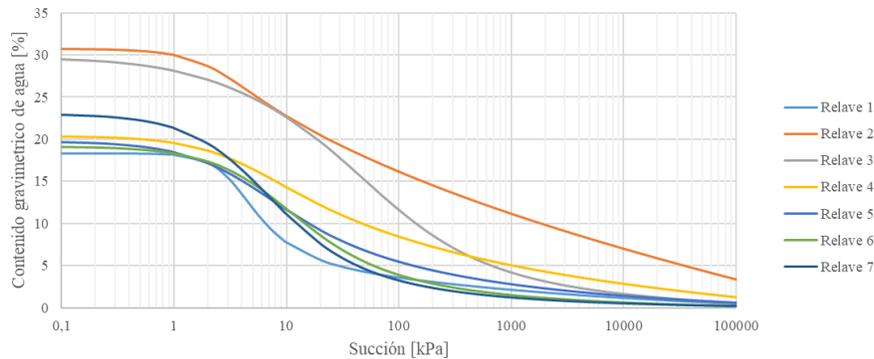


Figura 7-7: Curvas de retención de agua de los relaves tipo SM, ajustadas mediante el modelo de Fredlund & Xing (1994).
Fuente: Elaboración propia.

7.2.2. SWRC de relaves con clasificación USCS, ML-CL

En la Figura 7-8 se presentan los puntos de la SWRC medidos para las tres muestras de relaves clasificados como limo de baja plasticidad. El equilibrio de presiones en las matrices de suelos limosos se logra en un periodo intermedio de tiempo en comparación a sus similares (7 días por incremento de presión).

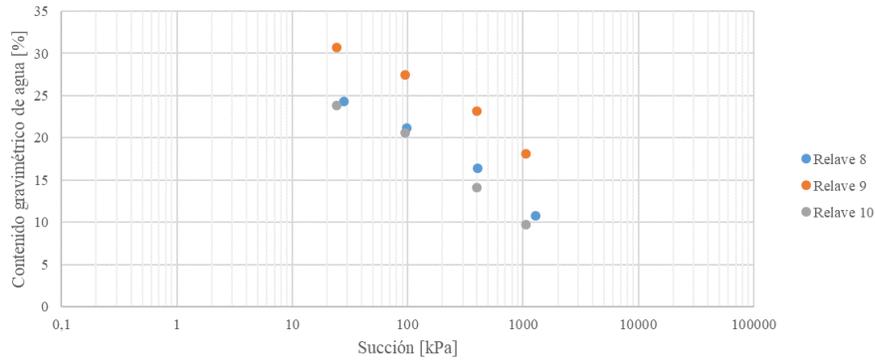


Figura 7-8: Dispersión de valores experimentales asociados a relaves clasificados como ML-CL.
Fuente: Elaboración propia.

En el ajuste de los valores experimentales (Figura 7-9), presentados en la Figura 7-8, se aprecia una caída más lenta que en las muestras de relaves de clasificación SM, produciéndose el primer quiebre de la curva a valores de presiones mayores que los presentados anteriormente. Lo anterior se traduce en valores de la entrada de aire o Air-Entry Value mayores. Además, al tener valores característicos (i.e. AEV y succión residual) mayores, causa que en la práctica el ascenso capilar por sobre el nivel freático sea aún mayor que en el caso de las arenas limosas.

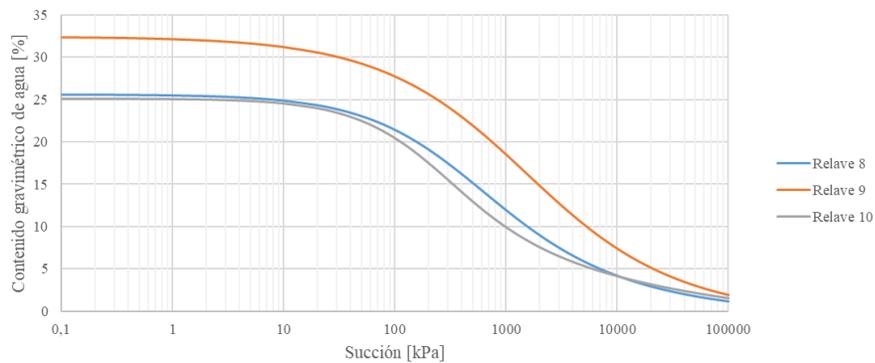


Figura 7-9: Curvas de retención de agua de los relaves tipo ML-CL, ajustadas mediante el modelo de Fredlund & Xing (1994).
Fuente: Elaboración propia.

7.2.3. SWRC de relaves con clasificación USCS, CL

En la Figura 7-10 se presentan los puntos de la SWRC medidos para las tres muestras de relaves clasificados como arcillas de baja plasticidad. El equilibrio de presiones en las matrices de suelos arcillosos se logra en un periodo elevado de tiempo en comparación a sus similares (7-9 días por incremento de presión).

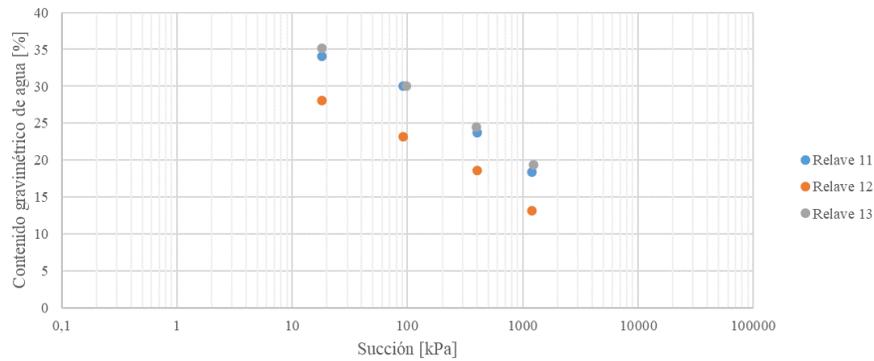


Figura 7-10: Dispersión de valores experimentales asociados a relaves clasificados como CL.
Fuente: Elaboración propia.

En el ajuste de los valores experimentales de la Figura 7-10 presentados en la Figura 7-11, se aprecian curvas con un contenido de humedad de saturación más elevado que en las muestras de relaves anteriores, con un primer quiebre asociado al valor de entrada de aire de la matriz de suelo aún más tardío. Al ser las curvas más elevadas en comparación a las anteriores presentadas, se traduce en mayores humedades y un mayor ascenso capilar por sobre el nivel freático.

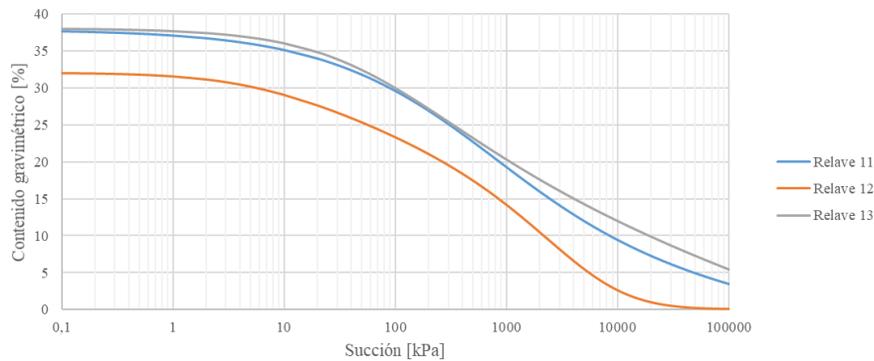


Figura 7-11: Curvas de retención de agua de los relaves tipo CL, ajustadas mediante el modelo de Fredlund & Xing (1994).
Fuente: Elaboración propia.

7.2.4. Comentarios del método

La obtención de la SWRC mediante el uso de la cámara de presión y platos porosos posee una repetitividad aceptable con poca dispersión en los valores obtenidos, es decir generando curvas con buena repetitividad (Figura 7-12), por lo que es un método que genera resultados con bastante fiabilidad, por ello es un método altamente utilizado a nivel mundial, principalmente en la agronomía, y además por estar supeditado a pocos errores experimentales, por lo que la experticia del operador no infiere grandes modificaciones en los resultados.

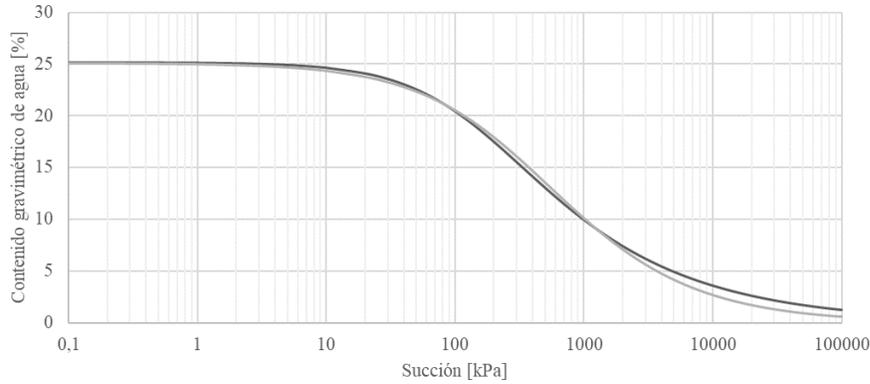


Figura 7-12: Comparación de SWRC para relave 10 obtenidas en mediciones independientes.
Fuente: Elaboración propia.

7.3. Análisis de la SWRC Obtenidas Mediante Técnica de Papel Filtro

Para la obtención de la SWRC mediante la técnica del papel filtro como sensor pasivo de la succión, se realizó utilizando de la metodología para la succión matricial, es decir, con los papeles filtros en directo contacto con las muestras de relaves. Para ello se realizó mediante relaves en condición slurry al 70 % de contenido de sólidos, de manera de poder realizar una calibración y posteriormente comparación con las curvas obtenidas mediante la técnica de la cámara de presión con platos porosos. Posteriormente, se vierten las muestras de relaves dentro de los contenedores para dar inicio a una desaturación controlada, de modo de que los puntos queden en zonas representativas de la SWRC.

Para la obtención de la curva se obtendrán cinco puntos a distintas humedades más el punto determinado mediante la humedad de saturación determinada en el punto 7.1.4. Para el ajuste de los puntos obtenidos en una curva única, se utilizará el modelo de Fredlund & Xing (1994), presentado en el punto 3.3.3.3.

7.3.1. SWRC mediante papel filtro

Para realizar una calibración del método se realizaron mediciones de los relaves 8, 9 y 12 correspondiente a relaves de clasificación ML-CL y CL, obteniéndose un equilibrio luego de 7 días. Posteriormente se realiza la calibración mediante una regresión entre la humedad del papel filtro, obtenida mediante la metodología ASTM D 5298, y la succión obtenida para los relaves asociada a la humedad de los relaves en cada contenedor, obteniéndose la curva de calibración de la Figura 7-13.

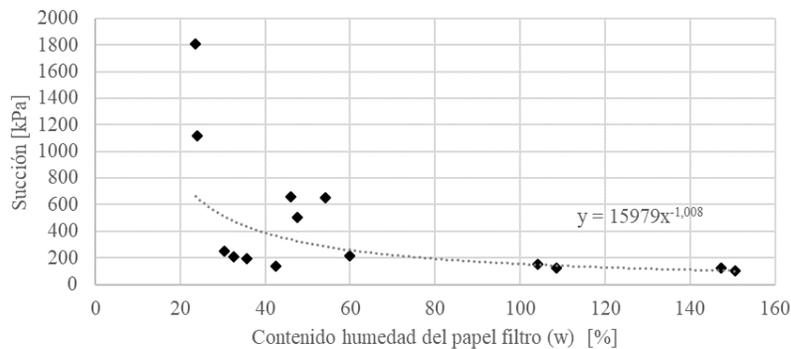


Figura 7-13: Regresión de las mediciones para los relaves 8, 9 y 12, para calibración del método papel filtro.
Fuente: Elaboración propia.

Con la calibración antes obtenida mediante regresión no lineal según lo sugerido por Bicalho et al. (2011), se obtiene la siguiente ecuación con variable independiente la humedad del papel filtro y variable dependiente la succión del suelo.

$$h = 15979 * w^{-1,008}$$

Donde:

- h Succión matricial, en [kPa], y
 w Contenido de humedad del papel filtro [%].

Dicha regresión, fue obtenida con un coeficiente de correlación $R^2=0,5$.

Debido a la dispersión y la disponibilidad de cantidad de muestra de cada relave para la obtención de las SWRC mediante este método, sólo fue obtenida la curva para el relave 10 (Figura 7-14), la cual se muestra en la Figura 7-14, comparada con la curva obtenida mediante el método de la cámara de presión con plato poroso.

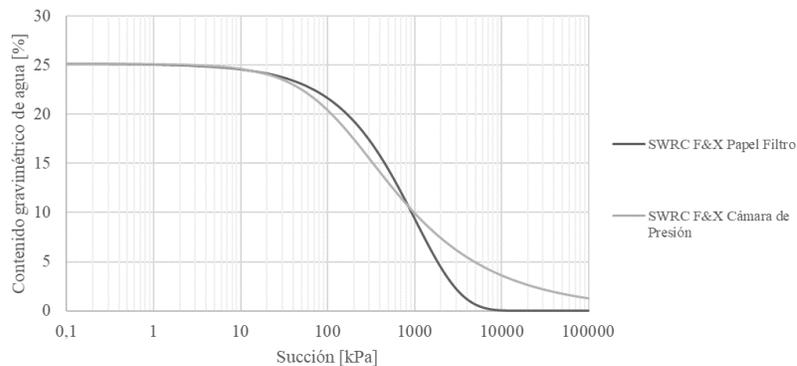


Figura 7-14: Comparación de SWRC obtenidas mediante el método del papel filtro y cámara de presión.
Fuente: Elaboración propia.

7.3.2. Comentarios del método

La obtención de la SWRC mediante el método del papel filtro, es un método, que a diferencia del método de la cámara de presión, genera curvas con poca repetitividad y con gran dispersión (Figura 7-13), sin embargo arroja resultados relativamente buenos para succiones dentro del rango de calibración (i.e. 0-1500 [kPa]).

Los errores de medición se pueden producir producto de la contaminación del papel filtro con el material en medición, lo que debido a la sensibilidad del método debido a la precisión necesaria (0,001 [g]), puede provocar valores con una dispersión no menor. Además, la demora en la medición de más de 5 segundos puede provocar errores de hasta un 5% (ASTM D 5298), lo cual se ve acentuado producto de la humedad relativa y las altas temperaturas.

Considerando que, si se disponen suficientes contenedores de medición, el método logra obtener la totalidad de la curva en un periodo de siete días, lo cual es bastante mejor que lo que logra obtener la cámara

de presión con platos porosos (un mes para cuatro puntos¹). Por lo anterior el método logra obtener resultados relativamente buenos para un análisis preliminar (e.g. análisis de ingeniería básica).

7.4.Comparación de los Métodos de Ajuste

Una de las formas de poder encontrar la curva de retención de agua en su totalidad, es mediante la aplicación de modelos de ajuste, presentados en el punto 3.3.3, lo cual permite obtener una representación continua de la SWRC. A continuación, se presentan las regresiones de los parámetros para tres modelos de ajuste, estos son el modelo de van Genuchten (1980), el modelo de Fredlund & Xing (1994) y el modelo de Pham & Fredlund (2011), los dos primeros de tres parámetros de regresión y el último de sólo dos parámetros. Las regresiones antes mencionadas, se presentan a continuación para un relave de cada clasificación USCS obtenida en el presente estudio, estos son relave 7, relave 10 y relave 12, clasificados como SM, ML-CL y CI respectivamente.

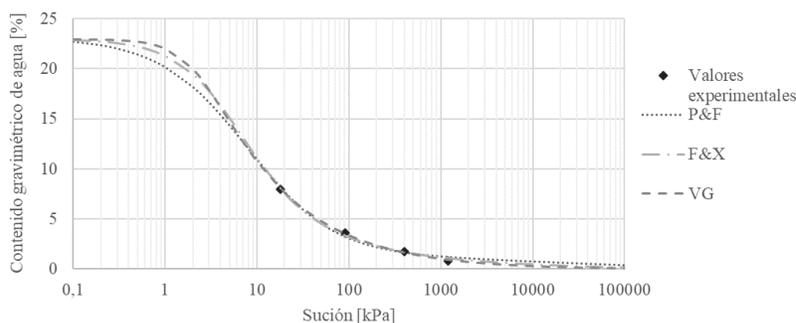


Figura 7-15: Comparación modelos de ajuste van Genuchten (1980), Fredlund & Xing (1994) y Pham & Fredlund (2011) para relave 7.
Fuente: Elaboración propia.

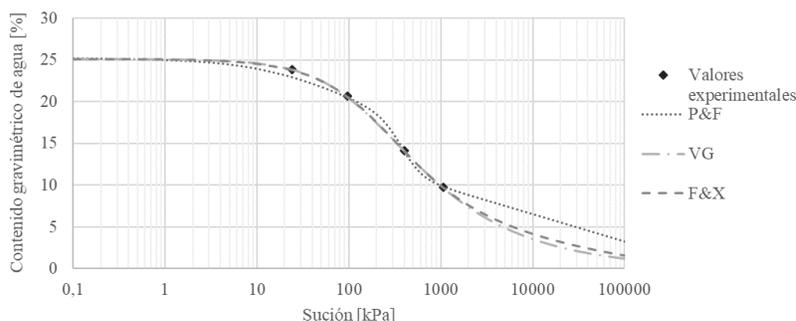


Figura 7-16: Comparación modelos de ajuste van Genuchten (1980), Fredlund & Xing (1994) y Pham & Fredlund (2011) para relave 10.
Fuente: Elaboración propia.

¹ Sin embargo, Riquelme et al. (2016), logró obtener buenos resultados para relaves de cobre con 2 mediciones por medio de la cámara (30 y 1500 [kPa]) y la humedad de saturación, lo cual se traduce en 15 días de medición.

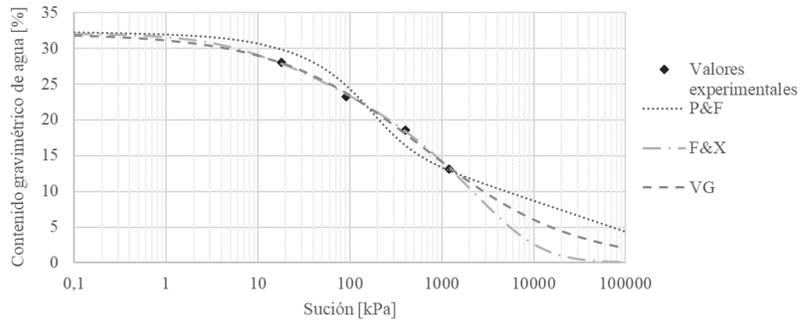


Figura 7-17: Comparación modelos de ajuste van Genuchten (1980), Fredlund & Xing (1994) y Pham & Fredlund (2011) para relave 12.
Fuente: Elaboración propia.

El ajuste mediante el modelo de van Genuchten (VG), arrojó una media del error cuadrático medio (ECM) de 0,05, el modelo de Fredlund & Xing (F&X), arrojó una media del ECM de 0,031 y el modelo del Pham & Fredlund (P&F), arrojó un ECM de 0,681. Lo anterior nos indica, que al menos para el ajuste de los valores experimentales a una curva continua de la SWRC, el modelo de Fredlund & Xing (1994), presenta mejores resultados, seguido por el modelo de van Genuchten (1980) y finalmente el modelo de Pham & Fredlund (2011).

Como se puede apreciar en la Figura 7-15, Figura 7-16 y Figura 7-17, las curvas obtenidas son bastante similares pero con una discrepancia entre ellas en la zona residual, lo cual puede ser mejorados con valores experimentales para esos valores, sin embargo, obtener valores en aquel rango de valores por medio de la cámara de presión no es posible, por lo que es necesario nuevos estudios en dichas zonas. No obstante, para relaves de clasificación más gruesa como las arenas y los limos, y en particular para las arenas, estas diferencias se reducen hasta un nivel ínfimo.

7.5. Air-Entry Value

Como se mencionó en el punto 3.3.1, uno de los parámetros más importantes que se pueden obtener a partir de la SWRC es el valor de la entrada de aire, el cual representa el punto para el cual comienza a ingresar aire a la matriz de suelo en el proceso de desaturación.

El punto de la entrada de aire se calculó según las bases teóricas de van Genuchten (1991), Fredlund & Xing (1994), Ψ_{VG} y $\Psi_{F&X}$ respectivamente, y el llamado por diversos autores Ψ_{90} (e.g. Fredlund et al., 1993; Aubertin et al., 1998). En la Tabla 7-11, se presentan los valores del AEV asociados a cada enfoque teórico.

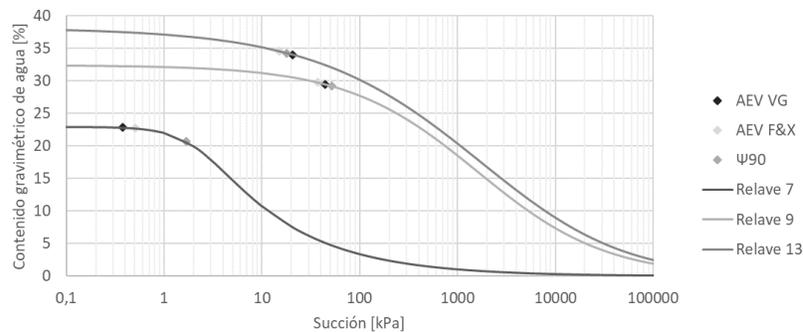


Figura 7-18: Ubicación de los AEV en tres relaves de tipo SM, ML-CL y CL de la industria nacional.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7-11: Valores del AEV mediante los enfoques teóricos de van Genuchten (1991), Fredlund & Xing (1993) y Ψ_{90} .

Fuente: Elaboración propia.

Relave	Ψ_{VG} [kPa]	$\Psi_{F\&X}$ [kPa]	Ψ_{90} [kPa]
1	0,11	0,69	0,21
2	3,87	11,04	2,32
3	4,79	8,66	3,36
4	0,78	0,65	2,93
5	0,7	0,72	1,64
6	0,59	1,01	2,9
7	0,38	0,51	1,67
8	62,12	54,76	50,32
9	44,58	36,99	52,14
10	46,66	46,03	48,06
11	28,88	25,69	16,1
12	22,85	14,32	10,85
13	20,6	15,13	17,8

En la Figura 7-18, se presentan tres curvas de relaves seleccionadas arbitrariamente de clasificación USCS SM ML-CL y CL, con la ubicación respectiva de cada AEV.

Como se puede apreciar en la Tabla 7-11 y Figura 7-18 los valores teóricos no se encuentran mayormente distantes, sin embargo, en el caso particular de las arenas el valor queda más fielmente representado por el Ψ_{90} , ya que los dos primeros valores se encuentran en la zona horizontal de la curva, es decir en la zona saturada, por lo que el ingreso de aire a la matriz de suelo aún no se ha producido. Esto es posible ratificarlo para el resto de los relaves como se puede apreciar en la Figura 7-19.

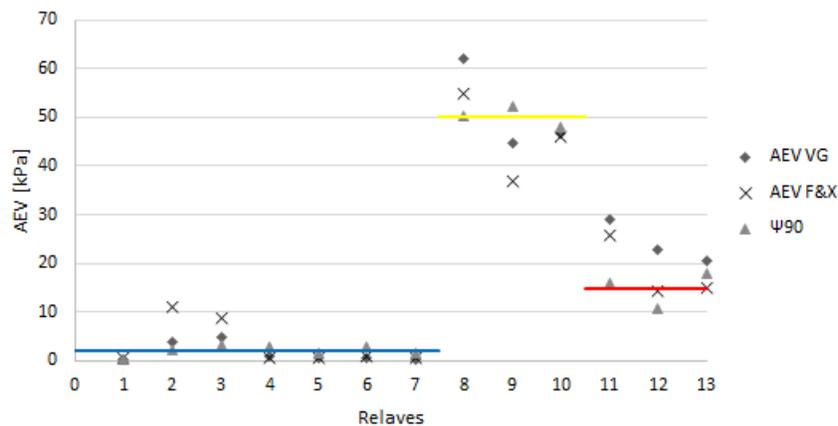


Figura 7-19: Variación del valor del AEV de los distintos autores en relaves de la industria nacional.

Fuente: Elaboración propia.

Considerando lo antes señalado y la facilidad que representa su cálculo, es que el método de cálculo del AEV a través del Ψ_{90} es altamente atractivo para el cálculo ingenieril.

7.6. Permeabilidad Parcialmente Saturada

El presente acápite consta del estudio teórico de la permeabilidad no saturada, según la teoría planteada por van Genuchten (1980), lo cual contribuye a la estimación de líneas de flujo no saturado, como por ejemplo en depósitos de relave.

Teniendo en cuenta el análisis de ajuste de van Genuchten (1980) realizado en el punto 7.4, en el cual se realizó una regresión de los parámetros de van Genuchten (i.e. α_{VG} , m_{VG} y n_{VG}), los cuales serán utilizados en la estimación de la conductividad hidráulica no saturada de las muestras de relaves. La conductividad hidráulica obtenida algunos relaves se presentan a continuación (**Figura 7-20**, **Figura 7-21** y **Figura 7-22**).

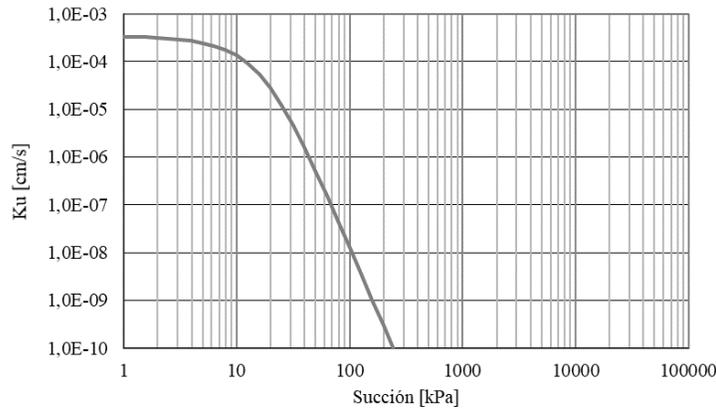


Figura 7-20: Conductividad hidráulica no saturada para relave 1.

Fuente: Elaboración propia.

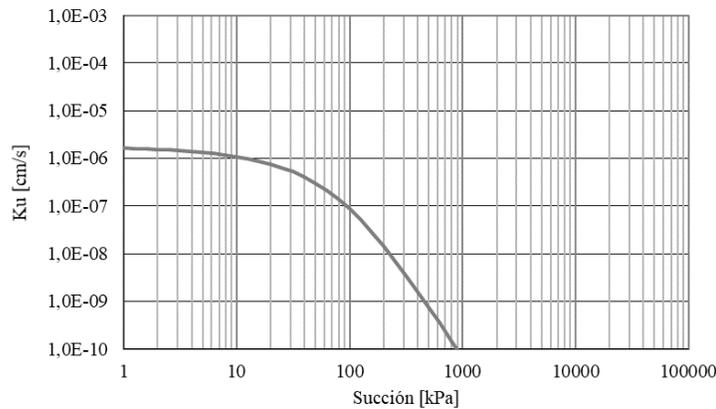


Figura 7-21: Conductividad hidráulica no saturada para relave 10.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la Figura 7-20, Figura 7-21 y Figura 7-22, la conductividad hidráulica decae rápidamente, esencialmente luego de exceder la succión asociada al AEV, la cual tiene un valor de 0,21, 48 y 11 para los relaves 1, 10 y 12 respectivamente. Por lo que para arenas esto ocurre a presiones bajo 10 [kPa], cercano a 100 [kPa] para limos.

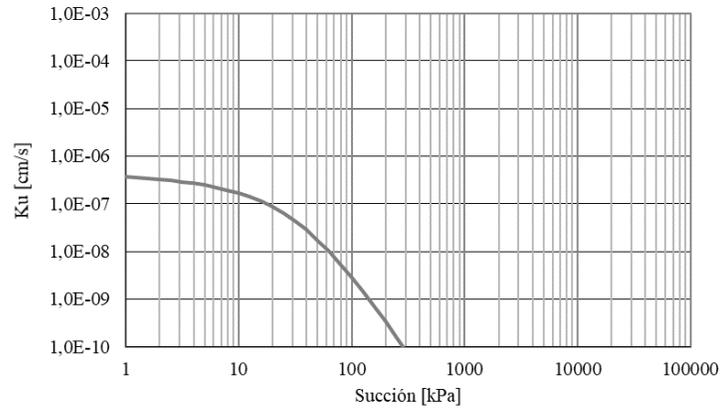


Figura 7-22: Conductividad hidráulica no saturada para relave 12.
Fuente: Elaboración propia.

7.7.Efectos de la variación del contenido de sólidos inicial

Como se mencionó en el punto 3.3.4.1, el estado inicial de la muestra es relevante al momento de la obtención de la curva de retención de agua. Es por ello la necesidad de establecer un estudio que ayude a tener en conocimiento la variabilidad de SWRC en cuando a la preparación inicial de las muestras.

Por lo antes mencionado, la motivación de este acápite es observar cómo se altera la SWRC, en la medida que se varía el contenido de sólidos inicial de los relaves, para el cual, el relave analizado será el relave 10, presentado anteriormente.

El presente estudio se realizará para contenidos de sólidos de 40, 50, 60 y 70%. En la Figura 7-23, se presentan los valores experimentales asociados a cada contenido de sólidos para cuatro incrementos de presión.

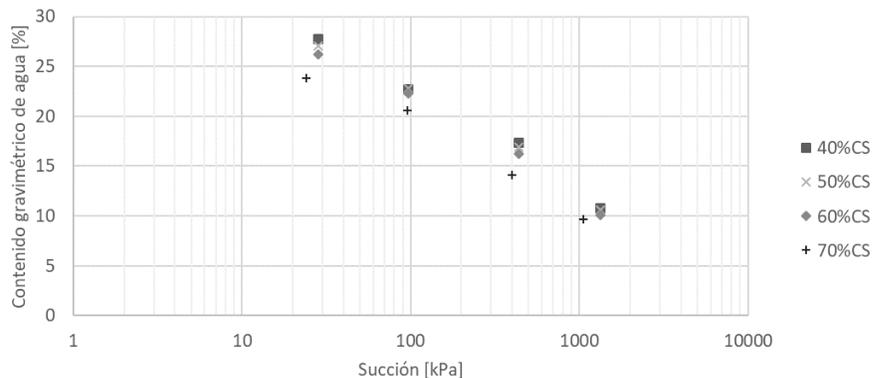


Figura 7-23: Dispersión de valores experimentales asociados al relave 10 bajo una preparación a distintos contenidos de sólidos.

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente a los valores anteriores, se obtuvieron los valores experimentales asociados a la humedad de saturación de las muestras, extrayendo el agua superficial a cada una de las muestras luego de haber dejado sedimentar por un periodo de 4 horas. Éstos se presentan a continuación en la Figura 7-14.

Tabla 7-12: Contenido gravimétrico de agua al límite de saturación según el contenido de sólidos de preparación de la muestra.

Fuente: Elaboración propia.

CS [%]	w_s [%]
40	28,50
50	27,71
60	26,33
70	25,13

Las curvas de retención de agua asociadas a los valores experimentales de la Figura 7-23 y de la Tabla 7-12 se presentan en la Figura 7-24.

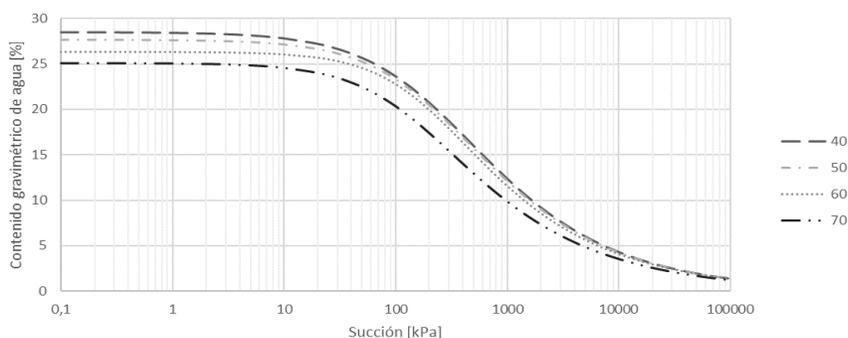


Figura 7-24: Curvas de retención de agua para el relave 10, con muestras preparadas a distintos contenidos de sólidos, ajustadas mediante el modelo de van Genuchten (1980).

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la Figura 7-24, el comportamiento de las curvas en la medida que disminuye el contenido de sólidos causa que la curva ascienda verticalmente, lo cual se esperaba según lo expuesto en el punto 3.3.4.1, donde el contenido de humedad inicial provoca un ascenso en la parte inicial de la curva para luego ir equiparándose asintóticamente a una única SWRC, lo cual se ratifica en este estudio. Esto es producto de que los poros iniciales tiene un tamaño mayor, capaces de almacenar mayor cantidad de agua los cuales colapsan en la medida en que se drena el agua dentro de la matriz del suelo, o relave, llegando a una misma curva para altas presiones, donde las propiedades capilares son irrelevantes en la succión, sino que más bien, las propiedades son gobernadas producto de las condiciones residuales, es decir, producto de la succión osmótica y fuerzas de atracción molecular.

La variación de los parámetros de van Genuchten, es decir α_{VG} , m_{VG} y n_{VG} , en el análisis antes presentado se exhiben en las gráficas que se muestran a continuación.

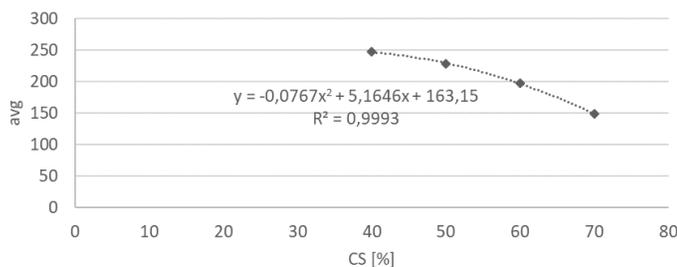


Tabla 7-13: Variación del parámetro α_{VG} del modelo de van Genuchten.

Fuente: Elaboración propia.

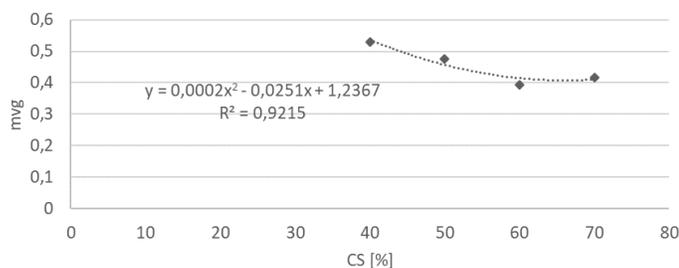


Tabla 7-14: Variación del parámetro m_{VG} del modelo de van Genuchten.
Fuente: Elaboración propia.

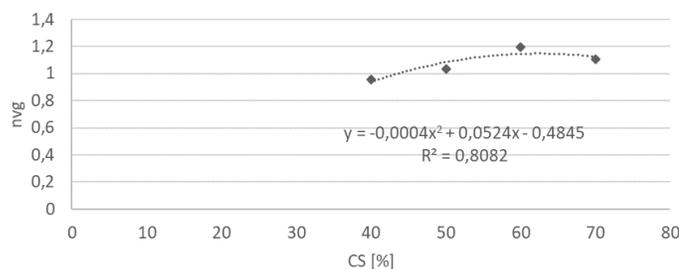


Tabla 7-15: Variación del parámetro α_{VG} del modelo de van Genuchten.
Fuente: Elaboración propia.

7.8. Estimación de la SWRC

7.8.1. Estimación mediante modelos propuestos anteriormente

Otra forma de obtención de la curva de retención de agua es mediante la estimación de la SWRC. Este tipo de estudios se han visto fomentados debido a la dificultad que presenta la determinación de la SWRC de forma experimental, por lo cual el desarrollo de modelos de estimación a partir de algunas propiedades básicas del material, en este caso relaves, ha sido uno de principales motivos de estudio en la materia en las últimas décadas. En el presente estudio se evaluarán las estimaciones de tres modelos propuestos por Vereecken et al. (1989), Aubertin et al. (2003) y Pham & Fredlund (2011).

Los parámetros básicos utilizados por los distintos modelos son asociados principalmente a la granulometría y al índice de vacíos, por ejemplo, el modelo de Vereecken, estima la SWRC a partir de la regresión de los parámetros de van Genuchten utilizando como parámetros de entrada el contenido de arenas, el contenido de arcillas y la densidad. El modelo de Aubertin, o modelo MK, realiza una estimación utilizando una modificación del modelo de Kovács (1981), a partir del índice de vacíos, D_{10} , y la gravedad específica (G_s). En cuanto al modelo de Pham et al. utiliza los mismos parámetros del modelo de Aubertin y además adiciona un parámetro C_c asociado a la histéresis de la curva de retención de agua.

A continuación, en la Figura 7-25, Figura 7-26 y Figura 7-27 se presentan las curvas de retención de agua estimadas mediante los tres métodos antes señalados, para tres relaves según las clasificaciones antes estudiadas, es decir, relaves con clasificación SM, ML-CL y CL.

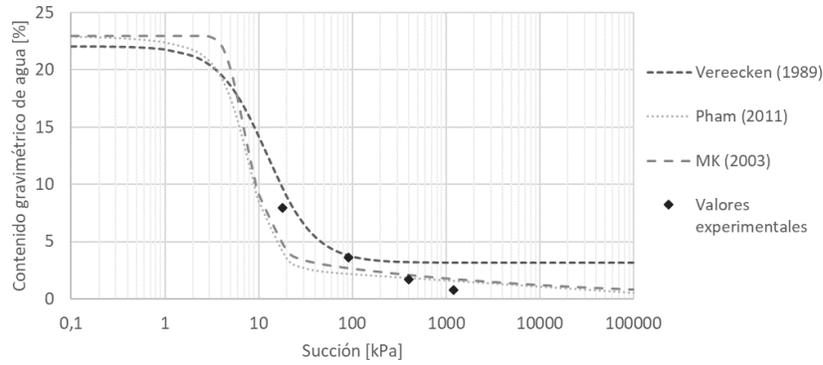


Figura 7-25: Estimación de la SWRC para el relave 7 mediante los modelos de Vereecken et al. (1989), Aubertin et al. (2003), Pham et al. (2011).
 Fuente: Elaboración propia.

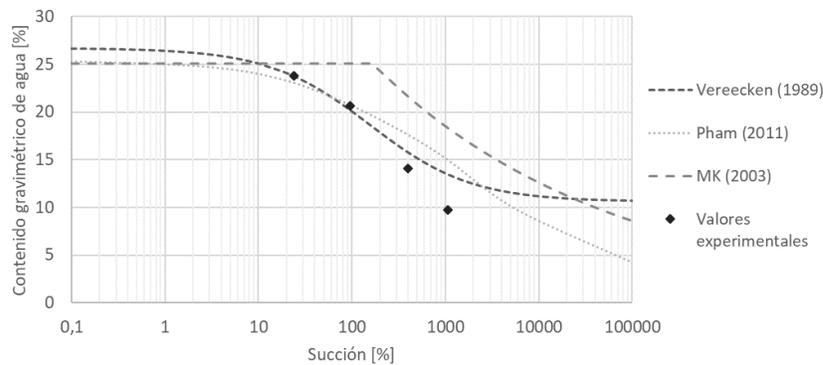


Figura 7-26: Estimación de la SWRC para el relave 10 mediante los modelos de Vereecken et al. (1989), Aubertin et al. (2003), Pham et al. (2011).
 Fuente: Elaboración propia.

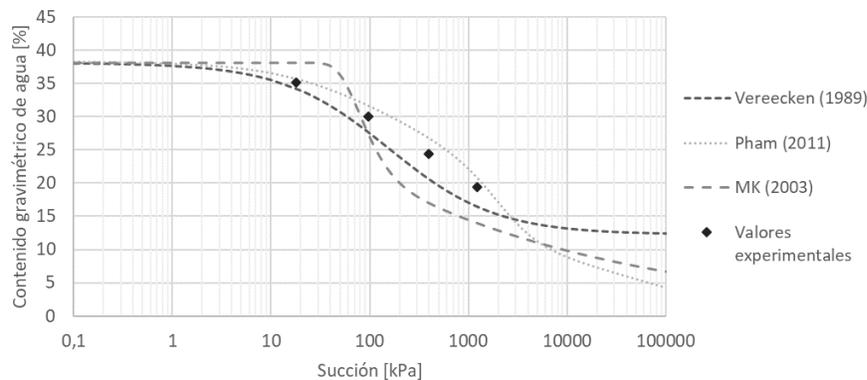


Figura 7-27: Estimación de la SWRC para el relave 13 mediante los modelos de Vereecken et al. (1989), Aubertin et al. (2003), Pham et al. (2011).
 Fuente: Elaboración propia.

La estimación mediante el modelo de Vereecken arrojó una media del error cuadrático medio (ECM) de 32,35, el modelo de Aubertin arrojó una media del ECM de 59,17 y el modelo del Pham & Fredlund arrojó un ECM de 4,74. Lo anterior nos indica, que la estimación para los valores experimentales de la SWRC, el

modelo de Pham & Fredlund (2011), presenta mejores resultados, seguido por el modelo de Vereecken (1989) y finalmente el modelo de Aubertin (2003).

Como se puede observar, en la Figura 7-25, Figura 7-26 y Figura 7-27, el modelo de Vereecken no posee gran variabilidad con respecto al modelo de Pham et al. hasta antes del AEV, sin embargo luego de ello, el modelo de Pham et al. se aleja asemejándose en una parte final al modelo planteado por Aubertin. Lo anterior es debido a que ambos modelos poseen en su expresión algebraica, un factor de corrección proveniente del modelo de Fredlund & Xing (1994), presentado en el punto 3.3.3.3. Adicionalmente, se puede mencionar que el modelo de Vereecken, en promedio se acerca de mejor manera a la parte inicial de los valores experimentales de la SWRC, sin embargo, tiende a sobreestimar los valores cercanos a la zona residual.

7.8.2. Propuesta modelos alternativos de estimación de la SWRC

No obstante, a lo antes presentado, los modelos de estimación más utilizados requieren una gran cantidad de recursos en cuanto a los parámetros de entrada. Es por ello, que en el presente apartado se proponen dos modelos, un modelo de estimación de dos parámetros de entrada, como lo es la humedad de saturación y el contenido de finos en las muestras, y además, un modelo de estimación completa con parámetros de entrada la gravedad específica (G_s) y contenido de finos de la muestra. Todos estos parámetros de entrada son valores obtenibles con relativa facilidad y a la vez económicos.

Es de conocimiento general que el contenido de finos, al igual que el grado de compactación, en el suelo es directamente asociable a la capilaridad que el suelo presenta, y dicha capilaridad es altamente influyente en el comportamiento de la SWRC, como se mencionó en el punto 3.3. Es por ello, que en este acápite se analizará principalmente el comportamiento de los relaves al variar el contenido de finos de éstos.

Los modelos de estimación que se desarrollan en este apartado, se realizarán mediante regresión y ajuste de los parámetros del modelo de van Genuchten (1980), es decir α_{VG} , m_{VG} y n_{VG} , asumiendo una succión residual nula (i.e. modelo 5 de Vereecken presentado en el punto 3.3.3.2).

Las curvas que se utilizaron en la calibración del modelo provienen de granulometrías sintéticas realizadas con muestras del relave 6, formando granulometrías con un contenido de finos de 0, 23, 50, 75 y 100%, las cuales se presentan a continuación en la Figura 7-28.

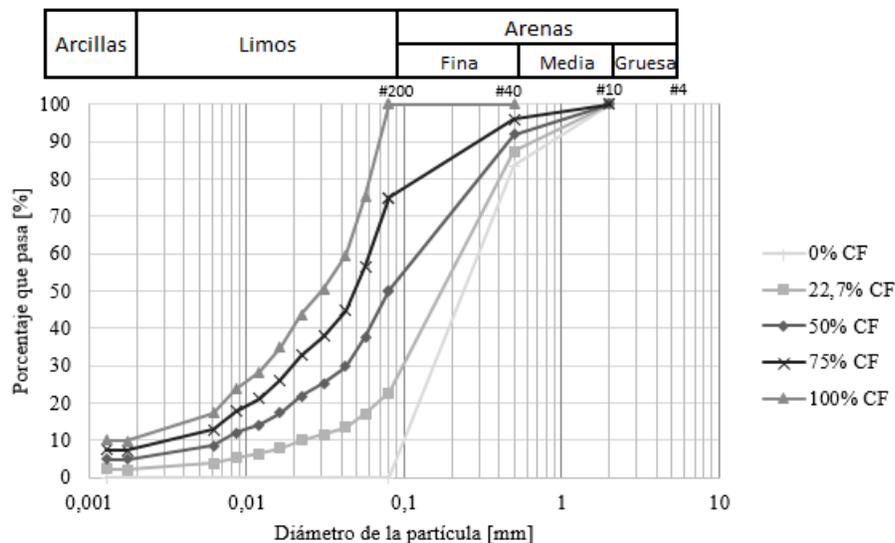


Figura 7-28: Granulometrías sintéticas relave 6 para calibración de modelos de estimación propuestos.

Fuente: Elaboración propia.

Con las muestras presentadas anteriormente (Figura 7-28), se obtuvieron las SWRC asociadas a cada una las cuales se presentan en la Figura 7-29.

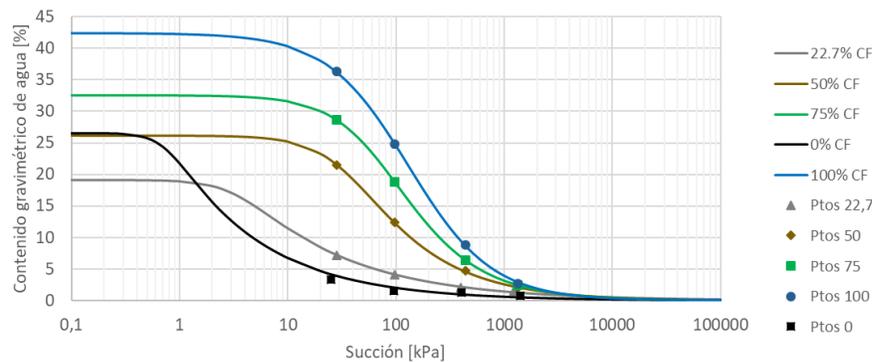


Figura 7-29: SWRC provenientes del relave 6 con granulometrías sintéticas.
Fuente: Elaboración propia.

7.8.2.1. Estimación mediante contenido de humedad de saturación y contenido de finos

La estimación utilizando el contenido de humedad de saturación (i.e. humedad a succión nula), y el contenido de finos (i.e. cantidad de material bajo la malla #200), en adelante modelo 1, es posible realizarla mediante una regresión de los parámetros del modelo de van Genuchten, es decir α_{VG} , m_{VG} y n_{VG} , agregando a ella la modificación impuesta por Fredlund & Xing (1994) en su modelo de estimación tendiendo a un valor nulo la humedad residual, con ello es posible evitar los errores de sobreestimación obtenidos mediante el modelo de Vereecken, modelo igualmente basado en el modelo de van Genuchten (1980).

De esta manera el modelo de regresión está constituido mediante la siguiente expresión:

$$w(\psi) = \frac{w_s}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m}$$

El cual consta de un modelo de tres parámetros de regresión los cuales se detallan a continuación.

Los parámetros de regresión obtenidos α_{VG} , m_{VG} y n_{VG} de cada relave sintético se presentan en la Figura 7-30, Figura 7-31 y Figura 7-32 respectivamente, con las referentes curvas de regresión propuestas.

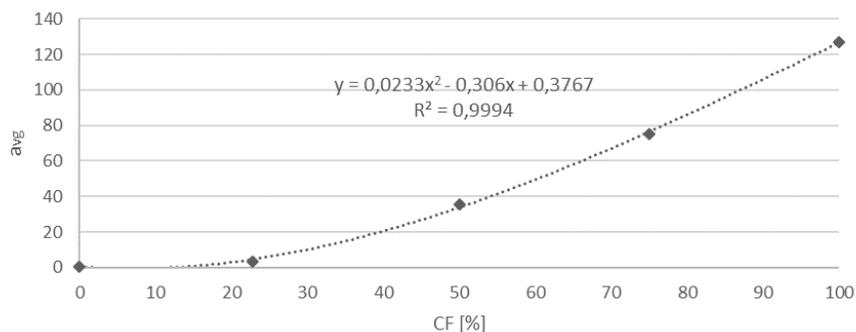


Figura 7-30: Calibración parámetro α_{VG} modelo van Genuchten.
Fuente: Elaboración propia.

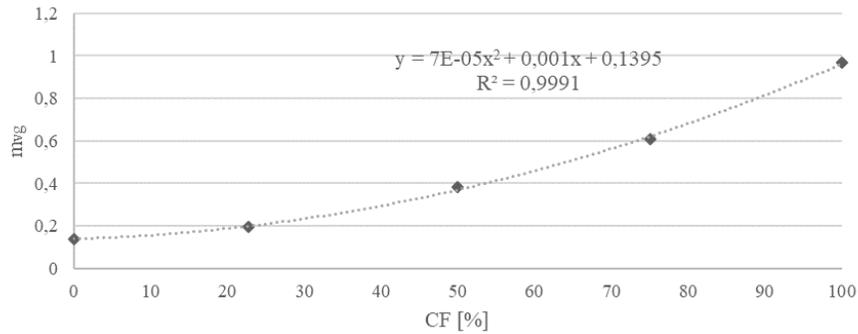


Figura 7-31: Calibración parámetro m_{VG} modelo van Genuchten.
Fuente: Elaboración propia.

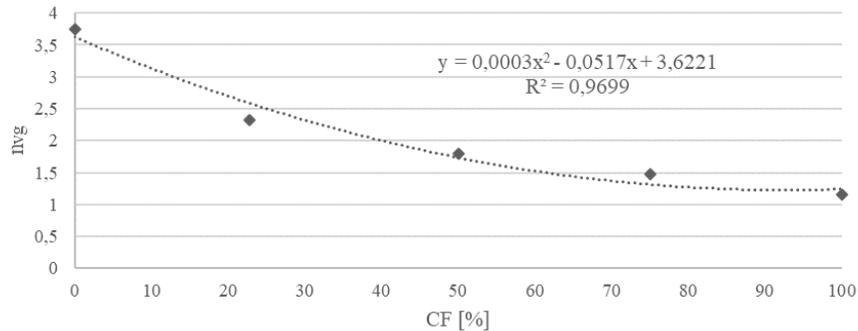


Figura 7-32: Calibración parámetro n_{VG} modelo van Genuchten.
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en las calibraciones de los parámetros de regresión antes presentados, es posible estimarlos mediante polinomios de segundo grado entregando coeficientes de correlación R^2 cercanos a la unidad. Las ecuaciones de regresión obtenidas para los parámetros de van Genuchten se presentan a continuación.

$$\alpha_{VG} = 0,0233CF^2 - 0,306CF + 0,3767$$

$$m_{VG} = 0,00007CF^2 + 0,001CF + 0,1395$$

$$n_{VG} = 0,0003CF^2 - 0,0517CF + 3,6221$$

Donde:

CF Contenido de finos de la muestra de relaves.

Utilizando la calibración antes presentada, sólo es necesario el contenido de finos y la humedad de saturación de los relaves para utilizar el modelo descriptivo de van Genuchten como un modelo de estimación de la curva de retención de agua. A continuación, se presentan algunas SWRC estimadas mediante el modelo propuesto comparándolos con los valores experimentales antes presentados, donde los parámetros de entrada son obtenidos del punto 7.1.5.

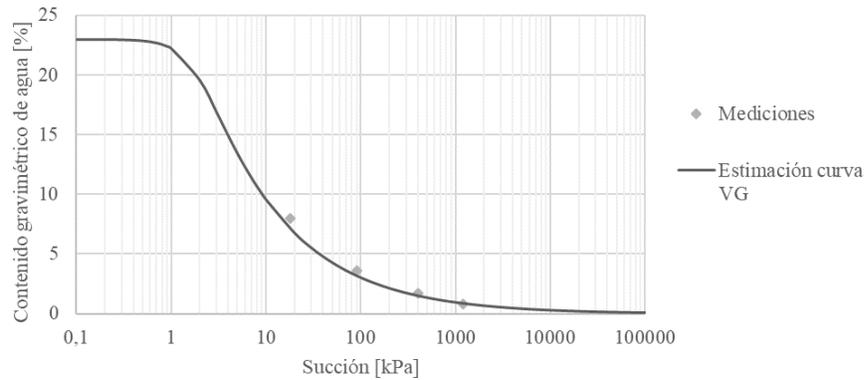


Figura 7-33: Estimación SWRC para relave 7 mediante modelo 1 comparada con datos experimentales.
Fuente: Elaboración propia.

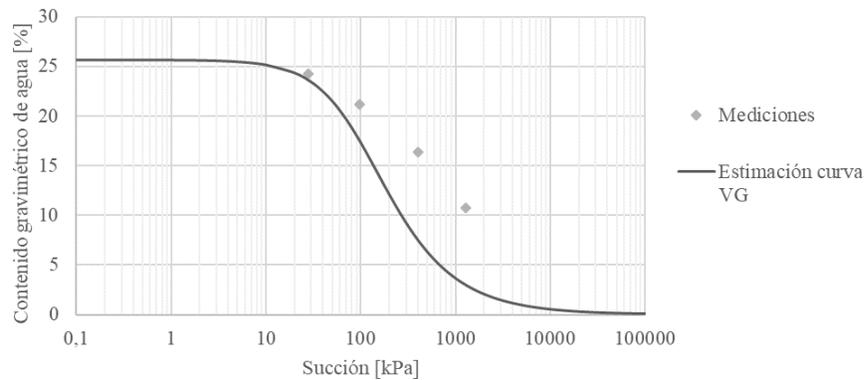


Figura 7-34: Estimación SWRC para relave 8 mediante modelo 1 comparada con datos experimentales.
Fuente: Elaboración propia.

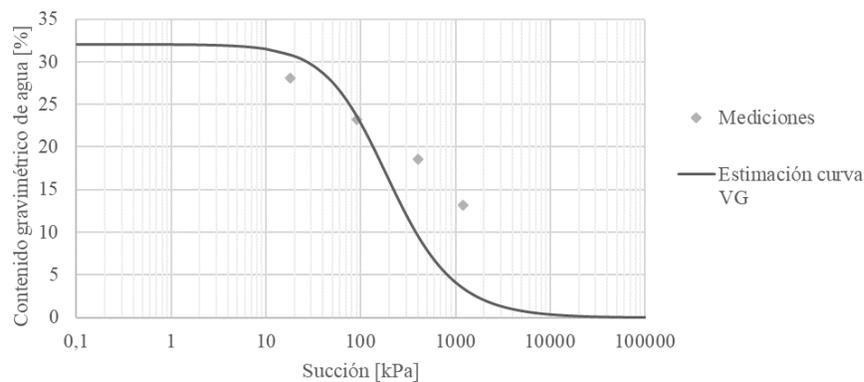


Figura 7-35: Estimación SWRC para relave 12 mediante modelo 1 comparada con datos experimentales.
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en las curvas estimativas antes presentadas, las SWRC obtenidas presentan una mejor estimación de las arenas limosas (Figura 7-33) que para relaves más finos (i.e. relaves de clasificación ML-CL y CL), sin embargo, si se tiene en cuenta que el modelo 1 sólo requiere el contenido de finos y la humedad de saturación, los cuales son valores obtenibles con relativa facilidad y de forma rápida, por lo que no demanda cuantiosos recursos en la obtención de la SWRC bajo este modelo.

7.8.2.2. Estimación completa mediante gravedad específica (G_s) y contenido de finos

La estimación de la SWRC mediante la utilización de la gravedad específica y el contenido de finos, en adelante modelo 2, es un modelo complementario al modelo 1, en la cual se le agrega la estimación de la humedad de saturación (w_s) por medio del contenido de finos (CF) y la gravedad específica (G_s). Para comprender de mejor manera la relación que existe entre estos parámetros del suelo, en la Figura 7-36 se presenta una gráfica en la que se exhibe la relación presente entre estas variables.

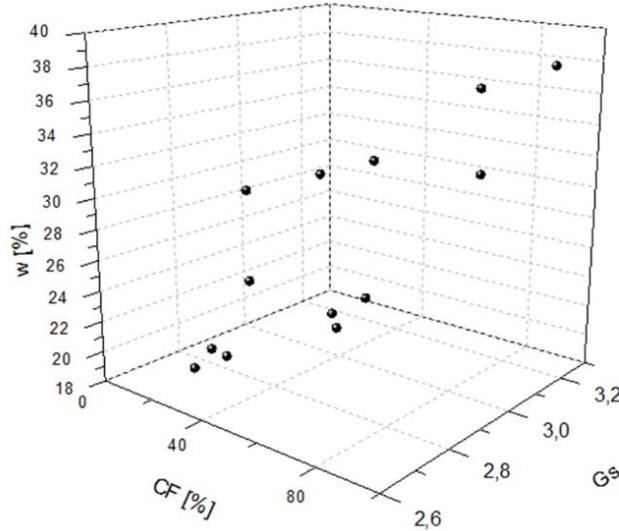


Figura 7-36: Relación experimental entre el contenido de finos (CF), gravedad específica (G_s) y humedad de saturación (w_s).

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la Figura 7-36, la relación existente entre estas variables es cercana a la linealidad, por ello se utilizará una relación de este tipo para la estimación de la humedad de saturación, la cual se obtiene mediante regresión de las variables en un modelo lineal como se modela a continuación.

$$w_s = a * CF + b * G_s + c$$

Donde:

a, b, c Parámetros de regresión del modelo 2.

Como se mencionó anteriormente, estos parámetros se obtienen mediante regresión de los datos experimentales, obteniéndose los valores presentados en la Tabla 7-16.

Tabla 7-16: Parámetros de regresión para la estimación de la humedad de saturación.

Fuente: Elaboración propia.

a	b	c
0,15	12	-15,53

De esta manera, es posible obtener los valores asociados a la humedad de saturación para los relaves en estudio. En la Figura 7-37 se presenta la comparación entre los valores experimentales y los valores estimados mediante la propuesta antes presentada.

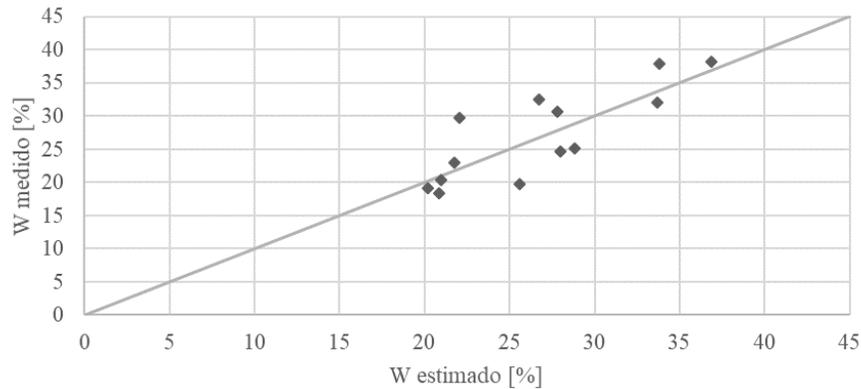


Figura 7-37: Comparación entre los valores experimentales y los valores estimados propuestos mediante el modelo de regresión.

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta lo antes presentado, es decir, la estimación del límite de saturación, utilizando para ello la gravedad específica y el contenido de finos del relave analizado y evaluando el resto de la curva mediante la estimación de los parámetros de regresión de van Gneuchten, utilizando para ello sólo el contenido de finos, es posible establecer una estimación de la SWRC en su totalidad. A continuación, en las figuras siguientes (Figura 7-38, Figura 7-39 y Figura 7-40) se presentan curvas estimadas mediante el modelo 2.

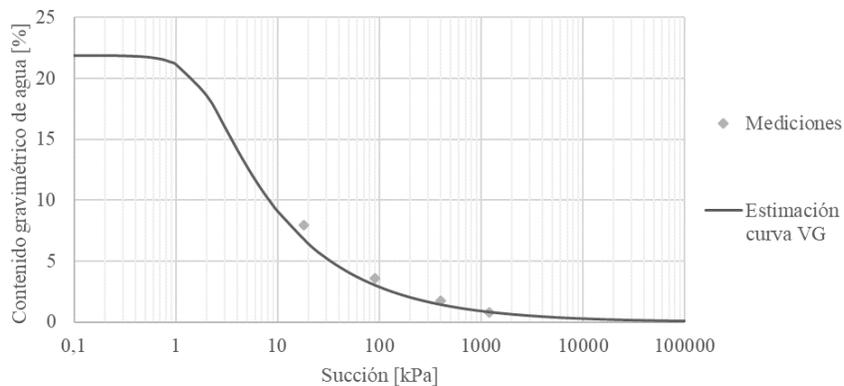


Figura 7-38: Estimación SWRC para relave 7 mediante modelo 2 comparada con datos experimentales.

Fuente: Elaboración propia.

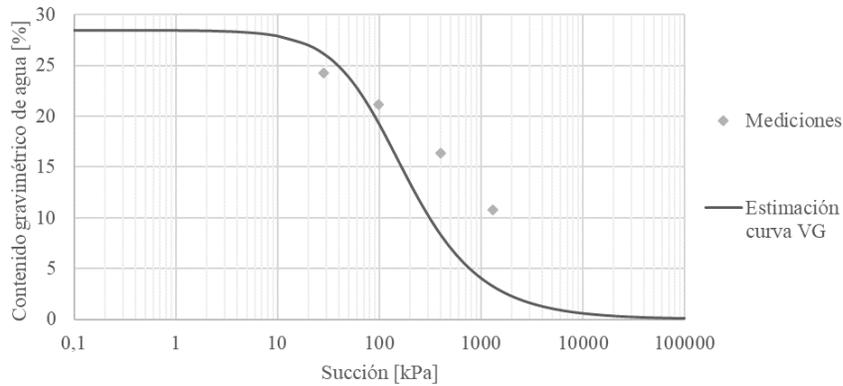


Figura 7-39: Estimación SWRC para relave 8 mediante modelo 2 comparada con datos experimentales.

Fuente: Elaboración propia.

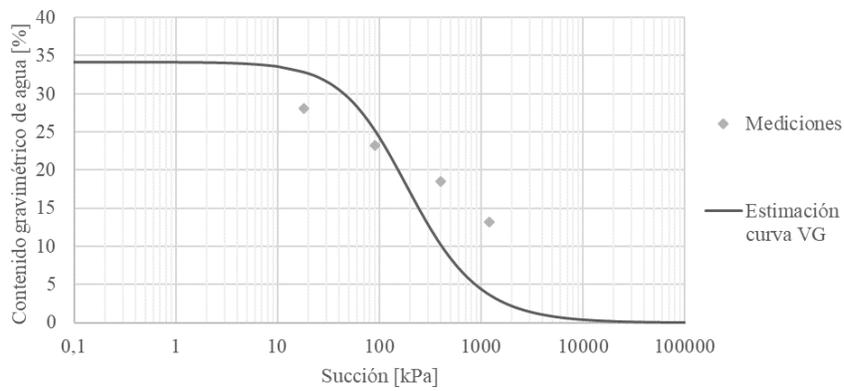


Figura 7-40: Estimación SWRC para relave 12 mediante modelo 2 comparada con datos experimentales.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo 2 antes presentado, si bien estima la SWRC de forma bastante aceptable, ésta presenta una dispersión no despreciable en el valor del límite de saturación, la cual un pequeño error en este punto puede desencadenar grandes errores en el resto de la curva, por lo que una buena estimación de este punto es esencial en la estimación completa de la SWRC.

Sin embargo, al igual que el modelo 1 propuesto previamente, dada la rapidez con la que es posible obtener los valores de entrada para este modelo, y que devengan gastos relativamente bajos, es por lo que obtener la SWRC bajo el modelo 2 propuesto es bastante atractivo y más aún para estudios de preliminares o de ingeniería básica.

7.8.3. Estimación mediante modelos propuestos para valores experimentales de otros autores

José Riquelme y Cristián Godoy (2016), presentaron valores experimentales de la curva de retención de agua para 5 relaves de cobre de la industria nacional (Figura 7-41), 4 obtenidos mediante la cámara de presión y 1 obtenido mediante la técnica del papel filtro (relave 5).

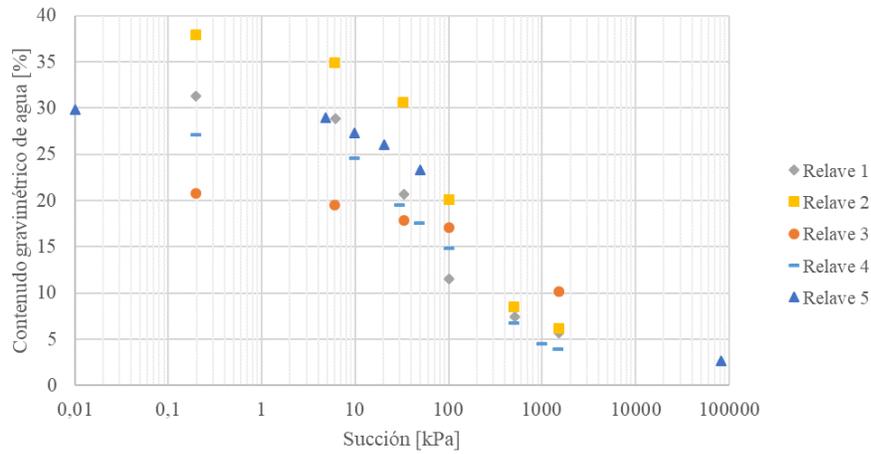


Figura 7-41: Valores experimentales para 5 relaves de cobre.
 Fuente: Modificado de Riquelme et al., 2016.

Para el caso particular del relave 4, que se presenta a continuación, se obtiene estimaciones bastante cercanas a los valores experimentales, arrojando un ECM de 10,4 para la obtención de la curva mediante el modelo 1 (Figura 7-42) y un ECM de 16,4 para el modelo 2 (Figura 7-43).

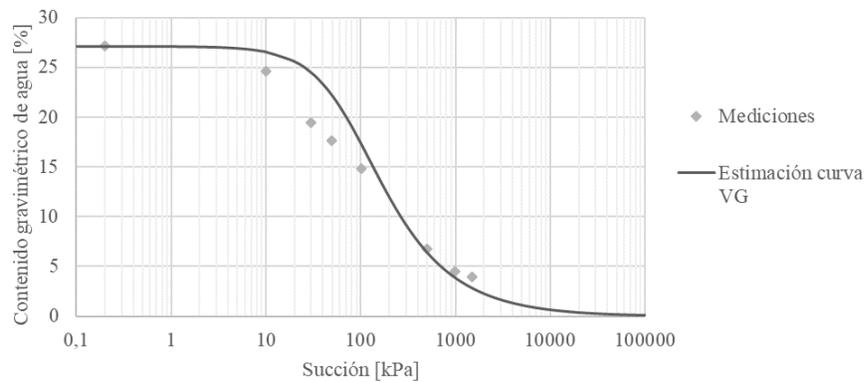


Figura 7-42: Estimación mediante modelo 1 propuesto, para relave 4 de Riquelme et al. (2016).
 Fuente: Elaboración propia.

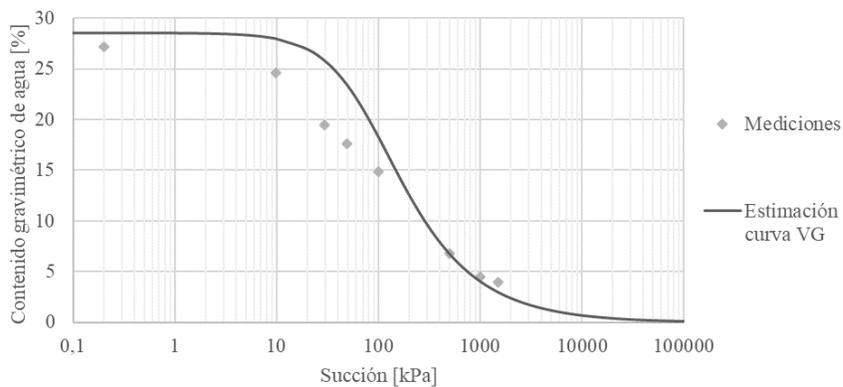


Figura 7-43: Estimación mediante modelo 2 propuesto, para relave 4 de Riquelme et al. (2016).
 Fuente: Elaboración propia.

Con lo anterior se ratifica que los modelos propuestos generan estimaciones de la SWRC de una forma aceptable, siendo la estimación entregada mediante el modelo 1 una mejor estimación que la entregada el modelo 2.

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES

Chile en la actualidad consta de una gran cantidad de depósitos de relaves, la mayoría de ellos clasificados como tranques de relaves, seguidos por los embalses de relaves, los cuales constituyen aproximadamente un 97% de los 740 relaves existentes en el territorio nacional. Estos depósitos al interactuar con la atmósfera y el mismo drenaje ejecutado en la operación de éstos, modifican el estado inicialmente saturado, con el cual son vertidos, a un estado parcialmente saturado, que abarca desde el nivel freático hasta la superficie. Bajo este contexto, es que el estudio de las propiedades no saturadas de los relaves adquieren una gran relevancia, las cuales con el auge de la tecnología han podido ser estudiadas con mayor profundidad.

Los efectos de la capilaridad en los depósitos de relaves provocan un ascenso del agua sobre el nivel freático, provocando que el grado de saturación se encuentre muy cercano a la unidad, lo cual ante nuevos suministros de agua, provenientes de variables atmosféricas o antrópicas, como lo es el nuevo vertido de relaves, causen que el nivel freático ascienda rápidamente. Este ascenso repentino del nivel freático provoca que las propiedades de los relaves se vean alteradas (e.g. respuesta sísmica), es por ello que una correcta operación de los depósitos de relaves, con la ayuda del conocimiento de las propiedades parcialmente saturadas es trascendental para la seguridad de los mismos.

Las propiedades parcialmente saturadas tanto de los suelos, como en el caso particular de los relaves, tienen como fundamento la curva de retención de agua (SWRC, por su sigla en inglés, soil wáter retention curve), la cual consta de una relación entre el contenido de agua, expresada como contenido gravimétrico o contenido volumétrico de agua) y la succión del suelo. Esta curva de retención de agua es posible dividirla en tres zonas mediante dos puntos definidos como el punto de la entrada de aire (AEV, por sus siglas en inglés, Air Entry Value) y por el punto de succión residual, dividiendo las zonas como una zona gobernada por succiones menores o gravimétricas, una segunda zona gobernada por succiones intermedias o capilares llamada zona de transición y una última zona, gobernada por altas succiones y bajos contenidos de humedad, llamada zona residual.

Por lo anterior, el presente estudio buscó ampliar el conocimiento de la curva de retención de agua y con ello poder realizar una caracterización en relaves multimetálicos de la industria minera nacional. A modo de posibilitar lo anterior, se implementó en las dependencias del laboratorio de geotécnia de la Universidad Técnica Federico Santa María con dos métodos de medición de la SWRC, estos son, el método tradicional de la cámara de presión con platos porosos y el método del papel filtro.

Respecto del análisis de las propiedades de los relaves de la industria minera nacional realizado en el presente estudio, se puede concluir lo siguiente:

- Se realiza una caracterización de los relaves nacionales compuestos principalmente arenas finas o limos. Las arenas, en su mayoría producto del ciclonado en tranques de relaves, poseen una gran cantidad de arenas finas retenidas en la malla #200 (i.e. 0,08 [mm]), y un contenido de limos cercano al 20% y menos del 10% de arcillas. En cuanto a los limos, obtenidos producto de la parte fina del cliclonado en tranques de relaves y relaves integrales, poseen una gran cantidad de limos, cercano al 60% para relaves integrales y un 80% para relaves ciclinados. En cuanto a los límites de plasticidad, las arenas al estar constituídas por una baja

cantidad de arcillas no presentan plasticidad, no así los limos que al estar compuestas por una mayor cantidad de finos presentan una plasticidad que si bien no es elevada, posee índices de plasticidad (IP), bajo 10% para relaves producto de la extracción del cobre-oro-molibdeno y bajo un 15% para relaves producto de la extracción de hierro.

Las demás propiedades de este tipo de materiales se presentan en la siguiente tabla resumen (Tabla 8-1), en donde se exhiben los rangos de valores obtenidos en la caracterización.

Tabla 8-1: Resumen para los rangos de valores obtenidos en la caracterización de relaves.

Fuente: Elaboración propia.

G_s [-]	ρ_{min} [T/m ³]	$\rho_{Proctor}$ [T/m ³]	$W_{Proctor}$ [%]	IP [%]	Permeabilidad [cm/s]	w_s [%]
2,7 – 3,2	0,98 – 1,59	1,62 – 2,03	13,5 – 17	2 – 14	$3 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-4}$	18 – 38

- Se establece una metodología para la obtención experimental de la curva de retención de agua mediante el método de papel filtro y cámara de presión con platos porosos.
- El método del papel filtro si bien logra obtener una curva en 7 días, posee una dispersión importante, lo cual puede derivar en errores en la estimación de otras propiedades de los suelos no saturados a partir de la SWRC. Sin embargo, el método de la cámara de presión con platos poroso es un método con alta fiabilidad y poca dispersión en los valores obtenidos, por lo que obtener la SWRC experimentalmente a partir de la cámara de presión con platos porosos logra resultados con una calidad más elevada que a partir de método del papel filtro.
- Las 13 curvas de retención de agua obtenidas a partir de relaves multimetálicos de la industria nacional, encontrando valores para el valor de la entrada de aire en un rango de 0 – 3 [kPa] para las arenas y un rango de 10 – 50 [kPa] para limos. En cuanto a la succión residual se encontraron valores para las arenas en un rango de 20 – 200 [kPa], y para limos se encontraron valores en el rango de 1000 – 10000 [kPa]. En cuanto a las pendientes de la zona de transición de la SWRC, se observó que para arenas la pendiente es mayor a la alcanzada por los limos, esto es debido a que la pendiente de la curva está asociada a la permeabilidad de la muestra. Un caso particular ocurre para el relave 2, el cual posee una pendiente más horizontal que sus similares, esto es debido a su mayor contenido de finos, específicamente arcillas presentes en este depósito de relaves, lo cual es posible ratificarlo ya que es el único relave clasificados como arena con presencia de plasticidad.
- En las curvas de conductividad hidráulica parcialmente saturada de los relaves, se observa que la permeabilidad decae rápidamente luego del valor de la entrada de aire, lo cual ocurre para un valor de menos del 10 [kPa] para arenas y para en un rango de 50 a 100 [kPa] para limos.
- Se ratificó que el efecto de la humedad inicial de los relaves modifica la SWRC, de tal manera que al aumentar o disminuir su contenido inicial de sólidos, la curva sufre una traslación vertical producto del aumento del índice de vacíos, es decir, asciende el valor de la humedad de saturación, para finalmente converger a una curva única de desaturación a succiones elevadas.
- Se propusieron dos modelos para la estimación de la curva de retención de agua a partir de una regresión del modelo de van Genuchten (1980), y una succión residual con una magnitud nula (ψ_r). Un primer modelo que estima la SWRC utilizando como parámetros de entrada el contenido de finos y la humedad de saturación de la muestra. Un segundo modelo que utiliza como parámetros de entrada el contenido de finos y la gravedad específica. Ambos modelos entregan valores aceptables particularmente para arenas, sin embargo, logran estimar la SWRC para limos de una manera aceptable para un uso de estudios preliminares de ingeniería.

CAPÍTULO IX

BIBLIOGRAFÍA

- Aduvire, O. (2006). *Drenaje ácido de mina generación y tratamiento*. Madrid.
- ASTM. (1998). *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM D 422 - 63*. West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2000). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM D 2487 - 9800*. West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2000). *Standard Test Method for Capillary-Moisture Relationships for Coarse- and Medium- Texture Soils by Porous-Plate Apparatus. ASTM D 2325 - 60*. West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2000). *Standard Test Method for Determination of the Soils Water Characteristic Curve for Desorption using a Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, and/or Centrifuge. ASTM D 6836 - 02*. West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2000). *Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2000). *Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head), ASTM D 2434 - 68*. West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2002). *Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solid by Water Pycnometer, ASTM D 854 - 02*. West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2003). *Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristic of Soil Using Modified Effort, ASTM D 1557 - 02*. West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2007). *Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. ASTM D 5298 - 03*. West Conshohocken, PA.
- Aubertin, M., Bussière, B., & Chapuis, R. (2001). Unsaturated flow in layered cover systems: A comparison between numerical and field results. *Odyssee de la Terre*, 1612-1619.
- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B., & Chapuis, R. P. (2003). A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Can. Geotech. J.*, 1104-1122.
- Aubertin, M., Ricard, J., & Chapuis, R. P. (1998). A predictive model for water retention curve: application to tailings from hard-rock mines. *Can. Geotech. J.*, 35, 55-59.
- Bilcalho, K., Cupertino, K., & Bertolde, A. (2011). Evaluation of Suction-Water Content Calibrations of Filter Paper. *Pan-Am CGS Geotechnical Conference*.
- Bocking, K. A., & Fredlund, D. G. (1980). Limitations of the Axis Technique. *Fourth International Conference on Expansive Soils*, (págs. 1-19). Denver, Colorado, USA.
- Brooks, R. H., & Corey, A. T. (1964). *Hydraulic properties of properties of porous media*. Colorado State University, Fort Collins, CO.

- Chandler, R. J., & Gutierrez, C. I. (1986). The filter-paper method of suction measurement. *Imperial College of Science and Technology*, 265-269.
- de Almeida, E. L., dos Santos, A., da Silva, F., de Assis, R., & de Oliveira, A. (2015). Filter paper method for the determination of the soil water retention curve. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* vol.39, 1344-1352.
- Fredlund, D. G. (2000). The 1999 R.M. Hardy lecture: The implementation of unsaturated soil mechanics into geotechnical engineering. *Can. Geotech. J.*, 37(5), 963-986.
- Fredlund, D. G., & Morgenstern, N. R. (1976). Constitutive relations for volume change in unsaturated soils, 13(3). *Can. Geotech. J.*, 261-276.
- Fredlund, D. G., & Pham, H. Q. (2006). A volume-mass constitutive model for unsaturated soils in terms of two independent stress state variables. *Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils* (págs. 105-134). Carefree, Arizona: American Society of Civil Engineering.
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *An overview of unsaturated soil behavior*. Proc., ASCE Specialty Series on Unsaturated Soil Properties. Dallas.
- Fredlund, D. G., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Can. Geotech. J.*, 31(4), 521-532.
- Fredlund, M. D., Fredlund, D. G., & Wilson, G. W. (1997). Prediction of the soil-water characteristic curve from grain-size distribution and volume-mass properties. *3rd Brazilian Symposium on Unsaturated Soils*, (págs. 1-12). Rio de Janeiro, Brazil.
- Fredlund, M. D., Wilson, G. W., & Fredlund, D. G. (2002). Use of the grain-size distribution for estimation of the soil-water characteristic curve. *Can. Geotech. J.* 39, 1103-1117.
- Galaz, J. (2011). Estado del arte en la disposición de relaves espesados. *III Versión - Relaves en Pasta*. Santiago, Chile.
- Gan, J. K., Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1988). Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test. *Can. Geotech. J.*, 500-510.
- Geo-Slope International Ltd. (2012). *Seepage Modeling with SEEP/W*. Alberta, Canada.
- Hilf, J. W. (1956). An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils. En *Ph.D. thesis, U.S. Bureau of Reclamation*. Denver.
- Holtz, R. D., & Kovács, W. D. (1981). *An introduction to geotechnical engineering*. Rhode Island: University of Rhode Island.
- Irrrometer Company, I. (2015). *Manual de referencia para el indicador de humedad*. Riverside, CA.
- Istituto Nacional de Normalización. (1999). *Mecánica de suelos - Determinación de las densidades máxima y mínima y cálculo de la densidad relativa en suelos no cohesivos*. NCh 1726 Of. 80. Santiago, Chile.
- Jewel, R. J., & Fourie, A. B. (2002). *Paste and thickend tailings - A guide*. Australian Centre for Geomechanics.
- Kawai, K., Kato, S., & Karube, D. (2000). The model of water retention curve considering effects of void ratio. *Unsaturated soils for Asia. Proceedings of the Asian Conference on Unsaturated Soils* (págs. 329-334). Singapore: Rahardjo, H.; Toll, D.
- Khalid, M., & Ahmed, A. (2010). Nature of soil-water characteristic curves (SWCC) for soils from Anbar Governorate. *Anbar Journal of Engineering Sciences*, 61-80.
- Khire, M. V., Benson, C. H. & Bosscher, P. J. (2000). Capillary barriers: Design variables and water balance. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 695-708.

- Khire, M., Meerdink, J., Benson, C., & Bosscher, P. (1995). Unsaturated hydraulic conductivity and water balance predictions for earthen landfill final cover. En *Soil suction applications in geotechnical engineering practice* (págs. 38-57). New York: W. Wray and S. Houston. ASCE.
- Kovács, G. (1981). Seepage hydraulics. *Elsevier Science Publishers, Amsterdam*.
- Leong, E. C., & Rahardjo, H. (1997). Permeability functions for unsaturated soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- Leong, E. C., He, L., & Rahardjo, H. (2002). ASTM geotech. Testing J., 25(3). 322-333.
- Lourenco, S., Gallipoli, D., Toll, D., Evans, F., & Medero, G. (2005). Determination of the soil water retention curve with tensiometer. *Softbank e-book center tehran*, 95-102.
- Lu, N., & Likos, W. J. (2004). *Unsaturated soil mechanics*. Michigan: Wiley.
- Lucas, E., dos Santos, A., da Silva, F., Nonato, R., & de Oliveira, R. (2015). Filter paper method for the determination of the soil water retention curve. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*.
- Maulem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12, 513-522.
- mineros, D. g. (2007). *Guía para el diseño de depósitos de residuos mineros*. Lima, Perú: Ministerio de energía y minas.
- Pham, H. Q. (2001). An engineering model of hysteresis for water characteristic curves. *M.Sc. thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Sask.*
- Pham, H. Q., & Fredlund, D. G. (2011). Volume-mass unsaturated soil constitutive model for drying-wetting under isotropic loading-unloading conditions. *Can. Geotech. J.*, 280-313.
- Pham, Q. H. (2005). A volume-mass constitutive model for unsaturated soils. *Ph.D. dissertation, University of Saskatchewan, Saskatoon, Sask.*
- Qui, Y., & Sego, D. (2001). Laboratory properties of Mine Tailings. *Can. Geotech. J.*, 38, 183-190.
- Ramírez, N. (2007). *Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Seguridad Minera.
- Riquelme, J., & Godoy, C. (2016). Determinación experimental de curvas de retención de humedad (SWCC) para ripios y relaves de cobre. *IX Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica*. Valdivia: Sociedad Chilena de Geotécnica.
- Rodríguez, R. L., & Oldecop, L. (2006). Liquefacción de los relaves mineros: Riesgo ambiental. *V simposio nacional de seguridad minera y desarrollo sostenible*. Lima, Perú.
- Rodríguez, R., & Oldecop, L. (2011). Humedad y estabilidad geotécnica de presas de relaves. *Aspectos relacionados a la hidrogeología e hidroquímica en zonas mineras del sur del Ecuador*. Quito.
- SERNAGEOMIN. (2015). *Catastro de Medidas y Tecnologías para la Prevención, Control y Tratamiento del Drenaje Minero*. Santiago: Ministerio de Minería.
- SERNAGEOMIN. (2016). Análisis del Catastro de Depósitos de Relaves en Chile y guía de estructura de datos. *Ministerio de Minería*.
- SERNAGEOMIN. (2018). Análisis del Catastro de Depósitos de Relaves en Chile y guía de estructura de datos. *Ministerio de Minería*.
- Sheng, D., Zhou, A., & Fredlund, D. G. (2011). Shear strength criteria for unsaturated soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(2), 145-159.

- Swanson, D. A., Savci, G., Danziger, G., Mohr, R. N., & Weiskopf, T. (1999). Predicting the soil-water characteristic fo mine soils. *Tailings and Mine Waste '99*, (págs. 345-349).
- Terzaghi, K. (1943). *Theorecal soil mechanics*. New York: Wiley and Sons.
- van Genuchten, M. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44(5), 892-898.
- van Genuchten, M., Leij, F., & Yates, S. R. (1991). The RECT code for quantifying the hidraulic functions of unsaturated soils. *EPA/600/2-91/065*.
- Vanapalli, S. K., & Fredlund, D. G. (2000). Comparison of empirical procedures to predict the shear strength of unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Advances in Unsaturated Geotechnics*, 195-209.
- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., & Clifton, A. W. (1996). Model for the prediction of shear strenght with respect to soil suction. *Can. Geotech. J.*, 33, 379-392.
- Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J., & Darius, P. (1989). Estimating the Soil Moisture Retention Characteristic from Texture, Bulk Density, and Carbon Content. *Soil Science*, 389-403.
- Woyshner, M. R., & St-Arnaud, L. (1994). Hydrogeological evaluation and water balance of a thickened tailings deposit near timmins, on, Canada. *Proceedings America Society of Mining and Reclamation*, 198-207.
- Yanful, E. K. (1993). Oxigen difusion through soil covers on sulphidic mine tailings. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1207-1228.
- Yang, E. K., Barbour, S. L., & Wilson, G. W. (1992). A laboratory characterization of the properties of Kidd Creek thickened tailings required for evaporative flux modeling. *Univ. SK, Dep. Civil Eng., Geo-Environmental Eng. Group*, 74.

CAPÍTULO X

ANEXOS

10.1. Depósitos de Relave

Los 740 depósitos de relaves presentes en nuestro país, presentan la siguiente distribución por región según su estado:

Tabla 10-1: Distribución de depósitos de relaves por región, según estado.

Fuente: SERNAGEOMIN, 2018.

Región	Activos	Inactivos	Abandonados	Total
Arica	1	0	0	1
Tarapacá	1	0	6	7
Antofagasta	13	20	14	47
Atacama	30	108	23	161
Coquimbo	30	250	106	386
Valparaíso	13	57	11	81
Metropolitana	6	14	6	26
O'Higgins	3	15	0	18
Maule	2	2	0	4
Aysén	2	3	4	9
Total	101	469	170	740

En cuanto a los depósitos de relaves activos, la obtención de relaves principalmente se encuentra influenciada producto de la extracción de cobre, oro, plata y molibdeno, con una extracción concentrada principalmente en las regiones de Atacama y Coquimbo (Tabla 10-2).

Tabla 10-2: Depósitos de relaves según su recurso de extracción y volumen.

Fuente: Análisis de los depósitos de relaves en Chile, Sernageomin, 2018.

RECURSO	Nº	Arica	Tarapacá	Antofagasta	Atacama	Coquimbo	Valparaíso	Metropolitana	O'Higgins	Maule	Aysén	volumen aprobado (m ³)	volumen actual (m ³)	% del total aprobado
COBRE -ORO-PLATA-MOLIBDENO	78	1	1	12	24	23	10	4	3	-	-	14.340.279.289	6.459.228.437	99,103
ORO-COBRE-PLATA-ZING	17	-	-	1	4	7	3	1	-	-	1	51.926.354	22.225.714	0,359
SILICE	2	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	353.586	352.964	0,002
ZING-ORO	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2.176.000	617.685	0,015
CARBONATO DE CALCIO	1	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	6.380.000	6.156.886	0,044
HIERRO	2	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	69.014.517	6.424.350	0,477
Totales												14.470.129.746	6.495.006.036	100%

Además de los relaves activos se desprenden 22 relaves pertenecientes a la gran minería (Tabla 10-2), que contienen un 98,6% de la masa de relaves producida anualmente en Chile, según el análisis del catastro de depósitos de relaves en Chile realizado el 2016.

Tabla 10-3: Depósitos de relave de la gran minería, por región, y cantidad de producción de relave por día aproximada.

Fuente: SERNAGEOMIN, 2016.

EMPRESA	DEPÓSITO	REGIÓN	TPD
Cía. Inés de Collahuasi	Pampa Pabellón	I	136.441
Minera las Cenizas	Las Luces 2	II	23.751
Minera Escondida	Laguna Seca	II	242.707
Minera Meridian	El Peñón	II	4.046
Mantos Cooper	DMBL	II	117.056
CODELCO (Chuquicamata)	Talabre	II	138.064
SCM Sierra Gorda	Sierra Gorda	II	66.243
Minera Centinela	Esperanza	II	88.154
CODELCO (Salvador)	Filtrado Escorias	III	732
CODELCO (Salvador)	Pampa Austral	III	27.108
COEMIN	Tranque III	III	61.515
CCM Candelaria	Candelaria	III	75.345
SCM Atacama Kozan	El Gato	III	3.794
SCM PUCOBRE	Las Cruces	III	9.846
Lumina Cooper	El Tambo/La Brea	III	62.348
Teck Andacollo	Hipogeno	IV	47.151
Los Pelambre	El Mauro	IV	171.833
Minera San Gerónimo	Humo Corral	IV	3.797
Anglo American (Los Bronces)	Las Tórtolas	RM	97.266
Anglo American (El Soldado)	Torito	V	97.266
CODELCO (Andina)	Ovejería	V	84.284
CODELCO (El Teniente)	Caren	VI	111.111

10.2. Informe Cámara de Presión

Tabla 10-4: Planilla de ingreso mediciones cámara de retención de agua.

Fuente: Elaboración propia.

CURVA DE RETENCIÓN DE AGUA PARA CÁMARA DE PRESIÓN

Lugar _____ Muestra n° _____
Departamento _____ Fecha _____
Identificación _____ Tipo de Suelo _____
Contenido de sólidos inicial _____ Tipo de Muestra _____
Gravedad específica _____ Porosidad _____

0	Fecha medición					
1	Presión [KpA]					
2	O-ring n° [g]					
3	Muestra humeda + o-ring [g]					
4	O-ring + papel filtro [g]					
5	Muestra humeda [g] (3-4)					
6	Contenedor n° (humedad) [g]					
7	Contenedor + muestra seca [g]					
8	Muestra seca [g] (7-6)					
9	Masa de agua [g] (5-8)					
10	Contenido de humedad [%] (9/8)*100					

10.3. Informe Método Papel Filtro

*Tabla 10-5: Ficha para la obtención de la curva de retención de agua con el método del papel filtro.
Fuente: Elaboración propia.*

CURVA DE RETENCIÓN DE AGUA PARA PAPEL FILTRO

Lugar _____ Fecha _____
 Departamento _____ Tipo de Suelo _____
 Identificación _____ Tipo de Muestra _____
 Muestra n° _____

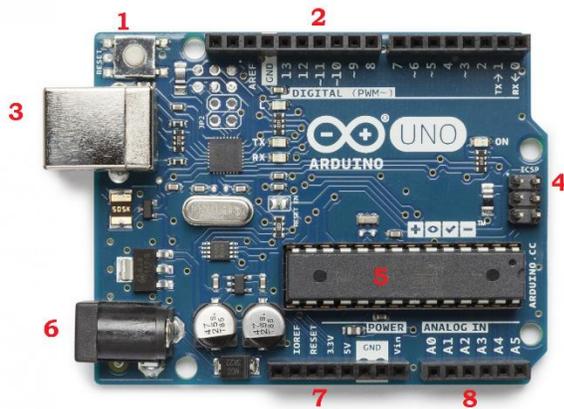
Fecha IN						
Fecha Out						
N° Contenedor de humedad						
Masa contenedor frío (g)	Tc					
Masa papel filtro húmedo + Masa contenedor frío (g)	M1					
Masa papel filtro seco + Masa contenedor caliente (g)	M2					
Masa contenedor caliente (g)	Th					
Masa papel filtro seco (M2-Th) (g)	Mf					
Masa de agua en el papel filtro (M1-M2-Tc+Th) (g)	Mw					
Contenido de agua en papel filtro (%)	Wf					
Succión, pF	h					
Succión, [kPa]	h					
Masa muestra+contenedor (g)	P1					
masa contenedor (g)	Pc					
masa seca (g)	Ps					
masa agua (g)	Ma	0	0	0	0	0
% humedad gravimetrica	w	#iDIV/0!	#iDIV/0!	#iDIV/0!	#iDIV/0!	#iDIV/0!

10.4. Arduino

La plataforma electrónica Arduino, es una plataforma de diseño electrónico de código abierto, es decir, los códigos de sus distintos componentes se encuentran disponibles para el usuario ya sea en internet, como también en el mismo software de programación (Arduino 1.8.5). Arduino, utiliza sensores para interactuar con el mundo físico, de esta manera, Arduino es capaz de responder ante los cambios del medio físico, como lo es la humedad, luz, temperatura y particularmente para el caso de interés, la presión. De este modo es posible realizar procesos de automatización, por ejemplo, leer un sensor de humedad y si esta se encuentra fuera de un rango establecido, el sistema, es capaz de encender o apagar un sistema de riego automático.

El microcontrolador Arduino, es capaz de guardar en su memoria un cierto código, previamente cargado para aplicarlo cíclicamente en la posterioridad. Este código, está escrito en formato Java, expandible a través de librerías escritas en C++ de código abierto, es decir, realizadas previamente por programadores experimentados. Sin embargo, es posible no utilizar dichas librerías, debiendo agregar directamente los códigos necesarios a los programas de Arduino.

Para este caso se utilizó la placa de desarrollo “Arduino Uno” (Figura 10-1) que se presenta a continuación:



1. Botón de reseteo
2. Pines digitales
3. Puerto USB
4. Programador de circuito serial
5. ATmega328
6. Entrada de alimentación externa
7. Pines de manejo de energía
8. Pines de entrada análoga

Figura 10-1: Partes Arduino Uno.

10.4.1. Sensores

Los sensores, en general, son dispositivos que detectan una cantidad física del entorno al que se encuentran expuestos y la convierten mediante un cambio en su resistividad en una señal electrónica. Estas mediciones pueden ser de temperatura, luz, presión, movimiento, humedad, entre otras, donde la salida de estos sensores comúnmente suele ser de voltaje, corriente o carga.

Para este estudio como se mencionó en el cuerpo de este estudio, se utilizará Arduino como un sensor de presión. El sensor de presión utilizado (Figura 10-2) posee las siguientes características:

Voltaje de trabajo:	5 [VDC]	Presión máxima:	2,5 [MPa]
Output Voltaje:	0,5-4,5 [VDC]	Presión de destrucción:	3,0 [MPa]
Material del sensor:	Aleación acero al carbón	Rango de temperaturas de trabajo:	0-85 [°C]
Corriente de trabajo:	10 [mA]	Error de medición:	±1,5% (FSO)
Rango de presiones de trabajo:	0-1,2 [MPa]	Tiempo de respuesta:	2 [ms]
		Ciclos de vida:	500.000 [pcs]



Figura 10-2: Sensor de presión Arduino.

Su conexión a la placa de Arduino es mediante 3 cables:

Amarillo: Pin análogo

Negro: GND (Tierra)

Rojo: 5 [VDC]

10.4.2. Pantalla de cristal líquido (LCD)

El módulo electrónico, pantalla de cristal líquido (LCD), tiene una gran gama de aplicaciones, siendo un dispositivo de salida en la implementación de Arduino. La pantalla comúnmente utilizada es la de 16x2 caracteres, preferida por su bajo costo y facilidad de programación, lográndose con ella mostrar una amplia gama de caracteres y animaciones.

La pantalla de LCD de 16x2 posee 2 líneas de 16 caracteres cada una, que mediante un simple código almacenado en el registro de comando y dadas específicamente para la pantalla LCD, donde el registro de datos almacena los datos que se entregarán en la pantalla LCD.

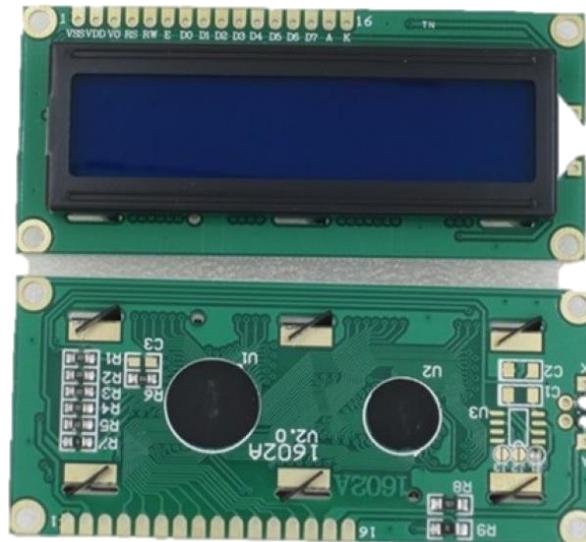


Figura 10-3: Pantalla de cristal líquido (LCD) modelo 1602.

Su conexión a la placa de Arduino es más compleja que la anterior ya que requiere más conexiones. Para el caso de estudio, se efectuó la configuración de 4 bit, teniendo que soldar las conexiones respectivas a la placa LCD. Los pins de entrada a la placa se encuentran enumerados del 1 al 16, utilizando los 6 primeros y los 6 últimos para la configuración de 4 bit.

Tabla 10-6: Pins de conexión de pantalla cristal líquido (LCD).

NÚMERO PIN	FUNCIÓN	ACRÓNIMO
1	Tierra	GND
2	Tensión de alimentación	VDD
3	Ajuste de contraste (potenciómetro)	V0
4	Registro de comando	RS
5	Lectura y escritura de registro	RW
6	Envío de datos a los pins	E
11	Pin de datos	4
12	Pin de datos	5
13	Pin de datos	6
14	Pin de datos	7
15	Luz de fondo (ánodo) $V_{cc} = 5 [V]$	A
16	Tierra de luz de fondo (cátodo)	K

10.4.3. Potenciómetro

Para el uso más efectivo de la pantalla de cristal líquido (LCD), es posible regular su contraste por medio de un potenciómetro instalado en serie al pin número 3 de la pantalla LCD antes descrita. Un potenciómetro, funciona variando su resistividad logrando modificar el potencial eléctrico de entrada, que para el caso de arduino es de 5 [V]. Su conexión se basa en 3 pins, los pins de los extremos tierra (GND) y alimentación (5 [V]) respectivamente, mientras que el pin central, corresponde a la salida de potencial eléctrico modificado, que para el caso de estudio corresponde al contraste de la pantalla de cristal líquido (LCD).



Figura 10-4: Potenciómetro Arduino para pantalla LCD.

10.4.4. Módulo microSD

El módulo de microSD, es un dispositivo de almacenamiento de datos, comúnmente utilizable para el almacenamiento de las mediciones respectivas realizadas por los sensores acoplados a la placa Arduino. El módulo utilizado en el presente trabajo soporta tarjetas microSD y microSDHC, que cuenta con regulador de

potencial eléctrico y adaptador de señales para de esta manera posibilitar la conexión directa a las placas de Arduino con una alimentación de 4,5 a 5,5 [V].

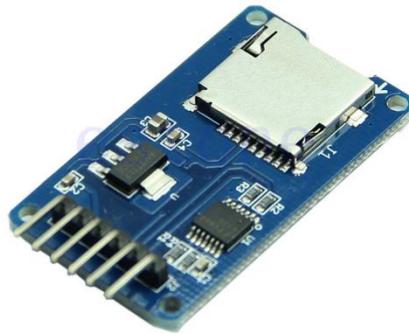


Figura 10-5: Módulo microSD para Arduino.

10.4.5. Proto Board

Este dispositivo proporciona una mayor cantidad de conexiones a la placa Arduino, logrando de esta manera tener mayor cantidad de salidas de alimentación para los distintos sensores, conexión más amigable de potenciómetros y la interconexión de componentes electrónicos en general con cables de 20 a 29 AWG (0,3-0,8 [mm])

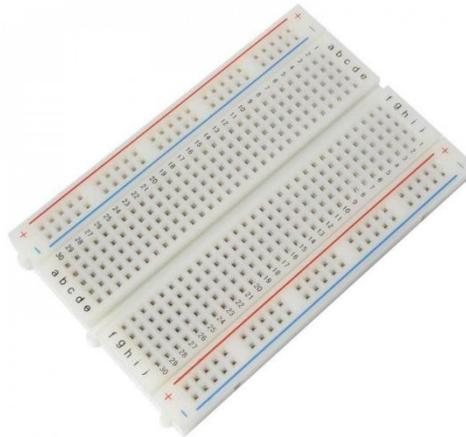


Figura 10-6: Proto board para Arduino.

10.4.6. Implementación del sistema Arduino

La implementación de todos los módulos para la aplicación de Arduino a una red de presión se realiza como se presenta a continuación. Cabe destacar que es posible utilizar otras configuraciones homólogas para un mismo funcionamiento. Para la realización de un mejor entendimiento se presentará el armado de los módulos por separado comenzado por el sensor de presión.

Previo a la implementación se debe tener en consideración el funcionamiento de la Proto Board (Figura 10-6), ya que las conexiones de los distintos módulos serán desde este dispositivo. Estas placas se encuentra agujeradas donde internamente poseen conexiones dispuestas en hileras, de esta manera se logra insertar componentes para formar un circuito.

Las 2 hileras de los extremos superior e inferior (Figura 10-6), se encuentran interconectadas horizontalmente para ser utilizadas y conectadas a la alimentación de Arduino o alimentación externa (5 [V] en el borde rojo y a tierra (GND) en el borde azul). Las hileras centrales se encuentran interconectadas en grupos de 5 de forma verticalmente (grupos a-b-c-d-e y f-g-h-i-j respectivamente). Estas hileras son utilizadas para los distintos dispositivos y para conexión en paralelo si fuese necesario.

En estos dispositivos, es posible montar innumerables circuitos conformados por resistencias, transistores, condensadores, LEDs y circuitos principalmente, donde para la implementación de los distintos dispositivos, se utilizarán cables y resistencias si fuesen necesarias.

La implementación del sensor de presión en la placa de Arduino es simple, ya que posee solo 3 entradas para su aplicación. Habiendo ya conectado las líneas de alimentación (5V y GND) se conectan el cable rojo a cualquier pin de alimentación del borde rojo (en adelante 5V), el cable negro a cualquier pin del borde azul de la Proto Board (en adelante GND) y finalmente el cable amarillo se conecta a un pin análogo, que para este caso de estudio se conectará a A1. Este dispositivo, debido a su simpleza, eventualmente se puede conectar directamente a la placa de Arduino, sin embargo esto para otros dispositivos como lo es el caso de la pantalla LCD no es posible debido a la demanda de alimentación que ésta posee.

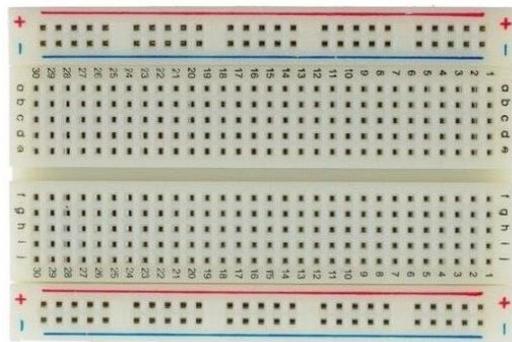


Figura 10-7: Implementación Proto Board de 400 hoyos para Arduino.

La implementación de la pantalla de cristal líquido (LCD), al necesitar mayor cantidad de alimentación por requiere más conexiones a la alimentación (filas superiores e inferiores), sin embargo el resto de conexiones son directas a la placa de Arduino, como se presenta en la tabla a continuación.

Tabla 10-7: Conexión de pantalla LCD modelo 1602 a Placa Arduino Uno mediante Proto Board y potenciómetro.

NÚMERO PIN	ACRÓNIMO EN LCD	ACRÓNIMO EN PLACA ARDUINO
1	GND	GND (Proto Board)
2	VDD	5v (Proto Board)
3	V0	Potenciómetro
4	RS	D1
5	RW	GND (Proto Board)
6	E	D2
11	D4	D4
12	D5	D5
13	D6	D6
14	D7	D7
15	A	5v (Proto Board)
16	K	GND (Proto Board)

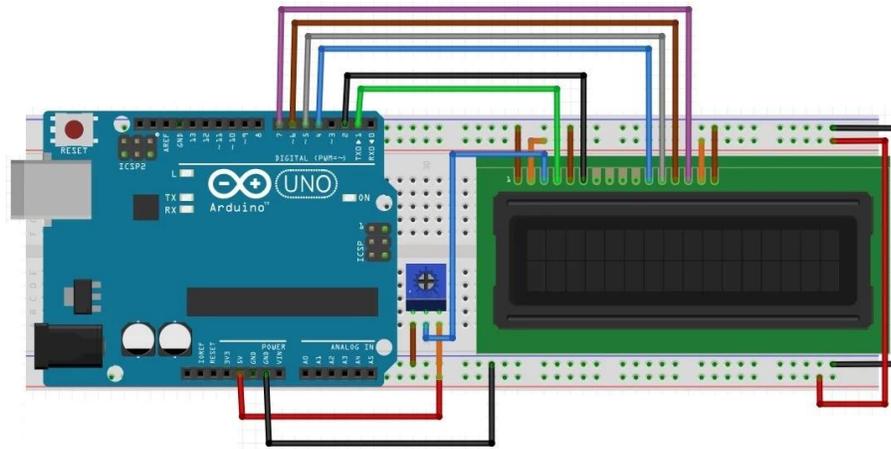


Figura 10-8: Modelo de implementación pantalla cristal líquido (LCD) a placa Arduino mediante Proto Board y potenciómetro.

Finalmente, la implementación del módulo microSD se realiza al igual que el módulo anterior mediante pins digitales, con la diferencia que este dispositivo no requiere tanta alimentación como el módulo anterior, ya que es un dispositivo de bajo consumo. Su implementación se muestra en la Tabla 10-8.

Tabla 10-8: Conexión de módulo microSD a placa de Arduino.

NÚMERO PIN	ACRÓNIMO EN MÓDULO MICROSD	ACRÓNIMO EN PLACA ARDUINO
1	CS	D11
2	SCK	D12
3	MOSI	D13
4	MISO	D10
5	VCC	5V (Proto Board)
6	GND	GND (Proto Board)

De esta manera es posible implementar un dispositivo de medición, a nivel de conexiones físicas, sin embargo, aún falta el código necesario para realizar las mediciones de presión necesarias para este estudio.

10.4.7. Pseudo código arduino

El código está dividido en 3 partes, según los 3 módulos que se utilizaron en la implementación de Arduino como sensor de presión. Su primera parte corresponde al sensor de presión, en la que se procede a medir debido a la variación de la resistividad de la celda de presión al modificarse la presión la red conectada. La segunda parte corresponde al almacenamiento de datos en el módulo MicroSD implementado, y finalmente, el mostrar el valor de la presión a través de la pantalla LCD.

- Lee el valor de que entrega el sensor de presión
- Guarda el valor de la presión en una variable
- Inicia el módulo de MicroSD
- Crea un archivo .TXT
- Guarda el valor de la presión en una columna

- Cierra el archivo
- Muestra el valor en la pantalla LCD
- Espera 500 [ms]

10.4.8. Código

El código real, dividido en las mismas tres partes enunciadas anteriormente en el pseudo-código y se presenta a continuación con los comentarios previos de las conexiones necesarias para que el código sea válido.

/*

Conexiones:

Tarjeta adaptador MicroSD

D11	MOSI
D12	MISO
D13	CLK or SCK
D10	CS
5V	VCC
GND	GND

Sensor de presión

A1	Amarillo
GND	Negro
5V	Rojo

Pantalla

VSS	GND
VDD	5V
V0	CONTRASTE (POTENCIÓMETRO)
RS	SELECTRO DE REGISTRO
RW	PIN QUE COMANDA LA LECTURA EN ESTE CASO GND
E	HABILITA LA PANTALLA PARA RECIBIR INFORMACIÓN
D0	D4
D5	D5
D6	D6
D7	D7
A	BLACKLIGHT
K	GND

```

*/

#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <LiquidCrystal.h> // Incluye la Librería LiquidCrystal
LiquidCrystal lcd(1, 2, 0, 5, 6, 7); // Crea un Objeto LC. Parámetros: (rs, enable, d4, d5, d6, d7)
const int chipSelect = 4;

void setup() {
while (!Serial) {
    ; // Espera conexión del puerto serial
}
pinMode(10, OUTPUT);
if (!SD.begin(chipSelect)) { // No hacer nada mientras no inicie
    return;
}
lcd.begin(16,2); // Inicializa la interface para el LCD screen, y determina sus dimensiones (ancho y alto) del
display
}
void loop(){
int sensorVal=analogRead(A1);
float voltage = (sensorVal*5.0)/1024.0;
float pressure_pascal = (3.0*((float)voltage-0.47))*1000000.0;
float pressure_bar = pressure_pascal/10e5;

    // efectua un string para armar el datalog:
String dataString = "";
    // Realiza un for para escribir datos en una columna
for (int analogPin = 0; analogPin < 1; analogPin++) {
    int sensor = analogRead(analogPin);
    dataString += String(sensor);
}

    // Abre el archivo (solo se puede abrir un solo archivo a la vez
File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);

```

```

// Si el archivo está disponible, entonces escribe:
if (dataFile) {
  dataFile.println(pressure_pascal/1000);
  dataFile.close();
}
else { // No realizar nada
}

lcd.print(pressure_pascal/1000); // Imprime el valor de la presión en kPa sobre la lcd (primera fila)
lcd.print(" kPa");              // Imprime " kPa" sobre el LCD (continuación anterior)
lcd.setCursor(0,1);             // Seteamos la ubicación texto 0 línea 1 que será escrita sobre el LCD
lcd.print(pressure_pascal/100000); //Imprime el valor de la presión en BAR sobre la lcd (segunda fila)
lcd.print(" Bar");              // Imprime "LCD Tutorial" sobre el LCD

delay(500);

lcd.clear();                    // Limpia la pantalla
}

```

10.4.9. Calibración

La calibración del sensor de Arduino para la aplicación a la red de aire se efectúa con un manómetro de glicerina, conectado en serie a la línea de aire comprimido, donde se varía la presión a los números bien graduados del manómetro y se mide la diferencia de potencial (mV) medida por el sensor de presión Arduino. Con la diferencia de potencial medida y la presión entregada por el manómetro, es posible realizar una regresión lineal para obtener una relación empírica entre ambas magnitudes físicas (Figura 10-9).

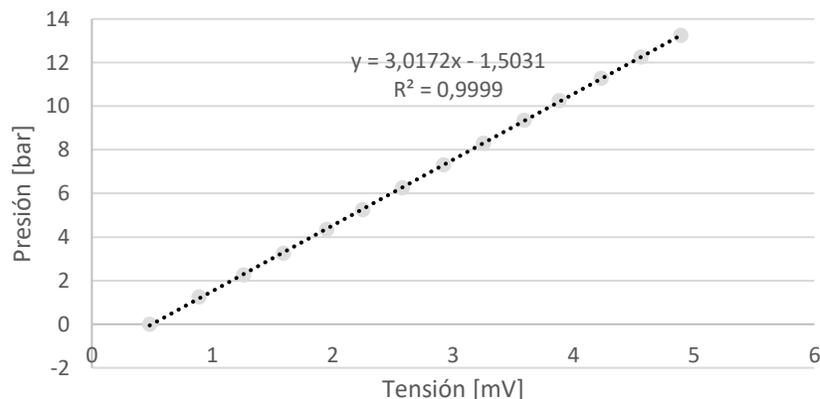


Figura 10-9: Curva de calibración sensor de presión Arduino mediante el uso de manómetro de glicerina en serie.

Como se aprecia en la gráfica antes mostrada, se obtiene la ecuación que relaciona ambas magnitudes físicas en una línea de presión estática de aire comprimido, para valores de presión comprendidos de 0 a 13 [bar], con un coeficiente de correlación de Pearson $R^2=0,9999$, por lo que se puede apreciar que el sensor cumple con los requisitos de esta área de trabajo.

Finalmente se puede mencionar que de esta manera es posible implementar un sistema electrónico que sea capaz de medir autónomamente, mostrar inmediatamente y a la vez guardar los valores medidos, así como también, medir presiones con relativa precisión y exactitud, en un rango aceptable de presiones para este trabajo, las cuales no son bien determinadas por medidores de presión análogos que no poseen buena exactitud de trabajo a bajas presiones, lo cual en este estudio, se suple mediante dispositivos tecnológicos contemporáneos y de rápida implementación.

10.5. Caracterización Relaves

A continuación, se presentan una serie de figuras en las que se muestran algunos de los ensayos realizados en esta memoria de titulación.



Figura 10-10: Ensayo límite líquido con cuchara de Casagrande.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 10-11: Ensayo límite plástico.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 10-12: Ensayo Proctor estándar.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 10-13: Ensayo granulometría por sedimentación, método del hidrómetro.
Fuente: Elaboración propia.

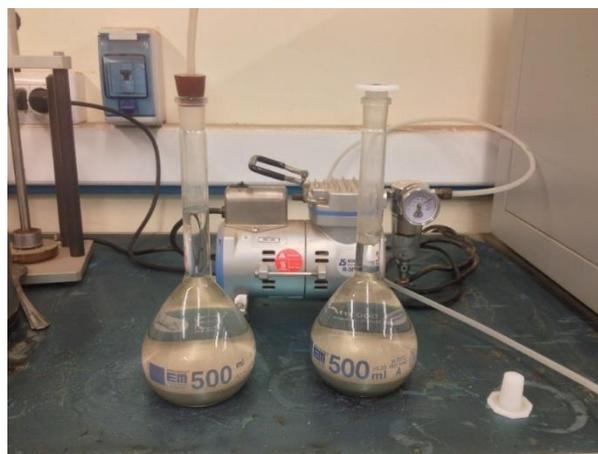


Figura 10-14: Ensayo densidad de partículas sólidas para la obtención de la gravedad específica.
 Fuente: Elaboración propia.



Figura 10-15: Ensayo para la obtención del límite de saturación.
 Fuente: Elaboración propia.

10.6. Permeabilidad no Saturada

A continuación, se presentan las curvas de permeabilidad parcialmente saturadas para otras los demás relaves.

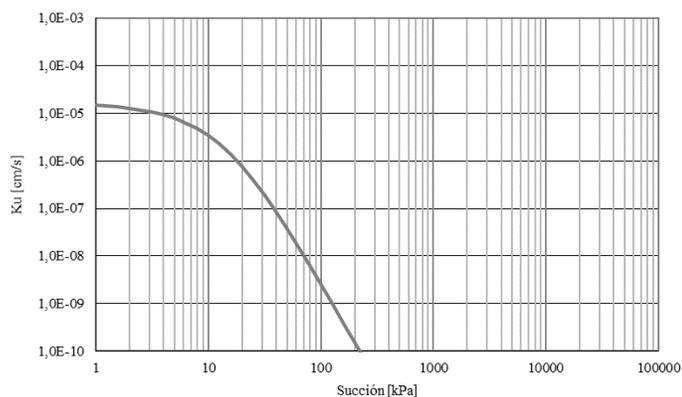


Figura 10-16: Conductividad hidráulica no saturada para relave 2.
 Fuente: Elaboración propia.

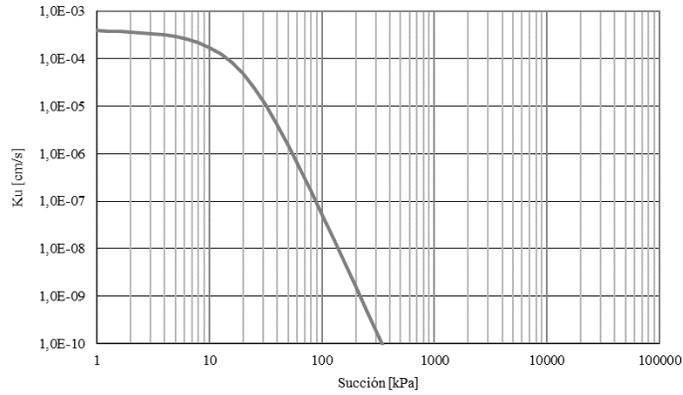


Figura 10-17: Conductividad hidráulica no saturada para relave 6.
Fuente: Elaboración propia.

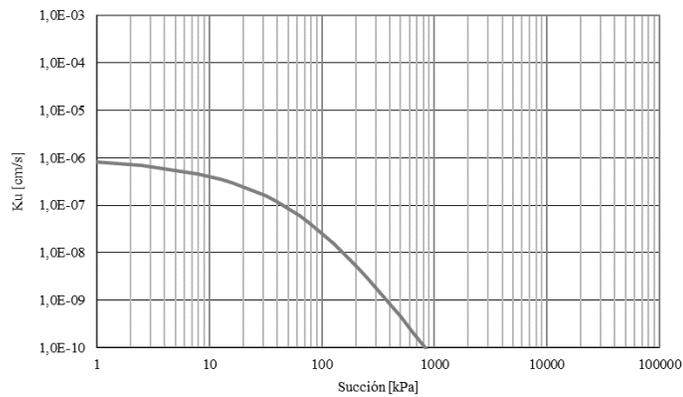


Figura 10-18: Conductividad hidráulica no saturada para relave 8.
Fuente: Elaboración propia.

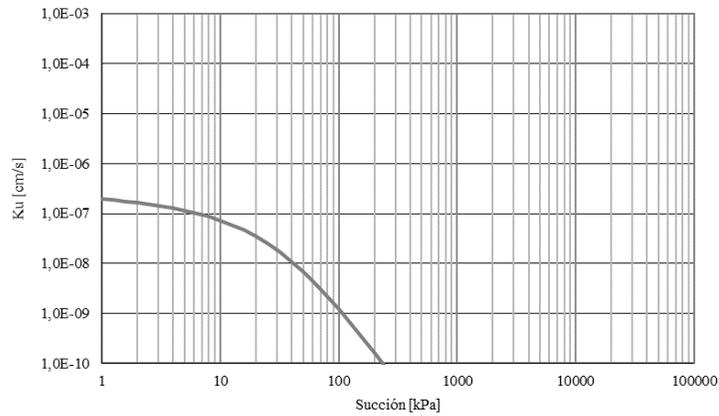


Figura 10-19: Conductividad hidráulica no saturada para relave 12.
Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a las curvas de conductividad hidráulica para los relaves en los que no se obtuvo la permeabilidad saturada, se mostrarán las gráficas para la permeabilidad relativa a la permeabilidad saturada.

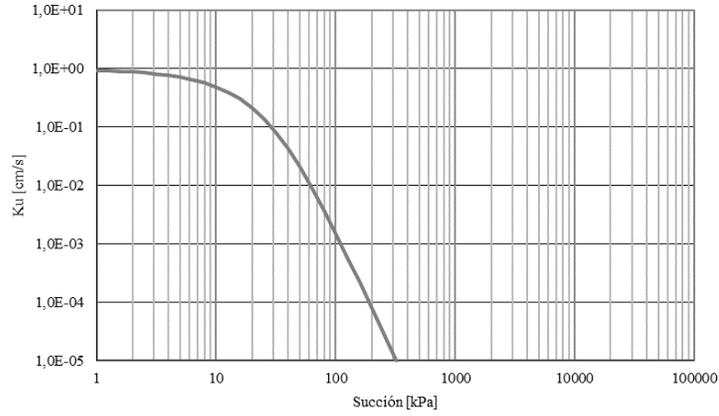


Figura 10-20: Conductividad hidráulica relativa no saturada para relave 3.
Fuente: Elaboración propia.

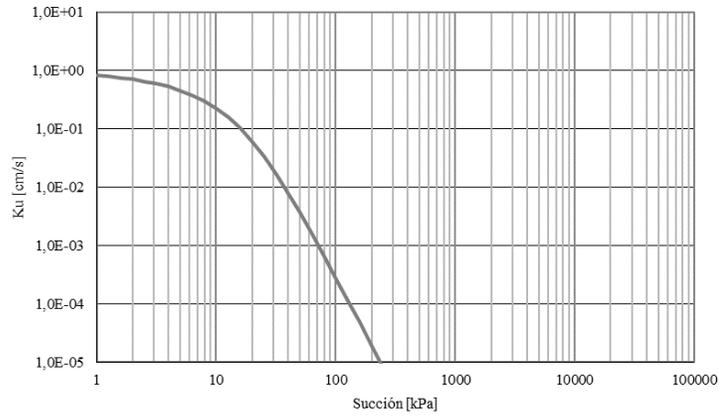


Figura 10-21: Conductividad hidráulica relativa no saturada para relave 4.
Fuente: Elaboración propia.

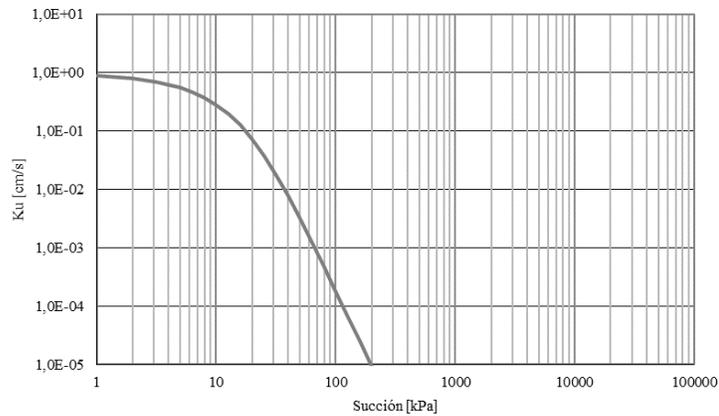


Figura 10-22: Conductividad hidráulica relativa no saturada para relave 5.
Fuente: Elaboración propia.

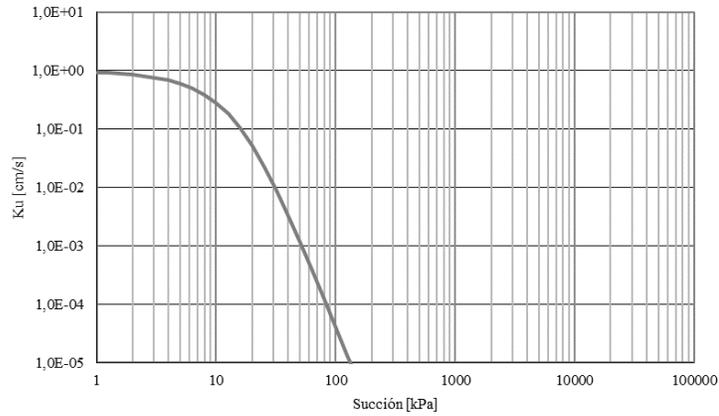


Figura 10-23: Conductividad hidráulica relativa no saturada para relave 7.
Fuente: Elaboración propia.

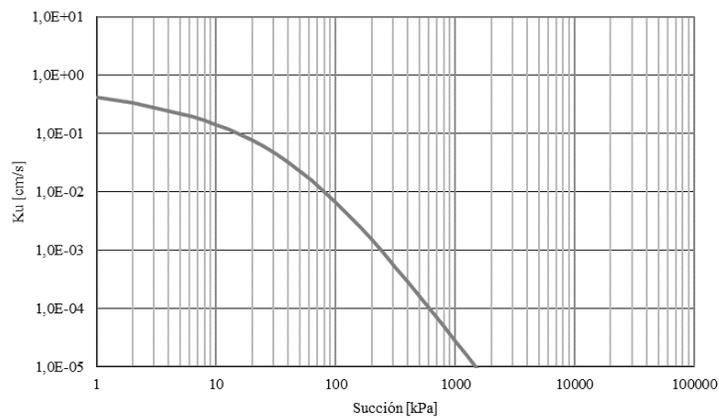


Figura 10-24: Conductividad hidráulica relativa no saturada para relave 9.
Fuente: Elaboración propia.

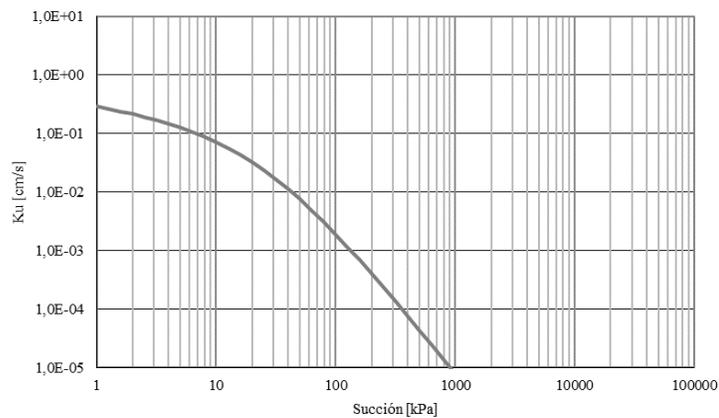
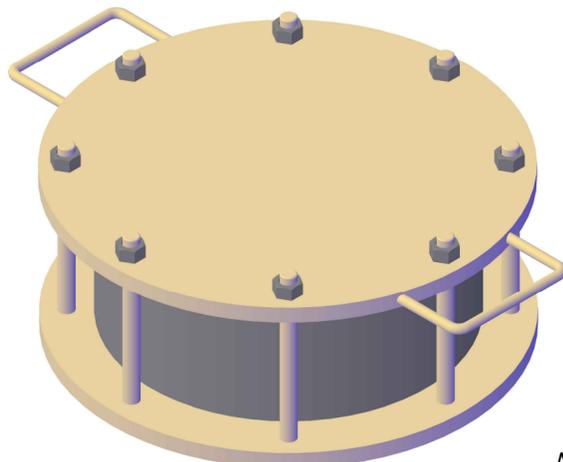
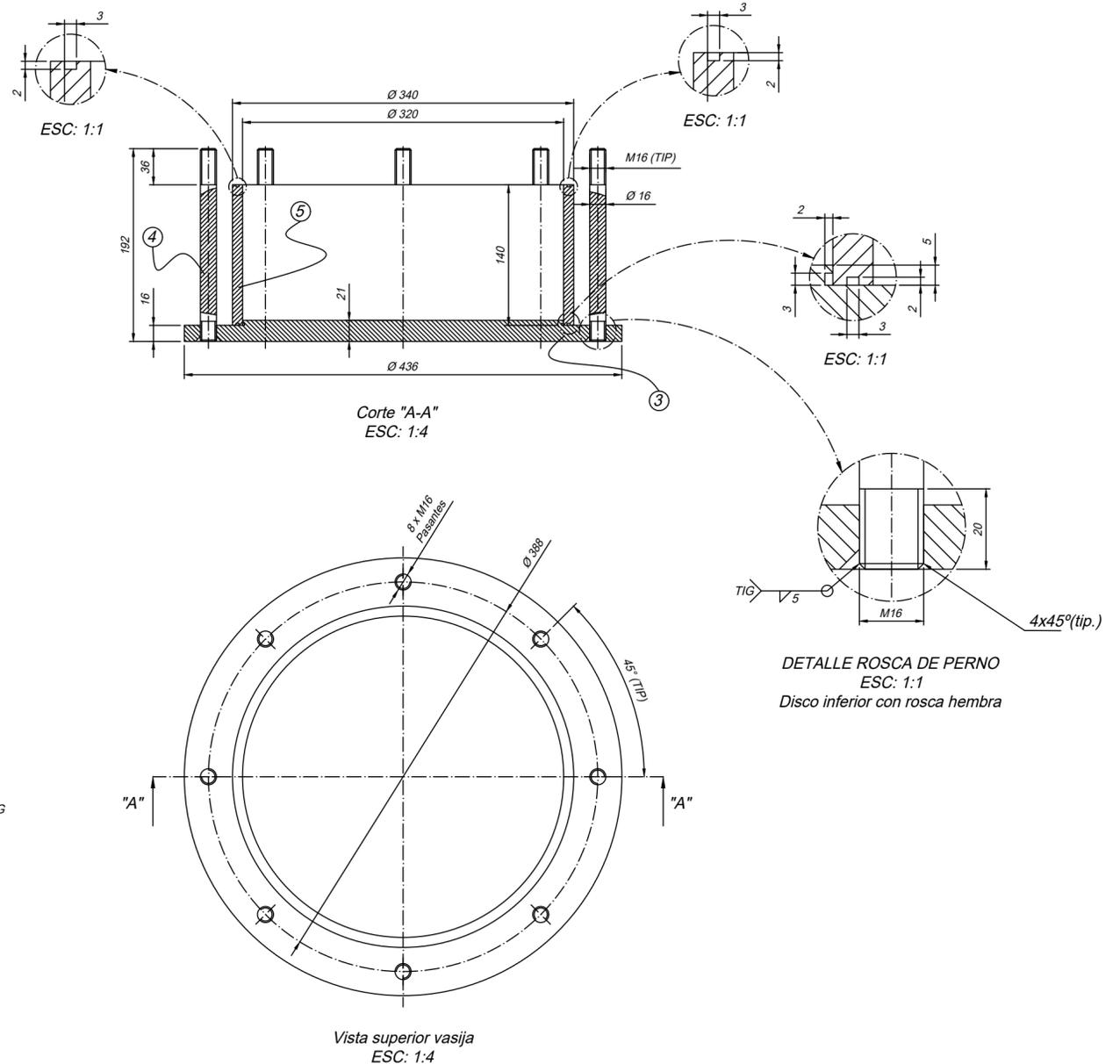
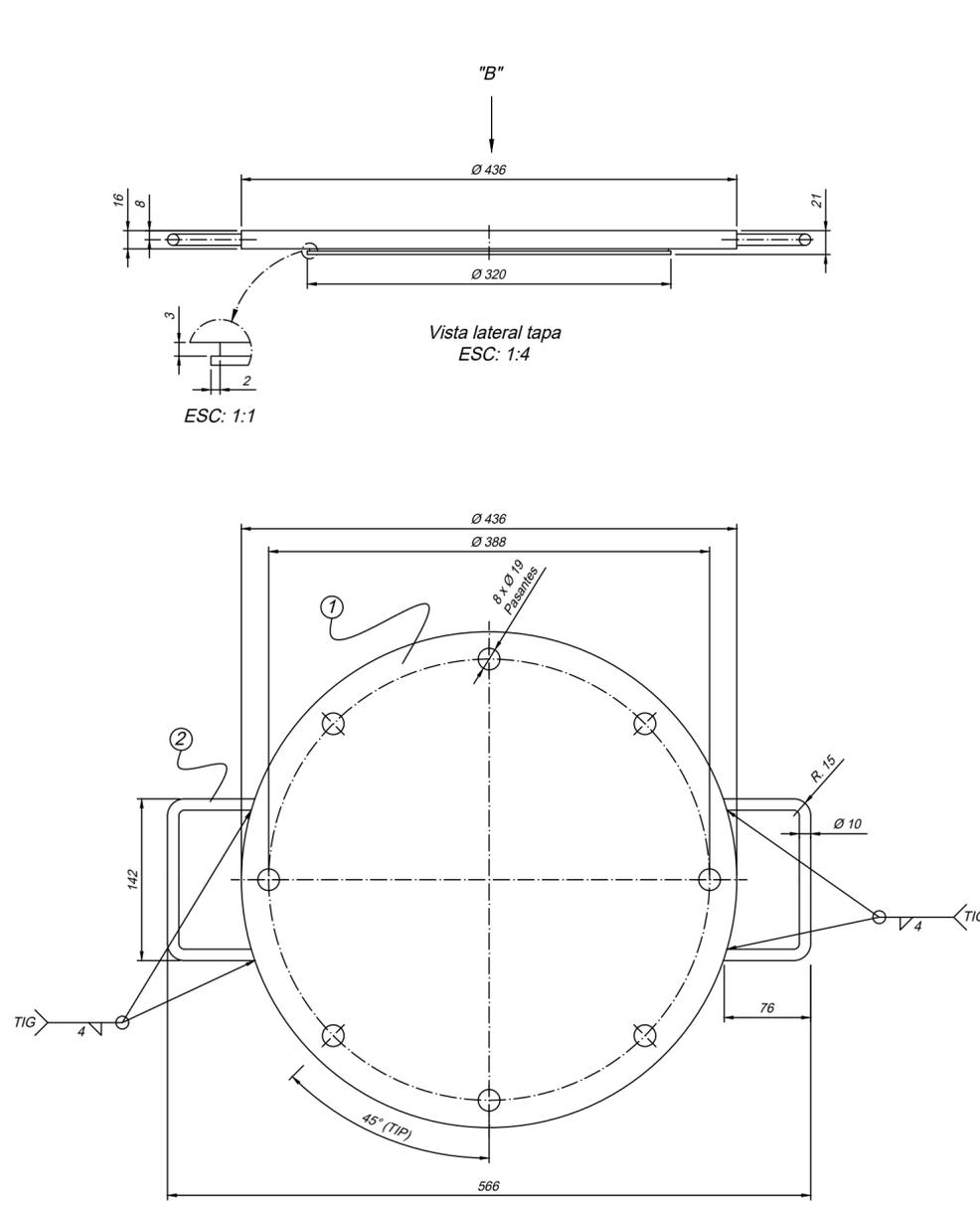


Figura 10-25: Conductividad hidráulica relativa no saturada para relave 11.
Fuente: Elaboración propia.

10.7. Cámara de Presión



Isométrico vasija con tapa
ESC: 1:4

NOTAS:
1.-Dimensiones en [mm]
2.-Cotas prevalecen sobre dibujo
3.-Conectores se instalan a requerimiento de montaje

ITEM	CANT.	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	PESO	OBSERVACIÓN
6	4	O'RING 3X330	GOMA		COMERCIAL
5	1	CUERPO	AISI-304	12 kg	PLANCHA CILINDRADA
4	8	ESPARRAGO	AISI-304	4 kg	
3	1	DISCO INFERIOR	AISI-304	19 kg	
2	2	ASA TAPA	AISI-304	5 kg	
1	1	TAPA	AISI-304	23 kg	

REVISIONES				Proyecto	
N°	Fecha	Rev.	Observación	Autoclave Obras Civiles	
B	03/08/2017	GBB	Aprobación cliente	Proy.	HCT 01/08/2017
A	02/08/2017	GBB	Revisión interna	Revisó	GBB 02/08/2017
				Aprobó	GBB 02/08/2017

Plano CAD			O.T.	Lamina	Revisión
843-PLA-FAB-01			843	1 de 1	B
			Cajón A2		